

# **Technische Universität München**

Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

Holzforschung München

Lehrstuhl für Holzwissenschaft

## **Der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz**

—

### **Das Modell WoodCarbonMonitor**

Sebastian Rüter

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

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Ass. Prof. Dr. J. P. Benz

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. K. Richter
2. apl. Prof. Dr. M. Weber
3. Univ.-Prof. Dr. A. Fischlin  
(Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz)

Die Dissertation wurde am 31.03.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 25.11.2016 angenommen.



# KURZFASSUNG

Die stoffliche Nutzung von Holz verlängert die Speicherung von biogenem Kohlenstoff, den Bäume während ihres Wachstums der Atmosphäre entnommen haben. Der nachwachsende Rohstoff ist damit Teil des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs und spielt eine zentrale Rolle bei der durch menschliches Handeln verursachten Einbringung des Treibhausgases Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre. In der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls (2008 bis 2012) wurde der biogene Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten bei der Ermittlung der nationalen Treibhausgasbudgets nicht berücksichtigt. Zugleich liegen nur sehr wenige und oftmals widersprüchliche Schätzungen über die Größe dieses Kohlenstoffspeichers für Deutschland vor.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Abschätzung des Beitrags der stofflichen Holznutzung zum Klimaschutz durch die Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten für Deutschland, sowie die Einordnung der Ergebnisse in den klimapolitischen Kontext.

Da das Thema ein zentraler Bestandteil des klimapolitischen Diskurses ist, wird das Zusammenspiel von Wissenschaft und Politik transparent erörtert und zwischen rein naturwissenschaftlich-technischen Aspekten einerseits und den politischen Rahmenbedingungen andererseits unterschieden. So werden bestehende und im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Berechnungsmethoden auf ihre Eignung zur kontinuierlichen Quantifizierung des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten hin analysiert. Zugleich wird die Entwicklung eines neuen Ansatzes zur Berücksichtigung von Holzprodukten im Kontext der internationalen Klimapolitik beschrieben, der unter dem wesentlichen Einfluss dieser Arbeit entstanden ist.

Als zentrales Ergebnis wird das Computermodell *WoodCarbonMonitor* vorgestellt, welches die diskutierten Methoden und Ansätze zur Berücksichtigung des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten rechnerisch umsetzt. Folgt man den politischen und methodischen Vorgaben des internationalen Klimaschutzregimes, belaufen sich die aus dem Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten stammenden Netto-Emissionen in Deutschland auf durchschnittlich etwas über -3,5 Mt CO<sub>2</sub> a<sup>-1</sup> im Zeitraum 2009 bis 2013. Die Arbeit legt somit die Grundlage für die Treibhausgasberichterstattung des Klimaschutzbeitrages von Holzprodukten unter der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls und der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC). Darüber hinaus ermöglicht der *WoodCarbonMonitor* die Bereitstellung der für Politik und Gesellschaft notwendigen Entscheidungsgrundlage für zukünftige Handlungsoptionen zur Reduzierung der klimaschädlichen Treibhausgasemissionen, welche mit der Nutzung des nachwachsenden Rohstoffs Holz verbunden sind.

## ABSTRACT

The use of wood as a material prolongs the storage of biogenic carbon that has been absorbed from the atmosphere by trees during their growth. The renewable raw material is thus part of the natural carbon cycle and plays a central role in human-induced emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) into the atmosphere. The biogenic carbon pool in harvested wood products (HWP) was not considered in the quantification of national greenhouse gas budgets in the first commitment period of the Kyoto Protocol (2008 to 2012). At the same time, only very few and often contradicting estimates of the size of this carbon pool exist in Germany.

The aim of this thesis is therefore to estimate the contribution of the material wood use to climate protection through the carbon storage in HWP for Germany and to consider the results in the context of climate policy.

The topic is a key component of the climate-political discourse, which is why the interaction between science and policy is discussed in all transparency. The thesis distinguishes between those aspects that are purely scientific and technical in nature, and those that are part of the political framework. Therefore, both the existing estimation methods and those developed for the purpose of this thesis are evaluated in terms of their suitability for calculating the carbon stock in HWP on an ongoing basis. At the same time, the study describes a new approach for the consideration of HWP in the context of international climate policies which was developed under significant influence of this work.

The *WoodCarbonMonitor*, which is a computer-based model, is presented as a core result that implements the discussed methods and approaches for the consideration of the carbon pool in HWP. Following the political and methodological guidelines of the international climate protection regime, the net emissions from the carbon pool in HWP in Germany amount to -3.5 Mt CO<sub>2</sub> a<sup>-1</sup> on average for the period 2009 to 2013. The thesis thus lays the basis for the greenhouse gas reporting of the contribution of HWP to climate protection under the second commitment period of the Kyoto Protocol, as well as the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). The *WoodCarbonMonitor* furthermore allows for the provision of a basis necessary for politics and society to make decisions on options for future policies to reduce climate-damaging emissions that are related to the utilization of the renewable resource, wood.

# INHALT

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>13</b>
1.1	WISSENSCHAFTLICHER UND POLITISCHER KONTEXT .....	13
1.1.1	Die Relevanz von Wald und Holz im globalen Kohlenstoffzyklus .....	14
1.1.2	Der Weltklimarat, die Klimarahmenkonvention und das Kyoto-Protokoll .....	18
1.1.3	Der Landnutzungssektor im Kyoto-Protokoll .....	24
1.1.4	Unterschiede zwischen Abschätzung und Anrechnung – wichtige Begrifflichkeiten und Festlegungen.....	26
1.2	ZIELSETZUNG UND AUFBAU DER ARBEIT.....	29
<b>2</b>	<b>METHODEN ZUR BERECHNUNG DES KOHLENSTOFFSPEICHERS.....</b>	<b>35</b>
2.1	INVENTARISIERUNG DES BESTANDS AN HOLZPRODUKTEN.....	35
2.2	ERMITTLUNG DER KOHLENSTOFFSPEICHERHÖHE MIT HILFE VON FLUSSDATEN.....	36
2.2.1	Bestimmung des Kohlenstoffzuflusses in den Speicher über den Holzeinschlag .....	37
2.2.2	Bestimmung des Kohlenstoffzuflusses in den Speicher über die Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren .....	47
2.2.3	Methoden zur Berechnung der zeitlichen Dynamik des Kohlenstoffabflusses aus dem Speicher.....	49
2.2.3.1	<i>Kohortenrechnung</i> .....	51
2.2.3.2	<i>Lineare Zerfallsfunktion</i> .....	52
2.2.3.3	<i>Retentionskurven</i> .....	53
2.2.3.4	<i>Logistische Zerfallsfunktion</i> .....	57
2.2.3.5	<i>Exponentielle Zerfallsfunktion</i> .....	59
2.2.4	Direkte Schätzung der Emissionen.....	65
<b>3</b>	<b>ANSÄTZE ZUR ERFASSUNG DES BEITRAGS VON HOLZPRODUKTEN .....</b>	<b>67</b>
3.1	DIE ANRECHNUNG DES LULUCF-SEKTORS IM KYOTO-PROTOKOLL.....	68
3.1.1	Bisherige Konzepte zur Anrechnung von LULUCF .....	68
3.1.1.1	<i>Brutto/netto-Ansatz</i> .....	69
3.1.1.2	<i>Netto/netto-Ansatz</i> .....	71
3.1.2	Verhandlungen zu LULUCF für post-2012.....	72
3.1.3	Wald in der 2. Verpflichtungsperiode - der Referenzwert-Ansatz .....	74
3.2	BERECHNUNGSANSÄTZE FÜR HOLZPRODUKTE .....	76
3.2.1	Bisherige Ansätze zur Ermittlung des Beitrags von Holzprodukten .....	76
3.2.1.1	<i>Annahme einer sofortigen Emission (Default Ansatz)</i> .....	79
3.2.1.2	<i>Stock-change Ansatz</i> .....	80
3.2.1.3	<i>Produktionsansatz</i> .....	82
3.2.1.4	<i>Atmospheric-flow Ansatz</i> .....	84

3.2.1.5	<i>Stock-change of domestic origin Ansatz</i> .....	86
3.2.2	Entwicklung eines neuen Ansatzes zur Anrechnung von Holzprodukten .....	87
3.2.2.1	<i>Diskussion der bestehenden Berechnungs- bzw. Anrechnungsansätze</i> .....	88
3.2.2.2	<i>Bedingungen für die Anrechnung von Holzprodukten</i> .....	90
3.2.2.3	<i>Verknüpfung der Anrechnung von Holzprodukten mit der Aktivität im Wald</i> .....	92
3.2.2.4	<i>Verhandlungen von Bali (COP13) bis Kopenhagen (COP15)</i> .....	93
3.2.2.5	<i>Verhandlungen bis Cancún (COP16) – Referenzwerte für Holzprodukte</i> .....	98
3.2.2.6	<i>Beschluss von Durban (COP17) zur Anrechnung und Berichterstattung von Holzprodukten</i> .....	100
<b>4</b>	<b>DIE IPCC LEITLINIEN MIT BEZUG ZU HOLZPRODUKTEN .....</b>	<b>105</b>
4.1	REVISED 1996 IPCC GUIDELINES .....	106
4.2	2003 GOOD PRACTICE GUIDANCE FOR LULUCF.....	107
4.3	2006 IPCC GUIDELINES .....	110
4.4	2013 KP SUPPLEMENT .....	115
<b>5</b>	<b>ENTWICKLUNG DES MODELLS WOODCARBONMONITOR .....</b>	<b>123</b>
5.1	METHODENDISKUSSION UND WAHL EINER GEEIGNETEN VORGEHENSWEISE .....	124
5.1.1	Inventurdatenmethode .....	124
5.1.2	Flussdatenmethode .....	130
5.1.2.1	<i>Kohlenstoffzufluss über den Holzeinschlag</i> .....	131
5.1.2.2	<i>Kohlenstoffzufluss über Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren</i> .....	136
5.1.2.3	<i>Kohlenstoffabfluss über Zerfallsfunktionen und Nutzungsdauern</i> .....	144
5.1.3	Direkte Abschätzung von Emissionen .....	154
5.1.4	Schlussfolgerung .....	157
5.2	BESCHREIBUNG DES MODELLS UND SEINER BERECHNUNGSPARAMETER .....	159
5.2.1	Aktivitätsdaten.....	160
5.2.1.1	<i>Daten zum Holzeinschlag</i> .....	161
5.2.1.2	<i>Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren</i> .....	164
5.2.1.3	<i>Kohlenstoff-Umrechnungsfaktoren</i> .....	167
5.2.1.4	<i>Ermittlung des Anteils an Holzprodukten aus heimischem Einschlag und Zuordnung zu Kyoto-Aktivitäten im Forstsektor</i> .....	168
5.2.2	Emissionsfaktoren und Nutzungsdauern .....	171
5.2.2.1	<i>Verwendung vorhandener Informationen zu Nutzungsdauern</i> .....	172
5.2.2.2	<i>Berechnung länderspezifischer Nutzungsdauern auf Basis von Marktdaten</i> .....	172
5.2.3	Berechnungsmethoden.....	175
5.2.3.1	<i>Berücksichtigung der geerbten Emissionen</i> .....	176
5.2.3.2	<i>Verwendung verschiedener Zerfallsfunktionen</i> .....	177
5.2.4	Szenarien und Projektionen .....	177
5.2.4.1	<i>Erstellung von Projektionen auf Basis vorhandener Daten zu Holzhalbwaren</i> .....	180

5.2.4.2	<i>Erstellung von Szenarien auf Basis der Entwicklung des Holzeinschlags</i> .....	181
5.2.4.3	<i>Berechnung zukünftiger Netto-Emissionen auf Basis von Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren aus anderen Modellen</i> .....	183
5.2.5	Wahl der LULUCF Anrechnungsoptionen.....	184
<b>6</b>	<b>MODELLERGEBNISSE UND DISKUSSION</b> .....	<b>187</b>
6.1	WAHL DES BERECHNUNGSANSATZES FÜR HOLZPRODUKTE .....	188
6.1.1	Kohlenstoffzufluss .....	188
6.1.2	Ermittelte Netto-Emissionen .....	191
6.2	ANALYSE DER BERECHNUNGSPARAMETER .....	193
6.2.1	Ergebnisse zu Aktivitätsdaten .....	193
6.2.1.1	<i>Daten zum Holzeinschlag und zur Rohstoffbereitstellung</i> .....	193
6.2.1.2	<i>Daten zur Produktion von Holzhalbwaren</i> .....	194
6.2.1.3	<i>Verwendete Kohlenstoffumrechnungsfaktoren</i> .....	197
6.2.2	Ergebnisse für unterschiedliche Emissionsfaktoren .....	193
6.2.2.1	<i>Veränderte Halbwertszeiten</i> .....	198
6.2.2.2	<i>Länderspezifische Nutzungsdauern und Halbwertszeiten</i> .....	200
6.2.3	Ergebnisse verschiedener Berechnungsmethoden .....	202
6.2.3.1	<i>Methoden zur Berücksichtigung der geerbten Emissionen</i> .....	202
6.2.3.2	<i>Linearer, logistischer und exponentieller Zerfall</i> .....	204
6.3	PROJEKTIONEN UND SZENARIEN VON NETTO-EMISSIONEN AUS DEM PRODUKTSPEICHER .....	206
6.3.1	Projektionen auf Basis historischer Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren .....	206
6.3.1.1	<i>Verwendung definierter jährlicher Wachstumsraten</i> .....	206
6.3.1.2	<i>Verwendung einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate eines definierten Zeitraums</i> .....	207
6.3.1.3	<i>Verwendung eines Trends eines definierten Zeitraums</i> .....	207
6.3.2	Projektionen unter Verwendung von Zeitreihen zum zukünftigen Holzeinschlag .....	208
6.4	ANALYSE DER ANRECHNUNGSMODALITÄTEN VON HOLZPRODUKTEN IM LANDNUTZUNGSSEKTOR .....	212
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>217</b>
<b>8</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>223</b>
<b>9</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>229</b>
<b>10</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>233</b>
<b>11</b>	<b>DANKSAGUNG</b> .....	<b>257</b>
<b>12</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>259</b>





# ABKÜRZUNGEN

a	Jahr (Abk. für lat. <i>annus</i> )
AFOLU	Landwirtschaft, Wälder und andere Landnutzung (Abk. für <i>Agriculture, Forestry and Other Land Use</i> )
AGBM	Arbeitsgruppe unter dem Berlin Mandat ( <i>Ad Hoc Group on the Berlin Mandate</i> )
AOSIS	Allianz kleiner Inselstaaten (Abk. für <i>Alliance of Small Island States</i> ).
atro	absolut trocken (Holzfeuchte 0 %).
AWG-KP	Ad-hoc Working Group on Further Commitments (Abk. für <i>Ad-hoc Working group on Further Commitments for Annex I Parties under the Kyoto-Protocol</i> )
BaU	<i>Business as Usual</i>
BBSR	Bundesamt für Bauen, Stadtentwicklung und Raumordnung
BDAT	BaumDATen (Akronym für BWI-Unterprogramm)
BFH	Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft
BHD	Brusthöhen-Durchmesser (Durchmesser des Stammes in 1,3 m Höhe)
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (ab 2014)
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (bis 2014)
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bauen und Reaktorsicherheit
BRI	Bruttorauminhalt
BWI	Bundeswaldinventur
C	Kohlenstoff
CH <sub>4</sub>	Methan
CDM	Mechanismus für Umweltverträgliche Entwicklung (Abk. für <i>Clean Development Mechanism</i> )
CMP	Konferenz der Vertragsstaaten (COP) als Treffen der Vertragsstaaten unter dem Kyoto-Protokoll (Abk. für <i>Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol</i> )
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO <sub>2</sub> e	Kohlendioxid-Äquivalent
COP	Konferenz der Vertragsstaaten (Abk. für <i>Conference of Parties</i> )
CRF	Gemeinsames Berichterstattungsformat (Abk. für <i>Common Reporting Format</i> )
DDR	Deutsche Demokratische Republik
EAV	Europäisches Abfallverzeichnis
EFI	Europäisches Forstinstitut (Abk. für <i>European Forest Institute</i> )

Efm	Erntefestmeter
ESL	Spezifische Lebensdauer (Abk. für <i>estimated service life</i> )
EU	Europäische Union
EUROSTAT	Statistisches Amt der Europäischen Union
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
fm	Festmeter
FM	Waldbewirtschaftung (Abk. für <i>forest management</i> )
FMRL	Referenzwert für Waldbewirtschaftung (Abk. für <i>forest management reference level</i> )
FOD	Zerfallsfunktion 1. Ordnung (Abk. für <i>first order decay</i> )
GPG	Leitfaden für die gute Fachliche Praxis (Abk. für <i>Good Practice Guidance</i> )
GPG-LULUCF	Leitfaden für die gute Praxis im Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (Abk. für <i>Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry</i> )
Gt	Gigatonne
HDF	Hochdichte Faserplatte (Abk. für <i>high density fibreboard</i> )
hl	Halbwertszeit (Abk. für <i>half-life</i> )
HS	Harmonisiertes System zur Bezeichnung und Codierung von Waren der Weltzollorganisation (Abk. für <i>Harmonized Commodity Description and Coding System</i> , kurz <i>Harmonized System</i> )
HWP	Holzprodukte (Abk. für <i>harvested wood products</i> )
HWS	Holzwerkstoffe
IIASA	Internationales Institut für angewandte Systemanalyse (Abk. für <i>International Institute for Applied Systems Analysis</i> )
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimawandel (Abk. für <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
ITTO	Internationale Organisation für tropisches Holz (Abk. für <i>International Tropical Timber Organization</i> )
JFSQ	Gemeinsamer Fragebogen für die Forstwirtschaft (Abk. für <i>Joint Forest Sector Questionnaire</i> )
JI	Gemeinschaftsreduktion (Abk. für <i>Joint Implementation</i> )
JRC	Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission (Abk. für <i>Joint Research Centre</i> )
KN	Kombinierte Nomenklatur
KP	Kyoto-Protokoll
LDF	Holzfaserdämmplatte (Abk. für <i>low density fibreboard</i> )
lfm	Laufmeter
LH	Laubholz
LUCF	Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (Abk. für <i>Land-Use Change and Forestry</i> )

LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (Abk. für <i>Land Use, Land-Use Change and Forestry</i> )
MDF	Mitteldichte Faserplatte (Abk. für <i>medium density fibreboard</i> )
Mm <sup>3</sup>	Millionen Kubikmeter
Mt	Millionen Tonnen
m.R.	mit Rinde
NACE	Allgemeine Systematik der Wirtschaftszweige in den Europäischen Gemeinschaften (Abk. für <i>Nomenclature générale des Activités économiques dans les Communautés Européennes</i> )
NH	Nadelholz
NGF	Nettogrundfläche
NIR	Nationaler Inventarbericht (Abk. für <i>national inventory report</i> )
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Abk. für <i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i> )
OSB	OSB Spanplatte (Abk. für <i>oriented strand board</i> )
ppm	Teile einer Million bzw. Millionstel (Abk. für <i>parts per million</i> )
QELRO	Quantifizierte Emissionsbegrenzungs- oder Reduktionsverpflichtung (Abk. für <i>Quantified Emission Limitation and Reduction Obligation</i> )
RSL	Referenzlebensdauer (Abk. für <i>reference service life</i> )
SB	Nebenorgane der Klimarahmenkonvention (Abk. für <i>Subsidiary Bodies</i> )
SBSTA	Nebenorgan der Klimarahmenkonvention für wissenschaftliche und technologische Beratung (Abk. für <i>Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice</i> )
sl	Nutzungsdauer (Abk. für <i>service life</i> )
StBA	Statistisches Bundesamt
THG	Treibhausgas
TSU	Technische Unterstützungseinheit (Abk. für <i>Technical Support Unit</i> )
UN	Vereinte Nationen ( <i>United Nations</i> )
UNECE	Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (Abk. für <i>United Nations Economic Commission for Europe</i> )
UNEP	Umweltprogramm der Vereinten Nationen (Abk. für <i>United Nations Environmental Programme</i> )
UNFCCC	Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (Abk. für <i>United Nations Framework Convention for Climate Change</i> )
Vfm	Vorratsfestmeter
WCO	Weltzollorganisation (Abk. für <i>World Customs Organization</i> )
WEHAM	Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung
WMO	Weltorganisation für Meteorologie (Abk. für <i>World Meteorological Organization</i> )



# 1 EINLEITUNG

Klimawandel – eines der Megathemen der heutigen Zeit: universell und kontrovers diskutiert, ist es nach überwältigender Meinung zahlreicher Experten, Gremien und Organisationen eine der größten Herausforderungen in der Menschheitsgeschichte – ökologisch, ökonomisch und sozial (u. a. UN 1987; Enquete Commission "Protecting Earth's Atmosphere" of the German Bundestag 1992; Stern 2006; Müller *et al.* 2007; WBGU 2007; Welzer 2008; Dyer 2008). Aber was hat das mit dem Rohstoff Holz zu tun?

Holz ist Teil des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs und die Nutzung des Rohstoffs spielt eine zentrale Rolle bei der durch menschliches Handeln verursachten Einbringung des Treibhausgases Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre. Da Forschung rund um das Thema Kohlenstoff mittlerweile immer auch politische Aspekte berührt, soll neben der Beantwortung der gestellten Forschungsfragen rund um das Thema „Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten“ auch das Zusammenspiel und die gegenseitige Wechselwirkung zwischen Wissenschaft und Politik so transparent wie möglich dargestellt werden. Zu diesem Zweck beschreibt Kapitel 1.1 einleitend den wissenschaftlichen und politischen Kontext, in dem sich die vorliegende Arbeit bewegt, und der die Ausgangssituation für den in Kapitel 1.2 formulierten Forschungsgegenstand und die gewählte Struktur dieser Arbeit bildet. Hierzu sei einleitend gesagt, dass die vorliegende Arbeit den festgestellten anthropogenen Klimawandel nicht hinterfragt, sondern die überwältigenden Beweise der Wissenschaft über seine Existenz (vgl. IPCC 2013) zur Kenntnis nimmt.

## 1.1 WISSENSCHAFTLICHER UND POLITISCHER KONTEXT

Zunächst wird ein Überblick über die Entstehung der Forschung zu klimarelevanten Kohlenstoffaspekten der Wälder bzw. der Holznutzung und die Wirkung der Holznutzung auf die Treibhausgasbilanz gegeben (Kapitel 1.1.1). Daran anschließend beschreibt Kapitel 1.1.2 die Entstehung des politischen und institutionellen Rahmens, welcher die Bemühungen der Weltgemeinschaft im Kampf gegen die globale Herausforderung des Klimawandels bündeln soll, um auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse gesellschaftliches Handeln zu ermöglichen. Um zu verstehen, wie die Bewirtschaftung von Wäldern und implizit damit auch die Holznutzung in die internationale Klimaschutzpolitik bislang eingebunden waren, legt Kapitel 1.1.3 die historischen Hintergründe der Einbeziehung des Landnutzungssektors in das Kyoto-Protokoll dar. Zudem ist es unerlässlich, vorab wichtige Begrifflichkeiten und Festlegungen zu erläutern, um die Verständlichkeit der vorliegenden Arbeit zu erhöhen. Dies geschieht in Kapitel 1.1.3.

### 1.1.1 Die Relevanz von Wald und Holz im globalen Kohlenstoffzyklus

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts beschreiben Chamberlin (1899) und Arrhenius (1896) als Erste den Einfluss der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre auf die globale Temperatur. Callendar (1938) bringt diese Beobachtung im Jahr 1938 in Zusammenhang mit einem beobachteten Anstieg dieses Treibhausgases durch die Industrialisierung. Seit Mitte des letzten Jahrhunderts beschäftigte sich die Wissenschaft dann mehr und mehr mit der Zunahme der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration, der Rolle des globalen Kohlenstoffzyklus zwischen Atmosphäre, Ozeanen und Biosphäre sowie den Auswirkungen des Treibhausgases CO<sub>2</sub> auf die beobachtete globale Erwärmung (vgl. Attiwill 1971, S. 250). So legt Hutchinson (1954) erstmalig dar, dass durch Entwaldung der in der Biosphäre gespeicherte Kohlenstoff abgenommen hatte, und 1956 stellen Eriksson und Welander ein einfaches mathematisches Modell des natürlichen Kohlenstoffzyklus vor, welches neben der Atmosphäre und den Ozeanen auch die Speicherung von Kohlenstoff in lebender Biomasse und totem organischen Material enthält. In der Folge untersuchten Wissenschaftler die Rolle der biogenen Kohlenstoffspeicher und die Wirkung der Photosynthese auf die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration (u. a. Lieth 1963; Baumgartner 1969; Attiwill 1971; Keeling 1973), deren gemessene regelmäßige Schwankungen erstmalig von Keeling mit dem Pflanzenwachstum in Verbindung gebracht wurde (Keeling 1960, S. 205; s.u.).

Im gleichen Jahr, in welchem eine erste World Climate Conference stattfand, veröffentlicht 1979 die amerikanische National Academy of Sciences als erste große Wissenschaftsorganisation den sogenannten Charney Report, der einen Zusammenhang zwischen dem Anstieg des Treibhausgases und der beobachteten daraus resultierenden globalen Erwärmung feststellt. Darin heißt es:

“We now have incontrovertible evidence that the atmosphere is indeed changing and that we ourselves contribute to that change”. (Charney *et al.* 1979, S. vii)

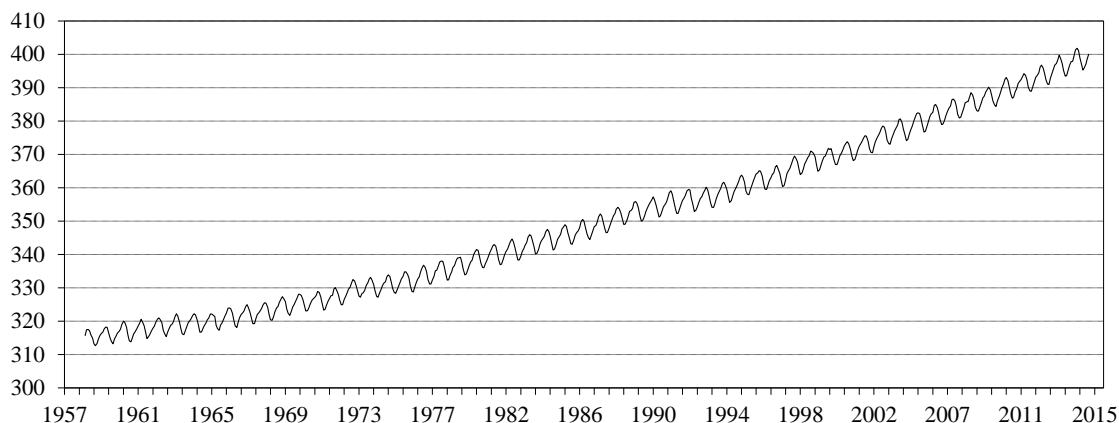
Zielte die Forschung zunächst auf ein besseres Verständnis über den Einfluss der lebenden Biomasse im globalen Kohlenstoffkreislauf, rückte alsbald die Frage nach Möglichkeiten, die durch die Entwaldung der Wälder verursachte Freisetzung von Treibhausgasen zu reduzieren bzw. zu vermeiden, in den Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen. Zugleich reifte das Bewusstsein, dass neben den Wäldern auch ihre Produkte aus Holz Kohlenstoff enthalten und die Auswirkungen der Holznutzung in der Klimadiskussion nicht vernachlässigt werden kann (u. a. Bolin 1977, S. 196; Cooper 1983, S. 164). Insbesondere nachdem der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimawandel (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, Abk. IPCC), der 1988 gegründet wurde (s. Kap. 1.1.2), in seinem ersten Sachstandsbericht der Arbeitsgruppe I die globale Entwaldung und die damit verbundene Freisetzung biogenen Kohlenstoffs thematisiert hatte (IPCC 1990), beschäftigten sich mehr und mehr Wissenschaftler mit der Rolle des Forst- und Holzsektors im globalen Kohlenstoffzyklus und entwickelten Methoden und immer detailliertere Berechnungsmodelle zur Quantifizierung der Emissionsbudgets des Sektors. Aus-

gewählte Beispiele werden im Kapitel 2.2.1 im Zusammenhang mit der Diskussion verschiedener Methoden zur Berechnung der Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten vorgestellt.

In seinem fünften Sachstandsbericht gibt der IPCC an, dass zwischen den Jahren 1750 und 2011 in etwa 180 Gt C durch Landnutzungsänderungen – vornehmlich von Wald in andere Landnutzungsformen (d. h. Entwaldung) – in die Atmosphäre gelangt sind, was in ungefähr 30 % der in diesem Zeitraum insgesamt durch menschlichen Einfluss in die Atmosphäre gelangten Menge an Treibhausgasen ausmacht (IPCC 2013, S. 467). Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wurden nach Einschätzung von Houghton (1998) innerhalb von 140 Jahren durch die Entwaldung von ungefähr 800 Mio. ha und durch die Holznutzung auf weiteren 1200 Mio. ha Wald etwa 100 Gt C durch menschlichen Einfluss freigesetzt. Der Großteil dieser Kohlenstoffverluste wurden dem Autor zufolge durch Entwaldung verursacht (ca. 75 Gt C) (vgl. Houghton 2003). Damit hat sich die in der Vegetation und in den Böden weltweit gespeicherte Menge an Kohlenstoff von etwa 1250 Gt C auf 1150 Gt C reduziert, während die in der Atmosphäre in Form von CO<sub>2</sub> enthaltene Kohlenstoffmenge im gleichen Zeitraum von 600 Gt C auf 760 Gt C zugenommen hat (vgl. Houghton 1998). Waren im Jahr 1990 nach Schätzung der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (*Food and Agricultural Organization of the United Nations*, Abk. FAO) allein in der lebenden Biomasse bestehender Wälder noch etwa 299 Gt C weltweit gespeichert, hat sich dieser Speicher innerhalb von nur 20 Jahren um weitere 10 Gt C verkleinert (FAO 2010). Somit tragen die weltweite Entwaldung, aber auch die Degradierung von Wäldern nach wie vor maßgeblich – wenn auch mit sinkendem Anteil – zum Anstieg des wichtigsten Treibhausgases in der Atmosphäre bei (IPCC 2013, S. 486; vgl. Abbildung 1-1).

Während Holzeinschlag und Entwaldung die Biomasse- bzw. Holzvorräte und damit den Waldkohlenstoffspeicher verringern, nehmen lebende Pflanzen im Zuge der Bruttoprimärproduktion durch die Photosynthese atmosphärisches Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) auf, wovon während des Wachstums ein Teil in Form von Kohlenstoff zum Aufbau von Zellmaterial verwendet wird. In diesem Zusammenhang spricht man auch von der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung der Wälder. Die Nettoprimärproduktion sorgt dafür, dass der Kohlenstoffspeicher im Wald zunimmt, während der nicht fixierte Teil des aufgenommenen Kohlenstoffs während der Atmung der Pflanzen (autotrophe Respiration) wieder an die Atmosphäre verloren geht. Dies zeigt sich besonders gut in der von Keeling seit dem Jahr 1958 gemessenen Zeitreihe zur CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre (Abbildung 1-1), deren jährliche Schwankungen auf das Vegetationswachstum auf der Nordhalbkugel zurückzuführen ist (Keeling *et al.* 1976; Keeling *et al.* 1996).

Zugleich repräsentiert die Kurve das Ergebnis einer der wenigen präzisen und fortlaufenden Messungen des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalts, welche den kontinuierlichen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration von etwa 315 ppm im Jahr 1958 auf mittlerweile über 400 ppm belegt. Ein Wert, der mindestens in den vergangenen 650.000 Jahre nie 300 ppm überschritten hat, mit Beginn der Industrialisierung um das Jahr 1750 noch etwa 280 ppm betrug, im Jahr des Erscheinens des ersten IPCC Sachstandsberichts bei 353 ppm lag und seitdem immer weiter ansteigt (IPCC 1990; IPCC 2007; Etheridge *et al.* 1996, S. 4121; IPCC 2013, S. 476).



**ABBILDUNG 1-1:** Veränderung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration gemessen am Mauna Loa, Hawaii (Keeling-Kurve, Stand Januar 2015), [in ppm] (Tans und Keeling 2015)

Betrachtet man lediglich die Wälder der nördlichen Hemisphäre (30°-60°N), welche zu großen Teilen aus sommergrünen Laub- und Mischwäldern und borealen Nadelwäldern der gemäßigten Breiten bestehen, so legen zahlreiche Studien nahe, dass ihre Biomassevorräte in der Summe sogar zunehmen, sich der Kohlenstoffspeicher also insgesamt vergrößert und Wälder somit eine Netto-Senke darstellen (Kauppi *et al.* 1992; Valentini *et al.* 2000; Ciais *et al.* 2008; Houghton und Hackler 2010; Pan *et al.* 2011). Dies kann durch einen Vorratszuwachs auf der bestehenden Waldfläche, aber auch durch eine Zunahme der Waldfläche, z. B. durch Aufforstungen bedingt sein.

In nicht bewirtschafteten Naturwäldern stehen die Bindung und die Freisetzung von Kohlenstoff langfristig nahezu im Gleichgewicht. Während der Großteil des Kohlenstoffs der Biomasse in unbewirtschafteten Wäldern über die Streu wieder abgebaut wird und in die Atmosphäre oxidiert, wird ein Teil des im Holz der Bäume gebundenen Kohlenstoffs in den aus dem Rohstoff gefertigten Produkten über die Dauer ihrer stofflichen Verwendungsdauer weiter gebunden. Anders als die lebende Pflanzenbiomasse, die mit Hilfe der Photosynthese tatsächlich Kohlenstoff aus der Atmosphäre assimiliert und zum Aufbau der körpereigenen Stoffe und Zellen verwenden kann, entnehmen Holzprodukte der Atmosphäre kein CO<sub>2</sub>, sondern speichern lediglich einen Teil des Kohlenstoffs, welchen die Bäume während ihres Wachstums sequestriert und im Holz festgelegt haben. Holzprodukte stellen somit keine eigentliche CO<sub>2</sub>-Senke, sondern ebenfalls einen Kohlenstoffspeicher dar. Nach Ablauf der stofflichen Verwendungsdauer der Produkte wird dieser Kohlenstoff durch natürliche Zersetzungsprozesse oder eine thermische Verwertung des Holzes wieder in die Atmosphäre oxidiert. Für die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Produktes bedeutet dies ein Nullsummenspiel über seinen gesamten Lebenszyklus (vgl. Rüter 2013, S. 93).

Ebenso wie bei den Kohlenstoffspeichern im Wald vergrößert sich der Produktspeicher, sobald mehr Kohlenstoff auf den Speicher übertragen wird, als aus ihm wieder entweicht. Dies kann entweder durch eine steigende stoffliche Verwendung von Holz oder durch eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Produkte geschehen. Aufgrund der weltweiten Zunahme der Produktion



und des Verbrauchs von Holzprodukten schätzen Brown *et al.* (1998, S. 7), dass der Produktspeicher um etwa  $139 \text{ Mt C a}^{-1}$  zunimmt und die jährlich in den Produktspeicher eingehende Kohlenstoffmenge ungefähr 2 % der globalen  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus fossilen Energieträgern entspricht. Somit wird also in der Summe immer mehr Kohlenstoff im Produktspeicher zurückgehalten, welcher ansonsten entweder im Wald verblieben oder z. B. bei der energetischen Nutzung von Holz als sofortige  $\text{CO}_2$ -Emission in die Atmosphäre entwichen wäre.

Die Nutzung von Holz wirkt sich auf das Klima aber nicht nur über den An- und Abbau des Rohstoffes im Wald und die Verlängerung der Kohlenstoffspeicherwirkung durch seine stoffliche Verwendung in Form von Produkten und damit unmittelbar auf den biogenen Kohlenstoffkreislauf aus; auch können Holzprodukte die Erzeugnisse aus anderen Rohstoffen, deren Herstellung bzw. Nutzung ebenfalls mit Treibhausgasemissionen verbunden sind, ersetzen bzw. substituieren. Im Zusammenhang mit der Nutzung von Holzprodukten lassen sich zwei Arten der Substitution unterscheiden:

- stoffliche oder indirekte Substitution, bei der Nicht-Holzprodukte ersetzt werden, und
- energetische oder direkte Substitution, bei der fossile Brennstoffe ersetzt werden.

Darüber hinaus gibt es bei der stofflichen Substitution die Faktor-Substitution und die Produkt-Substitution, was bedeutet, dass Holz entweder andere Materialien in einem Herstellungsprozess oder die Endprodukte selbst ersetzen kann (Gustavsson *et al.* 2006). Um die Umweltbelastung von Produkten zu ermitteln, bedient man sich der Methodik der Ökobilanzierung nach ISO 14040 und 14044 (ISO 2006a; ISO 2006b). Sie umfasst die Wirkungskategorie Treibhauspotential, die alle mit dem Produktsystem verbundenen Treibhausgasemissionen ausweist, die z. B. mit der Erzeugung der bei der Herstellung der Produkte benötigten elektrischen oder thermischen Energie verbunden sind. Auch können verschiedene Produktsysteme mit Hilfe von Ökobilanzen miteinander verglichen werden; so zeigen zahlreiche Ökobilanzuntersuchungen, dass Produktsysteme aus Holz im Vergleich mit ihren Alternativprodukten aus anderen Materialien im Laufe ihres Lebenszyklus in vielen Fällen weniger Treibhausgasemissionen emittieren (vgl. Scharai-Rad und Welling 2002; Bowyer *et al.* 2005; Petersen und Solberg 2005; Winistorfer *et al.* 2005; Gustavsson und Karlsson 2006). Sathre und O'Connor (2010: 106 ff.) ermitteln in ihrer Auswertung von 21 Studien durchschnittliche Substitutionsfaktoren, die sie in der Einheit  $\text{t C eingesparter Emission pro eingesetzter t C in Holz}$  ausweisen. Danach quantifizieren sie eine stoffliche Substitutionswirkung in Höhe von durchschnittlich  $2,1 \text{ t C/t C}$ . Dies entspricht einer Vermeidung von Treibhausgasen in Höhe von  $1,9 \text{ t CO}_2\text{e pro m}^3 \text{ Holz}$ , wenn man von einer Dichte von  $0,5 \text{ t/m}^3$  ausgeht (Sathre und O'Connor 2010, S. 114).

## 1.1.2 Der Weltklimarat, die Klimarahmenkonvention und das Kyoto-Protokoll

Aufgrund der immer zahlreicheren Belege für die Existenz des anthropogenen Klimawandels und der wachsenden Erkenntnis, dass die damit einhergehenden Herausforderungen aufgrund der globalen gegenseitigen Abhängigkeit der Menschheit besser koordiniert werden müssen, wurde im Jahr 1988 der IPCC gegründet, der im Deutschen auch Weltklimarat genannt wird. Einen detaillierten Überblick über die Entstehungsgeschichte des IPCC und eine Beschreibung des komplizierten Zusammenspiels von Wissenschaft und Politik bietet Bolin (2007). Die von der Weltorganisation für Meteorologie (*World Meteorological Organization*, Abk. WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (*United Nations Environment Program*, Abk. UNEP) ins Leben gerufene zwischenstaatliche Organisation soll die politische Entscheidungsfindung zu diesem komplexen Thema auf Basis einer unabhängigen, wissenschaftlichen und technischen Beratung sicherstellen.

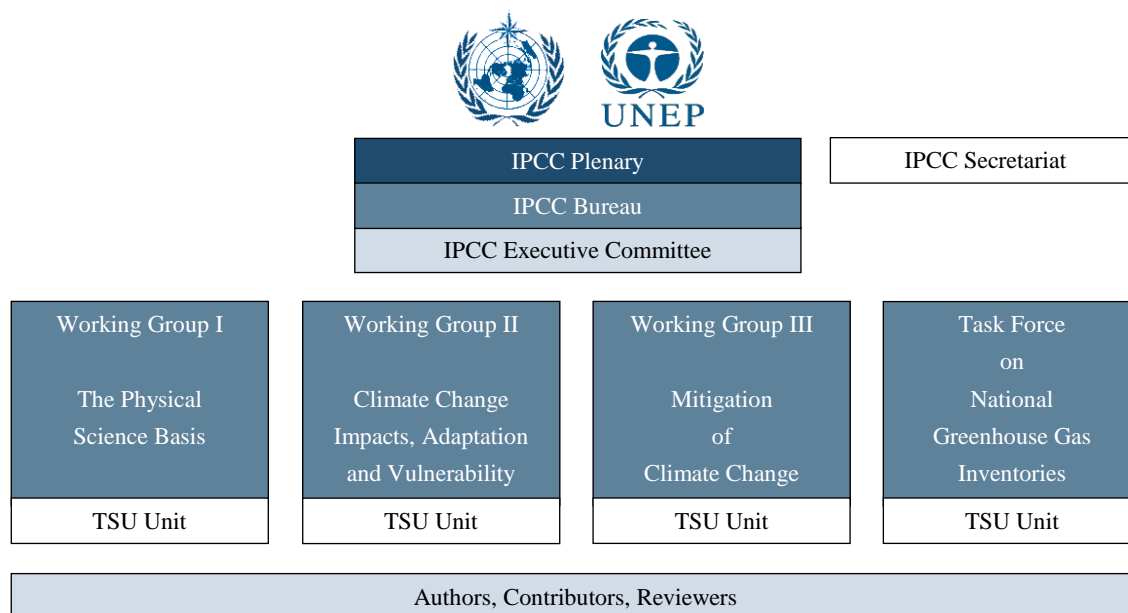
Die Grundlage für die Gründung des IPCC bildet die Resolution 43/53 der Generalversammlung der Vereinten Nationen, welche eine umfassende Überprüfung und Empfehlungen in Bezug auf folgende Aspekte fordert (IPCC 2010; IPCC 2015b):

- Kenntnisstand der Wissenschaft zu Klima und Klimawandel;
- Programme und Studien über die sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels, einschließlich der globalen Erwärmung;
- mögliche Reaktionsstrategien, um die Auswirkungen des nachteiligen Klimawandels zu verzögern, zu begrenzen oder zu verringern;
- Identifikation und mögliche Stärkung der bestehenden einschlägigen internationalen Rechtsinstrumente mit Auswirkungen auf das Klima,
- Elemente zur Aufnahme in einem möglichen zukünftigen internationalen Übereinkommen zum Klima.

Auf der Webseite der deutschen Koordinierungsstelle des IPCC heißt es:

„Der IPCC ist ein wissenschaftliches Gremium: die von ihm in seinen Berichten bereitgestellten Informationen beruhen auf wissenschaftlich erwiesenen Tatsachen und spiegeln die innerhalb der Wissenschaft vorhandenen Meinungen wider.“ (Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle 2015)

Neben den Vertretern der teilnehmenden Regierungen besteht der IPCC vor allem aus Wissenschaftlern, die die aktuelle wissenschaftliche, technische und sozioökonomische Literatur zusammentragen, die weltweit zu den jeweiligen Themen publiziert wird. Die Festlegung der Inhalte der IPCC Veröffentlichungen geschieht im Rahmen hierfür eigens anberaumter Sitzungen (*scoping meetings*). Der IPCC selbst betreibt somit keine Forschung.



**ABBILDUNG 1-2:** Organisationsstruktur des IPCC (IPCC 2015b)

Der IPCC besteht zurzeit aus drei Arbeitsgruppen und einer Task Force (Abbildung 1-2), wobei diese „klar umrissene, vom Ausschuss verabschiedete Mandate [haben], und ihre Aktivitäten [...] von je zwei Ko-Vorsitzenden geleitet [werden]. Sie werden je von einem Sekretariat (*Technical Support Unit*, Abk. TSU) und dem Arbeitsgruppen- bzw. Task Force-Vorstand unterstützt.“ (Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle 2015). Während die Vertreter der Regierungen der beteiligten Länder in den Sitzungen des Plenums die relevanten Entscheidungen treffen, befassen sich die Wissenschaftler der Arbeitsgruppe I mit den „Wissenschaftlichen Grundlagen von Klimaänderung“, die Arbeitsgruppe II konzentriert sich auf „Auswirkungen, Anpassung und Verwundbarkeiten“ und Arbeitsgruppe III trägt die aktuellen Informationen zur „Verminderung des Klimawandels“ zusammen, deren neueste Ergebnisse regelmäßig in den ebenfalls dreiteiligen Sachstandsberichten veröffentlicht werden. Das Hauptziel der Task Force besteht hingegen in der Entwicklung und Verfeinerung von Methoden zur Berechnung und Berichterstattung der nationalen Treibhausgasemissionen und ihrem Abbau durch Senken (vgl. Kap. 1.1.1).

Zur Erstellung der Sachstandsberichte, der zahlreichen IPCC Sonder- und Methodikberichte, sowie der technischen Abhandlungen tragen Fachleute aus aller Welt als Autoren, Beitragende und Gutachter bei, wobei die Zusammensetzung der Autorentams die gesamte Bandbreite an Ansichten, Expertise und geographischer Repräsentation widerspiegeln soll (Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle 2015). Der festgelegte zweistufige Begutachtungsprozess durch externe Fachleute und Regierungsvertreter, bei welchem drei grundlegende Prinzipien einzuhalten sind, stellt dabei einen essentiellen Bestandteil zur Qualitätssicherung der Veröffentlichungen dar (IPCC 1999):

- Die bestmögliche wissenschaftliche und technische Beratung sollte einbezogen werden, so dass die IPCC-Berichte auf den neuesten wissenschaftlichen, technischen und sozioökonomischen Erkenntnissen basieren und so umfassend wie möglich sind;
- Eine weite Verbreitung des Reviews sollte versuchen, so viele unabhängige Experten wie möglich (d. h. von Experten, die nicht an der Vorbereitung des jeweiligen Texte beteiligt waren) aus Industrie- und Entwicklungsländern einzubeziehen;
- Das Begutachtungsverfahren sollte objektiv, offen und transparent sein.

Somit kann der IPCC als zwischenstaatliche Organisation den „Entscheidungsträgern wissenschaftlich-technische und sozioökonomische Informationen auf politisch relevante, aber politikneutrale Art und Weise zur Verfügung stellen.“ (Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle 2015). Zur Abgrenzung von Wissenschaft und Politik heißt es auf den Webseiten des IPCC:

"IPCC reports should be neutral with respect to policy, although they may need to deal objectively with scientific, technical and socio-economic factors relevant to the application of particular policies." (IPCC 2015b)

„Durch die Anerkennung von IPCC-Berichten und die Verabschiedung ihrer Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger erkennen Regierungen die Rechtmäßigkeit der wissenschaftlichen Inhalte an.“ (Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle 2015)

Mit dem wachsenden Wissen über die globalen Zusammenhänge rund um den anthropogenen Klimawandel (vgl. Kap. 1.1.1) tauchte das Thema immer öfter auch auf der politischen Agenda auf. Ein Jahr nach der Gründung des IPCC trafen sich erstmals zahlreiche Regierungschefs und forderten mit der Hague Declaration (UN 1989) einen neuen Ansatz in der Klimapolitik. Dieser Forderung wurde durch die Veröffentlichung des ersten Sachstandsberichtes des IPCC im darauffolgenden Jahr noch weiter Nachdruck verliehen, so dass die UN-Generalversammlung das Mandat für einen internationalen Verhandlungsprozess zur Ausarbeitung einer internationalen Rahmenkonvention zum Klimawandel erteilte. Auf dem Earth Summit in Rio de Janeiro im Jahr 1992 wurde das Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, Abk. UNFCCC), in der Folge auch Klimarahmenkonvention genannt, als eine der drei Rio-Konventionen verabschiedet.

Die Klimarahmenkonvention trat am 21 März 1994 in Kraft und wurde von mittlerweile 195 Staaten unterschrieben, die sich damit als Vertragsstaaten den Zielen der Konvention verpflichtet haben. „Entschlossen, das Klimasystem für heutige und künftige Generationen zu schützen“ bekennen sich alle Vertragsstaaten u. a. zu dem in Artikel 2 festgeschriebenen Hauptziel der Konvention:

„Das Endziel dieses Übereinkommens und aller damit zusammenhängenden Rechtsinstrumente, welche die Konferenz der Vertragsparteien beschließt, ist es, in Übereinstimmung mit den einschlägigen Bestimmungen des Übereinkommens die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre

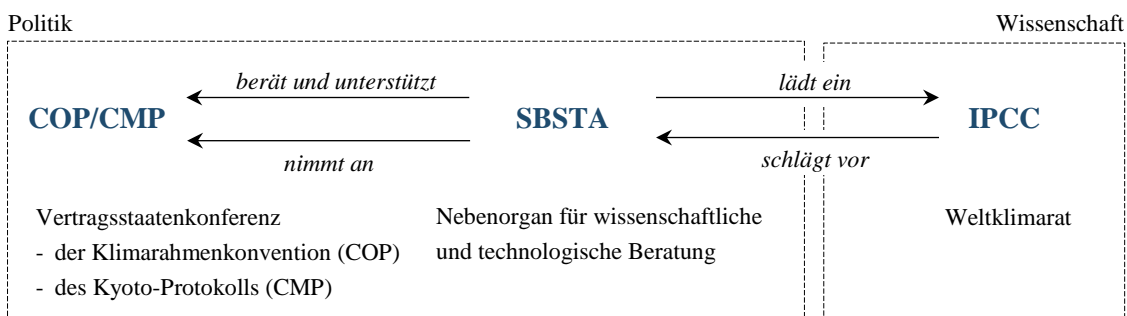
auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann.“ (UNFCCC 1992, S. 5)

Um dies zu erreichen, legt die Konvention Grundsätze (Artikel 3) fest, wonach die Vertragsparteien bei den Maßnahmen zur Verwirklichung des Zieles u. a. „auf der Grundlage der Gerechtigkeit und entsprechend ihren gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortlichkeiten und ihren jeweiligen Fähigkeiten“ vorgehen sollen. Dies spiegelt sich in der Einteilung der Staatengemeinschaft in Industrieländer und Entwicklungsländer wider: Erstere sind in Annex I der Konvention aufgeführt, weshalb man auch von den Annex I-Ländern spricht. Entsprechend werden die Entwicklungsländer als Nicht-Annex I-Staaten bezeichnet. Mit Artikel 4 haben sich die im Annex I gelisteten Länder verpflichtet, die anthropogenen Emissionen von CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> auf das Niveau von 1990 zurückzuführen (UNFCCC 1992).

Zudem müssen alle Staaten u. a. „nationale Verzeichnisse erstellen, in regelmäßigen Abständen aktualisieren, veröffentlichen und der Konferenz der Vertragsparteien zur Verfügung stellen, in denen die anthropogenen Emissionen aller nicht durch das Montrealer Protokoll geregelten Treibhausgase aus Quellen und der Abbau solcher Gase durch Senken aufgeführt sind, wobei von der Konferenz der Vertragsparteien zu vereinbarenden, vergleichbaren Methoden anzuwenden sind.“ Die Erstellung dieser Verzeichnisse wird in Artikel 12 geregelt, der die rechtliche Grundlage für die jährliche nationale Treibhausgasberichterstattung in den Annex I-Staaten bildet. Mit den *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC 1997c) wurden erstmals Leitlinien für die Erstellung dieser Verzeichnisse veröffentlicht (vgl. Kap. 4.1). Sie enthalten bereits eine detaillierte Auflistung aller wichtigen Sektoren, die in sogenannte Quellgruppen gegliedert sind und deren Treibhausgasbilanzen in den jährlich erscheinenden Nationalen Inventarberichten (*national inventory reports*, Abk. NIR) erscheinen. Dies umfasst die Quellgruppen „Energie“ und „Industrieprozesse“, in welchen u. a. die mit der Herstellung von Holzprodukten verbundenen Prozessemissionen (vgl. Kap. 1.1.1) enthalten sind. Weitere Quellgruppen sind „Lösemittel- und andere Produktverwendung“, „Landwirtschaft“, sowie „Abfall und Abwasser“ (vgl. Umweltbundesamt 2014). Die mit der Landnutzung verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die den natürlichen Kohlenstoffzyklus beeinflussen, werden in der Quellgruppe Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (*Land-Use, Land-Use Change and Forestry*, Abk. LULUCF) verbucht.

Mit Artikel 7 etabliert die Konvention außerdem die Konferenz der Vertragsparteien (*Conference of Parties*, Abk. COP), die als oberstes Gremium die Durchführung des Übereinkommens in regelmäßigen Abständen überprüft. Um der jährlich stattfindenden Konferenz der Vertragsparteien Informationen und Gutachten zu wissenschaftlichen und technologischen Fragen mit Bezug zu der Konvention zur Verfügung zu stellen, wurde auch ein Nebenorgan für wissenschaftliche und technologische Beratung (*Subsidiary Body for Scientific and Technological Ad-*

*vice*, Abk. SBSTA) eingesetzt, welches fachübergreifend unter Heranziehung bestehender zuständiger internationaler Gremien wie dem IPCC, Beurteilungen zum Stand der wissenschaftlichen Kenntnisse auf dem Gebiet der Klimaänderungen und ihrer Folgen vornimmt und wissenschaftliche, technologische und methodologische Fragen beantwortet (Artikel 12, UNFCCC 1992). SBSTA dient somit auch als Vermittler und Bindeglied zwischen der Wissenschaft, dem IPCC und der Vertragsstaatenkonferenz und ihren Nebenorganen (*Subsidiary Bodies*, Abk. SB) (Abbildung 1-3).



**ABBILDUNG 1-3:** Ablauf des Austauschs von Informationen zwischen Politik und Wissenschaft und der Bereitstellung von wissenschaftlichen Gutachten für politisches Handeln

Nach der Verabschiedung der Klimarahmenkonvention wurde von der ersten Vertragsstaatenkonferenz (COP 1) im Frühjahr 1995 in Berlin ein Verhandlungsgremium etabliert, welches im Rahmen des sogenannten Berlin Mandats über die Verabschiedung eines verbindlichen Abkommens über die Reduzierung der Treibhausgasemissionen verhandeln sollte. Zwei Jahre später konnte auf der COP 3 in Kyoto das Kyoto-Protokoll beschlossen werden, welches die Ziele der Klimarahmenkonvention operationalisiert (UNFCCC 1997a). Damit gingen die im Anhang B gelisteten Staaten, welche im Wesentlichen den Annex I-Staaten der Konvention entsprechen, die rechtlich verbindliche Verpflichtung ein, ihre Emissionen von Treibhausgasen innerhalb eines fünfjährigen Gültigkeitszeitraums, der sogenannten Verpflichtungsperiode von 2008 bis 2012, auf ein festgelegtes Niveau einer rechtlich verbindlichen Menge an Emissionsrechten (*assigned amount*) zu reduzieren. Diese jedem Land zugeteilte Emissionsmenge und die sich daraus ergebende jährliche Reduktionsverpflichtung basiert auf der Höhe der nach ihrem Treibhausgaspotential gewichteten sechs Treibhausgase CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs und SF<sub>6</sub> in einem Basisjahr, welches für viele Länder das Bezugsjahr 1990 ist. Beläuft sich die im Kyoto-Protokoll quantifizierte Emissionsbegrenzungsverpflichtung beispielsweise auf 92 % der Emissionen im Basisjahr, betragen die insgesamt zu mindernden Emissionen innerhalb der Verpflichtungsperiode das Fünffache von 8 % der Emissionen von 1990 (s. UNFCCC 1997a). Um die Emissionsreduktionen erfolgreich durchzuführen, wurden mit dem Kyoto-Protokoll auch die drei Kyoto-Mechanismen eingeführt, welche es den Vertragsstaaten erlauben, einen Teil ihrer Reduktionsverpflichtungen im Ausland zu erbringen. Dies ist zum einen der Emissionshandel, der den Handel mit Emissionsrechten unter den Industrieländern vorsieht. Zum anderen wurde

die Möglichkeit geschaffen, Emissionsreduktionen auch auf Projektbasis zu erreichen: während der Mechanismus *Joint Implementation* (Gemeinsame Umsetzung, Abk. JI), zwischen Industrieländern zum Tragen kommt, können im *Clean Development Mechanism* (Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung, Abk. CDM) Projekte zur Emissionsreduktion zwischen einem Industrieland und einem Entwicklungsland durchgeführt werden. Mit der Ratifizierung des Protokolls durch Russland trat die erste Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls von 2008 bis 2012 im Februar 2005 in Kraft.

Mit dem Ziel, weitere Anstrengungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen der Vertragsstaaten auch über die erste Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokoll nach dem Jahr 2012 zu erreichen, wurde auf der ersten Konferenz der Vertragsstaaten als Treffen für die Vertragsparteien des Kyoto-Protokolls (*Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol*, Abk. CMP) im Jahr 2005 mit der Entscheidung 1/CMP.1 zugleich eine Verhandlungsgruppe eingerichtet (*Ad-hoc Working group on Further Commitments for Annex I Parties under the Kyoto-Protocol*, Abk. AWG-KP), die, wie im Kyoto-Protokoll bereits festgelegt, in der Folgezeit über dessen Fortführung verhandeln sollte (UNFCCC 2005).

Dies mündete zwei Jahre später in der *Bali Roadmap*, die auf der Klimakonferenz in Bali (COP 13 und CMP 3) beschlossen wurde. Darin einigten sich die Industrie- und Entwicklungsländer darauf, den Klimawandel gemeinsam und deutlich stärker bekämpfen zu wollen. Zudem beinhaltete sie ein Verhandlungsmandat für ein alle Industrie- und Entwicklungsländer umfassendes Klimaschutzabkommen unter der Klimarahmenkonvention, das neben den Bereichen Anpassung, Technologie und Finanzierung vor allem den Bereich Minderung (einschließlich Verminderung der Entwaldung) umfassen sollte.

Sieben Jahre später wurde auf der COP 18 mit dem *Doha Amendment* (UN 2012) schließlich eine zweite Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls von 2013 bis 2020 verabschiedet.<sup>1</sup> Japan, Neuseeland und Russland haben jedoch beschlossen, keine verbindlichen Reduktionsverpflichtungen ab 2013 mehr einzugehen. Kanada, das noch 2007 auf der COP 13 das Kyoto-Protokoll als letztes Industrieland ratifiziert hatte, erklärte zum Ende des Jahres 2012 seinen Austritt aus dem Protokoll. Damit umfasst das verbindliche Klimaschutzabkommen unter dem Dach der Vereinten Nationen zum jetzigen Zeitpunkt Australien, die Europäische Union (EU) und weitere europäische Staaten, die für ca. 12 % der globalen Emissionen verantwortlich sind.

---

<sup>1</sup> Das Abkommen tritt nach Zustimmung aller Vertragsstaaten beim Verwahrer in Kraft. Mit Stand 25 Februar 2015 haben es 25 Staaten ratifiziert (Siehe hierzu CHAPTER XXVII ENVIRONMENT, 7 c Doha Amendment to the Kyoto Protocol unter <https://treaties.un.org>)

### 1.1.3 Der Landnutzungssektor im Kyoto-Protokoll

Erst kurz vor Beginn der dritten Vertragsstaatenkonferenz (COP 3) in Kyoto Ende des Jahres 1997 begannen in der Arbeitsgruppe unter dem Berlin Mandat (*Ad Hoc Group on the Berlin Mandate*), dem sogenannten AGBM-Prozess, ernsthafte Verhandlungen darüber, ob und wie der Bereich der natürlichen Senken in das verbindliche Klimaschutzabkommen eingebunden werden soll. Dabei war klar, dass dies „ernsthafte Auswirkungen auf Glaubwürdigkeit, Transparenz und Verifizierbarkeit der Emissionsziele“ haben würde (Oberthür und Ott 1999, S. 130). Daher votierten insbesondere Entwicklungsländer wie China und Brasilien gegen die Berücksichtigung des sogenannten Senkensektors in dem verbindlichen Klimaschutzabkommen. Nach ihrer Meinung sollten die Reduktionsziele „klar, transparent und erkennbar sein [...], wohingegen die Einbeziehung von LUCF [i.e. Abk. für *Land-Use Change and Forestry*; Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft] das Potential haben würde, die Intention zu konterkarieren, rechtlich bindende Reduktionsverpflichtungen festzulegen“ (Oberthür und Ott 1999, S. 133). Auch Höhne *et al.* (2007, S. 360) urteilen, dass einige Staaten in der Anrechnung von Wald eine kostengünstige Möglichkeit sahen, Emissionsgutschriften zu erhalten bzw. durch eine Ausweitung der Sequestrierleistung der Wälder dem Klimawandel kostengünstig zu begegnen (vgl. Kap. 1.1.1). Allerdings argumentierten vornehmlich Australien, Neuseeland, die USA und Kanada, dass eine Nichtberücksichtigung den Beschlüssen der Klimarahmenkonvention zuwiderlaufe, wonach ausdrücklich auch Maßnahmen zum Abbau von Treibhausgasen durch Senken einbezogen und berichtet werden sollen (UNFCCC 1997d; UNFCCC 1997c; vgl. Kap. 1.1.2 ). Auf Einladung der AGBM hatten sich im November 1997 zehn Parteien für eine Einbeziehung von Senken ausgesprochen (einschließlich der EU) und nur fünf Vertragsstaaten dagegen (u. a. Japan). Schließlich einigten sich die verhandelnden Staaten innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeit auf eine beschränkte Einbeziehung von drei Aktivitäten, die mit Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft verbunden und in Artikel 3, Paragraph 3 des Kyoto-Protokolls festgelegt sind:

“The net changes in greenhouse gas emissions by sources and removals by sinks resulting from direct human-induced land-use change and forestry activities, limited to afforestation, reforestation and deforestation since 1990, measured as verifiable changes in carbon stocks in each commitment period, shall be used to meet the commitments under this Article of each Party included in Annex I.” (UNFCCC 1997a)

Die inhaltliche Bedeutung dieses Artikels wird in der Entscheidung 9/CP.4 der vierten Vertragsstaatenkonferenz in Buenos Aires aus dem Jahr 1998 noch einmal konkretisiert:

“[...] the adjustment to a Party's assigned amount shall be equal to verifiable changes in carbon stocks during the period 2008 to 2012 resulting from direct human-induced activities of afforestation, reforestation and deforestation since 1 January 1990. Where the result of this calculation is a net sink, this value shall be added to the Party's assigned amount. Where the result of this calculation is a net emission, this value shall be subtracted from the Party's assigned amount;” (UNFCCC 1997a)



Neben den drei unter dem Paragraphen 3, Artikel 3 genannten Maßnahmen bzw. Landnutzungsaktivitäten Aufforstung (*afforestation*), Wiederaufforstung (*reforestation*) und Entwaldung (*deforestation*) wurde mit Paragraph 4 außerdem die Möglichkeit geschaffen, optional weitere zusätzliche vom Menschen verursachte Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasen – entgegen der ursprünglichen Intention bereits auf den ersten Verpflichtungszeitraum – anzuwenden:

“The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to this Protocol shall, at its first session or as soon as practicable thereafter, decide upon modalities, rules and guidelines as to how, and which, additional human-induced activities related to changes in greenhouse gas emissions by sources and removals by sinks in the agricultural soils and the land-use change and forestry categories shall be added to, or subtracted from, the assigned amounts for Parties included in Annex I [...]. Such a decision shall apply in the second and subsequent commitment periods. A Party may choose to apply such a decision on these additional human-induced activities for its first commitment period, provided that these activities have taken place since 1990.” (UNFCCC 1997a)

Da die Verabschiedung des Vertrages allerdings unter hohem Zeitdruck stattfand, waren die wissenschaftliche Grundlage und die Regeln, wie diese Maßnahmen umgesetzt und gemessen werden sollen, noch nicht vorhanden. Auf Mandat des Nebenorgans SBSTA fasste der IPCC im Jahr 2000 wissenschaftliche und technische Informationen zum Kohlenstoffzyklus sowie Möglichkeiten und Folgen einer Anrechnung von Kohlenstoffsinken in einem Sonderbericht zusammen, um den Staaten bei der Umsetzung des Kyoto-Protokolls Hilfestellung zu geben (IPCC 2000b). Bis dahin fehlende bzw. unzureichende Definitionen der in Artikel 3, Paragraphen 3 und 4 genannten Aktivitäten (u. a. Waldbewirtschaftung, *forest management*) stellt der Bericht ebenfalls zur Verfügung und legt damit den Grundstein der im darauffolgenden Jahr auf der siebten Vertragsstaatenkonferenz verabschiedeten *Marrakesh Accords*, die mit der Entscheidung 11/CP.7 die Umsetzung der Anrechnung biologischer Senken erst ermöglichen. Darin legen die Vertragsstaaten wesentliche Prinzipien für den Umgang mit den Maßnahmen in der Quellgruppe LULUCF fest (UNFCCC 2002a, S. 54 ff.):

- (a) Die Handhabung der Maßnahmen soll auf fundierter Wissenschaft beruhen;
- (b) für die Abschätzung und Berichterstattung der Maßnahmen über die Zeit sollen konsistente Methoden verwendet werden;
- (c) die Anrechnung von LULUCF soll nicht das für die Staaten in Artikel 3.1 des Kyoto-Protokolls genannte Ziel ändern, Emissionen zu reduzieren bzw. die zugeteilte Emissionsmenge zu überschreiten;
- (d) die schiere Existenz von Kohlenstoffspeichern soll von einer Anrechnung ausgeschlossen sein;
- (e) die Umsetzung der LULUCF Maßnahmen sollen zum Schutz von Biodiversität und der nachhaltigen Nutzung von natürlichen Ressourcen beitragen;
- (f) die Anrechnung von LULUCF impliziert keine Übertragung von Verpflichtungen in eine zukünftige Verpflichtungsperiode;

- (g) die Anrechnung einer Umkehrung jedes Abbaus von Gasen durch LULUCF-Maßnahmen soll zu dem entsprechenden Zeitpunkt erfolgen;
- (h) die Anrechnung schließt den Abbau von Gasen aus, welche (i) die erhöhte Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen über dem vorindustriellen Niveau, (ii) die indirekte Stickstoff-Ausfällungen und (iii) die dynamischen Effekte der Altersklassenstruktur aufgrund von Maßnahmen und Praktiken vor dem Referenzjahr (1990) betreffen.

Zudem enthalten die *Marrakesh Accords* eine Einladung an IPCC, Methoden auszuarbeiten, um Veränderungen der Kohlenstoffspeicher und anthropogene Treibhausgasemissionen nach Quellen und ihren Abbau durch Senken mit Hilfe definierter Aktivitäten im LULUCF Sektor abzuschätzen (*estimate*), zu messen (*measure*), zu überwachen (*monitor*) und Bericht zu erstatten (*report*). Zugleich wird der IPCC aufgefordert, einen Bericht mit Leitlinien für die gute Praxis (*Good Practice Guidance*) und zum Management von Unsicherheiten zu entwickeln. Im Ergebnis entstanden die *2003 Good Practice Guidance for LULUCF* (Abk. *GPG-LULUCF*) (IPCC 2003), die im Kapitel 4.2 näher beschrieben sind.

Eine Berücksichtigung der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten als Teil des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs der Wälder war in den Verhandlungen um ein verbindliches Klimaschutzabkommen zwar ebenfalls von Beginn an thematisiert worden, doch gab es keine eindeutige wissenschaftlich anerkannte Methode zur Abschätzung der Netto-Emissionen, auf die man sich als Grundlage für ein einheitliches Vorgehen hätte einigen können. Mit den *Marrakesh Accords* verschoben die Vertragsstaaten das Thema daher schließlich:

“The Conference of the Parties [...] decides that any changes to the treatment of harvested wood products shall be in accordance with future decisions of the Conference of the Parties.” (UNFCCC 2002a, S. 55)

Während die Annex I-Staaten den Produktspeicher unter bestimmten Voraussetzungen in die jährliche Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention einbeziehen konnten, wurde die Kohlenstoffspeicherwirkung der stofflichen Holznutzung in der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls somit nicht berücksichtigt.

#### 1.1.4 Unterschiede zwischen Abschätzung und Anrechnung – wichtige Begrifflichkeiten und Festlegungen

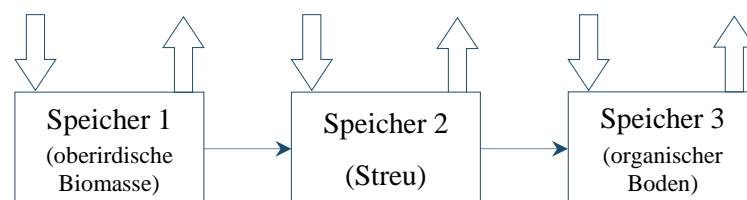
Bereits in den beiden vorangegangenen Kapiteln wurden einige Fachausdrücke für die Beschreibung der Hintergründe rund um das Thema „Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten“ verwendet, die im Folgenden erläutert und definiert werden.

In Kapitel 1.1.1 werden sowohl die Wälder, als auch Holzprodukte als Speicher bezeichnet. Nach Artikel 1 der Klimarahmenkonvention, welche zahlreiche weitere Definitionen beinhaltet, bedeutet **Speicher** ein oder mehrere Bestandteile des Klimasystems, in denen ein Treibhausgas oder eine Vorläufersubstanz eines Treibhausgases zurückgehalten wird (UNFCCC 1992). Für

die Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Quellen und deren Abbau in der Atmosphäre durch Senken werden für den Wald im LULUCF-Sektor fünf Teilspeicher betrachtet:

- ober- und unterirdische Biomasse
- Totholz, Streu
- organische Böden

Wie geschildert, entnimmt aber lediglich lebende Biomasse der Atmosphäre CO<sub>2</sub>. Diese Funktion wird mit dem Begriff der **Senke** umschrieben. Die Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre bzw. die Übertragung von Kohlenstoff von einem Speicher in den nächsten Speicher werden negativ dargestellt, Abgänge von Kohlenstoff aus einem Speicher bzw. Emissionen in die Atmosphäre hingegen immer positiv. Diese Darstellungsweise erschließt sich aus der Sichtweise der Atmosphäre; ein Zufluss von Kohlenstoff in einen biogenen Kohlenstoffspeicher enthält der Atmosphäre CO<sub>2</sub> vor bzw. entnimmt es ihr (negativ). Verlässt der Kohlenstoff einen Speicher wieder, z. B. durch Oxidationsprozesse (Verbrennung, Zersetzung) in die Atmosphäre, wird ihr im Umkehrschluss CO<sub>2</sub> hinzugefügt (positiv). Aus der Gegenüberstellung dieser Flussgrößen (*Inflow-Outflow-Methode*, vgl. Kap. 2.2.4) ergibt sich der Nettoeffekt dieses Speichers. Zugleich bedeutet die Vergrößerung eines Kohlenstoffspeichers über einen definierten Zeitraum, dass in der Summe mehr biogener Kohlenstoff aufgenommen bzw. auf den Speicher übertragen wird, als aus ihm wieder entweicht. So erhält man im Fall der Vergrößerung eines Speichers in der Summe ebenfalls einen insgesamt negativen Wert. Diese Wirkung des Speichers wird ebenfalls als Senke bezeichnet. Verkleinert sich ein Kohlenstoffspeicher im Laufe der Zeit (vgl. Kap. 1.1.1), stellt er eine **Quelle** dar. Bereits das Kyoto-Protokoll legt fest, dass die Wirkung des Speichereffektes über die Änderungen von erfassten Kohlenstoffspeichern ermittelt werden soll. Damit wird auch die Abgabe bzw. der Abfluss von Kohlenstoff aus einem Speicher, z. B. bei der Übertragung auf einen anderen Speicher, als positive Flussgröße für den betrachteten Speicher verbucht. So kann die CO<sub>2</sub>-Wirkung des Gesamtsystems abgeschätzt werden, indem die Veränderungen der einzelnen Kohlenstoffspeicher über einen definierten Zeitraum aufaddiert werden, anstatt den Fluss der einzelnen Kohlenstoffmoleküle durch das Gesamtsystem zu verfolgen (Abbildung 1-4).



**ABBILDUNG 1-4:** Beispiel für die Übertragung von Kohlenstoff entlang der Speicherkette

Zugleich werden fehlende Informationen über Kohlenstoffflüsse im Gesamtsystem implizit in der Atmosphäre verbucht: nur wenn Informationen über die gespeicherte Kohlenstoffmenge in den entsprechenden Speichern vorliegen, werden über deren Änderungen die sogenannten **Net-**

**to-Emissionen** ermittelt (vgl. Abbildung 1-1). Konsequenterweise kann nach dieser Sichtweise bzw. diesem methodischen Ansatz auch der Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten eine Senke darstellen: wenn sich der Speicher vergrößert, da beispielsweise mehr Holz in die stoffliche Verwendung geht als am Ende des Lebenszyklus der Holzwaren abgängig ist. Allein die obige Beschreibung zur Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Wirkung des Gesamtsystems macht es notwendig noch weitere Begriffe zu unterscheiden: dies sind die Begriffspaare **Methode** (*method*) und **Ansatz** (*approach*), sowie **Abschätzung** (*estimation*) und **Anrechnung** (*accounting*). Während der Begriff der Methode den rechnerischen Rahmen umschreibt, wie die Emissionen berechnet werden, definiert der Begriff des Ansatzes den konzeptionellen Rahmen bzw. die Grenzen des Systemraums hierfür. Die Methode beschreibt also, WIE und der Ansatz klärt, WAS berechnet bzw. angerechnet wird (Cowie *et al.* 2006). Im Wesentlichen geht die Differenzierung zwischen Methode und Ansatz auf die oben beschriebene Vorgehensweise zurück, die Wirkung der biologischen Senke und die verzögerte Freisetzung von CO<sub>2</sub> im biogenen Kohlenstoffzyklus anhand der Änderungen der gespeicherten Kohlenstoffmengen zu beschreiben. Zugleich ist dies eine der Hauptursachen, weshalb lange Zeit kein einheitliches Verständnis für eine Anrechnung der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten gefunden werden konnte (vgl. Kap. 1.1.3). Anrechnung bedeutet in diesem Zusammenhang die Berücksichtigung des klimarelevanten Kohlenstoffspeichereffektes bei der Erreichung der völkerrechtlich verbindlichen Reduktionsziele in einem Klimaschutzabkommen, wozu sich einige Staaten der Klimarahmenkonvention mit dem Kyoto-Protokoll verpflichtet haben. Die Nettowirkung der Speicheränderung bzw. der jeweiligen Aktivität wird also bei der Bilanzierung des jeweils erlaubten Emissionsbudgets als Gut- oder Lastschrift eingerechnet (vgl. IPCC 2003, S. G.2). Dass man im Zusammenhang der Ermittlung der Emissionsbudgets nicht von Berechnung, sondern von Abschätzung spricht, ist der Tatsache geschuldet, dass die Veränderungsdaten der Speicher entlang des Kohlenstoffzyklus nur anhand punktueller Informationen und in vielen Fällen nur auf Basis näherungsweise Schätzungen mit Hilfe von Modellen ermittelt werden können.

Unter dem Begriff **Modell**, wie er in der vorliegenden Arbeit verwendet wird, werden Rechen- bzw. Computermodelle verstanden, welche mit Hilfe definierter Methoden und Algorithmen die mit den Stoffströmen in Holz verbundenen Kohlenstoffflüsse, Kohlenstoffspeicher und CO<sub>2</sub>-Emissionen entlang der Verarbeitungskette des Rohstoffs auf Basis vorhandener Daten und Informationen berechnen, wodurch die komplexen Zusammenhänge zwischen diesen Größen simuliert und in vereinfachter Form abgebildet werden sollen.

Im Kontext der Erstellung von Treibhausgasinventaren wird unter der Methode auch die Kombination von **Aktivitätsdaten** (*activity data*) mit **Emissionsfaktoren** (*emission factor*) verstanden. Dabei beschreiben die Aktivitätsdaten die Größe der menschlichen Aktivität, welche in einem bestimmten Zeitraum die Emission von Treibhausgasen nach Quellen oder ihren Abbau durch Senken hervorruft; die Emissionsfaktoren sind als durchschnittliche Emissionsraten eines bestimmten Treibhausgases für eine gegebene Quelle, bezogen auf die Einheiten der Aktivität, definiert (IPCC 1997c; UNFCCC 2014a).

Zugleich sollen Unsicherheiten in der Berechnung so weit wie möglich reduziert werden: Die im Rahmen der Berichterstattung erstellten Nationalen Inventarberichte erfüllen nur dann die vom IPCC definierte **gute fachliche Praxis** (*good practice*), wenn vom IPCC vorgeschlagene Verfahren eingehalten werden, die sicherstellen sollen, dass Kohlenstoffspeichereffekte weder systematisch überschätzt, noch die Emissionen aus den Speichern unterschätzt werden (IPCC 2000a; IPCC 2003). Außerdem bezieht sich der Begriff auf Aspekte, die die Wahl von Schätzverfahren entsprechend den nationalen Gegebenheiten, die Qualitätssicherung und -kontrolle der Schätzungen, die Quantifizierung von Unsicherheiten und schließlich die Archivierung und Berichterstattung zur Förderung der Transparenz betreffen. So entspricht ein Ansatz zur Einteilung der Flächen eines Landes für die Berichterstattung im LULUCF-Sektor beispielsweise dann der guten fachlichen Praxis, wenn der Ansatz angemessen (*adequate*), konsistent (*consistent*), vollständig (*complete*) und transparent ist (IPCC 2003, S. 2.5).

Im Kontext der internationalen Klimapolitik wird im Englischen von „geernteten Holzprodukten“ (*harvested wood products*, Abk. HWP) gesprochen. Dieser Begriff beinhaltet zwei Elemente – die Holzernte (*forest harvesting*) und **Holzprodukte** (*wood products*) – und geht auf einen im Jahr 1999 durchgeführten Experten-Workshop in Dakar zurück, auf dem die bis dahin vorgeschlagenen Berechnungsansätze diskutiert und ihre zugrundeliegenden Konzepte evaluiert wurden: letztere sehen die stoffliche Verwendung entweder vornehmlich als Systemraumerweiterung der Kohlenstoffspeicherung im Wald oder betrachten Holzprodukte als eigenständigen Kohlenstoffspeicher (vgl. Brown *et al.* 1998; s. auch Kap. 2.2.1). Ebenso wie ein im Jahr 2003 erschienener Technischer Bericht des Klimasekretariats zu Holzprodukten, der auf Anfrage von SBSTA erstellt wurde (UNFCCC 2003a), verwendet die vorliegende Arbeit den Begriff „Holzprodukte“ und das englische Akronym HWP. Der Beitrag der Änderungen des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Quellen und ihrer Einbindung durch Senken im LULUCF Sektor wird in der vorliegenden Arbeit verkürzt auch als der **Beitrag von Holzprodukten** bezeichnet.

## 1.2 ZIELSETZUNG UND AUFBAU DER ARBEIT

Aufgrund der Tatsache, dass die Forst- und Holzwirtschaft wegen ihrer Kohlenstoffrelevanz zu Beginn der 1990er Jahre verstärkt als ein zu berücksichtigender Sektor für Strategien gegen die Anreicherung von klimaschädlichem CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre genannt werden (z. B. Marland 1988; Winjum *et al.* 1993; Nilsson und Schopfhauser 1995; vgl. Kap. 1.1.1), fordern Schlamadinger und Marland bereits Mitte der 1990er Jahre:

“If we intend to try to use forest or land management to influence the global carbon cycle, it behoves us to understand the full carbon cycle implications of our actions and to appreciate what are the most efficient options and the options that are most consistent with other forest management and social objectives.” (Schlamadinger und Marland 1996, S. 275)

Zahlreiche wissenschaftliche Studien haben sich seitdem mit den verschiedenen Wirkungen der Holznutzung auf die Treibhausgasbilanz auseinandergesetzt (vgl. Kap. 1.1.1). Für Deutschland beschreiben beispielsweise Albrecht *et al.* (2008) die potentiellen Substitutionseffekte einer veränderten Holzverwendung in Deutschland auf Basis von Ökobilanzdaten und detaillierten Marktinformationen. Als Grundlage für verbesserte Abschätzungen möglicher Substitutionseffekte durch die Verwendung von Holzprodukten in Deutschland können beispielsweise von Rüter und Diederichs (2012) veröffentlichte repräsentative Datensätze herangezogen werden. Die mit der Herstellung der Produkte verbundenen Treibhausgasemissionen und ein damit einhergehender möglicher Substitutionseffekt sind jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Forschungsarbeit.

Zur gespeicherten Kohlenstoffmenge in Holzprodukten und der damit verbundenen zeitlichen Dynamik der Netto-Emissionen in Deutschland liegen nur sehr wenige und oftmals widersprüchliche Schätzungen vor (vgl. Burschel *et al.* 1993b; Frühwald und Wegener 1993; Kohlmaier *et al.* 2007). Auch genügen die z.T. spärlichen Informationen nicht den Anforderungen an die gute fachliche Praxis und können daher in dem vorgestellten internationalen Kontext (vgl. Kapitel 1.1.2 und 1.1.3) nicht verwendet werden. Gerade vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Auswirkungen der Holznutzung auf die globale Treibhausgasbilanz (vgl. Kap. 1.1.1) stellt sich zunächst also die **Frage, wie hoch der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz durch die Kohlenstoffspeicherung in Deutschland tatsächlich ausfällt.**

Folgt man den bislang vorgeschlagenen Vorgehensweisen zur Ermittlung der Netto-Emissionen durch die stoffliche Holznutzung, errechnen sich je nach Wahl des einen oder anderen Ansatzes voneinander stark abweichende Beiträge des Produktspeichers zur CO<sub>2</sub>-Bilanz eines Landes. Diese Berechnungsansätze (d. h. WAS wird berechnet, vgl. Kap. 1.1.3) unterscheiden sich maßgeblich durch ihre gewählten Systemgrenzen und ihre voneinander abweichende Allokation der Kohlenstoffmengen in gehandelten Holzprodukten (s. u. a. Brown *et al.* 1998). Dies resultiert in unterschiedlich hohen Netto-Emissionen, die wiederum in Abhängigkeit von den Anrechnungsmodalitäten zu unterschiedlich hohen Gut- oder Lastschriften für die Staaten führen können. Im Zuge der Verhandlungen über die Reduktion von Treibhausgasen unter dem Kyoto-Protokoll gewann die **Frage nach der Wahl des „richtigen“ Berechnungs- bzw. Anrechnungsansatzes** (*accounting approach*) für die mit der Holznutzung verbundenen Netto-Emissionen daher schlagartig an Bedeutung: Sie war von Beginn an nicht nur Teil eines wissenschaftlichen Diskurses, sondern spielte vor allem im politischen Ringen um die ‚richtige‘ Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Wirkung der stofflichen Holznutzung eine zentrale Rolle. Aufgrund eines fehlenden internationalen Konsenses beschlossen die Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention schließlich, wie in Kapitel 1.1.3 beschrieben, den Holzproduktespeicher in der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls nicht zu berücksichtigen.

Mit der Etablierung der AWG-KP und der Aufnahme der Verhandlungen über eine Fortführung des Kyoto-Protokolls nach Ablauf der ersten Verpflichtungsperiode wurde auch ein erneuter

Anlauf für eine mögliche Einigung im Umgang mit der stofflichen Holznutzung bei der Ermittlung des Sektorbeitrages zur nationalen CO<sub>2</sub>-Bilanz in einem verbindlichen Klimaschutzabkommen unternommen. Vor diesem Hintergrund beauftragte das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) die damalige Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH)<sup>2</sup>, die wissenschaftliche Grundlage für die Erarbeitung einer deutschen Verhandlungsposition zum Thema Anrechnung von Holzprodukten zu schaffen. Damit bot sich die einmalige Gelegenheit, den bestehenden methodischen Rahmen grundsätzlich zu hinterfragen, anstatt nur, wie viele bestehende Studien, die existierenden Berechnungsansätze für eine Quantifizierung des Beitrags von Holzprodukten zum nationalen CO<sub>2</sub>-Budget zu verwenden. Ab dem Zeitpunkt der Verabschiedung der Bali Roadmap konnten die im Rahmen der Vorlaufforschung zur vorliegenden Arbeit gewonnenen Erkenntnisse direkt in den Verhandlungsprozess eingebracht werden. So wurde aus dem ursprünglich angedachten Ziel dieser Arbeit, nämlich lediglich die Kohlenstoffspeicherwirkung in Holzprodukten für Deutschland fundiert zu ermitteln, unerwartet mehr: zahlreiche Konferenzen und Diskussionen im Rahmen der internationalen Klimaverhandlungen seit 2008, die „unmittelbar darauf“ folgende Neufassung der methodischen Regeln des Weltklimarates IPCC zur Berechnung der Kohlenstoffspeicherung in Holz ab dem Jahr 2012 und schließlich die auf Ergebnissen der vorliegenden Arbeit beruhende Umsetzung der Regeln im Rahmen der nationalen Treibhausgasberichterstattung im Jahr 2014 – im Rahmen internationaler politischer Prozesse sich fast schon überstürzende Ereignisse, die allesamt den Forschungsprozess zu dieser Arbeit immer wieder zu überholen und überrollen drohten.

Mit der Entscheidung 2/CMP.7 der Vertragsstaaten auf der COP 17 im Dezember 2011 sollen die Netto-Emissionen des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten im Rahmen einer zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls angerechnet werden (UNFCCC 2012a), und seit Juni 2014 liegen detaillierte IPCC Leitlinien vor, welche von den Vertragsstaaten bei der Berechnung der zu berichterstattenden Daten verbindlich einzuhalten sind (IPCC 2014). Um den Beitrag der vorliegenden Arbeit zu diesen Meilensteinen bei der Ausgestaltung der Regeln für den LULUCF-Sektor unter dem Dach der Vereinten Nationen darzustellen und um eine differenzierte Auseinandersetzung mit den verschiedenen Aspekten des Forschungsgegenstandes dieser Arbeit, der Quantifizierung der Kohlenstoffspeicherwirkung in Holzprodukten, zu ermöglichen, folgt die Arbeit der nachfolgend beschriebenen Struktur.

Oftmals werden in der wissenschaftlichen Literatur Aspekte, die im Zusammenhang mit der Wahl der Systemgrenzen stehen (WAS wird berechnet, vgl. Kap. 1.1.3) und damit auch Teil des politischen Diskurses sind, im Methodenteil diskutiert (vgl. u. a. Hashimoto *et al.* 2002; Dias *et al.* 2007). Um jedoch die rein rechnerisch-methodischen Aspekte in Bezug auf die Abschätzung der Kohlenstoffspeicher und ihrer Änderungen über die Zeit, das WIE (vgl. Kap. 1.1.3), deutlich von den Aspekten zu trennen, die auch Bestandteil der Klimaverhandlungen waren und sind,

---

<sup>2</sup> Rechtsvorgängerin des Johann Heinrich von Thünen-Instituts

werden in **Kapitel 2** zunächst die existierenden Methoden thematisiert. Das Kapitel beschränkt sich also auf die Beschreibung der rein naturwissenschaftlichen und rechnerischen Aspekte und stellt die jeweiligen Methoden in entsprechenden Unterkapiteln exemplarisch anhand prominenter Modelle vor.

Die Ansätze zur Erfassung der Kohlenstoffspeicherwirkung in Holzprodukten, die das WAS beschreiben (vgl. Kap. 1.1.3), und die vor allem im politischen Kontext eine Rolle spielen (vgl. u. a. Brown *et al.* 1998; UNFCCC 2001c; Ford-Robertson 2003; UNFCCC 2008b), werden getrennt hiervon in **Kapitel 3** diskutiert. Da sich auch die für den gesamten LULUCF-Sektor geltenden Anrechnungsregeln auf die Ergebnisse auswirken können – ein in der Literatur bislang weitgehend ignoriertes Aspekt – unterscheidet Kapitel 3 zwischen den Ansätzen für den LULUCF-Sektor (Kap. 3.1) und den Ansätzen, die für den Holzproduktespeicher spezifisch sind (Kap. 3.2). Die im Zuge der Vorlaufforschung der vorliegenden Arbeit über die Anrechnung von Holzprodukten erzielten Ergebnisse, welche in enger Abstimmung mit dem BMEL, den zuständigen Fachressorts und der EU Expertengruppe zu LULUCF direkt in den AWG-KP Verhandlungsprozess zu LULUCF (Kap. 3.1.2 und 3.1.3) eingebracht wurden, werden separat in Kapitel 3.2.2 behandelt.

Nicht zuletzt weil der IPCC als zentrales Gremium den weltweiten Wissensstand zusammenfasst und als Referenz für die gesamte Thematik gilt, befasst sich ein eigener Abschnitt (**Kapitel 4**) mit den für Holzprodukte relevanten IPCC-Leitlinien zur Umsetzung der Treibhausgasberichterstattung. Da die Leitlinien jeweils auf Anfrage der Vertragsstaaten erstellt werden, spiegeln sie nicht nur den jeweils aktuellen Wissensstand, sondern auch den zu der entsprechenden Zeit herrschenden politischen Konsens wider (vgl. Kap. 1.1.2, Abbildung 1-3). In dem Unterkapitel 4.4 wird außerdem der Abschnitt 2.8 des im Mai 2014 erschienen IPCC-Leitfadens *2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol*, (Abk. *2013 KP Supplement*) vorgestellt und kommentiert; er beinhaltet den methodischen Leitfaden für die Berichterstattung für Holzprodukte unter dem Kyoto-Protokoll und basiert im Wesentlichen auf den bis dahin erzielten Ergebnissen der vorliegenden Arbeit (vgl. Rüter *et al.* 2014).

Ziel dieser Arbeit ist es, ein spezifisches Berechnungsmodell vorzustellen, das alle für das Thema „Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten“ relevanten Aspekte berücksichtigt:

- Prüfung, Implementierung und Vergleich vorgeschlagener Methoden zur Berechnung des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten;
- Quantifizierung diskutierter und neu vorgeschlagener Anrechnungsoptionen, um daraus Positionen für den internationalen Verhandlungsprozess unter der Klimarahmenkonvention ableiten bzw. qualifiziert einschätzen zu können;
- Abschätzung des Beitrags der stofflichen Holznutzung zum Klimaschutz für eine verbesserte Abbildung der zeitlichen Dynamik der CO<sub>2</sub>-Emissionen für Deutschland und andere Länder;



- Umsetzung der im Zuge der vorliegenden Arbeit entstandenen IPCC Leitlinien (Kap. 4.4) als Grundlage für die jährliche Treibhausgasberichterstattung unter dem Kyoto-Protokoll und der Klimarahmenkonvention.

Im Ergebnis der Bearbeitung des Forschungsthemas entstand das Computermodell WoodCarbonMonitor, das in **Kapitel 5** vorgestellt wird. Basierend auf der in Kapitel 5.1 geführten Diskussion und Bewertung der vorab beschriebenen Methoden (vgl. Kap. 2) beschreibt Kapitel 5.2 den modularen Aufbau und die Benutzeroberfläche des im Tabellenkalkulationsprogramm MS EXCEL implementierten Modells. Die damit erzielten Ergebnisse werden schließlich getrennt nach den Haupteinflussgrößen in **Kapitel 6** vorgestellt und diskutiert.



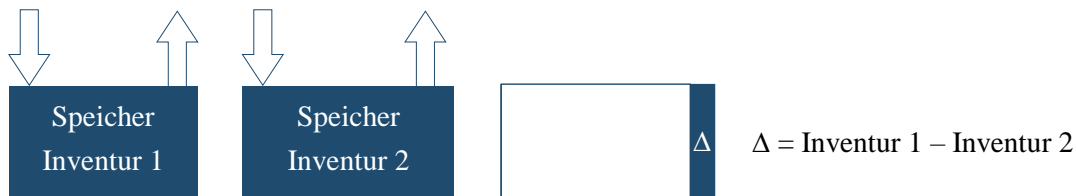
## 2 METHODEN ZUR BERECHNUNG DES KOHLENSTOFFSPEICHERS

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit existierenden Methoden zur Berechnung der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten, d. h. den verschiedenen Algorithmen und Berechnungsweisen, die bei der Ermittlung des Effektes der zeitlich verzögerten Abgabe von CO<sub>2</sub> durch die stoffliche Nutzung von Holz angewendet werden können (WIE wird es berechnet, vgl. Kap. 1.1.3). Zur Veranschaulichung werden hierfür verschiedene Berechnungsmodelle vorgestellt, in welchen die entsprechenden Methoden erstmalig oder prominent angewandt wurden. Allerdings werden die Modelle nicht ‚am Stück‘, sondern untergliedert nach den jeweils implementierten methodischen Bestandteilen in separaten Unterkapiteln beschrieben. So kann bei der Ermittlung der im Produktspeicher enthaltenen Kohlenstoffmenge, ihrer Änderung über die Zeit sowie den daraus abzuleitenden CO<sub>2</sub>-Netto-Emissionen grundsätzlich zwischen zwei Methoden unterschieden werden, die im LULUCF-Sektor angewandt werden: der Inventurmethode, die die Größe des Kohlenstoffspeichers zu mindestens zwei Zeitpunkten erfasst (Kap. 2.1), und den sogenannten Flussdatenmethoden (Kap. 2.2). Letztere bilden die Speicherwirkung bzw. die gespeicherte Menge an Kohlenstoff auf Basis von Informationen über den Zufluss von Kohlenstoff in den Speicher bzw. dessen Abfluss aus dem Speicher ab. Die Modellierung des Kohlenstoffzuflusses auf Basis von Daten zum Holzeinschlag bzw. zu Holzhalbwaren wird in den Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2 vorgestellt. Die Berechnung des Kohlenstoffabflusses mit Hilfe von Informationen zur Verweildauer wird in Kapitel 2.2.3 und die Ermittlung des Kohlenstoffabflusses über direkte Schätzungen in Kapitel 2.2.4 beschrieben.

### 2.1 INVENTARISIERUNG DES BESTANDS AN HOLZPRODUKTEN

In vielen Ländern werden die Veränderungen der gespeicherten Kohlenstoffmengen im Wald durch regelmäßige Inventuren der Holzvorräte erfasst (u. a. Dunger und Rock 2009; Polley *et al.* 2009). Für eine Anwendung der Inventurmethode zur Abschätzung der gespeicherten Kohlenstoffmenge in Holzprodukten muss im Prinzip der gesamte Bestand der zu einem bestimmten Zeitpunkt in Gebrauch befindlichen Holzwarenmengen erfasst werden. Um die nationalen Netto-Emissionen auf Basis der Änderung des Kohlenstoffspeichers zu ermitteln, reichen bereits zwei Zeitpunkte, für welche Daten über die Größe des Produktspeichers innerhalb eines Landes vorliegen. Aus der Bestimmung der Größendifferenz des Kohlenstoffspeichers zwischen den Inventuren berechnen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche aufgeteilt auf die Anzahl der Jahre zwischen den Inventurzeitpunkten die jährlichen Netto-Emissionen ergeben (Abbildung 2-1). An-

ders als bei einer Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten mit Hilfe von Flussdatenmethoden, die im nachfolgenden Kapitel 2.2 vorgestellt werden, ist die Verwendung von Inventurmethode unabhängig von Informationen über die Verweilzeit des Kohlenstoffs im Speicher.



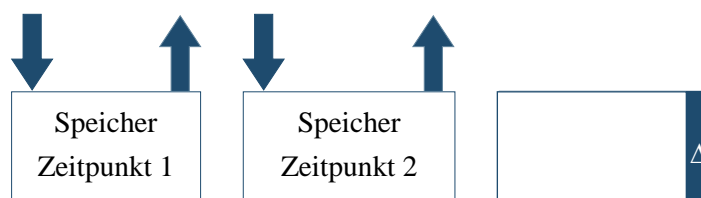
**ABBILDUNG 2-1:** Ermittlung der Kohlenstoffspeicheränderung ( $\Delta C$ ) mittels Inventuren zur Abschätzung der Netto- $\text{CO}_2$ -Emissionen innerhalb eines Zeitraums

Zugleich kann die Inventarisierung in Gebrauch befindlicher Holzprodukte, speziell im Gebäudebereich, der Verifizierung von Flussdaten-Modellen dienen und dazu beitragen, etwaige Unsicherheiten bei der Schätzung von Nutzungsdauern von Holz, welche in der im nächsten Kapitel beschriebenen Methode verwendet werden, zu reduzieren. Weitere Vor- und Nachteile der Verwendung von Inventuren werden in Kapitel 5.1.1 beschrieben.

Beispielhaft für die Ermittlung der im Gebäudebestand gespeicherten Kohlenstoffmengen auf Basis von Daten über die jährlich errichteten Gebäude gehen Gjesdal *et al.* (1996) für Norwegen und Pingoud *et al.* (2001, S. 94 ff.) für Finnland vor.

## 2.2 ERMITTLUNG DER KOHLENSTOFFSPEICHERHÖHE MIT HILFE VON FLUSSDATEN

Im Gegensatz zu einer Ermittlung des Bestandes der in Verwendung befindlichen Holzmengen mittels Inventurmethode, ermitteln Flussdatenmethoden die Veränderungsdynamik des Holzproduktespeichers, indem die Kohlenstoffflüsse in den Speicher und aus dem Speicher quantifiziert werden (Abbildung 2-2).



**ABBILDUNG 2-2:** Ermittlung der Speicherhöhe auf Basis der Kohlenstoffflüsse in den und aus dem Kohlenstoffspeicher zur Abschätzung der Netto- $\text{CO}_2$ -Emissionen über die Änderung des Speichers innerhalb eines Zeitraums

Dies kann im Fall des Produktspeichers durch eine direkte Analyse der Zu- und Abflüsse von Kohlenstoff in Holzprodukten in und aus dem Produktspeicher oder unter Verwendung von In-

formationen zur Speicherdauer des Kohlenstoffs in den jeweiligen Holzprodukten geschehen. Der Zufluss der in den Produktspeicher eingehenden Holzmengen entspricht dabei im Wesentlichen der Produktion bzw. dem Verbrauch von Holzprodukten. Der Kohlenstoffzufluss kann also theoretisch sowohl über den Holzeinschlag als auch über Daten zur Produktion und den Außenhandel von Holzprodukten ermittelt werden. Während für eine direkte Analyse der Zu- und Abflüsse von Kohlenstoff (Kap. 2.2.4) in und aus dem Holzproduktespeicher genaue jährliche Daten z. B. über die Holzmengen im Abfallaufkommen notwendig sind, reagieren insbesondere Berechnungen der Kohlenstoffabflüsse aus dem Speicher mit Hilfe von Nutzungsdauern sehr sensitiv auf die Annahmen zu dessen Verweilzeit im Speicher (Kap. 2.2.3). Diese unterstellten Verweildauern des Kohlenstoffs im Speicher können sowohl in einfachen Kohortenberechnungen als auch als Eingangsgröße für unterschiedliche Zerfallsfunktionen verwendet werden, welche die zeitliche Dynamik der Emissionen mit Hilfe jährlicher Oxidationsraten beschreiben.

### 2.2.1 Bestimmung des Kohlenstoffzuflusses in den Speicher über den Holzeinschlag

Der Großteil der Modelle, die Aussagen zur Kohlenstoffspeicherung in Produkten ermöglichen, bestimmt die in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmengen über den Holzeinschlag. In diesen Modellen, welche den Stoffstrom bzw. die Kohlenstoffströme nachverfolgen, spiegelt sich vor allem die Sichtweise wider, dass Holzprodukte eine Art Systemraumerweiterung des Waldes darstellen, welche für einen bestimmten Anteil des eingeschlagenen Rohholzes die Speicherwirkung des Waldes durch ihre Nutzung in den verschiedenen Verwendungsbereichen verlängern (vgl. Kap. 1.1.3 und 1.2).

**TABELLE 2-1:** Allokation des Kohlenstoffs in Rohholz auf Produktgruppen (Thompson und Matthews 1989, S. 3) [in %]

Nutzung von Rohholz	Nadelrundholz		Laubrundholz	
	7 – 16 cm	16 cm+	7 – 30 cm	30 cm+
Abfall, Rinde, Brennholz	–	13	30	29
Zellstoff	51	10	60	9
Spanplatten	37	23	10	9
Mitteldichte Faserplatten (MDF)	1	1	–	–
Paletten & Verpackungen	–	14	–	11
Zäune	8	19	–	5
Konstruktionsholz	–	13	–	15
Bergbau	3	5	–	15
Andere	–	2	–	7

Bereits 1983 regt Cooper an, bei der Ermittlung des Senkenpotentials des Forstsektors die Auswirkungen der stofflichen Holznutzung in die Betrachtung mit einzubeziehen. In Anlehnung an Thompson und Matthews (1989) beschreibt Dewar (1990) im Zuge seiner Untersuchung der Kohlenstoffspeicherwirkung in Forstplantagen in Großbritannien die Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten als Funktion einer Waldwachstumskurve, der Umtriebszeit und einer Retentionskurve für den in den Produkten gebundenen Kohlenstoff. Allerdings unterscheidet Dewar, anders als Thompson und Matthews, nicht zwischen Produktgruppen und ihrer unterschiedlichen Verwendung bei der Berechnung der verzögerten Freisetzung von Kohlenstoff. Die von Thompson und Matthews vorgenommene Aufteilung des Kohlenstoffs auf verschiedene Produktgruppen in Abhängigkeit vom Durchmesser des eingeschlagenen Rohholzes ist in Tabelle 2-1 abgebildet.

Auch Burschel *et al.* erklären 1993 im Rahmen ihrer Beschreibung eines Modells für Deutschland, auf das auf Seite 131 noch näher eingegangen wird:

“For their duration-time timber products lengthen the storage effect of the forests, therefore they have to be taken into consideration for a comprehensive estimation of the total effect of forests and forestry for the C-budget.” (Burschel *et al.* 1993b, S. 329)

Apps *et al.* (1999) beschreiben den Zusammenhang zwischen Waldbewirtschaftung und Produktkohlenstoffspeicher wie folgt:

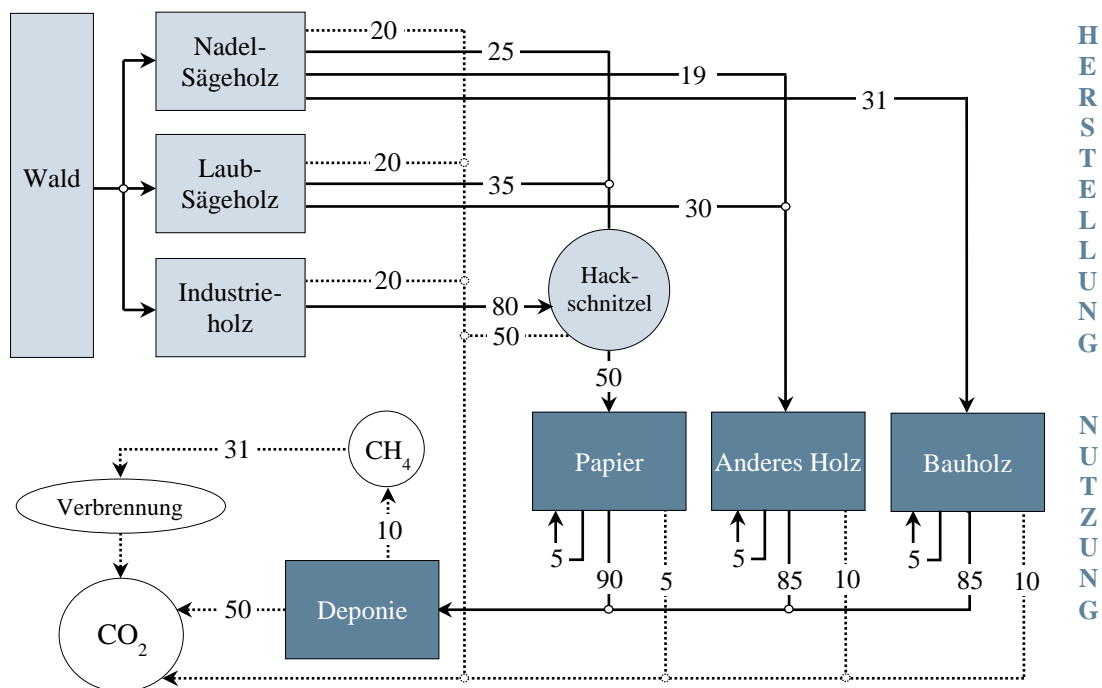
“Forest sector C [carbon] stocks and flows can be divided into two major groups associated with the forest ecosystems themselves and the FPS [forest products sector]. [...] Forestry operations remove C from forest ecosystems and transfer this C to the FPS.” (Apps *et al.* 1999, S. 26)

Oftmals steht bei Modellen, welche den Holzeinschlag als Ausgangsgröße für die Produktspeicherung verwenden, die Beantwortung der Frage im Vordergrund, wie der Beitrag von bewirtschafteten Wäldern für den Klimaschutz optimiert werden kann. So sollen z. B. mit dem *Canadian Budget Model of the Forest Product Sector* (CBM-FPS), welches als Submodul für das kanadische *Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector* (CBM-CFS) entwickelt wurde, verschiedene Waldbewirtschaftungsszenarien auf ihre Auswirkungen auf die nationale Treibhausgasbilanz für den gesamten kanadischen Forst- und Holzsektor analysiert werden (Kurz *et al.* 1992).

Schlamadinger und Marland (1996) verteilen in dem sehr vereinfachenden Modell GORECAM (Abk. für *Graz/Oak Ridge Carbon Accounting Model*) die eingeschlagene Holzmenge eines Bestandes auf vier Produktgruppen: 1) *langlebige* 2) *kurzlebige* und 3) *sehr kurzlebige* Produkte, sowie 4) *Biotreibstoffe* (Brennholz). Allerdings wird nur den ersten beiden Gruppen eine emissionsverzögernde Wirkung (Kohlenstoffspeicherung) unterstellt und es werden keine Sortimenten unterschieden (Marland und Schlamadinger 1999, S. 113). Neben der Kohlenstoffspeicher-

wirkung wird auch die stoffliche und energetische Substitutionswirkung der Holznutzung untersucht.

In dem von Apps *et al.* (1999) entwickelten Modell CBM-FPS wird hingegen eine Verteilung des Kohlenstoffs im Holzeinschlag auf die drei Rohholzsortimente Rundholz, Industrieholz für Zellstoff und Papier sowie Brennholz vorgenommen. Die unterstellten Allokationsraten verändern sich über die ab dem Jahr 1920 modellierte Zeitreihe. Das Rundholz wird weiter auf einen 1) *kurz-* und einen 2) *langlebigen* Speicher aufgeteilt, wobei in dem kurzlebigen Speicher (hier „Anderes Holz“, vgl. Abbildung 2-3) auch alle Nicht-Zellstoff-Produkte berücksichtigt werden, die eine kurze Verweildauer haben (Verpackungsholz und Holzabfälle).



**ABBILDUNG 2-3:** Kohlenstoffstrom vom Rohholz zum Produktspeicher mit den in den Modellen CBM-FPS und Carbon-Object Tracker unterstellten Allokationsfaktoren (nach Apps *et al.* 1999 und Hennigar *et al.* 2008, S. 789)

Der Kohlenstoff des für die Zellstoff- und Papierindustrie bestimmten Industrieholzes wird im Speicher 3) *Zellstoff- und Papier* erfasst, welcher zuvor in mechanischen und chemischen Zellstoff sowie Recyclingmaterial untergliedert und auf drei ‚Endverbrauchskategorien‘ Handelszellstoff, Zeitungszellstoff und anderer Zellstoff aufgeteilt worden ist. Auch berücksichtigt das von Apps *et al.* entwickelte Modell die Verbrennung jeweils eines Teils des Holzes bzw. Kohlenstoffs zur Energiegewinnung entlang des unterstellten Stoffstroms. In dem Speicher 4) *Deponie* zusammengeführt wird schließlich aller biogener Kohlenstoff, der nach Abzug der verfeuerten Mengen mit dem Industrierestholz entlang der Verarbeitungskette anfällt, sowie der Kohlenstoff des Altholzes, welcher nach Ablauf der jeweiligen Verweildauer aus den anderen drei Speichern

übertragen wird. Die Verweilzeit des Kohlenstoffs in den vier Speichern wird anschließend durch vier unterstellte Retentionskurven beschrieben (s. Abbildung 2-12, S. 54).

In Anlehnung an das kanadische Berechnungsmodell CBM-FPS von Apps *et al.* teilen Hennigar *et al.* (2008) in ihrem Modell Carbon-Object-Tracker den Kohlenstoff der drei Rohholzsortimente Nadel- und Laubrundholz sowie Industrieholz für Zellstoff auf vier Holzproduktespeicher 1) *Konstruktionsholz* 2) *anderes Stammholz* 3) *Papier* und 4) *Deponie* auf, welchen ebenfalls die Retentionskurven des CBM-FPS-Modells zugeordnet sind. Die hierfür genutzten Allokationsparameter aus dem CBM-FPS-Modell sind in Abbildung 2-3 auf Seite 39 dargestellt. Das Modell Carbon-Object-Tracker wird für die Abschätzung der Kohlenstoffspeicherwirkung von Holzprodukten im kanadischen Bundesstaat New Brunswick verwendet (Neilson *et al.* 2008).

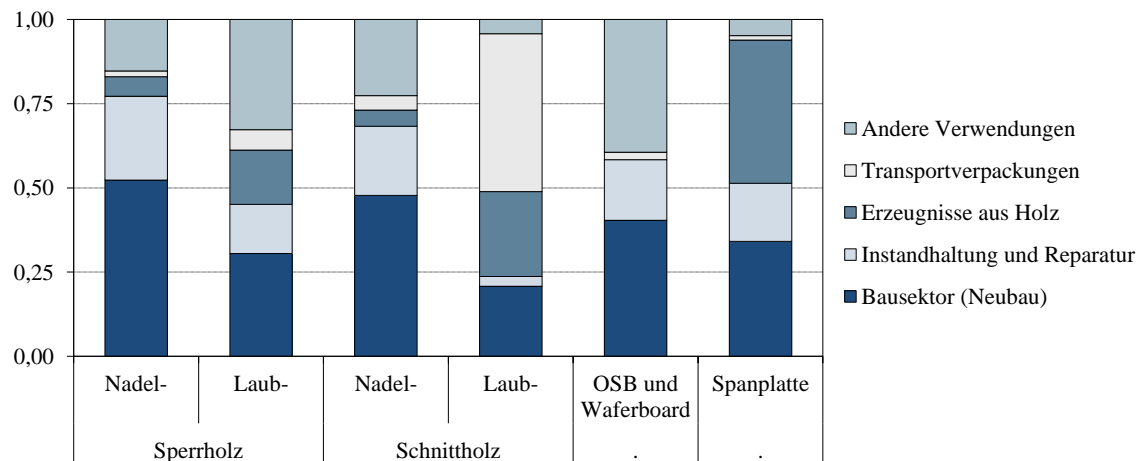
Auch das Berechnungsmodell HARVCARB von Row und Phelps simuliert die Kohlenstoffflüsse von der Holzernte bis hin zu den Szenarien am Ende der Nutzung der verschiedenen Produktgruppen. Es ermöglicht die Analyse der Kohlenstoffflüsse vom Rohholz sowohl aus einzelnen Beständen wie auch der gesamten Holzernte der Vereinigten Staaten (Row und Phelps 1996: 28 ff.). Die Berechnung ist in fünf Schritte aufgeteilt, die je nach verfügbarer Ausgangsdatenlage und Fragestellung separat angesteuert werden können. In der ersten Berechnungsphase werden in Abhängigkeit von einer anzugebenden Durchmesser- und Bestandsdichte, der Bestandsdichte und der durchschnittlichen Baumhöhe die Anzahl der zu fallenden Bäume und die anfallenden Rohholzsortimente berechnet. Wahlweise können auch aus einer vorgegebenen Anzahl von Rohholzstämmen unter Angabe ihrer Länge, dem BHD (Abk. für Brusthöhendurchmesser) und der Baumart die Sortimente bestimmt werden. Der zweite Berechnungsschritt wird von Row und Phelps zusammenfassend wie folgt beschrieben:

“Phase 2 of HARVCARB simulates the processing of roundwood product produced in Phase 1. Though not a detailed manufacturing process model, the simulation estimates the quantitative flows of fiber and carbon from roundwood, manufacturing byproducts, and recycled materials into primary wood products. [...] the transformation into some finished products (e.g. plywood, surfaced lumber and paper and paperboard) occurs in several manufacturing processes before the products are ready for final market use.” (Row und Phelps 1996, S. 32).

Der Holzeinschlag wird auf die Halbwarengruppen 1) *Masten und Pfähle* 2) *Sperrholz* 3) *Schnittholz* 4) *OSB und Waferboard* 5) *Spanplatte* 6) *Industrierestholz* 7) *Papier und Pappe* 8) *Schwarzlauge* und 9) *Energieholz* aufgeteilt. Ein Teil des Kohlenstoffs in 6) wird als Rohstoff für die Herstellung von 4) und 7) verwendet, der andere Teil zusammen mit 8) und 9) energetisch genutzt. In Phase drei der Berechnung werden die übrigen sechs Produktgruppen nach festgelegten Nutzungsmustern, getrennt nach Laub- und Nadelholz, auf zwölf finale Verwendungsbereiche aufgeteilt. Abbildung 2-4 stellt nur die Verwendungsbereiche dar, in denen Massivholzprodukte genutzt werden. Bei der Nutzung bzw. der Weiterverarbeitung der Halbwa-



ren zu Fertigwaren fallen wiederum Verschnitte an, die in dem Modell als von Experten geschätzte ‚Abfallfaktoren‘ hinterlegt sind (Tabelle 2-2).



**ABBILDUNG 2-4:** Nutzungsmuster der Halbwaren im Modell HARVCARB, nach Row und Phelps (1996, S. 49)

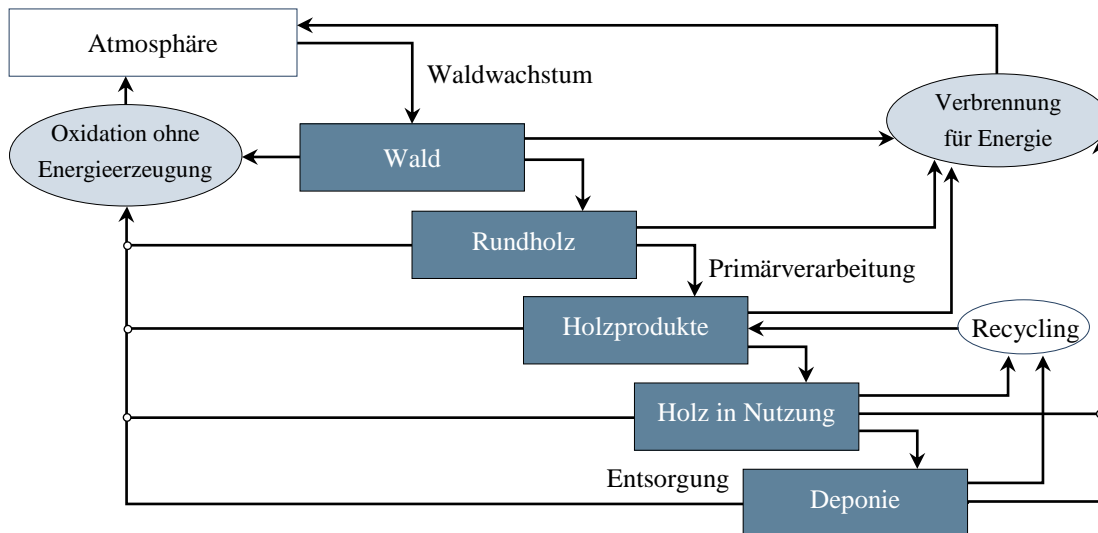
**TABELLE 2-2:** Im Modell HARVCARB unterstellte Verschnittanteile bei der Verarbeitung von Halbwaren zu Fertigwaren (Row und Phelps 1996, S. 36)

Produkt	Verschnittanteil
Masten und Pfähle	0,02
Sperrholz	0,07
Schnittholz	0,08
OSB / Waferboard	0,07
Spanplatte	0,12
Papier und Pappe	0,05

Nach diesem Schritt sind 39,9 % des Kohlenstoffs des ursprünglich gerenteten Rohholzes auf die Produkte verteilt und die restlichen 61,1 % verbrannt, deponiert oder anderweitig oxidiert. Die Holz- bzw. Kohlenstoffmengen werden nach jedem Verarbeitungsschritt mit den jeweiligen Außenhandelsdaten (Import und Export) der Halb- und Fertigwaren verrechnet, so dass auch der Verbrauch bestimmt werden kann. Die in Phase vier des Modells mit Hilfe dreiteiliger Zerfallskurven berechnete zeitliche Dynamik der Oxidation des Kohlenstoffs in den zwölf Verwendungsbereichen wird in Kapitel 2.2.3, welches die Methoden zur Ermittlung des Kohlenstoffabflusses thematisiert, auf Seite 56 beschrieben.

Skog und Nicholson (1998) übernehmen für die Allokation des Kohlenstoffs entlang der Forst-Holz-Kette die von Row und Phelps vorgeschlagene Struktur des Modells HARVCARB (Abbildung 2-5). In Kombination mit drei weiteren Modellen ist das WOODCARB genannte

Modell in der Lage, die Netto-Bilanz des in den Produkten gespeicherten Kohlenstoffs, die in Deponien eingelagerten Kohlenstoffmengen, die Mengen an Kohlenstoff, die bei der Erzeugung von Energie aus Holz wieder in die Atmosphäre entweichen, sowie die Kohlenstoffmengen abzuschätzen, welche ohne Energieerzeugung wieder in die Atmosphäre oxidieren.



**ABBILDUNG 2-5:** Kohlenstoffkreislauf in den Modellen HARVCARB und WOODCARB (vgl. Row und Phelps 1996, S. 29; Skog und Nicholson 1998, S. 76)

WOODCARB wird vom *United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service* in Kombination mit dem nationalen Waldkohlenstoffbilanz-Modell der Vereinigten Staaten FORCARB2 für die Erstellung der Treibhausgasbilanz verwendet. Anders als HARVCARB, für dessen Verwendung eine bestimmte Menge an Rohholz oder eine Fläche mit spezifischen Bestandsparametern als Eingangsgröße zu definieren ist, bilden historische und projizierte Daten zur Holzverwendung die Ausgangsdatensätze in WOODCARB. Für die historischen Werte zum Holzeinschlag seit dem Jahr 1910 werden die vom *USDA Forest Service* bereitgestellten Daten verwendet. Die Ermittlung des in der Vergangenheit liegenden Kohlenstoffzuflusses ist generell notwendig, um Informationen über den gegenwärtigen Kohlenstoffabfluss herleiten zu können (vgl. Kap. 2.2.3). Das Modell *North American Pulp and Paper (NAPAP)* simuliert die Funktion der Märkte für Papier und Zellstoffprodukte und projiziert darüber hinaus den Verbrauch für Zellstoff und Papier. Dabei wird zwischen Zellstoff aus Laub- und Nadelholz, vier Kategorien Recyclingpapier, sowie der Produktion und dem Außenhandel von insgesamt dreizehn Kategorien Zellstoff und Papier unterschieden. Für Massivholz simulieren die Holzinventurmodelle *Timber Assessment Market Model (TAMM)* und *Aggregate Timberland Assessment System (ATLAS)* das Verhalten der Märkte und leiten darüber den Verbrauch von Rohholz, die Produktion von Bauholz und Holzwerkstoffen sowie den Endverbrauch von Massivholzprodukten in verschiedenen Verwendungsbereichen ab (Tabelle 2-3). Mit TAMM wird zudem der Im- und

Export von Rohholz, Schmittholz und Holzwerkstoffen nachverfolgt, so dass in ATLAS auf Basis des prognostizierten Verbrauchs dieser Produkte der zukünftige Holzeinschlag errechnet werden kann. Mit WOODCARB als Zusatzmodul zu TAMM wird der gesamte Kohlenstoff aus geerntetem Rohholz in den Vereinigten Staaten unter Berücksichtigung des Im- und Exports von Kohlenstoff in Rundholz, Massiv- und Papierprodukten alloziert. Dabei wird bei der Weiterverarbeitung von Halbwerten in Endprodukte (Holz in Nutzung) für Massivholzprodukte ein Materialverlust von 8 % und für Zellstoff- und Papierprodukte von 5 % unterstellt (vgl. Row und Phelps, Tabelle 2-2). Die jährlich aus dem Speicher wieder frei werdende Menge an Kohlenstoff (Ende der Nutzung) wird ebenso wie im Modell HARVCARB zwischen Recycling, Deponie und Verbrennung, mit und ohne Energieerzeugung, aufgeteilt.

**TABELLE 2-3:** Kategorien für den Endverbrauch von Massivholz- und Papierprodukten im Modell WOODCARB (Skog und Nicholson 1998, S. 82)

Massivholzprodukte	Papierprodukte
Mehrfamilienhäuser	Nutzungs- und Abfallkategorien
Mobile Häuser (mobile homes)	Zeitungen
Instandhaltung und Reparatur von Gebäuden	Boxen
Nicht-Wohnbau	Büropapier
Holzverarbeitende Industrie	Gestrichenes Papier
Transport	Kategorien für Recyclingpapier
Möbel	Alte Zeitungen
Eisenbahnschwellen	Alte gewellte Transportbehälter
Diverse Holzwaren	Vermischtes Papier
Bauabfälle	Zellstoffsubstitute und deinktes Papier
Altholz aus dem Bausektor	

Chen *et al.* (2008) nutzen ebenfalls das von Skog und Nicholson (2000) bzw. Row und Phelps (1996) beschriebene Holzprodukte-Modell für ihre Abschätzung der Auswirkungen der Waldbewirtschaftung im kanadischen Bundesstaat Ontario. Um die in den Produktspeicher seit 1951 eingehenden Kohlenstoffmengen abzuschätzen, die aus dem Holzeinschlag dieses Bundesstaates stammen, wurde das nationale Waldkohlenstoffbilanz-Modell der Vereinigten Staaten FORCARB2 angepasst und mit dem kanadischen CBM-FPS-Modell von Apps *et al.* kombiniert, welches die Verteilung auf die vier in dem Modell berücksichtigten Endnutzungskategorien und mit den ebenfalls in Abbildung 2-3 gezeigten Verschnitten vornimmt.

Ein von Karjalainen *et al.* vorgestelltes finnisches Holzprodukte-Modell ist ebenfalls ein Modell, welches im Zusammenspiel mit einem Wald-Kohlenstoffmodell eingesetzt wird. Letzteres simuliert das Waldwachstum in Abhängigkeit von diversen Waldbewirtschaftungsszenarien, Klima- und Standortfaktoren sowohl auf Bestandes- als auch auf nationaler Ebene (Karjalainen

et al. 1994, Karjalainen 1996a, Karjalainen 1996b). Der im Holzeinschlag enthaltene Kohlenstoff der nach Baumarten (*Pinus sylvestris*, *Picea abies* und *Betulae spec.*) unterschiedenen Sortimenten Sägeholz, Industrieholz und Waldrestholz wird zur Berechnung der Speicherwirkung der Holznutzung auf die Produktlinien 1) *Schnittholz*, 2) *Sperrholz*, 3) *mechanischer Zellstoff*, 4) *chemischer Zellstoff* und 5) *Brennholz* verteilt (Tabelle 2-4).

**TABELLE 2-4:** Verteilung von Rohholzsortimenten auf verschiedene Produktionslinien im HWP-Modell nach Karjalainen [in %] (Karjalainen et al. 1994, S. 70)

Produktlinien	Pinus sylvestris			Picea abies			Betulae spec.		
	SH*	ZH*	IR*	SH	ZH	IR	SH	ZH	IR
Schnittholz	100	–	–	92	–	–	11	–	–
Sperrholz	–	–	–	8	–	–	89	–	–
Mech. Zellstoff & Papier	–	–	–	–	100	–	–	–	–
Chem. Zellstoff & Papier	–	100	–	–	–	–	–	100	–
Brennholz	–	–	100	–	–	100	–	–	100

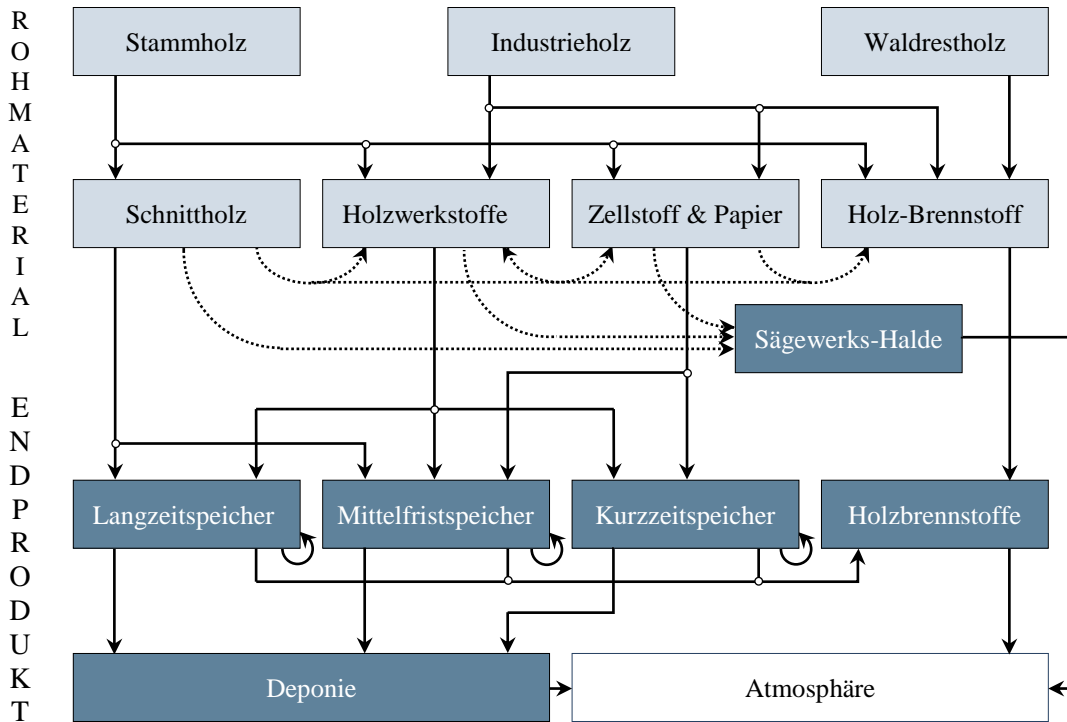
\*SH: Stammholz, \*ZH: Industrieholz für Zellstoff, \*IR: Industrierestholz

**TABELLE 2-5:** Unterstellter Umwandlungsnutzungsgrad bei der Verarbeitung von Stammholz und Industrieholz für die Produktion von Schnittholz, Sperrholz, Zellstoff und Energie in Finnland in % (nach Karjalainen et al. 1994, S. 70)

Nutzung von Rohholz	Stammholz (SH)		Industrieholz für Zellstoff (ZH)		
	Schnittholz	Sperrholz	Mech. Z. ( <i>Picea</i> )	Chemischer Zellstoff ( <i>Pinus</i> )	Zellstoff ( <i>Betulae</i> )
Produkt	43,5	38,4	92,8	45,8	48,6
Industrierestholz, weiter verarbeitbar, für Zellstoff	43,5	33,9	–	–	–
Industrierestholz, nicht weiter verarbeitbar, für Prozessenergie	13,0	27,7	7,2	54,2	51,4

Hierzu werden typische Verschnittfaktoren der finnischen Holzindustrie angenommen (Tabelle 2-5). Das entlang der Wertschöpfungskette anfallende Industrierestholz, welches nicht weiterverarbeitet wird, wird als sofortige Emission eingerechnet. Den fünf Produktgruppen werden wiederum anteilig vier Nutzungsdauerkategorien zugewiesen, wobei angenommen wird, dass ein Drittel der Produkte nach ihrer Nutzung wiederverwendet, ein Drittel am Ende des Lebenszyklus für die Energieerzeugung eingesetzt und ein weiteres Drittel als Altholz in Deponien landet (Karjalainen und Kellomaki 1995, S. 312). Die den vier Produktkategorien zugeordneten Zerfallskurven sind in Kapitel 2.2.3 auf Seite 57 beschrieben.

Das im Rahmen eines Projektes von Nabuurs *et al.* (2002) entwickelte Forstsektor-Modell CO2FIX V2.0 entspricht einer vereinfachten Version des Holzprodukte-Moduls von Karjalainen *et al.* (1994). CO2FIX V2.0 berechnet die Kohlenstoffflüsse und -speicher ebenso auf Basis des jährlich anfallenden Holzeinschlags (Abbildung 2-6).



**ABBILDUNG 2-6:** Flussdiagramm des Kohlenstoffs im Holzprodukte-Modul des Modells CO2FIX V2.0. (nach Nabuurs *et al.* 2002, S. 22)

**TABELLE 2-6:** Default-Allokationsparameter für verschiedene Produktionslinien für Holzprodukte im CO2FIX V2.0 Modell in % (nach Nabuurs *et al.* 2002, S. 35)

Rohmaterial	Produktionslinie			
	Schnittholz	Holzwerkstoffe	Papier	Holz-Brennstoff
Stammholz	80	15	5	–
Industrieholz	–	5	95	–
Waldrestholz	–	–	–	100

Anders als in allen vorher beschriebenen Modellen sind die Allokationsparameter entlang der Verarbeitungsstufen für die Verteilung des Kohlenstoffs vom Rohmaterial auf die Halbwaren Schnittholz, Holzwerkstoffe, Zellstoff & Papier und Holz-Brennstoff zwar voreingestellt, jedoch besteht für den Nutzer die Möglichkeit, diese Parameter ebenso wie die Recyclingeffizienz über die Benutzeroberfläche des programmierten Berechnungsmodells frei zu verändern (Tabel-

len 2-6 und 2-7). Die von Karjalainen *et al.* (1994) für die Ermittlung des Kohlenstoffabflusses ursprünglich verwendeten Berechnungsfunktionen (vgl. Kap. 2.2.3) wurden von Nabuurs *et al.* im Modell CO2FIX V2.0 ebenfalls verändert.

**TABELLE 2-7:** Default-Parameter für Produktmengen und Produktionsverluste entlang verschiedener Herstellungsketten Holzprodukte im CO2FIX Modell (nach Nabuurs *et al.* 2002, S. 35)

Produktionslinie	Produktionsverluste* während der Herstellung zu				
	Schnittholz	Holzwerkstoff	Papier	Brennholz	Sägewerkshalde
Schnittholz	0,4   0,3	0,1   –	0,3   –	0,2   –	–   0,7
Holzwerkstoffe	–   –	0,6   0,3	0,3   –	0,1   0,1	–   0,6
Papier	–   –	0,1   –	0,6   0,25	0,3   0,25	–   0,5
Holz-Brennstoff	–   –	–   –	–   –	–   0,9	1,0   –

\* die Parameter werden für Produktionssysteme sowohl für eine hohe (1. Wert) als auch niedrige Prozesseffizienz (2. Wert) angegeben

Auch das von Eggers (2002) beschriebene EFISCEN Holzproduktmodell basiert auf einer überarbeiteten Version des Modells von Karjalainen *et al.* (1994), in welchem das eingeschlagene Holz auf die sechs gebildete Produktgruppen 1) *Brennholz* 2) *Chemischer* und 3) *mechanischer Zellstoff* 4) *Schnittholz* 5) *Furnier und Sperrholz* und 6) *Span- und Faserplatten* aufgeteilt und der darin enthaltene Kohlenstoff anschließend sieben Nutzungskategorien zugeordnet wird.

In einer Schweizer Studie zum CO<sub>2</sub>-Effekt der Schweizer Forst- und Holzwirtschaft werden die mit Hilfe des Waldbewirtschaftungsmodells MASSIMO ermittelten jährlich anfallenden Rohholzmengen an ein Produktmodell weitergegeben, welches daraus die Menge des Kohlenstoffzuflusses in den Produktspeicher berechnet (Werner *et al.* 2006, Taverna *et al.* 2007). Die Verteilung des Rohholzes und Abschätzung des in Produkten gespeicherten Kohlenstoffs basiert in diesem Modell auf Ökobilanzinformationen für konkrete Bauprodukte (u. a. Mehrschichtplatten, Brettschichtholz, hölzerne Deckenkonstruktion, Holzfaserdämmstoffplatten, 3-Schichtparkett, Türrahmen und Möbel aus Spanplatten) (Werner *et al.* 2006, S. 322). Entlang der Weiterverarbeitung des Rohholzes zu den einzelnen Produkten wird dabei ein Verschnitt von 36 % für den Schweizer Langzeitdurchschnitt unterstellt. Der Anteil der Produkte am Gesamtumsatz des Holzverbrauchs im Baubereich, in welchem die Produkte eingesetzt werden (Gebäudekonstruktion und Innenausbau), stammt aus Marktinformationen. Berücksichtigt wird in der Modellierung außerdem der Außenhandel von Holzprodukten, weshalb die entsprechenden Daten aus den Statistiken, welche im nachfolgenden Kapitel beschrieben werden, bei der Ermittlung des Produktspeichers Verwendung finden.

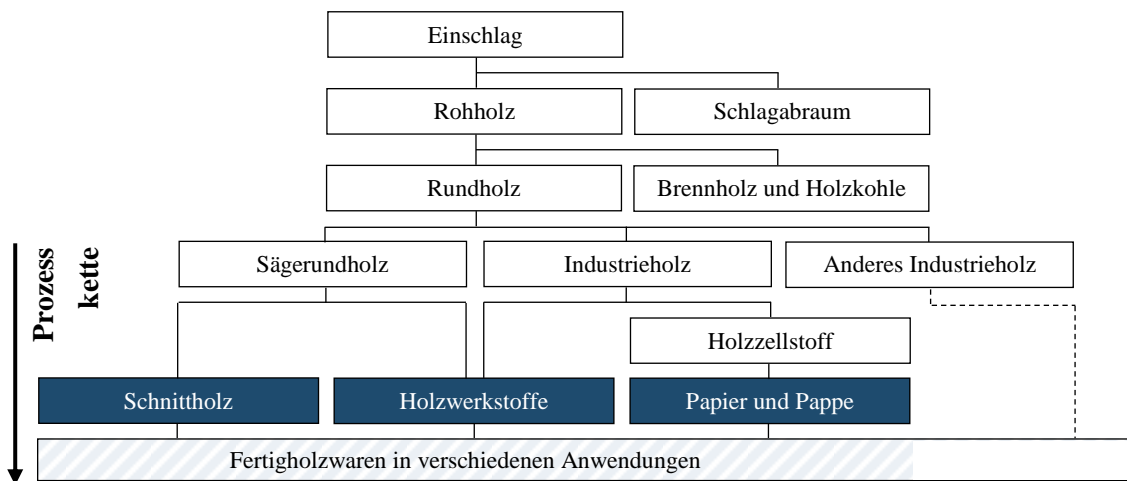
Profft *et al.* (2009a) beschränken sich in ihrer Modellierung der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten auf die Verteilung des Kohlenstoffs aus dem Holzeinschlag im Bundesland Thü-

ringen. Zunächst wird das verkaufte Rohholz der Jahre 2001 und 2002 nach Baumartengruppen in die Verkaufssortimente Brennholz, Industrieholz (lang), Industrieholz (kurz), Stammholz, Stammholzabschnitte, Parkett, Paletten, Schwellen und Masten und Ramppfähle aufgeteilt (vgl. Profft *et al.* 2009b). Diese Mengen werden anschließend zu verschiedenen Anteilen den sechs Produktgruppen 1) *Brenn- und Restholz* 2) *Papier/Zellstoff und Verpackung* 3) *Paletten und Masten* 4) *Möbel, Sperrholz und Holzwerkstoffe* 5) *Parkett* und 6) *Bauholz* zugeordnet, welchen jeweils eine durchschnittliche Produktlebensdauer unterstellt wird. Im Ergebnis der Untersuchung kann so der Kohlenstoffzufluss in den Produktspeicher in Abhängigkeit der bewirtschafteten Waldfläche mit einer bestimmten Baumartenverteilung quantifiziert werden. Aufgrund der Berechnung verschiedener Durchforstungsszenarien und einer im Ergebnis veränderten Zusammensetzung der Verkaufssortimente erörtern die Autoren zudem die Möglichkeit, mit einer Änderung des Bewirtschaftungsregimes die mittlere Speicherzeit in Holzprodukten zu beeinflussen.

### **2.2.2 Bestimmung des Kohlenstoffzuflusses in den Speicher über die Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren**

Anstatt die Mengen des Kohlenstoffs aus dem Holzeinschlag in Abhängigkeit von typischen Verteilungsmustern entlang der Verarbeitungskette nachzuverfolgen und auf unterschiedliche Produktgruppen aufzuteilen, bietet es sich an, für die Bestimmung des Kohlenstoffzuflusses in den Produktspeicher Daten aus Statistiken zur Produktion und Außenhandel von Waren und Gütern aus Holz zu verwenden. Diese Daten werden in fast allen Staaten von den nationalen Behörden auf Basis standardisierter Methoden und definierter Klassifikationen der Güter erhoben. Sie richten sich nach dem Harmonisierten System (*Harmonized Commodity Description and Coding System*, Abk. HS), welches von der Weltzollorganisation (*World Customs Organization*, Abk. WCO) spezifiziert wird, und liegen z. B. in der öffentlich zugänglichen Datenbank FAOSTAT für die meisten Staaten seit 1961 vor (FAO 2015). Eine Übersicht über die internationale Klassifikation von Holzprodukten ist in Abbildung 2-7 dargestellt.

Jedem hergestellten Holzprodukt ist, ebenso wie gehandelten Waren aus Holz, ein bestimmter Code zugeordnet, so dass sich auch die inländische Verfügbarkeit von Produkten, die gemeinhin als Verbrauch bezeichnet wird, rechnerisch aus der Produktion zuzüglich Importe und abzüglich Exporte für jedes Jahr ermitteln lässt (Abbildung 2-8).



**ABBILDUNG 2-7:** Vereinfachte Klassifikation von Holzprodukten auf Basis der FAO Definitionen (Rüter *et al.* 2014, S. 112)

Produktion		Import
Export	Verbrauch	

**ABBILDUNG 2-8:** Ermittlung des Verbrauchs über Daten zu Produktion und Außenhandel

In ihrer Analyse verschiedener Methoden bzw. Ansätze (vgl. Kap. 3.2.1) zur Ermittlung des Produktspeichers verwenden Winjum *et al.* (1998) die Daten der FAO und unterscheiden bei der Holzproduktion (Einschlag) die zwei Kategorien Rundholz (*industrial roundwood*) und Brennholz und Holzkohle (*fuelwood plus charcoal*). Auch bilden die Autoren die jährliche Produktion von Holzprodukten aus dem verfügbaren Rohholz erstmalig durch die Datensätze der vier Holzhalbwarengruppen 1) Schnittholz (*sawnwood*) 2) Holzwerkstoffe (*wood-based panels*) 3) Industrieholz (*other industrial roundwood*) und 4) Papier und Pappe (*paper and paperboard*) ab. Die Materialverluste entlang der Verarbeitungskette ergeben sich durch die rechnerische Differenz zwischen den Rohstoffen und den Produktkategorien 1) bis 4). Mit Hilfe der Daten zum Außenhandel werden die jährlichen Verbrauchsmengen und, unter Zuhilfenahme von Umrechnungsparametern, die darin enthaltenen Kohlenstoffmengen berechnet. Letztere entsprechen dem jährlichen Kohlenstoffzufluss in den Produktspeicher.

Auch Sikkema *et al.* (2001) verwenden die FAOSTAT Datenbank für ihre Analyse des Außenhandels mit Holzprodukten, um die Auswirkungen der Annahme unterschiedlicher Systemgrenzen bei Berechnung in Bezug auf die Kohlenstoffbilanz (vgl. Kap. 3.2.1) anhand dreier Fallbeispiele (Gabun, Schweden und Niederlande) aufzuzeigen.

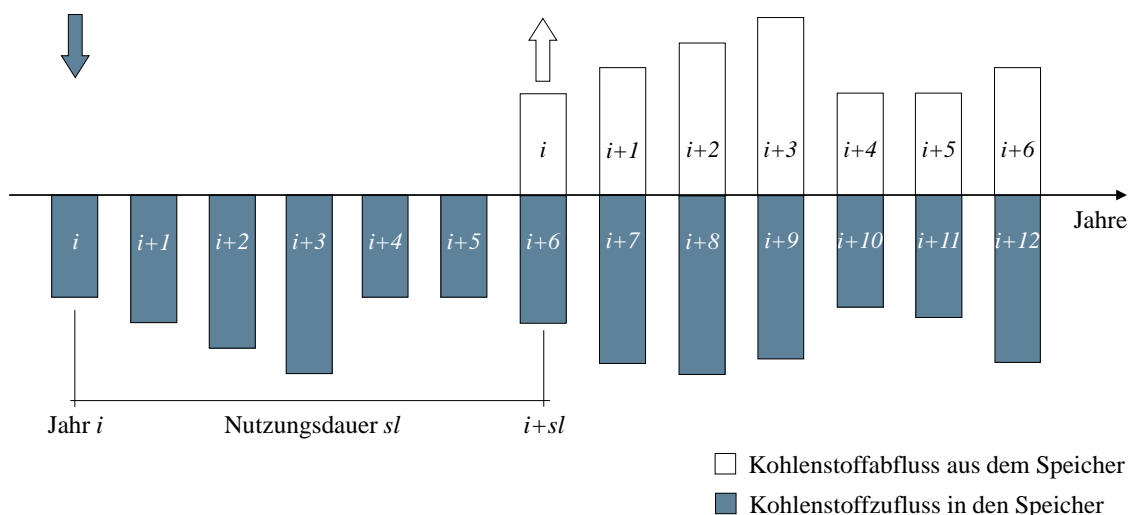
Das von Pingoud im Jahr 2002 vorgestellte Modell EXPHWP verwendet ebenfalls die jährlich vorliegenden Datensätze aus der FAO Statistik zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren, aus denen sich die in den Produktspeicher eingehenden Kohlenstoffmengen zahlreicher



Länder ermitteln lassen (Pingoud 2002). Es unterscheidet sowohl zwischen Massivholzprodukten (*solid wood products*), die die aggregierten Produktgruppen Schnittholz und Holzwerkstoffe umfassen, sowie Papier und Pappe, als auch zwischen dem Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten, die sich entweder in der stofflichen Nutzung oder in Deponien befinden. Der IPCC übernimmt die von Pingoud beschriebene Methode (vgl. Kap. 4.2), wonach der Kohlenstoffzufluss in den Produktspeicher, d. h. die Aktivitätsdaten, mit Hilfe von Statistiken zu Produktion und Außenhandel von Holz- und Papierhalbwaren zu ermitteln ist (IPCC 2003, S. 3.265; IPCC 2006, S. 12.15). In der Folge nehmen auch zahlreiche weitere Studien die Bestimmung des Kohlenstoffzuflusses auf Basis dieser Daten vor (z. B. Kohlmaier *et al.* 2007; Kohlmaier *et al.* 2008; Dias *et al.* 2007, S. 252; Werner *et al.* 2010).

### 2.2.3 Methoden zur Berechnung der zeitlichen Dynamik des Kohlenstoffabflusses aus dem Speicher

Der Abfluss von Kohlenstoff aus dem Speicher wird bei der nachfolgend beschriebenen Herangehensweise durch die Kombination der jährlich in den Speicher eingehenden Mengen an Holz bzw. Kohlenstoff (Aktivitätsdaten) mit der jeweiligen Verweilzeit des Kohlenstoffs in den Produkten ermittelt, welche im Falle der stofflichen Nutzung auch der Lebens- bzw. Nutzungsdauer der Holzwaren (Emissionsfaktoren) entspricht. Um mit Hilfe von Daten zu Verweildauern im Speicher Aussagen über aktuell stattfindende Kohlenstoffverluste des Speichers treffen zu können, muss der in der Vergangenheit liegende Zufluss von Kohlenstoff ermittelt werden (s. Abbildung 2-9). Diese Emissionen werden von Winjum *et al.* (1998) auch als geerbte Emissionen bezeichnet.



**ABBILDUNG 2-9:** Schema der zur Ermittlung der geerbten Emissionen mittels Datenzeitreihen über den historischen Kohlenstoffzufluss in den Produktspeicher

Dabei entspricht der mittels Nutzungsdauern berechnete Kohlenstoffabfluss aus dem Produktspeicher allerdings nicht zwangsläufig einer tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Emission, die durch Oxidation des Kohlenstoffs in die Atmosphäre entsteht. Im Sinne der in Kapitel 1.1.3 geschilderten Vorgehensweise, die Netto-Emissionen des Gesamtsystems auf Basis der Änderungen einzelner Speicher zu ermitteln, bedeuten die geerbten Emissionen lediglich den Verlust von Kohlenstoff aus dem betrachteten Speicher. So besteht z. B. die Möglichkeit, dass ein Teil der Produkte nach ihrer stofflichen Nutzung in Deponien entsorgt wird und dort den enthaltenen Kohlenstoff weiter bindet: der Kohlenstoff verlässt somit den Speicher „Holzprodukte in Nutzung“ und wird in einen Speicher „Holz in Deponien“ überführt (vgl. Abbildung 1-4). Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, basiert die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Wirkung der Forst-Holz-Kette vieler Modelle allerdings nicht auf einer separaten Betrachtung der jeweiligen Speicher und ihrer Größenänderungen über die Zeit (vgl. Kap. 1.1.3). Vielmehr werden die Kohlenstoffabgänge aus den Wald- und Holzspeichern in diesen Stoffstrommodellen der Senkenwirkung des Waldes gegenübergestellt, die über Waldwachstumskurven modelliert wird. In jedem Fall aber ist entscheidend, dass sich der Speicher am Anfang des Betrachtungszeitraums in einer Art Fließgleichgewicht befindet: um die aktuellen Kohlenstoffabflüsse in ihrer Gesamtheit zu erfassen, bzw. hierdurch die Netto-Emissionen auf Basis der Änderungen des Produktspeichers ermitteln zu können, müssen je nach Länge der unterstellten Nutzungsdauern oder den verwendeten Zerfallsfunktionen entsprechende historische Zeitreihen vorliegen. Für die Jahre in der Vergangenheit, in denen z. B. keine Statistiken über Holzprodukte verfügbar sind, müssen Annahmen über den historischen Kohlenstoffzufluss in den Produktspeicher getroffen werden.

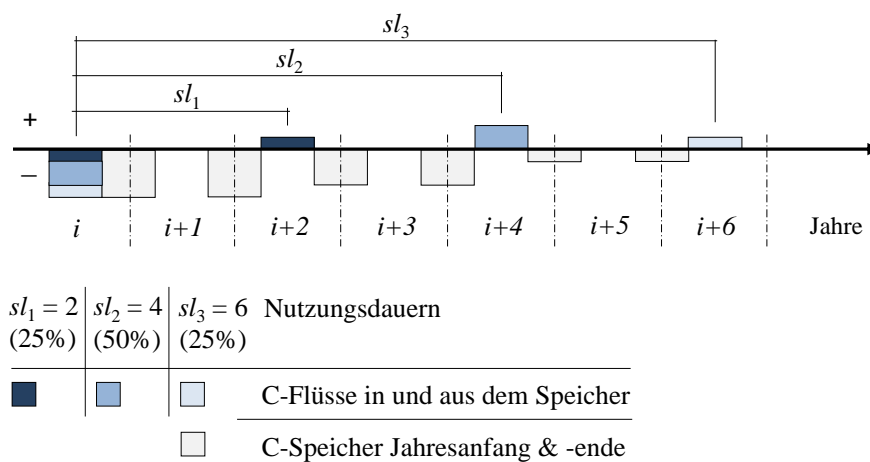
So schlägt Pingoud (2002) in seinem Berechnungsmodell EXPHWP vor, die Daten für Produktion und Außenhandel von Halbwaren für die Jahre vor 1961, die außerhalb der FAO Zeitreihe liegen (s. Kap. 2.2.2), auf Basis der durchschnittlichen Wachstumsrate der Rundholzproduktion bis ins Jahr 1900 zu extrapolieren. Da der Autor für die Berechnung des Kohlenstoffabflusses eine exponentielle Zerfallsfunktion verwendet (s. Kap. 2.2.3.5), reagiert die so ermittelte Speicheränderung umso weniger auf die ursprünglich angenommene Größe des Speichers, je länger der Berechnungszeitreihe bzw. je kürzer die unterstellte Nutzungsdauer der Produkte ist.

Folgende Funktionen und Berechnungsmethoden zur Beschreibung der zeitlichen Dynamik des Kohlenstoffabflusses aus dem Produktspeicher, die in der Literatur beschrieben sind, werden in den nachfolgenden Unterkapiteln vorgestellt:

- Kohortenrechnung
- Lineare Zerfallsfunktion
- Retentionskurven
- Logistische Zerfallsfunktion
- Exponentielle Zerfallsfunktion

### 2.2.3.1 Kohortenrechnung

Im Prinzip lässt sich die Höhe der jährlichen Netto-Emissionen mit Hilfe von einfachen Kohortenrechnungen abschätzen. Dabei wird der für ein bestimmtes Jahr angenommene Zufluss von Kohlenstoff in den Speicher als eine Einheit betrachtet, die nach Ablauf der unterstellten Nutzungsdauer als Emission von Kohlenstoff in die Atmosphäre wieder in der Bilanz auftaucht. Sofern genaue Informationen über die Mengenverteilung eines Produktes auf die verschiedenen Verwendungsbereiche mit ihren unterschiedlichen Nutzungsdauern vorliegen, kann diese Berechnung auch für die jeweiligen Anteile separat vorgenommen werden (vgl. Abbildung 2-10).



**ABBILDUNG 2-10:** Schema für die Ermittlung der um die jeweilige Nutzungsdauer der Produkte verzögerten Freisetzung von Kohlenstoff aus dem Produktspeicher

Die Bestimmung der Kohlenstoffabflüsse mittels Kohorten verwenden beispielsweise Werner *et al.* (2006, S. 323) in ihrer Studie über die Treibhausgasdynamik einer gesteigerten Holzverwendung in Gebäuden in der Schweiz. Zuvor wird der Produktspeicher in Holzbauprodukte, die in der Konstruktion des Gebäudes eingesetzt werden (Mehrschichtplatten, Brettschichtholzständer, hölzerne Deckenkonstruktion, Holzfaserdämmstoffplatten, etc.), und Produkte aus Holz, die im Innenausbau verwendet werden (3-Schichtparkett, Türrahmen und Möbel aus Spanplatten, etc.), unterteilt. Während den konstruktiven Elementen (Produkte im konstruktiven Bereich *K*) eine Nutzungsdauer  $sl = 80$  Jahre (Abk. für *service life*) unterstellt wird, verzögern letztere (Produkte im Ausbau *A*) die Freisetzung von Kohlenstoff in der Modellierung um durchschnittlich  $sl = 25$  Jahre.

In Anlehnung an eine von Werner *et al.* verwendete Funktion wird der Netto-Speichereffekt mit Hilfe der Gleichung 1 beschrieben. Um, wie im vorherigen Kapitel 2.2.2 beschrieben, die geerbten Emissionen bzw. die Höhe des aktuellen Holzspeichers erfassen zu können, muss die Modellierung so lange vor dem Beginn des betrachteten Bilanzierungszeitpunktes beginnen, wie die längste unterstellte Nutzungsdauer in der Modellierung verwendet wird.

$$\Delta C(i) = \sum_K C_K(i) + \sum_A C_A(i) - \left[ \sum_K C_K(i-80) + \sum_A C_A(i-25) \right] \quad (1)$$

Wobei:

$\Delta C(i)$  = Nettospeichereffekt im Jahr  $i$

$C_K$  und  $C_A$  = gespeicherter Kohlenstoff in Produkten (K und A) welche in einem Jahr  $i$  verbraucht werden

Der kumulierte Speichereffekt, d. h. der Nettoeffekt  $C_{NETTO}$  bis zum Jahr  $i$  ergibt sich damit aus der Summe der Speichereffekte aus den Vorjahren inklusive des Jahres  $i$  (Gleichung 2).

$$C_{NETTO} = \sum_{i=0}^i C_i \quad (2)$$

### 2.2.3.2 Lineare Zerfallsfunktion

Bei dieser Methode wird angenommen, dass sich die ursprünglich im Produktspeicher enthaltene Holzmenge jedes Jahr um einen bestimmten Anteil bzw. eine definierte Menge reduziert. Im Ergebnis resultiert diese Annahme in einem linearen Zerfallsmuster. Diese konstanten Zerfallsanteile stellen dabei den Kehrwert der maximalen Produktnutzungsdauer  $sl_{MAX}$  bzw. der Zeit dar, bis der gesamte in den Produkten enthaltene Kohlenstoff oxidiert ist.

Winjum *et al.* (1998) verwenden für ihre Untersuchung die in Tabelle 2-8 abgebildeten Zerfallsmengen für Holzprodukte. Die geerbten Emissionen aus Produkten vor dem Jahr 1961 (dem ersten Jahr des FAO Datenzeitreihe) werden als gering eingeschätzt und nicht mit eingerechnet.

**TABELLE 2-8:** Jährliche Oxidationsanteile zur Berechnung des linearen Zerfalls des Produktspeichers (Winjum *et al.* 1998, S. 276)

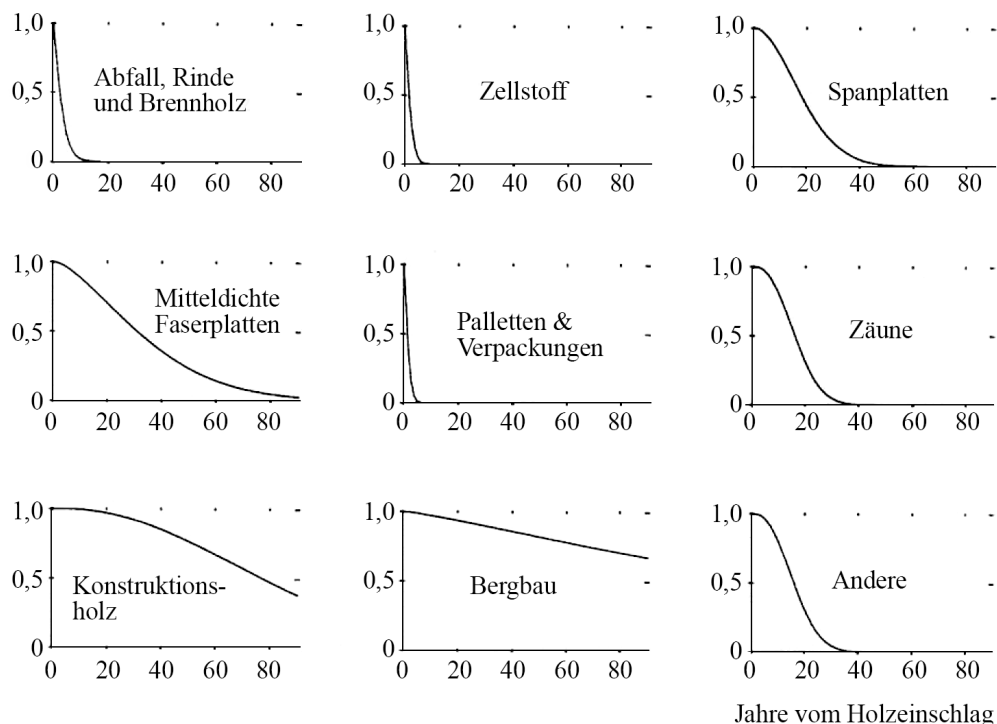
Produktkategorie	Waldregion	
	Boreal	Temperiert
Schnittholz	0,005	0,01
Holzwerkstoffe	0,010	0,02
Anderes Industrierundholz	0,020	0,04
Papier, Pappe und Kartonagen	0,005	0,01

Auch Ford-Robertson (2003, S. 13 ff.) beschreibt eine lineare Zerfallskurve und vergleicht sie u. a. mit einer exponentiellen Zerfallskurve. In seinen Berechnungen sind die geerbten Emissionen aus den Jahren vor 2005 nicht enthalten.

### 2.2.3.3 Retentionskurven

Retentionskurven stellen zusammengesetzte Kurven bzw. Funktionen dar, die es erlauben, den für die jeweils definierte Produktgruppe wahrscheinlichsten Zerfall bzw. Kohlenstoffabgang für einen definierten Lebenszyklusabschnitt zu verwenden. So werden die Kohlenstoffabgänge bestimmter langlebiger Fertigwaren, wie z. B. Dachbalken, in den ersten Jahren ihrer Verwendung eher gering sein, was wiederum z. B. mit einer linearen Funktion beschrieben werden kann; gegen Ende der durchschnittlichen Verwendungsdauer dieser Produkte werden die Abgänge aus dem Produktspeicher aber kontinuierlich ansteigen, was durch die Verwendung einer konvexen Kurve besser beschrieben wird. Retentionskurven können somit an die unterschiedlichen Produktgruppen oder Verwendungsbereiche von Holz angepasst werden und das vermeintliche Nutzungsmuster der jeweiligen Produktgruppe bestmöglich widerspiegeln.

Bereits im Jahr 1989 beschreiben Thompson und Matthews den Anteil des im Produktspeicher zurückgehaltenen Kohlenstoffs in Abhängigkeit von der Produktlebensdauer mit Hilfe sogenannter Retentionskurven (Abbildung 2-11). Der Zeitpunkt, an welchem die meisten Einzelprodukte der verschiedenen Produktgruppen aus der Nutzung ausscheiden, wird für die in Abbildung 2-11 enthaltenen Kurven durch einen Modalwert der Kohlenstoffverweildauer ( $sl_{MODAL}$ ) beschrieben (Tabelle 2-9).



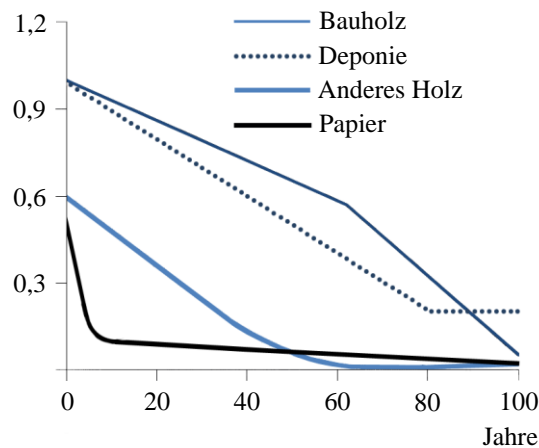
**ABBILDUNG 2-11:** Retentionskurven für verschiedene Holzprodukte und ihre Verwendungsbereiche (Thompson und Matthews 1989b, S. 3)

**TABELLE 2-9:** Unterstellte Modalwerte der Kohlenstoffverweildauer und Zeitdauer bis 5 % des Kohlenstoffs im Speicher übrig sind (in Klammern), für verschiedene Produkte nach Thompson und Matthews (1989a, S. 21) [in Jahren]

Nutzung in Produkten	Nadelrundholz		Laubrundholz	
	Fichte	Kiefer	Eiche	Birke
Abfall, Rinde, Brennholz	1 (8)	1 (8)	2 (18)	1 (6)
Zellstoff	1 (5)	1 (5)	1 (5)	1 (5)
Spanplatten	15 (40)	15 (40)	15 (40)	15 (40)
Mitteldichte Faserplatten (MDF)	20 (80)	–	–	–
Paletten & Verpackungen	1 (4)	2 (5)	2 (5)	1 (5)
Zäune	15 (30)	20 (40)	40 (80)	40 (80)
Konstruktionsholz (Schnittholz)	70 (150)	100 (200)	150 (300)	5 (40)
Bergbau	40 ( )	40 ( )	40 ( )	10 ( )
Andere	15 (30)	20 (40)	40 (80)	10 (20)

Bateman und Lovett (2000, S. 304) verwenden ebenfalls die von Thompson und Matthews angegebenen Modalwerte in ihrer Abschätzung der Kohlenstoffspeicherung in Laub- und Nadelbäumen, Holzprodukten und Waldböden in Wales.

Die von Apps *et al.* (1999) und Hennigar *et al.* (2008) in den Modellen CBM-FPS und Carbon-Object-Tracker verwendeten Retentionskurven sind in Abbildung 2-12 dargestellt. Allerdings sind deren zugrundeliegenden Funktionen aus der Literatur nicht ersichtlich. Auffallend ist, dass die Kohlenstoffmenge in Deponien ab einer Verweildauer von 80 Jahren konstant bleibt, d. h. keine Kohlenstoffabgänge aus diesem Teil des Speichers mehr unterstellt werden.



**ABBILDUNG 2-12:** In den Modellen CBM-FPS und Carbon-Object-Tracker verwendete Retentionskurven zur Ermittlung des Anteils des im Speicher verbleibenden Kohlenstoffs (Apps *et al.* 1999, S. 29; Hennigar *et al.* 2008, S. 789)

Auch Row und Phelps (1996) berechnen die Oxidationsrate und die Menge des im Speicher zurückgehaltenen Kohlenstoffs in dem Modell HARVCARB mit Hilfe von Retentionskurven, die aus drei Funktionen zusammengesetzt sind (vgl. Modellbeschreibung, S. 40). Sie beschreiben das Muster des Kohlenstoffabflusses aus dem Speicher in Abhängigkeit der fortschreitenden Verweildauer  $t$  des Kohlenstoffs in zwölf Verwendungsbereichen und dem unterstellten Median der Nutzungsdauer  $sl_{MEDIAN}$  (s. Tabelle 2-10). Der Median beschreibt den Zeitpunkt, an dem die Hälfte des Kohlenstoffs wieder aus dem Speicher abgeflossen ist, d. h. die Hälfte der Produkte nicht mehr stofflich genutzt werden. Sofern die Verweildauer  $t$  die erwartete Nutzungsdauer überschreitet, gilt Gleichung 3. Für die Verweilzeit zwischen  $0,5 \cdot sl_{MEDIAN}$  und  $sl_{MEDIAN}$  beschreibt Gleichung 4 den Kurvenverlauf, die allerdings, so wie sie in der Originalquelle angegeben ist, nicht stimmen kann. Bei einer noch kürzeren Verweildauer wird die Kohlenstoffmenge zwischen dem Jahr eins und der im Speicher befindlichen Menge bei  $t = sl/2$  interpoliert.

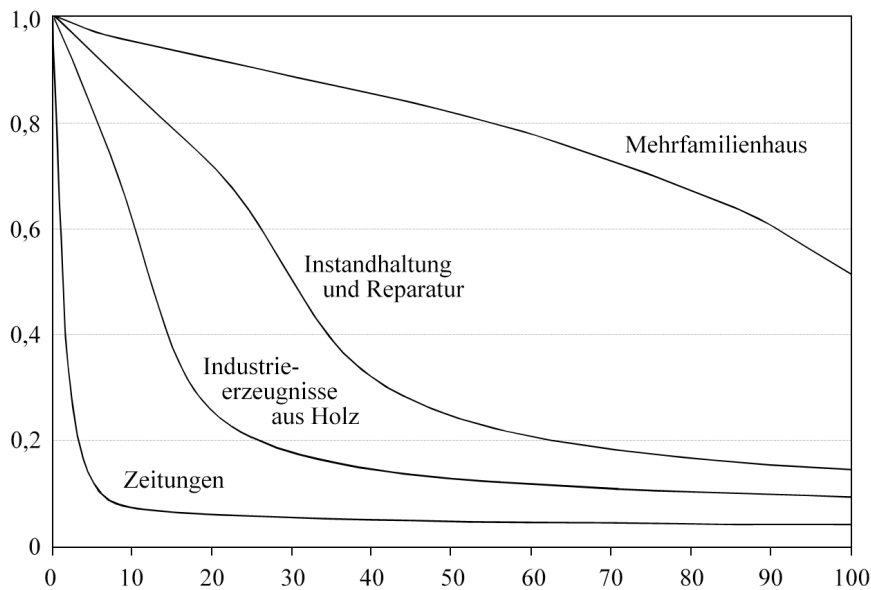
$$C(t) = 0,5 / (1 + 2 * (\ln(t) - \ln(sl_{MEDIAN}))) \tag{3}$$

$$C(t) = (1 - 0,5) / (1 + 2 * \ln(sl_{MEDIAN})) \tag{4}$$

**TABELLE 2-10:** Median der zu erwartenden Nutzungsdauer von Holz in verschiedenen Verwendungsbereichen im Modell HARVCARB (Row und Phelps 1996, S. 37) [in Jahren]

Produktkategorie	$sl_{MEDIAN}$	Produktkategorie	$sl_{MEDIAN}$
Einfamilienhaus	200	Transportverpackungen	6
Mehrfamilienhaus	150	Andere Verwendungen	30
Nicht-Wohngebäude	60	Druck- und Schreiberzeugnisse	6
Instandhaltung und Reparatur	30	Zeitungen	1
Mobile Häuser ( <i>mobile homes</i> )	12	Hygienepapier	1
Erzeugnisse aus Holz	12	Verpackungspapier	1

Für die in Deponien eingehenden Kohlenstoffmengen am Ende des Lebenszyklus der genutzten Produkte aus Nadelholz wird unterstellt, dass innerhalb eines Zeitraums von 100 Jahren nur knapp über 6 % des Kohlenstoffs wieder in die Atmosphäre oxidieren, weshalb die in Abbildung 2-13 dargestellten zusammengesetzten Zerfallskurven stark abflachen (Row und Phelps 1996, S. 40, 54).



**ABBILDUNG 2-13:** Zusammengesetzte Zerfallskurven zur Bestimmung des im Speicher verbleibenden Anteils an Kohlenstoff (Row und Phelps 1996, S. 39) [in Jahren]

Skog und Nicholson (1998) verwenden für die Ermittlung der Kohlenstoffspeicherwirkung in den Vereinigten Staaten neben der Verteilungsstruktur des Kohlenstoffs auch die von Row und Phelps (1996) beschriebenen Gleichungen zur Ermittlung des im Produktspeicher verbleibenden Kohlenstoffanteils. Allerdings unterscheiden sich die von den Autoren angesetzten Mediane der erwarteten Nutzungsdauer, die hier als Halbwertszeit  $hl$  angegeben wird (Tabelle 2-11), deutlich von den von Row und Phelps angegebenen Werten (vgl. Tabelle 2-10).

**TABELLE 2-11:** Halbwertszeit der erwarteten Nutzungsdauer von Holz in verschiedenen Verwendungsbereichen im Modell WOODCARB (Skog und Nicholson 1998, S. 78)

Produktkategorie	$hl$	Produktkategorie	$hl$
Einfamilienhaus (vor 1980)	80	Holzverarbeitende Industrie	12
Einfamilienhaus (nach 1980)	100	Möbel	30
Mehrfamilienhaus	70	Eisenbahnschwellen	30
Mobile Häuser ( <i>mobile homes</i> )	20	Druckerzeugnisse	6
Nicht-Wohngebäude	67	Anderes Papier	1
Paletten	6		

Auch in Bezug auf die auftretenden Emissionen von Holz in Deponien wird stärker differenziert. Abhängig von den Ligninanteilen der in Deponien verbrachten Holzprodukte (Zeitungs-papier mit bis zu 27 %) oxidiert nur ein geringer Teil des Kohlenstoffs unter anaeroben Verhältnissen. So unterstellen die Autoren in ihrem Modell in Anlehnung an Micales und Skog



(1997, S. 153), dass nur 3,2 % des Kohlenstoffes in Massivholz jemals zu CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> (im Verhältnis von 40 % zu 60 %) oxidiert werden, während sich der Anteil des wieder in die Atmosphäre gelangenden Kohlenstoffes in Papier auf 16 % (Zeitungen) bis 38 % (Büropapiere) beläuft. Es wird zudem angenommen, dass 50 % der anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb der ersten drei Jahre, und der CH<sub>4</sub>-Emissionen innerhalb von 20 Jahren stattfinden. Auch unterscheidet das Modell HARVCARB auf Basis vorliegender Inventurdaten über das Alter des Gebäudebestandes in den Vereinigten Staaten zwischen älteren Einfamilienhäusern und Gebäuden, die nach 1950 errichtet wurden. Danach beträgt der Median der Lebensdauer von vor 1950 gebauten Häusern 80 Jahre, während er für Gebäude jüngeren Datums bei 200 Jahren liegen soll (Row und Phelps 1996, S. 38). Für Häuser mit einer unterstellten Halbwertszeit von mehr als 100 Jahren, die seit 1950 gebaut worden sind, verwenden die Autoren anstelle zusammengesetzter Kurven eine logistische Zerfallsfunktion.

#### 2.2.3.4 Logistische Zerfallsfunktion

Für die Abschätzung des Verlustes an Kohlenstoff aus dem Speicher in langlebigen Gebäuden ab dem Baujahr 1950 schlagen Row und Phelps (1996, S. 38) nachfolgende Gleichung 5 vor:

$$C(i) = 1 - \frac{1}{(1 + e^{\alpha+bi})} \quad (5)$$

Wobei:

$C(i)$  = Produktspeicher im Jahr  $i$

$\alpha$  = 2,655 für Einfamilienhäuser und 2,85 für Mehrfamilienhäuser

$b$  = -5,31 für Einfamilienhäuser und -5,70 für Mehrfamilienhäuser

Ursprünglich hatten Row und Phelps (1990) eine logistische Zerfallsfunktion in Form der Gleichung 6 vorgeschlagen, die auch Karjalainen *et al.* (1994, S. 71) in ihrem Modell verwenden, um den jährlichen Kohlenstoffabfluss aus dem Speicher zu beschreiben.

$$C(i) = A - \frac{A}{(1 + B \cdot e^{-\alpha i})} \quad (6)$$

Wobei:

$C(i)$  = Produktspeicher im Jahr  $i$

$A$ ,  $B$  und  $e$  = Parameter (dimensionslos),  $\alpha$  = Kehrwert der Halbwertszeit  $hl$ , die sich aus  $\ln 2 \cdot sl$  berechnet ( $sl$  = durchschnittliche Nutzungsdauer)

Folgende Funktionsparameter werden für die in Abbildung 2-14 dargestellten Kurven verwendet:

$$A = 120 \text{ und } B = 5$$

kurzlebige HWP:  $\alpha = 0,5$ ,  $hl = 2,77$  und  $sl = 4$  Jahre

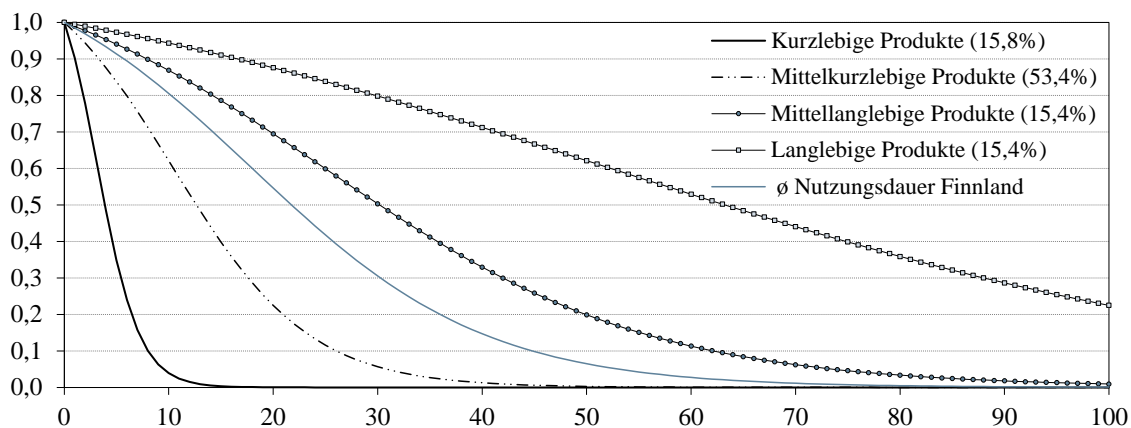
mittelkurzlebige HWP:  $\alpha = 0,15$ ,  $hl = 9,01$  und  $sl = 13$  Jahre

mittellanglebige HWP:  $\alpha = 0,065$ ;  $hl = 21,49$  und  $sl = 31$  Jahre

langlebige HWP:  $\alpha = 0,03$ ;  $hl = 45,05$  und  $sl = 65$  Jahre

In Abhängigkeit der diesen Kategorien unterstellten durchschnittlichen Nutzungsdauern werden mit Hilfe dieser Funktionsgleichung die vier Zerfallskurven berechnet (Abbildung 2-14).

Vor der Berechnung des Zerfalls werden die in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmengen, wie auf Seite 43 beschrieben, über den Holzeinschlag für Finnland ermittelt, anschließend wird der Kohlenstoff entlang des Stoffstroms nach einem festgelegten Verhältnis auf vier Speicherkategorien aufgeteilt (Tabelle 2-12), denen eine bestimmte durchschnittliche Nutzungsdauer zugeordnet ist (Tabelle 2-13).



**ABBILDUNG 2-14:** Logistische Zerfallskurven für Holzprodukte unterschiedlicher Nutzungsdauer zur Berechnung des Anteils der im Speicher verbleibenden Produkte (nach Karjalainen *et al.* 1994)

**TABELLE 2-12:** Verteilung der Produktgruppen auf Nutzungsdauerkategorien im finnischen HWP-Modell (nach Karjalainen *et al.* 1994, S. 71)

Kategorien Nutzungsdauer	Schnittholz	Sperrholz	Zellstoff		Brennholz
			mechanisch	chemisch	
Lang (65 Jahre)	0,5	0,5	–	–	–
Mittellang (31 Jahre)	0,5	0,5	–	–	–
Mittelkurz (13 Jahre)	–	–	0,66	0,86	–
Kurz (4 Jahre)	–	–	0,34	0,14	1,0

Im Zuge einer von Pingoud *et al.* (2001, S. 101) durchgeführten Studie wurden die ursprünglich von Karjalainen *et al.* (1994) vorgeschlagenen Nutzungsdauern mit Hilfe von Inventurdaten zur Holzverwendung im finnischen Gebäudebereich der Jahre 1980 und 1990 für Finnland kalibriert und für die beiden langlebigen Nutzungskategorien reduziert (Tabelle 2-13).

**TABELLE 2-13:** Nutzungskategorien mit zugewiesenen Nutzungsdauern bei der Verwendung der logistischen Zerfallsgleichung (6) im Vergleich verschiedener Autoren [in Jahren]

Nutzungskategorien	Eggers	Zum Vergleich	Karjalainen <i>et al.</i>	Pingoud <i>et al.</i>
Langlebige Baumaterialien	50	Lang	65	53,8
Andere Baumaterialien Einrichtungsgegenstände	16	Mittellang	31	17,6
Langlebige Papierprodukte	4	Mittelkurz	13	–
Schalungen, Gerüste, etc. Verpackungsmaterialien Kurzlebige Papierprodukte	1	Kurz	4	–

Auch Eggers (2002) verwendet in dem EFISCEN Holzproduktmodell die von Karjalainen *et al.* (1994) vorgeschlagene logistische Zerfallsfunktion. Zuvor wird der Kohlenstoff aus dem Holzeinschlag auf die Produktgruppen 1) *Brennholz*, Industrieholz für 2) *chemischen* und 3) *mechanischen Zellstoff* 4) *Schnittholz* 5) *Sperrholz und Furnier* und 6) *Span- und Faserplatten* aufgeteilt und sieben Nutzungskategorien zugeordnet, für welche die in Tabelle 2-13 angegebenen Nutzungsdauern unterstellt werden. Über den verwendeten Verteilungsschlüssel werden allerdings, anders als bei Karjalainen *et al.*, keine Angaben gemacht.

In dem Produktmodul des Modells CO2FIX V2.0 von Nabuurs *et al.* (2002), welches eine Weiterentwicklung des Holzproduktmodells von Karjalainen *et al.* (1994) darstellt, wurden die logistischen Zerfallskurven durch Exponentialfunktionen ersetzt, die nachfolgend beschrieben werden.

### 2.2.3.5 Exponentielle Zerfallsfunktion

Im Gegensatz zu einem linearen Zerfallsmuster, bei dem jedes Jahr immer die gleiche festgelegte Menge der ursprünglichen Produkte bzw. an Kohlenstoff aus dem ursprünglichen Speicher entweicht (vgl. Kap. 2.2.3.2), kennzeichnet ein exponentielles Zerfallsmuster eine gleichbleibende Rate des Kohlenstoffabflusses gegenüber der aktuell in Nutzung befindlichen Produktmenge bzw. Speicherhöhe.

So berechnen Burschel *et al.* (1993a, S. 28) in Anlehnung an Melillo *et al.* (1988) die aus dem Speicher abfließenden Kohlenstoffmengen bereits mittels einer gleichbleibenden jährlichen Verlustrate.

Auch Schlamadinger und Marland (1996) ermitteln das Zerfallsmuster des Holzspeichers für kurz- und langlebige Produkte in dem Modell GORCAM mit Hilfe einer exponentiellen Funktion (s. Gleichung 7, modifiziert).

$$C(i) = \frac{C(i-1)}{e^k} \cdot (1 - f_{ENERGY}) \quad (7)$$

Wobei:

$C(i-1)$  = Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten im Vorjahr  $i-1$

$k$  = Zerfallsrate der Produkte aus dem Speicher, angegeben als Kehrwert der Nutzungsdauer  $sl$  der Produkte ( $k = 1 / sl$ ).

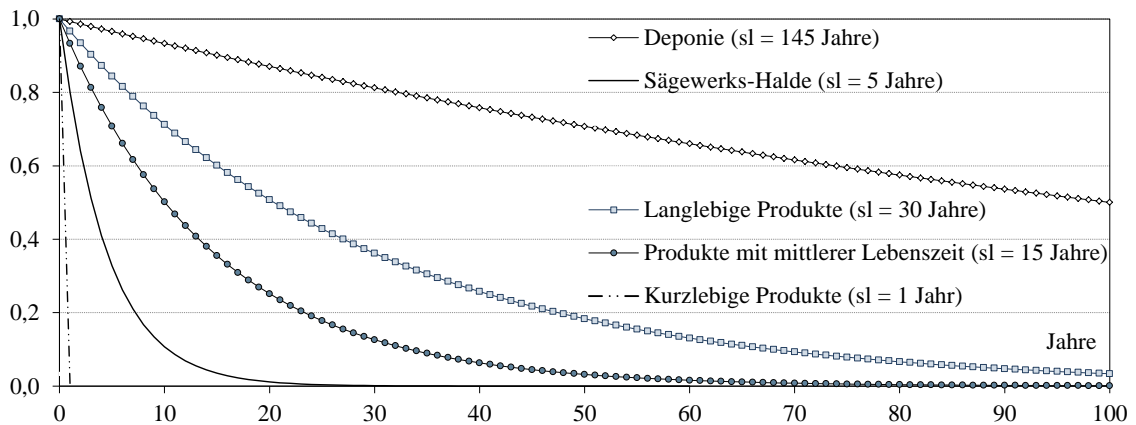
$f_{ENERGY}$  = Anteil des Kohlenstoffs in Produkten, der energetisch verwendet wird

In ihrer Simulation unterschiedlicher Waldbewirtschaftungsszenarien nehmen sie für langlebige Produkte eine durchschnittliche Nutzungsdauer  $sl$  von 30 bzw. 60 Jahren und für kurzlebige Produkte 10 bzw. 20 Jahre an. Die Zerfallsrate  $k$  errechnet sich aus dem Kehrwert der Nutzungsdauer. Von der jedes Jahr im Speicher verbleibenden Kohlenstoffmenge wird zudem noch ein festgesetzter Kohlenstoffanteil abgezogen, der mit einer energetischen Nutzung der Produkte in diesem Jahr verloren geht ( $f_{ENERGY}$ ). Dieser Anteil beläuft sich noch einmal auf 15 bzw. 30 % für jedes Jahr. Die Menge des für energetische Zwecke verwendeten Holzes aus dem Speicher wird in der Modellierung separat berücksichtigt, da die Studie den Versuch unternimmt, neben der Speicherwirkung auch energetische Substitutionseffekte zu quantifizieren.

Ebenfalls ein exponentielles Zerfallsmuster wird in dem Modell CO2FIX V2.0 unterstellt (Nabuurs *et al.* 2002, S. 23). Der Kohlenstoffabfluss einer Produktgruppe wird ausschließlich über die ihr zugeordnete Nutzungsdauer definiert, deren Kehrwert den jährlichen Anteil des Kohlenstoffabflusses in dem Modell bestimmt. In Tabelle 2-14 sind die verwendeten Allokationsparameter dargestellt, zu welchem Anteil die Produkte den Speicherkategorien und somit den entsprechenden Lebensdauern zugewiesen werden.

**TABELLE 2-14:** Aufteilung der Produkte auf Nutzungsdauerkategorien im Modell CO2FIX V2.0

Produkt	Langzeitspeicher	Mittelfristspeicher	Kurzzeitspeicher
Schnittholz	0,5	0,25	0,25
Holzwerkstoffe	0,3	0,5	0,2
Papier	0,01	0,1	0,89



**ABBILDUNG 2-15:** Berechnung des Anteils der im Speicher verbleibenden Produkte mittels einer exponentiellen Zerfallskurve 1. Ordnung im Modell CO2FIX V2.0 (nach Nabuurs *et al.* 2002, S.23, 37)

Der in dem Modell voreingestellte Defaultwert für die Verweilzeit der Produkte im Langzeitspeicher liegt bei 30 Jahren, für den Mittelfristspeicher bei 15 Jahren und für Produkte im Kurzzeitspeicher bei einem Jahr (vgl. Abbildung 2-6), woraus sich die in Abbildung 2-15 dargestellten Zerfallskurven errechnen. Für den Zeitraum nach der stofflichen Nutzung wird außerdem unterstellt, dass ein Teil des Kohlenstoffs deponiert wird (s. Tabelle 2-15) und dort mit einer Verweilzeit von 145 Jahren gespeichert bleibt. Zudem besteht die Möglichkeit den Kohlenstoff im Industrierestholz entlang der Verarbeitungskette im Speicher Sägewerks-Halde zu verbuchen (vgl. Abbildung 2-15). Die mit fünf Jahren angegebene Speicherdauer ist in dem Modell jedoch standardmäßig auf null gesetzt.

**TABELLE 2-15:** Verteilung des Kohlenstoffs nach der stofflichen Nutzung im Modell CO2FIX V2.0

Speicher der Produkte in Nutzung	Recycling	Energie	Deponie
Langzeitspeicher	0,3	0,1	0,6
Mittelfristspeicher	0,1	0,1	0,8
Kurzzeitspeicher	0,4	0,5	0,1

Pingoud *et al.* (2001, S. 99) berechnen den Abfluss aus im Holz gespeichertem Kohlenstoff ebenfalls mittels einer einfachen Exponentialfunktion 1. Ordnung (*first order decay function*). Dies bedeutet, dass der zeitliche Verlauf des Zerfalls unabhängig ist von der Anfangshöhe der in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmenge. Im Zuge der Weiterentwicklung des EXPHWP Modells, welches im Tabellenkalkulationsprogramm MS EXCEL implementiert wurde, schlägt Pingoud (2002) zunächst die Anwendung des Impliziten Euler-Verfahrens (*implicit Euler method*) zur Ermittlung der jährlichen Speicheränderung vor, welches von Burden und Faires (2001) beschrieben und im Folgenden kurz erläutert wird. Bei dieser Berechnungsweise wird die Differenz des Kohlenstoffzu- und -abflusses in Gleichung 8 ( $-f_{OUT} + f_{IN}$ ), also die Spei-

cheränderung  $dC$  für einen bestimmten Zeitraum  $dt$ , durch den Diskretisierungsschritt  $i + 1$  näherungsweise ermittelt.

$$\frac{dC}{dt} = f_{IN} - f_{OUT} \quad C(t_0) = C_0 \quad (8)$$

Wobei:

$C(t)$  = Kohlenstoffspeicher als Funktion der Zeit  $t$ , dessen ursprünglicher Wert  $C_0$  zum Zeitpunkt  $t_0$  ist

$f_{IN}$  = Kohlenstoffzufluss in den Speicher,  $Inflow(t)$

$f_{OUT}$  = Kohlenstoffmenge, die aus dem Speicher abfließt, auch  $k \cdot C(t)$ , wobei  $k$  die Zerfallsrate der Produkte aus dem Speicher ist ( $k$  ist der Kehrwert der durchschnittlichen Nutzungsdauer der Produkte  $sl$ ).

$C(i + 1)$  ist dabei also nur implizit gegeben (die Nutzung des Zeitschrittes  $i$  würde laut dem Autor zu dem Expliziten Euler-Verfahren führen). Da die aus dem Speicher abfließende Kohlenstoffmenge  $f_{OUT}$  auch durch  $k \cdot C(t)$  und die zufließende Menge  $f_{IN}$  durch  $Inflow(t)$  beschrieben wird (vgl. Funktionsgleichung 8), lautet die Differenznäherung:

$$\frac{C(i + 1) - C(i)}{\Delta t} = -k \cdot C(i + 1) + Inflow(i + 1) \quad (9)$$

Sofern  $\Delta t = 1$  Jahr ist, folgt daraus:

$$C(i + 1) = \frac{1}{(1 + k)} \cdot (C(i) + Inflow(i + 1)) \quad (10)$$

Zu ihrem Vorschlag, das Implizite Euler-Verfahren anzuwenden, schreiben Pingoud *et al.* (2003, S. 102):

“The method is stable even when average lifetime (inverse of decay rate) is less than the time step of 1 year. We may be in numerical troubles with  $k > 1$ , [when using] explicit forward Euler function. [...] More advanced numerical integration methods could of course be used [...], but we would maybe lose something in clarity. Some simple, robust and illustrative methods appear to be good enough, bearing in mind the impreciseness of the basic data.”

Die vorliegende Methode zur rekursiven Ermittlung der Netto-Emissionen aus Holzprodukten ist aufgrund des Diskretisierungsschrittes von einem Jahr ( $i + 1$ ) auch mit jährlich vorliegenden Daten über den Kohlenstoffzufluss in den Produktspeicher zu kombinieren. Pingoud verwendet

hierfür die FAO Statistiken zu Produktion und Außenhandel von Holz- und Papierhalbwaren und ordnet den aggregierten Produktgruppen 1) *Massivholzprodukte* (bestehend aus Schnittholz und Holzwerkstoffen) und 2) *Papierprodukte* Zerfallsraten zu, die bestimmten Nutzungsdauern entsprechen (Tabelle 2-16).

**TABELLE 2-16:** Im Modell EXPHWP ursprünglich zugewiesene Zerfallsraten mit sich daraus ergebenden Zeitparametern (Pingoud 2002) [in Jahren]

Produktgruppe	Zerfallsrate $k$	Ø Nutzungsdauer $sl^*$	Halbwertszeit $hl^{**}$	5 % übrig
Massivholzprodukte	0,0330	30,3	21,0	91
Papier, Pappe, Kartonagen	1	1	0,69	3

\* Die Nutzungsdauer wird als Kehrwert der jährlichen Zerfallsrate ( $1/k$ ) definiert. \*\*Die Halbwertszeit  $hl$  (half-life) ist die Anzahl der Jahre, die es braucht, um die Hälfte des Materials zu verlieren, welches sich gegenwärtig im Speicher befindet.

Da sich bei einer Zerfallsrate von  $0,033 \text{ a}^{-1}$  auch nach 91 Jahren noch 5 % des Kohlenstoffs im Speicher befinden (bzw. 1 % nach 140 Jahren), die im weiteren Zeitverlauf abfließen, die Datensätze für die Berechnung des Kohlenstoffzuflusses im Fall der FAO Daten aber nur bis ins Jahr 1961 zurückreichen, werden die in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmengen von Pingoud unter Annahme einer exponentiellen Wachstumskurve auf Basis des Jahres 1961 bis ins Jahre 1900 extrapoliert, um die geerbten Emissionen bei der Abschätzung der Netto-Emissionen berechnen zu können (s. S. 49). Zwar schreiben Pingoud und Wagner (2006), dass die Kohlenstoffzuflüsse vor 1961 zum gegenwärtigen Zeitpunkt „weniger wichtig für die Fehlerfreiheit der Modellschätzungen“ seien, doch schlägt Pingoud in seinem Modell die Berechnung der geerbten Emissionen für die Jahre vor 1961 in Anlehnung an das Bevölkerungswachstum und die Rundholzproduktion zwischen den Jahren 1950 und 1961 auf Basis einer Wachstumsrate von  $0,0119$  bzw.  $0,02 \text{ a}^{-1}$  für Europa vor. 2003 wurde das Berechnungsverfahren vom IPCC in den *GPG-LULUCF* als Defaultmethode vorgeschlagen (vgl. Kap. 4.2) und in der Folge auch von weiteren Autoren angewendet (u. a. Dias *et al.* 2007; Kohlmaier *et al.* 2007, S. 210).

In der Annahme der Richtigkeit der Grundthese, dass ein exponentielles Zerfallsmuster in der Kombination mit Daten zu Holzhalbwaren den tatsächlich stattfindenden dynamischen Prozessen entspricht, stellen Pingoud und Wagner in 2006 eine „mathematisch exaktere und elegantere Lösung“ vor. In ihrer Veröffentlichung beschreiben sie die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen über den Zeitpunkt und die Verteilung des Zuflusses in den Kohlenstoffspeicher in Produkten, die sich in Nutzung und in Deponien befinden. Auch untersuchen sie die Auswirkungen der getrennten Berechnung von Teilen des Speichers, die vom Zerfall betroffen sind, und anderen Teilen, deren Kohlenstoff nicht zu einer bestimmten Zeit oxidiert. Vor allem bei einer Abschätzung der Zerfallsdynamik von organischem Kohlenstoff in Deponien ist Letzteres von Bedeutung.

Der Zufluss von in Holzwaren gespeichertem Kohlenstoff in den Produktespeicher innerhalb eines bestimmten Zeitraums ist von vielen Faktoren abhängig (z. B. Konjunkturzyklen), die auf nationaler Ebene schwierig zu bestimmen sind. Daher unterstellen die Autoren dem Holzproduktespeicher aus pragmatischen Gründen einen im Verlauf eines betrachteten Intervalls (hier: ein Jahr) durchgehend konstanten Zufluss an Kohlenstoff, indem die Kohlenstoffmenge des auf jährlicher Basis gegebenen Datensatzes durch das Zeitintervall geteilt wird. Somit erhält man eine durchschnittliche Rate des Zuflusses in einem Jahr. Das gleiche gilt für die Statistiken zu Holzhalbwaren: die Produktions- und Außenhandelsstatistik stellt die Daten erst am Jahresende zur Verfügung, obgleich die Holzwaren bereits im Verlauf des Jahres produziert worden sind bzw. der darin enthaltene Kohlenstoff in den Speicher eingegangen ist (vgl. Kap. 5.1.2.2). Während Gleichung 9 bei der Berechnung des Zerfalls also keinen Unterschied zwischen dem Kohlenstoff aus dem Vorjahr ( $C(i)$ ) und dem im aktuellen Jahr hinzugekommenen Kohlenstoff ( $Inflow(i+1)$ ) macht, differenziert die im Jahr 2006 veröffentlichte Gleichung 11 zwischen diesen beiden Teilmengen.

Diese explizite Funktionsgleichung von Pingoud und Wagner wurde bei der Erstellung der *2006 IPCC Guidelines* als Default-Methode für die Abschätzung der Netto-Emissionen festgelegt (vgl. Kap. 4.1; IPCC 2006, S. 12.11). Ihre mathematische Herleitung wird in Pingoud und Wagner (2006) detailliert beschrieben. Auf Basis der jährlichen Netto-Emissionen während des Jahres  $i$  lassen sich anschließend mit Hilfe der ermittelten Kohlenstoffspeicheränderungen berechnen (Gleichung 12).

$$C(i+1) = e^{-k} \cdot C(i) + \left[ \frac{(1 - e^{-k})}{k} \right] \cdot Inflow(i) \quad (11)$$

Wobei:

$i$  = Jahr (beginnend mit 1900)

$C(i)$  = Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten zu Beginn des Jahres  $i$

$k$  = Zerfallskonstante der Funktion 1. Ordnung in  $a^{-1}$  ( $k = \ln(2) / hl$ , wobei  $hl$  die Halbwertszeit (half-life) des Holzproduktespeichers in Jahren ist.)

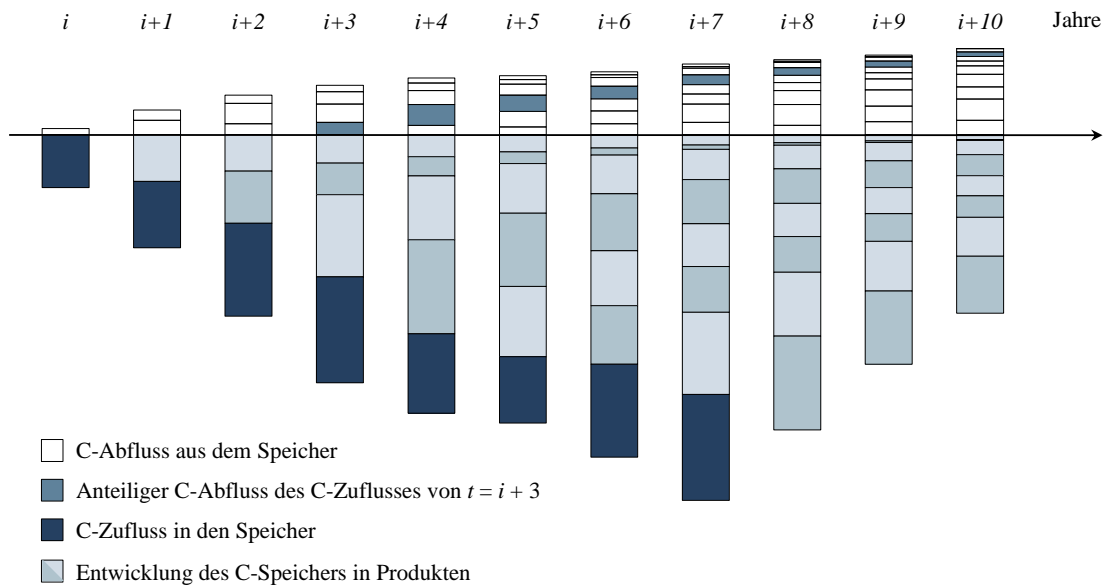
$Inflow(i)$  = Zufluss in den Holzproduktespeicher während des Jahres  $i$ ,  $a^{-1}$

$$\Delta C(i) = C(i+1) - C(i) \quad (12)$$

Wobei:

$\Delta C(i)$  = Kohlenstoffspeicheränderung in Holzprodukten, Gg C  $a^{-1}$





**ABBILDUNG 2-16:** Schematische Darstellung der Berechnung des Kohlenstoffspeicheraufbaus auf Basis des jährlichen Kohlenstoffzuflusses unter Verwendung der Funktionsgleichung 11

Abbildung 2-16 stellt den mit Hilfe der exponentiellen Funktionsgleichung 11 ermittelten Aufbau des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten schematisch dar (hier beispielhaft mit Kohlenstoffzufluss bis ins Jahr  $i + 7$ ).

### 2.2.4 Direkte Schätzung der Emissionen

Anstatt den Kohlenstoffabfluss aus einem Kohlenstoffspeicher indirekt über die zeitlich verzögerte Abgabe des ehemals in den Speicher eingegangenen Kohlenstoffs zu ermitteln, wie es alle in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Methoden vorsehen, besteht auch die Möglichkeit, die tatsächlich stattfindenden  $\text{CO}_2$ -Emissionen in die Atmosphäre direkt zu ermitteln bzw. über entsprechende Informationen abzuschätzen. An dieser Stelle sei noch einmal auf den Unterschied zwischen dem Kohlenstoffabfluss aus einem definierten Speicher (z. B. Holzprodukte in Nutzung) und einer tatsächlich auftretenden  $\text{CO}_2$ -Emission hingewiesen. In der Literatur wird bei Ermittlung direkter Emissionen zwar noch einmal unterschieden zwischen direkten Schätzungen, deren Ziel es ist, als Teil sogenannter *Inflow-Outflow* (Zufluss-Abfluss) Methoden generell alle Formen von klimarelevanten Treibhausgasemissionen aus der Zersetzung oder Verbrennung von Holz innerhalb eines Landes aufzuaddieren (vgl. Kap. 2.2.1), und direkten Schätzungen von Emissionen aus einem Speicher, die darauf abzielen die Netto-Emissionen auf Basis der Änderung eines Kohlenstoffspeichers zu erfassen (vgl. Kap. 1.1.3; Pingoud *et al.* 2003, S. 49, 52; UNFCCC 2003a, S. 9). Da sich die möglichen Vorgehensweisen bei der Erfassung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen aber nicht voneinander unterscheiden, wird diese methodische Feinheit hier außer Acht gelassen.

Um die Methode einer direkten Schätzung zur Abschätzung der Kohlenstoffspeicherwirkung in Holzprodukten anzuwenden, bietet sich im Prinzip die Quantifizierung jeglicher Stoffströme von Holz an, die mit einer Oxidation des in den Produkten enthaltenen Kohlenstoffs verbunden sind. Ist es das Ziel die Netto-Emissionen über Speicheränderungen zu erfassen (d. h. mittels *In-flow-Outflow* Methode) müssen die Daten, welche die CO<sub>2</sub>-Emission beschreiben, mit den Informationen über den Kohlenstoffzufluss in den jeweiligen Produktkategorien bzw. den Aktivitätsdaten kompatibel sein. Im Fall der Holzprodukte in Nutzung sind dies z. B. Informationen über die Freisetzung von Kohlenstoff durch Brände von Gebäuden, die energetische Nutzung von Holz in privaten Haushalten, das bis dahin stofflich genutzt wurde, oder die natürliche Zersetzung des Materials, welches zuvor in den verschiedensten Einsatzbereichen verwendet wurde (vgl. Flugsrud *et al.* 2001, S. 20). Aber auch Informationen über den Holzanteil im Abfallaufkommen und bei der Verbrennung von Müll, bzw. Daten zum Altholzaufkommen und seiner weiteren Verwendung können theoretisch herangezogen werden.

Zugleich können diese Daten in Abhängigkeit von der Behandlung des erfassten Altholzes auch den Kohlenstoffzufluss in den Speicher „Holz in Deponien“ beschreiben (vgl. Modellbeschreibungen in vorherigen Kapiteln). Zur Verwendung der Daten über die Speicherung von Holzkohlenstoff in Deponien bemerken Pingoud *et al.* (1996, S. 325) allerdings:

„Estimates of the behavior of the wastes in the landfills include relatively large uncertainties. In particular, the fraction of degradable organic carbon which actually decomposes is uncertain, and very different values for this fraction are presented in the literature.“

Ein paar Jahre darauf konkretisieren Pingoud *et al.* weiter:

“HWP waste statistics concerning landfill disposal is very poor everywhere, especially records on historical waste flows. Consequently, estimates of above landfilling fraction are on weak empirical basis.” (Pingoud *et al.* 2003, S. 84).

Beispielhaft für die beschriebene Schätzung von Emissionen mittels Daten zum Altholzaufkommen gehen Scharai-Rad (2002) und Mantau und Bilitewski (2010) vor. Letztere beschreiben den Stoffkreislauf von Holz für Deutschland, in welchem die CO<sub>2</sub>-Emissionen am Ende des Lebenszyklus über Altholzsortimente in der Entsorgungswirtschaft und die verschiedenen Wege zur Altholzverwertung bzw. -beseitigung hergeleitet werden. Details zur Berechnung des Kohlenstoffabflusses mittels Daten zum Altholzaufkommen werden in Kapitel 5.1.3 erläutert, in welchem die hier beschriebene Methode anhand ausgewählter Kriterien für Deutschland bewertet wird.

### 3 ANSÄTZE ZUR ERFASSUNG DES BEITRAGS VON HOLZPRODUKTEN

Während Kapitel 2 die rechnerische Vorgehensweise zur Ermittlung der Kohlenstoffspeicherwirkung thematisiert, stellt dieses Kapitel die diskutierten Systemgrenzen und den Bezugsrahmen einer Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten in den Mittelpunkt (WAS wird berechnet, vgl. Kap. 1.1.3). Die Berechnungsansätze haben ihren Ursprung zwar ebenfalls in der Diskussion um die beste Vorgehensweise bei der Erfassung der zeitlichen Dynamik der Netto-Emissionen; sie beruhen aber auf unterschiedlichen Konzepten und Vorstellungen darüber, wie sich die Speicherwirkung der stofflichen Holznutzung vor dem Hintergrund der Funktion des Waldes als Kohlenstoffsенке methodisch einordnen lässt. So errechnen sich in Abhängigkeit von den in diesem Kapitel vorgestellten Ansätzen vollkommen unterschiedliche Beiträge zur CO<sub>2</sub>-Bilanz eines Landes. Die damit verbundenen möglichen Konsequenzen in Bezug auf verbindliche Reduktionsverpflichtungen unter einem internationalen Klimaschutzabkommen wurden bereits in der Einleitung kurz erläutert. Neben politischen Anreizen zur Ausgestaltung der nationalen Klimapolitik eines Landes können durch den Ausschluss oder die Einbeziehung bestimmter Gruppen von Holzprodukten in Abhängigkeit von der Handelsbilanz auch unterschiedliche marktrelevante Anreize wirken.

Wie eingangs geschildert, spielte die Frage nach der Wahl des „richtigen“ Ansatzes für die Berechnung der Netto-Emissionen aus dem Produktspeicher von Beginn an eine zentrale Rolle bei den Klimaverhandlungen – sowohl in der Runde für die erste Verpflichtungsperiode, die ergebnislos blieb, als auch in den Verhandlungen unter der AWG-KP. Doch auch die für den gesamten LULUCF-Sektor geltenden Anrechnungsregeln wirken sich auf die Ergebnisse der Abschätzung der Kohlenstoffspeicherwirkung in Holzprodukten aus. Daher werden in Kapitel 3.1 zunächst die für den LULUCF-Sektor geltenden Rahmenbedingungen beschrieben, bevor in Kapitel 3.2 speziell auf die für die stoffliche Holznutzung relevanten Regeln eingegangen wird.

Beide Kapitel reflektieren in ihrer Untergliederung zudem die zeitliche Entwicklung der wissenschaftlichen und politischen Auseinandersetzung mit dem Thema, so dass sowohl der Stand der für den Sektor relevanten Beschlüsse der Klimapolitik vor dem Beginn des Verfassens der vorliegenden Arbeit als auch der während der Forschung zu dieser Arbeit geleistete Beitrag zu den Ergebnissen der LULUCF-Verhandlungen im Bereich der Anrechnung für Holzprodukte unter dem Kyoto-Protokoll ersichtlich wird.

## 3.1 DIE ANRECHNUNG DES LULUCF-SEKTORS IM KYOTO-PROTOKOLL

Die einleitenden Kapitel 1.1.2 und 1.1.3 beschreiben die Entstehungsgeschichte der internationalen Klimapolitik und seiner Institutionen wie auch die Einbindung des Landnutzungssektors in das Kyoto-Protokoll. Mit den zugrundeliegenden Konzepten, die bei den Verhandlungen zum Kyoto-Protokoll eine Rolle spielten und welche als „Stand des Wissens“ den Ausgangspunkt für die Frage nach einer Fortführung des Kyoto-Protokolls bildete, beschäftigt sich das folgende Kapitel 3.1.1. Das Kapitel 3.1.2 beschreibt den Fortgang der Verhandlungen zu LULUCF mit Fokus auf den mit dem Forstsektor verbundenen Diskussionen unter der AWG-KP, die schließlich zur Einigung auf ein neues Vorgehen bei der Anrechnung der Waldbewirtschaftung führten: der Referenzwert-Methode, die in Kapitel 3.1.3 beschrieben wird.

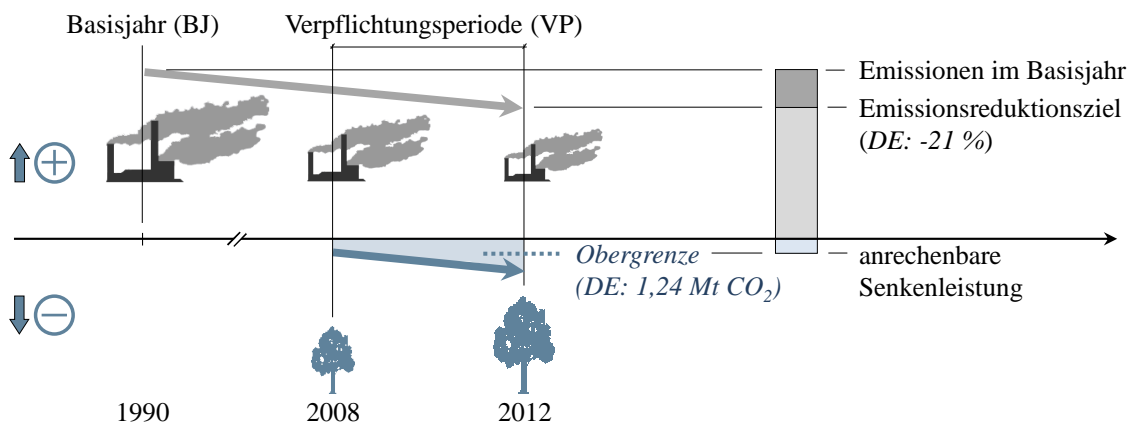
### 3.1.1 Bisherige Konzepte zur Anrechnung von LULUCF

Zur Einbeziehung der natürlichen Quellen und Senken in die THG-Gesamtbilanz eines Landes wurde im Zuge der Verhandlungen zum Kyoto-Protokoll eine Reihe möglicher Vorgehensweisen vorgeschlagen (UNFCCC 1997b; UNFCCC 1997c; UNFCCC 1997d). Die Variante, den Sektor Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LUCF) aufgrund der mit der Bestimmung der Netto-Emissionen des Sektors verbundenen Unsicherheiten überhaupt nicht zu berücksichtigen, wurde als *gross-approach* (Brutto-Ansatz) vor allem von den Entwicklungsländern Nauru, den Marshall-Inseln und Kenia sowie Japan favorisiert. Die Einbeziehung der Netto-Emissionen des „Senkensektors“ LULUCF sowohl im für das Kyoto-Protokoll vorgeschlagenen Basisjahr 1990 als auch im Emissionsbudget des Anrechnungszeitraums wurde als *net-approach* (Netto-Ansatz) bzw. *net/net-approach* (Netto/netto-Ansatz) vor allem von Australien präferiert. Im Zuge der Verhandlungen um die Einbeziehung von Senken unter dem Kyoto-Protokoll wurde der Ansatz, die während der Verpflichtungsperiode anfallenden Netto-Emissionen mit den Netto-Emissionen aus dem Jahr 1990 zu vergleichen, jedoch von den meisten verhandelnden Staaten wegen „systematischer Unsicherheiten aufgrund unvollständig verfügbarer Daten“ verworfen (Oberthür und Ott 1999, S. 133). Nicht zuletzt aufgrund dieser Schwierigkeiten, die Netto-Emissionen für das Basisjahr 1990 mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen, setzten sich daher Neuseeland und Kanada mit einer beschränkten Variante ihres Vorschlags für einen *gross/net approach* (Brutto/netto-Ansatz) durch. Danach sind die Netto-Emissionen aus Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft zwar nicht in die Bestimmung der Höhe der Reduktionsverpflichtung über das Basisjahr 1990 einzubeziehen, jedoch in die Ermittlung der Gesamtemissionen in der Anrechnungsperiode.

Nachfolgend werden die beiden in der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls verwendeten Anrechnungsansätze für den LULUCF-Sektor beschrieben.

### 3.1.1.1 Brutto/netto-Ansatz

Unter den vorgeschlagenen Möglichkeiten stellt diese Anrechnungsvariante einen Kompromiss dar, auf den man sich schließlich einigen konnte, wobei der Brutto/netto-Ansatz nicht für den gesamten LULUCF Sektor, sondern nur für ausgewählte Aktivitäten realisiert wurde. So ist mit dem Artikel 3 Paragraph 3 festgeschrieben, dass die Netto-Emissionen aus der Veränderung der biogenen Kohlenstoffspeicher der in diesem Paragraphen aufgezählten Aktivitäten Aufforstung, Wiederaufforstung und Entwaldung (vgl. Kap. 1.1.3), die seit dem Jahr 1990 stattgefunden haben, in der Berechnung der Treibhausgasbilanzen innerhalb der Verpflichtungsperiode berücksichtigt d. h. angerechnet werden.



**Abbildung 3-1:** Anrechnung der Netto-Emissionen im LULUCF-Sektor nach Brutto/netto-Methode mit Obergrenze

Ein etwaiger Senken- oder Quelleneffekt, der sich aus der absoluten Änderung des Speichers während dieses Zeitraums ergibt (= brutto), wird also vollständig zur Erfüllung der Emissionsreduktionsziele der Staaten anerkannt, obgleich diese Aktivitäten bei der zulässigen Berechnung der Gesamtemissionen eines Landes für diesen Zeitraum auf Basis des Jahres 1990 nicht mitbezogen wurden (vgl. Abbildung 3-1). Eine Ausnahme hiervon wurde mit Artikel 3 Paragraph 7 für jene Länder geschaffen, deren CO<sub>2</sub>-Bilanz für diese Aktivitäten im Basisjahr eine Nettoquelle ausweist. In diesem Fall müssen die Netto-Emissionen aus diesen Aktivitäten in die Berechnung der Gesamtemissionen einbezogen werden. Letzteres bedeutet eine Anrechnung nach einem Netto/netto-Ansatz, wie er bis auf wenige Ausnahmen in den anderen Sektoren für die Ermittlung der Reduktionsleistung der Länder unter dem Kyoto-Protokoll verwendet und im folgenden Kapitel 3.1.1.2 beschrieben wird. Allerdings trifft diese Regelung nur auf Australien und, in geringerem Umfang, auf Großbritannien zu (vgl. Missfeldt und Haites 2001, S. 269). Die dadurch entstandene Inkonsistenz bei der Behandlung der Emissionen aus Entwaldung in den Annex I-Staaten wurde vielfach kritisiert (vgl. Schlamadinger *et al.* 2007b, S. 297; Höhne *et al.* 2007, S. 363).

Neben den für alle Annex I-Staaten verbindlichen Aktivitäten unter Artikel 3 Paragraph 3 des Kyoto-Protokolls wurde der Brutto/netto-Ansatz in der ersten Verpflichtungsperiode auch für die Anrechnung der Aktivität Waldbewirtschaftung unter Artikel 3 Paragraph 4 angewandt (UNFCCC 2002a, S. 59ff.).

Der Grund, weshalb eine Brutto/netto-Anrechnung anders als für die übrigen unter Paragraph 4 aufgelisteten Aktivitäten nur für Waldbewirtschaftung beschlossen wurde, ist u. a. darin zu suchen, dass bei einem Netto/netto-Ansatz die Kohlenstoffspeicher im Wald auch dann rechnerisch zu einer Netto-CO<sub>2</sub>-Quelle werden können, wenn sich nur die Höhe der Senkenleistung in der Verpflichtungsperiode gegenüber der Senkenleistung im Basisjahr reduziert. Die Senkenwirkung des Waldes ist jedoch neben der Höhe des Holzeinschlages vor allem auch vom Wachstum der Bäume und dem historisch bedingten Altersklassenaufbau der Wälder abhängig (vgl. Kap. 1.1.1). Der in der Optimalphase abnehmende Zuwachs von Bäumen und die damit verbundene Aufnahme und Speicherung von Kohlenstoff sorgten letztendlich ebenso wie die Unsicherheiten eines möglichen Abbaus der Waldspeicher dafür, dass ein Vergleich der Emissionsdynamik mit einem Basisjahr (s. Kap. 3.1.1.2) für die meisten Annex I-Staaten nicht akzeptabel war und die Staatengemeinschaft dem neuseeländisch-kanadischen Vorschlag einer Brutto/netto-Anrechnung folgte (vgl. Penman 2005). Allerdings schließt eine Brutto/netto-Anrechnung die gesamte Senkenleistung durch das Waldwachstum ein und beinhaltet somit auch die indirekte Wirkung der Altersklassenverteilung oder natürliche Effekte, wie eine verstärkte Wuchseistung durch eine Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre (vgl. Schlamadinger *et al.* 2007a, S. 276). Das Kyoto-Protokoll legt aber implizit fest, dass diese von einer Anrechnung ausgeschlossen werden sollen:

“[...] how, and which, additional human-induced activities related to changes in greenhouse gas emissions by sources and removals by sinks in the agricultural soils and the land-use change and forestry categories shall be added to, or subtracted from, the assigned amounts for Parties included in Annex I, taking into account uncertainties, transparency in reporting, verifiability, the methodological work of the IPCC [...]” (UNFCCC 1997a, S. 3)

Auch die *Marrakesh Accords* legen explizit fest, dass der Altersklasseneffekt nicht berücksichtigt werden soll (s. S. 25). Um dieser Forderung nachzukommen wurde daher bereits im Jahr 2001 beschlossen, die auf die erlaubten Emissionen anrechenbare Senkenleistung aus Waldbewirtschaftungsmaßnahmen mit einer Anrechnungsobergrenze (*cap*) zu deckeln (vgl. Abbildung 3-1), wobei sich die im Appendix Z der Entscheidung 5/CP.6 (Bonner Abkommen zur Umsetzung des Buenos Aires Aktionsplans aus dem Jahr 2001) aufgelisteten Werte an einem Diskontierungsfaktor von 85 % bzw. einer Obergrenze von 3 % der Gesamtemissionen des jeweiligen Landes orientieren (UNFCCC 2001a, S. 46).

### 3.1.1.2 Netto/netto-Ansatz

Der Netto/netto-Ansatz (*net/net-approach*) bezeichnet die Vorgehensweise, wonach die Netto-Emissionen sowohl bei der Bestimmung des Basisjahres (für Deutschland 1990) als auch bei der Ermittlung der Emissionsreduktion während der Verpflichtungsperiode einbezogen werden (s. Gleichung 13).

$$C_{ACC} = \Delta C_R - \Delta C_{CP} \quad (13)$$

Wobei:

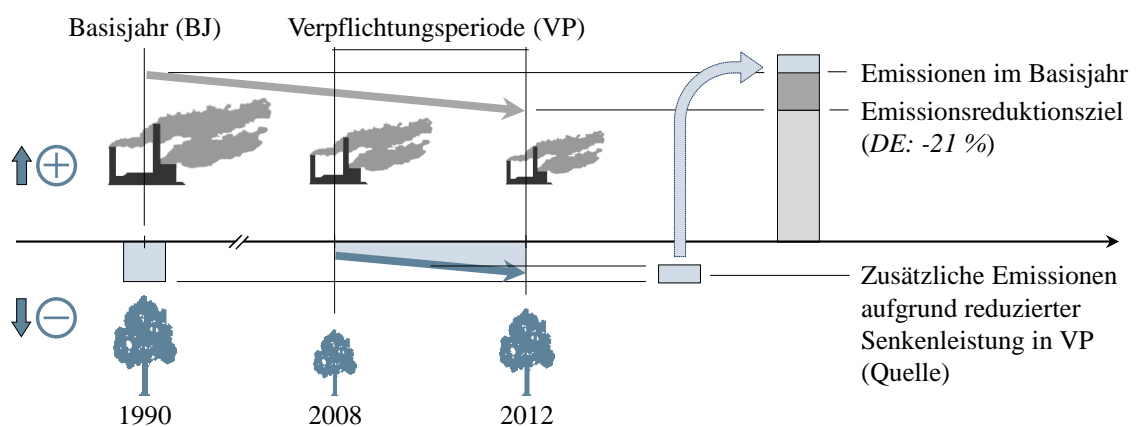
$C_{ACC}$  = anrechenbare Netto-Emissionen

$\Delta C_R$  = Durchschnittliche Veränderung des Kohlenstoffspeichers im Referenzzeitraum

$\Delta C_{CP}$  = Durchschnittliche Veränderung des Kohlenstoffspeichers während der Anrechnungsperiode *CP* (*commitment period*)

Im Sektor LULUCF wird diese Anrechnungsmodalität in der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls mit Ausnahme der Aktivität Waldbewirtschaftung für die ebenfalls unter Artikel 3 Paragraph 4 aufgezählten optionalen Maßnahmen Acker- und Weidewirtschaft (*cropland* und *grazing land management*) sowie Rekultivierung (*revegetation*) angewandt (vgl. Kap. 1.1.3).

Der Ansatz, die jährlichen durchschnittlichen Netto-Emissionen eines definierten Betrachtungszeitraums mit den Netto-Emissionen eines Basisjahres zu vergleichen, hat im Fall einer im Vergleich zur Referenz bzw. zum Basisjahr abnehmenden Senkenleistung die Ausweisung einer Netto-Quelle zur Konsequenz (vgl. Abbildung 3-2). Dies wird bereits im vorherigen Kapitel erwähnt: trotz Senkenleistung errechnet sich eine Nettoquelle bzw. Lastschrift.



**Abbildung 3-2:** Anrechnung der Netto-Emissionen im LULUCF-Sektor nach Netto/netto-Methode, hier: Netto-Quelle aufgrund reduzierter Senkenwirkung im Vergleich zum Basisjahr 1990

Im Gegenzug resultiert eine im Vergleich zur Referenz reduzierte Emissionsquelle aber in einer rechnerischen Senke, die, ebenso wie in den anderen Sektoren, als Beitrag zur Erfüllung der Reduktionsziele berücksichtigt wird.

Als Vorteil einer Netto/netto-Anrechnung kann gelten, dass sich im Gegensatz zur Brutto/netto-Anrechnung jegliche Langzeittrends bei der Entwicklung der Netto-Emissionen zwischen den zu vergleichenden Zeiträumen rechnerisch gegenseitig aufheben. Dieser Ansatz reduziert daher nach allgemeiner Ansicht die Wahrscheinlichkeit, Senkeneffekte aufgrund indirekter und natürlicher Effekte in die Anrechnung mit einzubeziehen (vgl. Schlamadinger *et al.* 2007a, S. 276).

### 3.1.2 Verhandlungen zu LULUCF für post-2012

Im Rahmen der Verhandlungen über die Ausgestaltung eines verbindlichen Klimaschutzabkommens über die erste Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls hinaus wurde nach Etablierung der AWG-KP im Jahr 2005 (s. Kap. 1.1.2) im darauffolgenden Jahr in Bonn ein Runder Tisch zur Analyse von THG-Vermeidungspotentialen und möglicher Emissionsreduktionsziele in Annex I-Staaten durchgeführt. Dabei wurden auch die mit dem Forstsektor verbundenen Aktivitäten erwähnt, welche die Funktion der Wälder als CO<sub>2</sub>-Senke fördern könnten. Auch das Management von Holzprodukten wurde in diesem Zusammenhang bereits explizit genannt (UNFCCC 2007a). Zeitgleich beschäftigte sich auch die Wissenschaft verstärkt mit methodischen Fragen rund um eine Fortführung des Kyoto-Protokolls (Freibauer *et al.* 2007; Benndorf *et al.* 2007; Höhne *et al.* 2007; Schlamadinger *et al.* 2007a; Schlamadinger *et al.* 2007b). Im Frühjahr 2008 fand dann auf Einladung der AWG-KP zusammen mit der fünften Sitzung in Bangkok ein Workshop statt, bei welchem eine weitgehende Einigkeit darüber herrschte, dass die Aktivitäten unter LULUCF auch nach einer ersten Verpflichtungsperiode weiter für eine Anrechnung im Rahmen der angestrebten Verpflichtung zur Reduzierung von Treibhausgasen zur Verfügung stehen sollte. In diesem Zusammenhang befanden die Teilnehmer, dass auf Kontinuität und Konsistenz der Regeln geachtet werden und jede mögliche Änderung im Einklang mit den Prinzipien der *Marrakesh Accords* sein müsse (UNFCCC 2007b). Unter anderem wurden folgende Punkte zu LULUCF identifiziert und in dem Bericht der AWG-KP zusammengefasst:

- Einfachere und transparentere Regeln für eine einfachere Umsetzung sowie eine deutlichere Anerkennung nationaler Umstände, um eine effektivere Durchführung von Maßnahmen im LULUCF Bereich zu erreichen;
- Bedenken einzelner Teilnehmer gegenüber den Regeln der ersten Verpflichtungsperiode, die nach Meinung nicht genügend Anreize böten, das volle THG-Minderungspotential des Sektors auszuschöpfen. Stattdessen Favorisierung eines ganzheitlichen Ansatzes, der die gesamte Landfläche umfasst und Kohlenstoffspeicher einbezieht, die bis dato nicht berücksichtigt worden sind;



- Forderung einzelner Teilnehmer, möglichst nur minimale Änderungen der Regeln der ersten Verpflichtungsperiode und sorgfältige Prüfung der Auswirkungen der Einbeziehung neuer Aktivitäten oder Kohlenstoffspeicher, wie etwa Holzprodukte;
- Unterstützung der weiteren Diskussion zu LULUCF durch die Arbeit von Experten aufgrund der Komplexität und des technischen Charakters der Themen.

So reichte die Auswahl der von den Vertragsstaaten bis Mitte des Jahres 2008 identifizierten möglichen Optionen für LULUCF von einem aktivitätsbasierten Ansatz (d. h. eine Anrechnung auf Basis von Aktivitäten wie beispielsweise Aufforstung oder Waldbewirtschaftung) mit wenigen, einigen oder vielen Änderungen gegenüber der ersten Verpflichtungsperiode, über einen flächenbasierten Ansatz (d. h. ähnlich der Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention) bis hin zum Thema Holzprodukte (UNFCCC 2008a; UNFCCC 2008c). Im Laufe der weiteren Verhandlungen wurde eine Reihe von Vorschlägen für Anrechnungsmodalitäten für die walddrelevanten Aktivitäten unter Artikel 3 des Kyoto-Protokolls von den verhandelnden Vertragsstaaten zusammengetragen, die für ein Klimaschutzabkommen nach dem Ende der ersten Verpflichtungsperiode Ende des Jahres 2012 gelten sollten (UNFCCC 2008b). Über die im vorherigen Kapitel vorgestellten Verfahren enthielten die nach der im August 2008 in Ghana stattgefundenen sechsten Sitzung der AWG-KP benannten Accra-Optionen sowohl Varianten der Anrechnungsregeln der ersten Verpflichtungsperiode, als auch gänzlich neue Ideen:

- Brutto/netto-Anrechnung (d. h. keine Änderung im Vgl. zu KP VP1) (s. Kap. 3.1.1.1);
- Netto/netto-Anrechnung (s. Kap. 3.1.1.2), entweder mit:
  - Basisjahr (z. B. 1990) oder
  - Basisperiode;

Für beide dieser bereits vorgestellten Anrechnungsoptionen wurde eine Umsetzung entweder mit bzw. ohne Anrechnungsobergrenze (*cap*) oder einem Diskontierungsfaktor (*discount factor*) vorgeschlagen.

- Anrechnung mittels einer vorausschauenden Basislinie (*forward-looking baseline*):  
Nach diesem von Kanada eingebrachten Vorschlag sollte der zu erwartende Beitrag der Waldbewirtschaftung zu den Netto-Emissionen vor der Verpflichtungsperiode als Messbasis ermittelt werden. Die Differenz der tatsächlich auftretenden Netto-Emissionen in der Verpflichtungsperiode zur festgelegten Basislinie sollte angerechnet werden. Eine Anrechnungsobergrenze oder ein Diskontierungsfaktor sollte ebenfalls die Höhe des Anrechnungsbeitrags begrenzen (Canada 2008).
- Anrechnung auf Basis einer festgelegten Messlatte (*bar*):  
Danach sollten als Referenz durchschnittliche Netto-Emissionen aus der Waldbewirtschaftung herangezogen werden (Basisjahr oder Basisperiode), wobei aber länderspezifische Umstände (z. B. Altersklassenaufbau) mit ihrer Auswirkung auf die Netto-Emissionen berücksichtigt werden sollten.

- Anrechnung mittels eines Land-basierten Ansatzes (*land-based approach*).

Zugleich wurde die Frage diskutiert, inwieweit eine Anrechnung verpflichtend oder freiwillig, ob sie sich nur auf bestimmte definierte Aktivitäten beschränken sollte oder eine umfassende Anrechnung anzustreben sei.

Zwar konnten die Länder bis zur 15. Vertragsstaatenkonferenz in Kopenhagen, die gemeinhin als letzte Möglichkeit einer Einigung über ein Nachfolgeabkommen für das Kyoto-Protokoll angesehen wurde, in weiteren Verhandlungsrunden einige der im Zuge der Verhandlungen diskutierten Optionen und Vorschläge zusammenführen und den Verhandlungstext konsolidieren, doch konnte man sich nicht durchgängig auf einheitliche Anrechnungsmodalitäten für den LULUCF-Sektor einigen (UNFCCC 2009c; UNFCCC 2009a; UNFCCC 2009b; UNFCCC 2009d). Neben noch unterschiedlicher Vorstellungen über den Umgang mit natürlichen Störungen im Waldbereich (*natural disturbance*), über die Einbeziehung des Holzproduktespeichers (s. Kap. 3.2.2.4) oder die verbindliche Einbeziehung von Aktivitäten unter Artikel 3 Paragraph 4 blieb vor allem die Frage nach den Anrechnungsmodalitäten für die Waldbewirtschaftung noch ungelöst. Allerdings hatte man sich unter der LULUCF Option, welche alle Annex I-Staaten und die meisten Nicht-Annex I-Staaten unterstützten (Verhandlungsoption A)<sup>3</sup>, auf grundsätzlich zwei mögliche Verfahren einigen können: eine Anrechnung mit Anrechnungsobergrenze (*cap*) oder auf Basis eines Referenzwertes (*reference level*) (UNFCCC 2010b). Allerdings wurden nach dem Scheitern von Kopenhagen bis Ende des Jahres 2010 wieder weitere Anrechnungsoptionen von Nicht-Annex I-Staaten vorgeschlagen: eine Netto/netto-Anrechnung auf Basis der ersten Verpflichtungsperiode und ein kombiniertes Verfahren aus einer Anrechnung mit Referenzwert und einer Netto/netto-Anrechnung auf Basis der Netto-Emissionen aus den Jahren 2000 bis 2009 (*baselines*) (UNFCCC 2010a; UNFCCC 2011b).

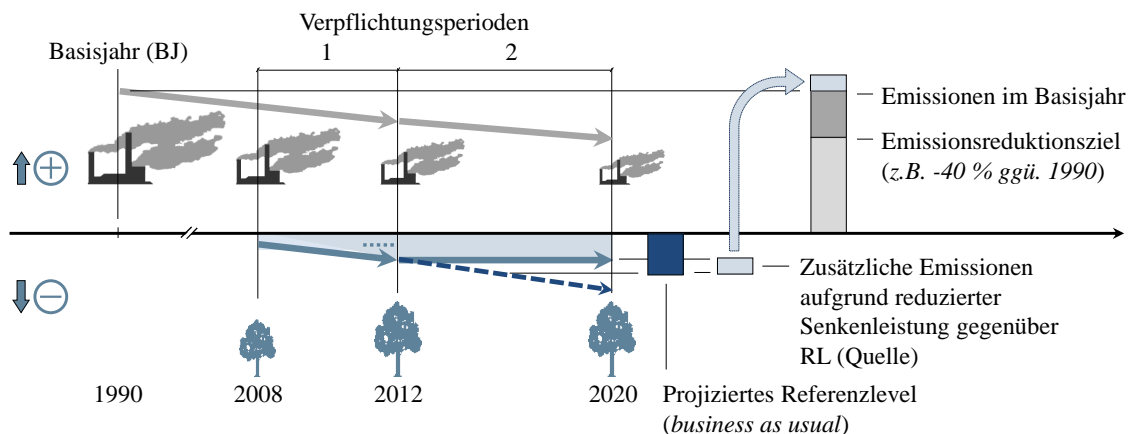
Da sich eine Anrechnung der Waldbewirtschaftung auf Basis des Referenzwert-Ansatzes im Verlauf der weiteren Verhandlungen schließlich durchsetzte und sich der Ansatz aufgrund der engen Verknüpfung mit der stofflichen Holznutzung auch auf die Anrechnung des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten auswirkt, wird der Referenzwert-Ansatz im nachfolgenden Kapitel detailliert beschrieben.

### 3.1.3 Wald in der 2. Verpflichtungsperiode - der Referenzwert-Ansatz

Im September 2009 konnten sich die Annex I-Staaten auf die Konsolidierung der beiden Vorschläge zur Anrechnung der Waldbewirtschaftung mittels einer vorausschauenden Messbasis (*forward-looking baseline*) und auf Basis einer festgelegten Messlatte (*bar*) einigen und die Referenzwert-Methode (*reference levels*) wird erstmalig in den Verhandlungstexten erwähnt (UNFCCC 2009b).

---

<sup>3</sup> Enthalten in allen Verhandlungsdokumenten



**Abbildung 3-3:** Anrechnung der Netto-Emissionen der Waldbewirtschaftung auf Basis eines projizierten Referenzwertes

Der Referenzwert-Ansatz ermöglicht die Verwendung sowohl historischer als auch projizierter Netto-Emissionsniveaus als länderspezifische Messbasis und führt somit die unterschiedlichen Verhandlungspositionen zueinander (vgl. Abbildung 3-3). Im darauffolgenden Jahr beschloss die Staatengemeinschaft auf der 16. Vertragsstaatenkonferenz mit den sogenannten *Cancun Agreements* (Entscheidung 2/CMP.6), dass alle Annex I-Staaten dem Klimasekretariat bis Ende Februar 2011 ihre länderspezifischen Referenzwerte für die Waldbewirtschaftung (*forest management reference level*, Abk. FMRL) übermitteln sollten. Die Kriterien für die Berechnung wurden in einer Fußnote des Entscheidungstextes festgelegt:

“The forest management reference levels inscribed in appendix I to this decision were set transparently, taking into account the following: (a) removals or emissions from forest management as shown in greenhouse gas inventories and relevant historical data; (b) age-class structure; (c) forest management activities already undertaken; (d) projected forest management activities under a ‘business as usual’ scenario; (e) continuity with the treatment of forest management in the first commitment period; (f) the need to exclude removals from accounting in accordance with decision 16/CMP.1, paragraph 1. Points (c), (d) and (e) above were applied where relevant. The forest management reference levels also took into account the need for consistency with the inclusion of carbon pools. Reference levels including and excluding ‘force majeure’ should be provided.” (UNFCCC 2011c, S. 5)

Anschließend erfolgte im Vorfeld des darauffolgenden Treffens der AWG-KP eine technische Begutachtung der übermittelten Werte durch ein internationales Expertenteam, das überprüfte inwieweit die in einem Appendix II der Entscheidung definierten Informationen „transparent, komplett, konsistent, vergleichbar und akkurat“ übermittelt wurden. Hierzu gehörten u. a. eine Beschreibung der in die Referenzwerte einbezogenen Elemente (z. B. Waldfläche und Altersklassenstruktur) und Politiken zur Waldbewirtschaftung, um die Verwendung des im Anhang der Entscheidung genannten Wertes zu ermöglichen (UNFCCC 2011a; UNFCCC 2011c, S. 9).

Auch Holzprodukte wurden in die Ermittlung eines Referenzwertes einbezogen und einer technischen Begutachtung unterzogen. Eine detaillierte Beschreibung hierzu findet sich im Kapitel 3.2.2.5. Im Ergebnis des transparenten Reviewprozesses unterstützten auch immer mehr Nicht-Annex I-Staaten die Referenzwert-Methode als Anrechnungsoption, obgleich nicht alle Staaten ihre Bedenken zu diesem Ansatz zerstreut sahen. So kritisierte beispielsweise Tuvalu, dass der Referenzwert-Ansatz nicht die definierten Anforderungen an eine Anrechnung der Waldbewirtschaftung erfülle (Tuvalu 2011). Im Vorfeld der Vertragsstaatenkonferenz in Durban fanden weitere Sitzungen der AWG-KP in Bangkok, Bonn und Panama statt, die sich vornehmlich auf die Lösung anderer noch offener Fragen unter LULUCF konzentrierten.

Mit der 7. Konferenz der Vertragsstaaten des Kyoto-Protokolls in Durban (CMP 7) wurde der Referenzwert-Ansatz schließlich formal für die Anrechnung der Aktivität Waldbewirtschaftung beschlossen (UNFCCC 2012a: Anhang Entscheidung 2/CMP.7, Art. 22). Die Aktivitäten Aufforstung, Wiederaufforstung und Entwaldung werden hingegen, wie bereits in der ersten Verpflichtungsperiode, auf Basis des Brutto/netto-Ansatzes berücksichtigt.

## 3.2 BERECHNUNGSANSÄTZE FÜR HOLZPRODUKTE

Im Zuge der im vorherigen Kapitel beschriebenen Überlegungen bei der Gestaltung der Regeln zur Verbuchung der Emission von Treibhausgasen nach Quellen und ihrer Einbindung in Senken im LULUCF-Sektor des Kyoto-Protokolls kristallisierten sich mit Beginn der politischen Diskussionen auch verschiedene Vorgehensweisen bei der Ermittlung des Beitrags der stofflichen Nutzung zur CO<sub>2</sub>-Bilanz heraus (vgl. Kap. 1.1.3). Während die meisten frühen Modelle geerntetes Holz als einfache Systemraumerweiterung der forstlichen Kohlenstoffspeicher betrachteten, welche die Kohlenstoffemission verzögert (vgl. Kapitel 2.2.1), wurden mit der Diskussion um die ‚richtige‘ Verbuchung des Sektors in einem Klimaschutzabkommen mit verbindlichen Reduktionszielen alsbald auch Fragen nach den mit einer Anrechnung verbundenen Anreizen gestellt.

Während Kapitel 3.2.1 die vor der Ausfertigung der vorliegenden Arbeit bestehenden Ansätze beschreibt und diskutiert, stellt Kapitel 3.2.2 den fachwissenschaftlichen Beratungsbeitrag der vorliegenden Arbeit dar, welcher direkt in die Verhandlungen um ein Nachfolgeabkommen der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls in die AWG-KP (vgl. Kap. 3.1.2) eingebracht wurde.

### 3.2.1 Bisherige Ansätze zur Ermittlung des Beitrags von Holzprodukten

Wie in Kapitel 1.1.3 geschildert, stand die Frage nach einer Einbeziehung der natürlichen Senken erst sehr spät auf der Tagesordnung bei den Verhandlungen zum Kyoto-Protokoll. Generell

waren die mit einer Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Budgets aus dem Landnutzungssektor verbundenen Unsicherheiten sehr hoch, da auch keine eindeutige IPCC Richtlinien vorhanden waren, die Aussagen darüber enthielten, wie die Holzernte oder die nachgelagerte stoffliche Nutzung des Holzes in den Emissionsinventaren zu berücksichtigen ist. Vielmehr wurde die mögliche Ausgestaltung der Regeln zum diesem Thema im Zuge eines IPCC Expertenworkshops im September 1997 auf zukünftige Treffen verschoben (IPCC 1997a). Daher äußerten sich die wenigen Länder, die hierzu in ihren Submissionen an das Klimasekretariat kurz vor Verabschiedung des Kyoto-Protokolls Stellung bezogen – bis auf die USA – auch sehr zurückhaltend über eine mögliche Einbeziehung von Holzprodukten in eine Anrechnung (UNFCCC 1997d, S. 53).

Erstmals unterscheiden Winjum *et al.* (1998, S. 273) zwischen zwei grundlegend unterschiedlichen Herangehensweisen, die sie in Anlehnung an den Bezugsrahmen dieser Berechnungsansätze als *atmospheric flow method* (Atmosphären-Fluss-Methode) und als *stock-change method* (Speicheränderungsmethode) bezeichnen. Während der erste Ansatz die Gesamtemissionen des Sektors aus den Ernterückständen, dem Zerfall von Kohlenstoff aus kurz- und langlebigen Holzprodukten und den berechneten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Industrierestholz entlang der Verarbeitungskette und aus der Verbrennung von Brennholz und Holzkohle in die Atmosphäre aufsummiert, ermittelt die Speicheränderungsmethode, wie der Name besagt, die mit einem definierten Speicher zusammenhängenden CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. deren Einbindung innerhalb eines Landes.

In Folge der ungeklärten Frage nach einem wissenschaftlich fundierten und einheitlichen Vorgehen zur Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten zur CO<sub>2</sub>-Bilanz der Länder fand im Jahr 1998 in Dakar, Senegal, ein Expertentreffen des IPCC statt, welches folgende Ansätze identifizierte:

- *Instantaneous oxidation* (Annahme einer sofortigen Emission, IPCC Default Methode),
- *Stock-change approach* (Speicheränderungsansatz),
- *Production approach* (Produktionsansatz) und
- *Atmospheric-flow approach* (Atmosphären-Fluss-Ansatz).

Diese im Zuge des Workshops erstmals definierten Ansätze wurden anhand der Kriterien Durchführbarkeit und Genauigkeit, Relevanz für die Erfordernisse der Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention und dem Kyoto-Protokoll sowie Politikrelevanz für die Länder evaluiert (Brown *et al.* 1998, S. 11). In der Folge fand eine rege Diskussion um die Vor- und Nachteile dieser „Dakar-Ansätze“ statt, wobei sich ihre heute gebräuchlichen Bezeichnungen erst im Laufe der Zeit durchsetzten. So beschreiben Nabuurs und Sikkema (2001) neben dem *stock-change approach* auch eine *flow consumption* Methode, die dem *atmospheric-flow approach* entspricht, und eine *flow production* Methode, die zwar ebenfalls die Kohlenstoffflüsse in Holzprodukten betrachtet, aber auf deren Produktion basiert (vgl. auch Poker *et al.* 2003).

Im Laufe der weiteren Verhandlungen über die Ausgestaltung des Kyoto-Protokolls beschrieben einige Staaten (Österreich, Australien, Kanada, Dänemark, die Niederlande und USA) ihr Vorgehen zur Ermittlung des Beitrags von Holzprodukten in ihren Submissionen Mitte des Jahres 2000 an das Klimasekretariat über die Ausgestaltung der Regeln unter Artikel 3 Paragraph 4 etwas detaillierter (UNFCCC 2000c, S. 12 ff). Im Zusammenhang mit möglichen Aktivitäten unter Artikel 3 Paragraph 4 meldeten Deutschland, Norwegen, die Schweiz und Finnland ebenfalls Daten zum Holzproduktespeicher (UNFCCC 2000b; UNFCCC 2000a). Wiederum auf Einladung von SBSTA reichten mehrere Staaten ein Jahr später weitere Submissionen zu den vorgeschlagenen Ansätzen ein, die die unterschiedlichen Sichtweisen deutlich machten (UNFCCC 2001c). Die Mehrzahl der Staaten (Norwegen, Russland, Schweden (für die EU) und die Schweiz) sprach sich dabei explizit für den *stock-change approach* aus, u. a. mit dem Argument, dass dieser am konsistentesten mit den Aussagen des Kyoto-Protokolls sei, wonach die anrechenbaren Aktivitäten als ‚nachprüfbare Veränderungen der Kohlenstoffspeicher‘ gemessen werden sollen (Art. 3.3, UNFCCC 1997a, S. 3). Während Kanada Stellung für den *atmospheric flow approach* bezog, da dieser am besten die Realität abbilden würde, gaben die USA an, für ihre gegenwärtige Berichterstattung den *production approach* zu nutzen, aber offen für andere Vorschläge zu sein. Australien und Japan vertraten die Auffassung, dass der Diskussionsstand zu diesem Zeitpunkt noch unzureichend sei, um daraus politische Schlussfolgerungen im Sinne einer umfassenden Berücksichtigung von Holzprodukten zu ziehen. Auch aus diesem Grund lehnte Samoa für die Allianz der kleinen Inselstaaten (*Alliance of Small Island States*, Abk. AOSIS) eine Einbeziehung von Holzprodukten für die erste Verpflichtungsperiode grundsätzlich ab. Auch mehrere im Jahr 2001 stattfindende Workshops von Verhandlern und Experten in Rotorua, Neuseeland, konnten das unterschiedliche Verständnis über den „richtigen“ Ansatz und die Konfusion über je nach Ansatz unterschiedliche Verteilung und Anlastung der Emissionen aus Holzprodukten nicht klären. Da man sich nicht auf die spezifischen Anrechnungsmodalitäten einigen konnte, wurde ein Übereinkommen zu Holzprodukten mit der Entscheidung 11/CP.7 der Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention im Jahr 2001 schließlich verschoben (vgl. Kap. 1.1.3).

Auf Einladung von SBSTA legten zwei Jahre später wiederum einige Staaten ihre Sichtweisen zu den Auswirkungen der unterschiedlichen Vorgehensweisen bei einer Anrechnung von Holzprodukten dar, die die zunehmend verhärteten Fronten zwischen Holz verbrauchenden Ländern und den Netto-Exporteuren von Holz widerspiegeln. (UNFCCC 2003b). In Folge dieser Diskussion schlug Ford-Robertson (2003) mit dem *simple decay approach* (einfacher Zerfallsansatz) einen weiteren Anrechnungsansatz vor. Auf diesen Ansatz wird in der vorliegenden Arbeit aber nicht weiter eingegangen, da er anders als der Produktionsansatz zwar über Kohlenstoffflüsse hergeleitet wird, diesem im Ergebnis aber gleicht.

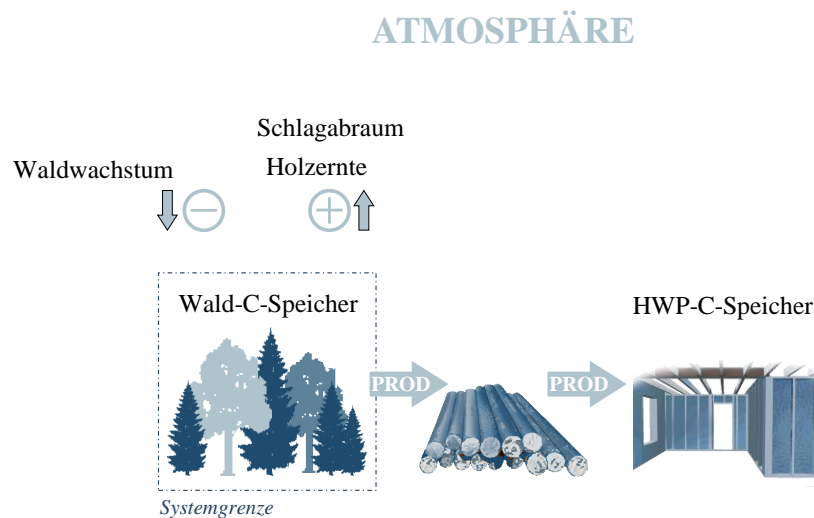
In einem technischen Papier des Klimasekretariats aus dem Jahr 2003 werden die Einschätzungen der Staaten zu den Auswirkungen der unterschiedlichen Anrechnungsansätze ebenso wie

das Expertenwissen über Methoden zur Ermittlung des Beitrags von Holzprodukten zum LULUCF-Sektor zusammengefasst (UNFCCC 2003a).

Auch in den Folgejahren, die bereits im Zeichen der Erstellung neuer Inventurrichtlinien des IPCC standen (vgl. Kap. 4.3), konnte kein gemeinsamer Nenner für eine einheitliche Vorgehensweise gefunden werden (Pingoud *et al.* 2004). Zwar herrschte allgemein Einigung darüber, dass eine Anrechnung vor allem einen Anreiz setzen soll, die mit der Nutzung von Holz verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Sinne einer Verzögerung und Minderung von Treibhausgasen in die Atmosphäre zu optimieren. Doch hat ein unterschiedliches Verständnis darüber, welches Land für den Speichereffekt der stofflichen Nutzung honoriert werden bzw. die Verantwortung für die Emissionen am Ende des Lebenszyklus der Produkte tragen soll, maßgeblich dazu beigetragen, dass lange Zeit auch keine politische Einigung in Bezug auf einen gemeinsamen Berechnungsansatz erzielt werden konnte.

Im Folgenden werden die einzelnen Ansätze für die Anrechnung und Berichterstattung von Holzprodukten mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben.

### 3.2.1.1 Annahme einer sofortigen Emission (Default Ansatz)



**ABBILDUNG 3-4:** Schema des IPCC Default Ansatzes

Die einfachste Vorgehensweise bei der Abschätzung der Netto-Emissionen eines Kohlenstoffspeichers ist die Annahme, dass die jährlich in den Speicher eingehende Menge an Kohlenstoff mit der aus dem Speicher freigesetzten Menge die Waage hält. Der Speicher befindet sich demnach im Fließgleichgewicht. Dies ist unabhängig von der Tatsache, dass die Kohlenstoffflüsse trotzdem beachtlich sein können und der Kohlenstoff im Fall der stofflichen Holz-nutzung erst nach Ablauf der Produktnutzungsdauer zeitlich verzögert wieder abgegeben wird.

Die Verwendung dieses Ansatzes bedingt, dass der Kohlenstoffspeicher ignoriert wird, und da auch keine Speicheränderungen ermittelt werden, beläuft sich der Beitrag der stofflichen Nutzung zu den Netto-Emissionen ebenfalls auf null (Abbildung 3-4). Dies entspricht rechnerisch wiederum der Annahme, dass auch aller Kohlenstoff in der geernteten Biomasse zum Zeitpunkt des Holzeinschlages in die Atmosphäre oxidiert (vgl. Abbildung 1-4, Kap. 1.1.3).

Diesen Ansatz empfahl der IPCC bereits in seinen 1997 überarbeiteten Leitlinien für die Erstellung der jährlichen Treibhausgasinventare unter der Konvention als Default Annahme zur Berücksichtigung des Holzproduktespeichers (vgl. Kap. 4.1). Auch nach den Vorgaben der *Marrakesh Accords* sollte die schiere Existenz von Kohlenstoffspeichern von einer Anrechnung ausgeschlossen sein (s. Kap. 1.1.3) und Holzprodukte wurden – der Annahme folgend, dass sich der Produktspeicher im Fließgleichgewicht befindet – nicht als zu berücksichtigender Speicher für das Kyoto-Protokoll aufgezählt (UNFCCC 2002a, S. 62). In der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls war der Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten daher nicht enthalten (vgl. Kap. 1.1.3) und es wurden, dieser Default-Annahme folgend, keine mit der stofflichen Holznutzung verbundenen Netto-Emissionen berichtet.

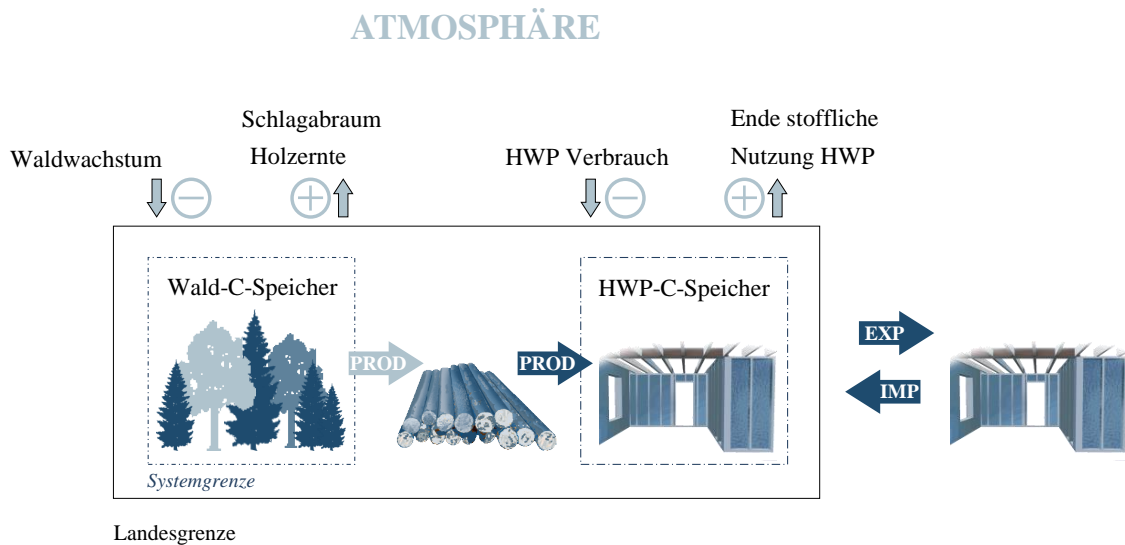
#### Vor- und Nachteile des IPCC Default Ansatzes

- ⊕ Einfache Annahme
- ⊕ Keine Änderung am Berichtssystem der meisten Länder notwendig
- ⊖ Gibt die verzögerte Freisetzung von CO<sub>2</sub> durch die stoffliche Holznutzung nicht wieder
- ⊖ Kein Anreiz für eine Verbesserung des Kohlenstoffmanagements der stofflichen Holznutzung

#### 3.2.1.2 Stock-change Ansatz

Wie der Name des Ansatzes aussagt, werden mittels des *stock-change* Ansatzes die Netto-Emissionen aus Wald und Holzprodukten auf Basis der Änderungen definierter Kohlenstoffspeicher berechnet (vgl. Kap. 1.1.3). Soll mit Hilfe von Flussdaten die Menge an Kohlenstoff ermittelt werden, welche in stofflich verwendetem Holz innerhalb eines Landes gespeichert ist, muss der Kohlenstoffzufluss über den rechnerischen Verbrauch von Holzprodukten quantifiziert werden. Der Verbrauch berechnet sich aus den Daten zur Produktion, zuzüglich der Importe und abzüglich der Exporte. Damit erhält man bei der Ermittlung der Netto-Emissionen auf Basis der Änderungen des Kohlenstoffspeichers über einen definierten Zeitraum (vgl. Kap. 1.1.3) die innerhalb eines Landes stattfindenden Netto-Emissionen. Exportierte Holzprodukte fallen also aus dem Bilanzraum (d. h. der Systemgrenze), so als handelte es sich um einen Abfluss von Kohlenstoff aus dem Speicher, während Importe den Kohlenstoffspeicher des jeweiligen Landes rechnerisch erhöhen; die Systemgrenze entspricht den Landesgrenzen (vgl. Abbildung 3-5).





**ABBILDUNG 3-5:** Schema des *stock-change* Ansatzes

Bei der Verwendung von Inventurmethode werden hingegen, ähnlich wie bei Waldinventuren, die gespeicherten Kohlenstoffmengen in Holzprodukten innerhalb eines Landes zu mindestens zwei Zeitpunkten quantifiziert. Im Fall der Ermittlung der Kohlenstoffspeicheränderungen im Wald auf Basis von Inventuren, spricht man auch von der *stock-difference* Methode (vgl. IPCC 2006, S. 2.10). Da sowohl der Ort (das Land) der Speicheränderung, als auch ihr Zeitpunkt identifiziert werden (im Gegensatz zu dem IPCC Default Ansatz), werden die Speicheränderungen bzw. die daraus resultierenden Netto-Emissionen angerechnet, *wo* und *wann* sie stattfinden (vgl. Lim *et al.* 1999, S. 205).

Das Vorgehen, den Speichereingang über den Verbrauch zu ermitteln, entspricht zunächst einmal den Vorgaben der Treibhausgasberichterstattung, nach welcher die Inventare die Emissionen und die Senkenleistung desjenigen Staatsgebietes enthalten sollen, über welches die Länder Rechtsprechungsgewalt verfügen (UNFCCC 2003a, S. 14, Paragraph 51). Zwar kritisierte beispielsweise Kanada, die Änderungen des Produktspeichers könnten nicht die tatsächlich stattfindenden Emissionen innerhalb dieser Grenzen wiedergeben, doch ist dies nach Meinung von Pingoud (2008) bezüglich der zu verwendenden Daten der einfachste Ansatz, welcher den Zeitpunkt der Emissionen korrekt wiedergibt (UNFCCC 2001c, S. 8). Zudem ist der *stock-change* Ansatz mit der gängigen Methodik im LULUCF-Sektor konsistent, die Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und deren Abbau durch Senken für die Berichterstattung und die Anrechnung unter Artikel 3.3 und 3.4 des Kyoto-Protokolls wie beschrieben mittels Speicheränderungen zu erfassen (vgl. auch Flugsrud *et al.* 2001, S. 5). Allerdings wurde vor allem von den Entwicklungsländern ins Feld geführt, dass der *stock-change* Ansatz für die Annex I-Staaten den verkehrten Anreiz (*perverse incentive*) setzen könne, Holz aus nicht nachhaltig produzierter Bewirtschaftung aus Nicht-Annex I-Staaten zu importieren, und aufgrund der Vergrößerung des Produktspeichers des anrechnenden Landes im Ergebnis Gutschriften zu erhalten (UNFCCC

2001c, S. 41). Eine Beschränkung der Anrechnung importierter Produkte z. B. auf zertifizierte Holzwaren ist aufgrund mangelnder Daten jedoch nicht umsetzbar (Rüter 2008a). In einer vom Klimasekretariat im Auftrag von SBSTA zusammengestellten Analyse der Ansätze geht man im Falle einer Anwendung des *stock-change* Ansatzes zudem von einer Verknappung des Angebots und einer Erhöhung der Holzpreise aus. Dies wird damit begründet, dass sich die Exporte aufgrund ihrer „Bestrafung“ verringern und sich eine erhöhte Nachfrage nach bzw. ein erhöhter Verbrauch von Holzprodukten positiv auf den Speicher auswirken würde (UNFCCC 2003a, S. 24). Bereits Nabuurs und Sikkema (2001, S. 393) kommen zu dem Schluss, dass der Berechnungsansatz einen „Stimulus für eine Nutzung langlebiger Holzprodukte, eine nachhaltige Waldbewirtschaftung und für Bioenergie“ darstellen würde. Der auch von Cowie *et al.* (2006, S. 175) genannte Vorteil des *stock-change* Ansatzes, einen Gegenanreiz für Entwaldung darzustellen, steht allerdings im Widerspruch zu – meist von den Entwicklungsländern – geäußerten Bedenken. Dieser Aspekt ist daher eher von der Ausgestaltung der allgemeinen LULUCF Regeln abhängig (vgl. Kap. 3.1) ebenso wie von der Frage, inwieweit sich einige wenige (Annex I-Staaten) oder alle Staaten weltweit diese Regeln zu Eigen machen.

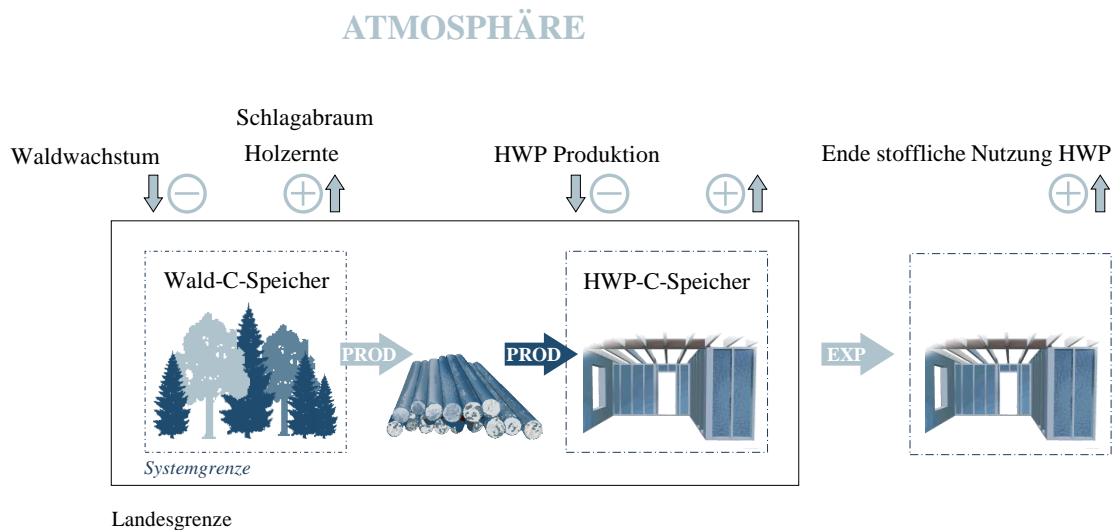
#### Vor- und Nachteile des *stock-change* Ansatzes

- ⊕ Methodische Konsistenz innerhalb LULUCF (C-Speicheränderungen)
- ⊕ Einfachster Ansatz bezüglich der zu verwendenden Daten (Produktions- und Außenhandelsstatistik für Holzwaren), welcher den Zeitpunkt der Emissionen korrekt wiedergibt
- ⊕ Verbrauch von Holzprodukten wird berücksichtigt, somit besteht ein Anreiz zur Verbesserung der stofflichen Holzverwendung im Land, das anrechnet
- ⊕ Prinzip der Hoheit der Staaten über ihr Territorium ist gewährleistet; d. h. ein Land rechnet nur die Netto-Emissionen an, die auch auf seinem Staatsgebiet stattfinden
- ⊖ Möglichkeit zur Anrechnung der Speicherleistung von Holzprodukten, die aus nicht nachhaltiger Forstwirtschaft stammen

#### 3.2.1.3 Produktionsansatz

Ebenso wie mit dem *stock-change* Ansatz, wird auch mit dem Produktionsansatz der Quellen- und Senkeneffekt über die Änderungen der Kohlenstoffspeicher im Wald und in Holzprodukten ermittelt. Im Gegensatz zu dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Berechnungsansatz basiert die Bestimmung der Menge des Kohlenstoffzuflusses in den Produktespeicher aber nicht auf dem Verbrauch von Holzprodukten, sondern ausschließlich auf deren Produktion. Somit wird implizit auch der gespeicherte Kohlenstoff in exportierten Holzprodukten in die Bilanz mit einbezogen und dem produzierenden Land gutgeschrieben, obgleich die Speicherleistung und die am Ende des Produktlebenszyklus entstehenden Emissionen in einem anderen Land stattfinden. Die Importe von Holz sind hingegen von der Berechnung ausgenommen – nicht zuletzt, um

Doppelzählungen zu vermeiden. Die Systemgrenze entspricht demnach nicht den Landesgrenzen, in denen die Netto-Emissionen stattfinden (Abbildung 3-6). Da zwar der Zeitpunkt der Emissionen ermittelt wird, jedoch keine Unterscheidung hinsichtlich des Landes, in welchem der Kohlenstoff den Speicher in stofflich genutzten Holzprodukten wieder verlässt, werden die Netto-Emissionen lediglich angerechnet, *wann* sie stattfinden.



**ABBILDUNG 3-6:** Schema des Produktionsansatzes

Obgleich die Einbeziehung möglicherweise nicht „kohlenstoffnachhaltig“ produzierter Holzprodukte aus Entwicklungsländern, wie beim *stock-change* Ansatz kritisiert, vermieden wird, ist die mangelnde Kontrollmöglichkeit des produzierenden Landes über die Art und Dauer der Verwendung des exportierten Holzes und den daraus entstehenden Netto-Emissionen ein von vielen Ländern genannter Nachteil dieses Anrechnungsansatzes (vgl. UNFCCC 2001c, S. 20, 32, 46). Auch gestaltet sich die Implementierung des Produktionsansatzes aus methodischer Sicht im Vergleich zum *stock-change* Ansatz als schwierig, da bei der Beschreibung des Ansatzes unter der Produktion von Holzprodukten nicht die Herstellung von Halbwaren, sondern in vielen Fällen der Holzeinschlag gemeint ist (vgl. Brown *et al.* 1998, S. 10). Insbesondere Modelle, welche den Stoffstrom vom Holzeinschlag nachverfolgen, sind mit dem Produktionsansatz leichter umzusetzen (vgl. Kap. 2.2.1). Da die Speicherleistung aber nicht durch das Rohmaterial Rundholz erbracht wird, sondern durch die Produkte, die aus dem eingeschlagenen Holz hergestellt werden, ergibt sich u. U. eine Informationslücke, wenn z. B. nicht die Daten über die Produktionsmengen der den Speicher ausmachenden Holzprodukte verwendet werden. Dies betrifft insbesondere fehlende Informationen über das exportierte Rundholz. Pingoud *et al.* beschreiben das Problem wie folgt:

“The basic difficulty is to follow the lifecycle of harvested wood over country borders. For example, wood harvested in one country can be transported as roundwood to a second country, where it is pro-

cessed and transported as a semi-finished product to a third country, where it is finished and end-used. In addition, HWP can be mixtures of wood harvested in several countries. Further, we do not know the true end use in country Y of the particular wood harvested in country X, as country Y may import roundwood (often of different quality and end uses) from many other countries. [...] Some paper products may in fact be mixtures of fibres of domestic and foreign origin.” (Pingoud *et al.* 2003, S. 56)

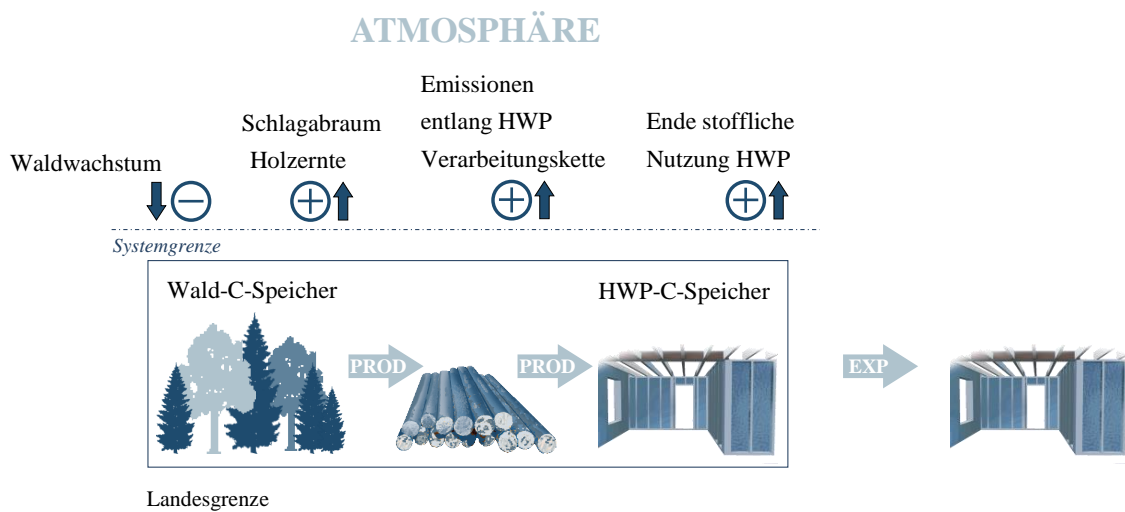
Bei der Verwendung dieses Ansatzes können sich die Unsicherheiten bezüglich des Ergebnisses somit deutlich erhöhen. Zudem findet durch die Einbeziehung des Exports im Prinzip eine Festlegung auf die Anwendung von Flussdatenmethoden (Kap. 2.2) statt, da zur Bestimmung der Speicherhöhe Inventurmethode (Kap. 2.1) kaum anwendbar sind. Selbst wenn ein Land, in welches Holzprodukte exportiert worden sind, Informationen über die Verwendung dieser Produkte zur Verfügung stellen wollte, ist es so gut wie unmöglich, den Importanteil beispielsweise in verbautem Holz auf Basis einer Inventur festzustellen.

#### Vor- und Nachteile des Produktionsansatzes

- ⊕ Zeitpunkt der Emissionen kann korrekt wiedergegeben werden
- ⊖ Nicht vereinbar mit dem Prinzip der Gebietshoheit (s.o. Anrechnung auch von Netto-Emissionen, die außerhalb des Staatsgebietes stattfinden)
- ⊖ Problem der Nachverfolgung von exportierten Holzprodukten
- ⊖ Nachweis der Verwendung des Produktes eigentlich nur durch das Verbraucherland möglich (stoffliche Nutzung vs. sofortige energetische Verwertung)
- ⊖ Die Verwendung aller Exportmärkte müsste abgeschätzt werden (Marktverteilung und Nutzungsdauern); damit verbunden ist ein hoher Aufwand
- ⊖ Bestehende Verfahren zur Abschätzung sind mit großer Unsicherheit behaftet
- ⊖ Kein Anreiz zur Stärkung der heimischen stofflichen Holzverwendung

#### 3.2.1.4 Atmospheric-flow Ansatz

Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Ansätzen, hat der *atmospheric-flow* Ansatz zum Ziel, die tatsächlichen Kohlenstoffflüsse zwischen der Biosphäre und der Atmosphäre zu erfassen und die sich daraus innerhalb der nationalen Grenzen ergebende Quelle oder Senke anzurechnen. Dies gilt nicht nur für den Holzproduktespeicher, sondern für das Gesamtsystem des Forst- und Holzsektors (Abbildung 3-7). Damit unterscheidet sich dieser Ansatz grundlegend von dem *stock-change*- und Produktionsansatz, welche die Emissionen über die Änderung definierter Speicher abschätzen. In der Umsetzung des *atmospheric-flow* Ansatzes sollen alle Kohlenstoffflüsse entlang der Forst-Holz-Kette erfasst werden, *wo* sie stattfinden (im Land), und jegliche CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Atmosphäre angerechnet werden, *wann* sie passieren.



**ABBILDUNG 3-7:** Schema des *atmospheric-flow* Ansatzes

Anders als bei dem *stock-change* Ansatz, welcher für die Netto-Emissionen ermittelt, *wo* und *wann* sie stattfinden, wird in der rechnerischen Umsetzung des *atmospheric-flow* Ansatzes der gesamte Außenhandel von Holz in die Berechnung einbezogen, beispielsweise also auch die Daten von Rundholz, Industrierestholz und Holzkohle. So basiert die Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach dem *atmospheric-flow* Ansatz in der praktischen Umsetzung auf der innerhalb eines Jahres insgesamt verfügbaren Menge an Holz (Rohholzaufkommen zuzüglich der Außenhandelsbilanz aller weiteren holzbasierten Produkte, wie z. B. Industrierestholz oder Holzkohle), von welcher alle Holz mengen abgezogen werden, die dauerhaft in die Nutzung eingehen und dadurch Kohlenstoff über das Betrachtungsjahr hinaus binden (vgl. Pingoud 2002; IPCC 2006; vgl. Kap. 4.2). Während allerdings beim *stock-change* Ansatz, der die Netto-Emissionen auf Basis von Speicheränderungen beschreibt, das exportierte Holz außerhalb der Systemgrenze liegt und die Ausfuhr von Holz somit lediglich in einer geringeren Speicherhöhe resultiert (beim Import verhält es sich genau umgekehrt), wird beim *atmospheric-flow* Ansatz im Falle des Exportes von Kohlenstoff in Holzprodukten ein sofortiger Senkeneffekt für das jeweilige Land verbucht. Zwar gelangt in der Realität kein CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre, doch verringert sich mit dem Export, beispielsweise von Rundholz, die Menge an Kohlenstoff, welche in dem anrechnenden Land in die Atmosphäre oxidieren kann. In Konsequenz werden „Kohlenstoffflüsse in die Atmosphäre, die durch Zersetzung oder Verfeuerung von Rundholz oder Holzprodukten entstehen [d. h. tatsächliche CO<sub>2</sub>-Emissionen, Anm. d. Verf.], [...] von dem verbrauchenden Land angerechnet, wohingegen die Kohlenstoffsequestrierung durch das Waldwachstum dem produzierenden Land zugeschrieben wird“ (Lim *et al.* 1999, S. 209). Dies wirkt sich speziell für Länder mit unausgeglichener Rundholzhandelsbilanz, wie z. B. den Netto-Rundholzexporteur Kanada, deutlich auf die Ergebnisse der Abschätzung aus (vgl. Winjum *et al.* 1998, S. 280).

Somit ist der *atmospheric-flow* Ansatz in jedem Fall inkonsistent mit der im LULUCF-Sektor angewandten Methodik, die zeitliche Dynamik von Netto-Emissionen auf Basis von Änderun-

gen der Kohlenstoffspeicher abzuschätzen. Um den *atmospheric-flow* Ansatz widerspruchsfrei anwenden zu können und mit seiner Verwendung nicht die Massenbilanz der nationalen Berichterstattung zu gefährden, müsste das gesamte System der Berichterstattung im Landnutzungssektor geändert werden (s. Pingoud *et al.* 2004; Cowie *et al.* 2006, S. 172). Kritisiert wurde an dem Ansatz vor allem sein erwarteter Handlungsanreiz auf das anrechnende Land, den Export von Holz zu erhöhen anstatt die Kohlenstoffspeicher zu stärken (vgl. Flugsrud *et al.* 2001, S. 5; Nabuurs und Sikkema 2001, S. 391)

#### Vor- und Nachteile des *atmospheric-flow* Ansatzes

- ⊕ Theoretische Berücksichtigung aller CO<sub>2</sub>-Emissionen entlang des Lebenszyklus von Holzprodukten
- ⊖ Inkonsistenz mit der in LULUCF angewandten Methodik, Netto-Emissionen auf Basis von Speicheränderungen abzuschätzen
- ⊖ Mangelhafte bzw. oftmals fehlende Datengrundlage (z. B. Außenhandel mit Industriestholz)
- ⊖ Setzt aufgrund der methodischen Umsetzung einen Anreiz für Exporte

#### 3.2.1.5 Stock-change of domestic origin Ansatz

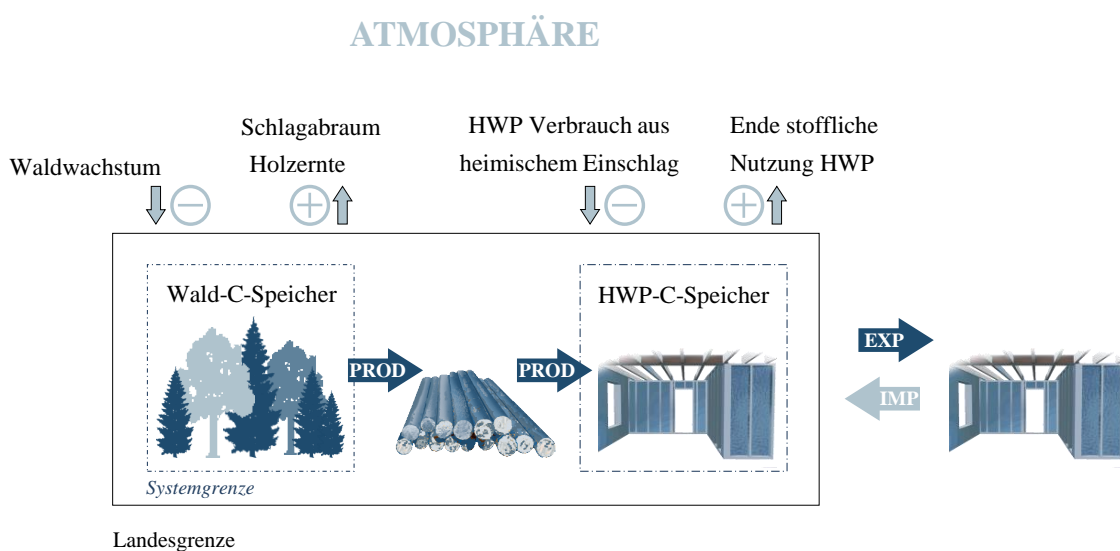


ABBILDUNG 3-8: Schema des *stock-change of domestic origin* Ansatzes

Im Zuge der fehlenden Verständigung auch unter Experten auf einen Anrechnungsansatz, der sowohl für die nationale Treibhausgasberichterstattung wie auch für eine zukünftige Einbeziehung von Holzprodukten in ein verbindliches Klimaabkommen notwendig ist, schlagen Cowie

*et al.* (2006, S. 175) einen weiteren neuen Ansatz vor: den *stock-change of domestic origin* Ansatz.

Dieser Ansatz zur Berechnung der Netto-Emissionen auf Basis der Speicheränderung von Holz aus heimischem Einschlag stellt einen Hybrid zwischen dem *stock-change*- und dem Produktionsansatz dar, in welchem nur Holzprodukte berücksichtigt werden, die im Land der Anrechnung hergestellt (eingeschlagen) und verbraucht werden (Abbildung 3-8). Dabei werden zur Bestimmung des Kohlenstoffzuflusses die exportierten von den produzierten Holzmenge abgezogen, ohne die Importe hinzuzurechnen.

Nach dem Bekunden der Autoren können mit diesem Ansatz die Vorteile des *stock-change* Ansatzes erhalten und die einer Einigung auf einen Ansatz im Weg stehenden Meinungsverschiedenheiten über die Zuschreibung des Außenhandels von Holzprodukten überwunden werden.

#### Vor- und Nachteile des *stock-change of domestic origin* Ansatzes

- ⊕ Vermeidung der Nachteile des *stock-change* und des Produktionsansatzes
- ⊖ Unvollständige Betrachtung des Produktspeichers, da alles gehandelte Holz als sofortige Emission behandelt wird

### 3.2.2 Entwicklung eines neuen Ansatzes zur Anrechnung von Holzprodukten

Nachdem die Verhandlungen der Mitgliedsstaaten der Konvention über die Ausgestaltung der Regeln im LULUCF-Sektor und speziell die Vorgehensweise für eine Berücksichtigung von Holzprodukten unter dem Kyoto-Protokoll mit der Entscheidung 11/CP.7 in Marrakesch auf Eis gelegt worden waren (s. Kap. 1.1.3 und 3.2.1), wurde der Beitrag des Holzproduktespeichers zu den Netto-Emissionen im Zuge der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls unter der Annahme einer sofortigen Emission angerechnet (s. Kap. 3.2.1.1).

Mit Aufnahme der in Kapitel 3.1.2 beschriebenen klimapolitischen Verhandlungen unter der Bali Roadmap sollten wissenschaftlich fundierte Analysen zur Frage einer möglichen Einbindung des Holzproduktespeichers eine Positionierung in den Verhandlungen ermöglichen (s. Kap. 1.1.3). Die auf Grundlage der vorliegenden Forschungsarbeit geleisteten Beiträge bei der Ausgestaltung der Verhandlungstexte werden in diesem Kapitel vorgestellt.

Zunächst wurden die existierenden Vorschläge für einen Berechnungsrahmen des Beitrags von Holzprodukten analysiert und bewertet (Kap. 3.2.2.1), bevor mögliche Wege zur Verbesserung der Anrechnungsverfahren auf Basis definierter Voraussetzungen aufgezeigt werden konnten (Kap. 3.2.2.2 und 3.2.2.3). Die fachwissenschaftlich erarbeiteten Vorschläge wurden anschließend in entsprechenden Verhandlungstexten formuliert und als abgestimmte Positionen



Deutschlands bzw. der EU in die Verhandlungen mit den beteiligten Vertragsstaaten und Verhandlungsgruppen eingebracht (Kap. 3.2.2.4 und 3.2.2.5). Das letzte Unterkapitel erläutert schließlich das mit der Entscheidung 2/CMP.7 gefundene Ergebnis des Verhandlungsprozesses auf die klimapolitischen Rahmenbedingungen einer Anrechnung von Holzprodukten in der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls ab dem Jahr 2013.

Neben der in Kapitel 5.1 diskutierten Eignung beschriebener Berechnungsmethoden (vgl. Kapitel 2), spielte bei der Entwicklung des Berechnungsmodells zur Abschätzung des Beitrags der stofflichen Holznutzung von Beginn an auch die rechnerische Umsetzung der Anrechnungsvorschläge und deren Überprüfung in Bezug auf mögliche Anreize eine große Rolle. Beispielhafte Ergebnisse dieser rechnerischen Analyse verschiedener Anrechnungsoptionen sind in Kapitel 6.4 enthalten.

### 3.2.2.1 Diskussion der bestehenden Berechnungs- bzw. Anrechnungsansätze

Alle in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Berechnungsansätze ermöglichen eine Quantifizierung der Speicherwirkung von Holzprodukten und die Ermittlung des Kohlenstoffabflusses aus diesem Speicher am Ende des Lebenszyklus der Produkte. Allerdings folgt der *atmospheric-flow* Ansatz nicht der im LULUCF-Sektor zugrundeliegenden Vorgehensweise, Netto-Emissionen über Speicheränderungen abzuschätzen (vgl. Kap. 1.1.3). Damit ist er für die derzeitige Treibhausgasberichterstattung eigentlich nicht geeignet.

Da die Ansätze voneinander abweichende Systemgrenzen festlegen und ihre Verwendung unterschiedliche Ergebnisse zur Folge haben, kann eine Anrechnung von Holzprodukten in ein Klimaschutzregime je nach gewähltem Ansatz für ein Land in unterschiedlich hohen Gut- oder Lastschriften resultieren. In diesem Zusammenhang werden den Ansätzen oftmals unterschiedliche Wirkungen im Sinne von Handlungsanreizen für das anrechnende Land unterstellt. So wird sich im Fall gleichbleibender Produktions- und Importmengen von Holz in einem Land eine steigende Ausfuhr von Holz unter dem *stock-change* Ansatz rechnerisch in einer Verkleinerung des nationalen Kohlenstoffspeichers bemerkbar machen, während das exportierte Holz unter dem *atmospheric-flow* Ansatz – sofern seine Verwendung mit der Anrechnung der übrigen Kohlenstoffspeicher im Landnutzungssektor überhaupt konsistent wäre – dem Bilanzraum entzogen wird, wodurch ein Senkeneffekt entsteht, da rechnerisch weniger CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre oxidieren kann.

Im ersten Fall besteht folglich der Anreiz, das Holz im Land zu verbrauchen und so dem Bilanzraum zu erhalten, während im zweiten Fall der Export honoriert wird und zumindest kein Anreiz besteht, das Holz im eigenen Land zu verwenden. Allerdings geht solch eine Betrachtungsweise davon aus, dass die mit einer Anrechnung verbundenen Vermeidungskosten eines Staates auch direkt an die Marktteilnehmer weitergegeben werden: an die Verbraucher oder die Produzenten – je nachdem um welchen Ansatz es sich handelt. Dies kann nach Meinung einiger Autoren wiederum zur Folge haben, dass beispielsweise die Produktionskosten für Holzprodukte



steigen oder verstärkt Holz ex- oder importiert wird (vgl. UNFCCC 2003a, S. 22 ff.; Martino 2004, S. 5 ff.; Ford-Robertson 2003, S. 8 ff.). Doch stellt auch der technische Bericht des Klimasekretariats aus dem Jahr 2003 klar, dass es unwahrscheinlich ist, dass die Berichterstattung oder Anrechnung von Holzprodukten einen wichtigen Faktor bei der Festlegung der Preise und den Mengen von gehandeltem Holz darstellt (UNFCCC 2003a, S. 25). Der Auffassung, dass die Ansätze mit bestimmten Anreizen verbunden sind, welche ein bestimmtes Verhalten des anrechnenden Landes bedingen, liegt zudem die Annahme zugrunde, dass es im Interesse des Staates liegt, seine Treibhausgasbilanz zu optimieren, und der Staat dies mit entsprechenden Maßnahmen zu erreichen sucht. Damit die Anreize auf dem Holzmarkt aber auch ihre Wirkung entfalten, wie sie beschrieben und diskutiert wurden, müssen die Staaten tatsächlich Einfluss auf den Außenhandel von Holz oder das Angebot und die Nachfrage von und nach bestimmten Holzwaren nehmen; es müssen Anreize für ein bestimmtes Verhalten der Marktteilnehmer, beispielsweise in Form von Zöllen, Subventionen, Steuererleichterungen oder ähnlichen Instrumenten, überhaupt erst einmal gesetzt werden. Dies ist aber nicht zwingend der Fall, weshalb z. B. unvorhersehbare Preisentwicklungen aufgrund eines geänderten Angebots oder einer geänderten Nachfrage nach Holz einen viel größeren Einfluss auf das Ergebnis einer Anrechnung haben können. Zudem basieren die Analysen der Auswirkungen der Anrechnungsansätze auf die Märkte und den Außenhandel auf sehr vereinfachenden Annahmen: die Holzprodukte werden als homogene Produktgruppe abgebildet, ohne weitere Differenzierungen entlang der Verarbeitungskette vorzunehmen.

Neben möglichen Auswirkungen auf den Holzmarkt spielen in der Diskussion um die Anrechnungsansätze auch Bedenken eine Rolle, die Anrechnung von Holz könnte die Umweltintegrität eines Klimaabkommens untergraben: So wird beim *stock-change* Ansatz ein steigender Verbrauch von Holz, unabhängig von dessen Herkunft, belohnt, wodurch die Möglichkeit besteht, die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Sektors auch durch den Import von Holz aus nicht nachhaltiger Forstwirtschaft zu verbessern. Da unter dem *atmospheric-flow* Ansatz ein verstärkter Export von Rohholz zu einer deutlich günstigeren CO<sub>2</sub>-Bilanz für das entsprechende Land führt, kann dies ebenfalls negative Auswirkungen auf die Mengennachhaltigkeit der Waldbewirtschaftung haben. Speziell die rechnerische Umsetzung der Berechnungsansätze kann negative Folgen haben und die Umweltintegrität unterminieren. So ist es bedenklich, wenn beim Produktionsansatz auch die Exporte von Rundholz, oder sogar die Handelsbilanz von Holzhackschnitzeln und Industrierestholz einbezogen werden: in vielen Staaten ist mit einer steigenden Nachfrage nach Biomasse für die Energiegewinnung zu rechnen, so dass mögliche Speicherwirkungen berechnet werden, obgleich das Material verbrannt wird und tatsächlich unmittelbare CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht werden (vgl. Kap. 4.3).

Auffallend bei der Diskussion um die „richtigen“ Anrechnungsansätze in der vorhandenen Literatur ist zudem, dass die Regeln bzw. Ansätze, welche für den gesamten LULUCF Sektor im Zuge einer Anrechnung gelten, überhaupt keine Rolle spielen: die Diskussion wurde ausschließlich unter der impliziten Annahme geführt, dass eine Anrechnung von Holzprodukten unter dem

in Kapitel 3.1.1.1 beschriebenen Brutto/netto-Ansatz zum Tragen kommt. Viele der Argumente und diskutierten Marktanreize einer Anrechnung von Holzprodukten können jedoch nur im Zusammenhang mit den allgemein unter LULUCF geltenden bzw. angenommen Anrechnungsregeln überprüft und bewertet werden. Diesem Aspekt sollte daher bei der zeitgleich mit der in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen fachwissenschaftlichen Beratungsleistung stattfindenden Entwicklung des Berechnungsmodells als Ziel der vorliegenden Arbeit, die im Zuge der Klimaverhandlungen stattfand, eine besondere Bedeutung zukommen.

### 3.2.2.2 Bedingungen für die Anrechnung von Holzprodukten

Neben der Einordnung der bestehenden Berechnungsansätze war zunächst die Frage nach den aus fachwissenschaftlicher Sicht notwendigen Voraussetzungen zu beantworten, unter welchen Bedingungen eine Anrechnung von Holzprodukten überhaupt befürwortet werden kann (vgl. Kap. 1.1.3). Nicht zuletzt aufgrund der Tatsache, dass sich die Staaten im Zuge der Verhandlungen um das Kyoto-Protokoll erst auf die Modalitäten und Regeln für den Bereich der Senken einigten, nachdem sie sich auf die Reduktionsziele verpflichtet hatten, wurde die gesamte Einbeziehung der Senken unter dem Kyoto-Protokoll vielfach äußerst kritisch gesehen (u. a. WBGU 1998; Coenen und Sardemann 1998, S. 16 ff.; Schulze *et al.* 2002). In diesem Zusammenhang wurde auch die Rolle der Wissenschaft hinterfragt; so kritisiert Fry (2002, S. 162), dass die bei der Erstellung des IPCC Sonderberichts zu LULUCF involvierten Wissenschaftler vornehmlich Forstwissenschaftler waren, die die Bedeutung der Klimapolitik für den Forstsektor frühzeitig erkannt hätten, und dass die Wirksamkeit von Senkenprojekten in dem „politisch aufgeladenen Prozess“ offensichtlich nicht hinreichend kritisch analysiert worden war (vgl. Kap. 1.1.3 und 2.2.1). Bereits im Vorfeld der Erstellung dieses Sonderberichts hatte auch der wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung angemahnt, dass hierbei „das gesamte Spektrum der Naturwissenschaften vertreten sein [sollte], nicht nur die Forstwissenschaft“ (WBGU 1998, S. 41).

Die frühzeitige und kritische Auseinandersetzung mit den Bedingungen für eine Veränderung der Anrechnungsregeln im Rahmen dieser Forschungsarbeit sollte daher sicherstellen, dass etwaige negative Auswirkungen einer Einbeziehung von Holzprodukten auf die Umweltintegrität eines Abkommens vermieden werden. Bereits 1999 hatten Lim *et al.* Kriterien für die Bewertung der im vorherigen Kapitel vorgestellten Ansätze für Holzprodukte genannt, welche die Durchführbarkeit und Genauigkeit des jeweiligen Anrechnungsansatzes genauso umfassen wie ihre Sachdienlichkeit bezüglich der Erfordernisse der Treibhausgasberichterstattung unter der Klimarahmenkonvention und dem Kyoto-Protokoll sowie der nationalen Klimapolitik. Nach Meinung der Autoren sollte zunächst die Durchführbarkeit des jeweiligen Ansatzes berücksichtigt werden, welche durch die Komplexität, die Verfügbarkeit von Daten bzw. die Kosten ihrer Beschaffung, die Verfügbarkeit nationaler Expertise und die Anwendungsmöglichkeit der zugrundeliegenden Methoden in unterschiedlichen räumlichen Maßstäben bestimmt werden (Lim *et al.* 1999, S. 221).

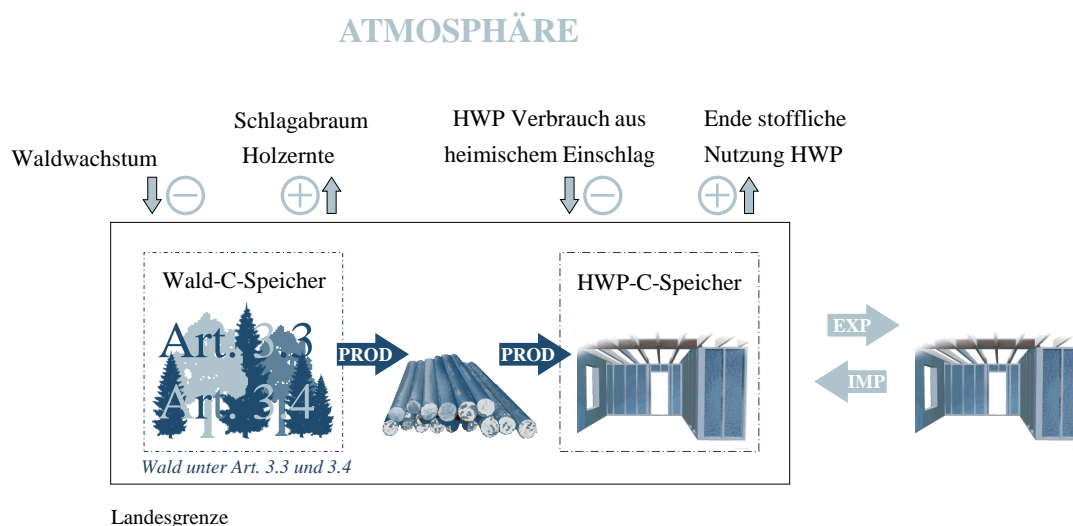
Um das Verständnis über die methodischen und politischen Zusammenhänge bezüglich des Themas zu vergrößern, fand im Vorfeld der 21. Sitzung von SBSTA im Jahr 2004 ein Workshop statt, dessen Teilnehmer weitere Elemente vorschlugen, an denen sich ein zukünftiger Anrechnungsansatz orientieren sollte. Darunter wurden Aspekte wie die Konsistenz des Ansatzes mit dem Ziel der Konvention, die Zurechenbarkeit und Verteilungsgerechtigkeit zwischen Verbraucher- und Produzentenländern, die Auswirkungen auf eine nachhaltige Waldbewirtschaftung und die Nutzung von Bioenergie genannt (UNFCCC 2004, S. 6 ff.). Darüber hinaus fanden ab dem Jahr 2005 mehrere, vor allem von der österreichischen Forschungseinrichtung Joanneum Research in Graz initiierte Expertentreffen und Workshops zum Thema der post-2012 Anrechnungsregeln im LULUCF Sektor statt, welche sich mit der Verbesserung und Ausweitung der für den LULUCF Sektor für die erste Verpflichtungsperiode beschlossenen Anrechnungsregeln befassten. So thematisierte ein drittes Expertentreffen im Frühjahr 2008 auch die Anrechnung von Holzprodukten in einem zukünftigen Klimaregime und definierte Kriterien, die für etwaige Anrechnungsansätze für Holzprodukte gelten sollten (Henschel *et al.* 2008, S. 10). In der Folge des Workshops wurden diese Empfehlungen im Lichte der kritischen Anmerkungen zur Einbeziehung des Senkensektors in ein Klimaschutzabkommen um weitere wesentliche Aspekte ergänzt (vgl. Kap. 3.2.2.1). Diese wurden u. a. im Rahmen eines Workshops der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (*United Nations Economic Commission for Europe*, Abk. UNECE) zum Beitrag der Holzprodukte im Kontext der Klimapolitik und einem Side-Event bei den Zwischenverhandlungen der Nebenorgane der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC SB28) vorgestellt (Grêt-Regamey *et al.* 2008; Rüter 2008b):

- Schaffung von Anreizen für ein verbessertes Management des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten;
- Entgegenwirken bzw. Vermeidung von nicht-nachhaltiger Waldbewirtschaftung (im Sinne eines Abbaus der Kohlenstoffspeicher im Wald);
- Vermeidung von Verlagerungseffekten (*leakage*) und verkehrten Anreizen (*perverse incentives*), z. B. negativer Auswirkungen auf Biodiversität;
- keine Generierung nicht gerechtfertigter Gutschriften, d. h. Gutschriften nur für Aktivitäten, welche tatsächlich CO<sub>2</sub>-Emissionen hervorrufen;
- keine Belohnung der Vertragsparteien für business-as-usual Aktivitäten;
- keine wesentliche Erhöhung von erlaubten Emissionsmengen der Länder oder Erhöhung der erlaubten Emissionsmengen über alle Annex I-Staaten hinweg;
- der Berechnungsansatz muss konsistent mit der Methodik im LULUCF-Sektor sein und mit den vorhandenen Daten und Methoden umsetzbar sein;
- das Hauptziel eines Kyoto-Folgeabkommens ist eine Reduzierung der globalen Treibhausgasemissionen; auch eine Anrechnung von Holzprodukten muss sich daran messen lassen.

### 3.2.2.3 Verknüpfung der Anrechnung von Holzprodukten mit der Aktivität im Wald

Neben den Voraussetzungen einer Anrechnung von Holzprodukten thematisierte im Frühjahr 2008 ein von der IEA Bioenergy Task 38 organisierter Expertenworkshop in Graz auch die ungelöste Frage nach einem einheitlichen Anrechnungsansatz. Auf Basis der im vorherigen Kapitel vorgestellten Analyse der verschiedenen Berechnungsansätze (s. Kap. 3.2.1) wurde ein im Rahmen der vorliegenden Arbeit entstandener Vorschlag präsentiert und diskutiert, wonach eine Anrechnung von Holzprodukten zunächst:

- nur für Länder wählbar ist, die die Auswirkungen der Waldbewirtschaftung anrechnen (z. B. unter Artikel 3.4 des Kyoto-Protokolls), und welcher
- ausschließlich auf Holzprodukte beschränkt ist, die von Ländern hergestellt werden, die ihrerseits Aktivitäten im Wald unter Artikel 3.3 und 3.4 anrechnen.



**ABBILDUNG 3-9:** Schema des *restricted stock-change* Ansatzes

Dieser als *restricted stock-change* bezeichnete Ansatz (beschränkter Speicheränderungsansatz, Abbildung 3-9) basiert u. a. auf einer bereits 2003 geäußerten Idee (vgl. UNFCCC 2003a, S. 17), Holzprodukte als separaten Kohlenstoffspeicher einer Aktivität zuzuordnen. Diese wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit weiter ausgearbeitet; so verhindert erst die Beschränkung einer Anrechnung auf Länder, die auch den Waldkohlenstoffspeicher in dem Anrechnungsregime berücksichtigen, aus welchem die Holzprodukte stammen, dass mit der Anrechnung von Holzprodukten ein Anreiz geschaffen wird, den Produktespeicher zu Lasten der Waldspeicher, d. h. durch eine gezielte Ausweitung des Holzeinschlages, zu erhöhen. Neben den in Kapitel 3.2.1.3 beschriebenen Schwierigkeiten, als Exportland abgesicherte Informationen über die Verwendung der ausgeführten Holzwaren zu erhalten, ist es ebenso unmöglich, über die statistischen Daten zu eingeführten Holzprodukten das Herkunftsland zu identifizieren

und die globalen Handelswege von Holzprodukten nachzuverfolgen, da die Daten zu Wareneinfuhren immer nur die letzte Handelsstation angeben. Daher wurde angeregt, diese beschränkte Anrechnungsmöglichkeit mit der Idee des in Kapitel 3.2.1.5 beschriebenen Ansatzes *stock-change of domestic origin* zu kombinieren und die Anrechnung auf Holzprodukte zu begrenzen, die im anrechnenden Land hergestellt werden (Henschel *et al.* 2008, S. 11; Rüter 2008a; Rüter 2008b).

#### 3.2.2.4 Verhandlungen von Bali (COP13) bis Kopenhagen (COP15)

Während der Verhandlungen um die zukünftige Ausgestaltung eines Abkommens für die Zeit nach dem Ende der ersten Verpflichtungsperiode 2012 wurden Holzprodukte erstmalig Mitte des Jahres 2008 bei der 5. Sitzung der AWG-KP in Bonn als ein zu berücksichtigendes Thema – allerdings noch ohne einen konkreten Bezug zu möglichen Ansätzen – erwähnt (UNFCCC 2008c, S. 12, 26). Im Vorfeld eines Workshops im August des gleichen Jahres in Accra reichten zahlreiche Länder weitergehende Erläuterungen ihrer Vorstellungen über die Ausgestaltung der Regeln in Submissionen an das Klimasekretariat ein. Darunter fällt auch ein von Neuseeland vorgeschlagener Anrechnungsansatz für Holzprodukte *emissions to atmosphere*, welcher in Anlehnung an den Produktionsansatz zwar eine zeitlich verzögerte Freisetzung des geernteten Holzes aufgrund der stofflichen Holznutzung vorsieht, jedoch die Berücksichtigung der Emissionen aus dem bestehenden Holzproduktespeicher ausschließt (New Zealand 2008). Eine Analyse und Quantifizierung dieses Ansatzes konnten bereits zu diesem Zeitpunkt mit Hilfe des vorliegenden Modells (s. Kap. 5.2) vorgenommen werden, so dass die in Kapitel 6.2.3.1 dargestellten Ergebnisse mit den in Kapitel 3.2.2.1 formulierten Zielen abgeglichen und in die Verhandlungen eingebracht werden konnten.

Im Ergebnis der Gespräche unter der AWG-KP kristallisierten sich bis Ende des Jahres auf der Vertragsstaatenkonferenz in Poznan, Polen (COP14) drei mögliche Optionen für die Berücksichtigung der stofflichen Holznutzung in einem Klimaabkommen ab dem Jahr 2013 heraus (UNFCCC 2008b, S. 3):

- Keine Anrechnung von Holzprodukten,
- Anrechnung als Möglichkeit eine verzögerte Anrechnung der Emissionen aus dem Holzeinschlag zu erlauben, das Waldflächen entnommen wurde, die unter den Artikeln 3 Paragraphen 3 und 4, sowie unter Artikel 6 (CDM Senkenprojekte) angerechnet werden (*emissions to atmosphere* Ansatz), und
- Erstellung von Vorschriften für die Einbeziehung von Holzprodukten unter der Verwendung möglicher Anrechnungsansätze, wie dem *stock-change*, Produktions- oder *atmospheric-flow* Ansatz (vgl. Kap. 3.2.1).

Ähnlich wie bereits unter den Verhandlungen für die Ausgestaltung der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls gab es auch innerhalb der EU sowohl Befürworter des Produktionsansatzes als auch des *stock-change* Ansatzes. Im weiteren Verlauf der Verhandlungen und

der Abwägung der jeweiligen Vor- und Nachteile der Anrechnungsoptionen gelang es schließlich Mitte des Jahres 2009 in Bonn, sich innerhalb der EU auf einen einheitlichen Vorschlag für das Vorgehen bei der Anrechnung für Holzprodukte zu einigen (EU 2009; BMELV 2009):

“Carbon in wood removed from forests accounted for under the Kyoto Protocol under Article 3 shall be accounted for on the basis of default instantaneous oxidation or on the basis of estimates as to when emissions occur, provided verifiable and transparent data are available.

When accounting is on the basis of estimates as to when emissions occur:

- It shall be confined to only harvested wood products originating from harvest for which emissions and removals have been included in the accounting of the Party, and in the same way as for other pools. Where a ratio is applied for accounting of emissions and removals from forest management it shall also apply to the harvested wood products pool.
- It shall be based on changes in the harvested wood products pool consumed and produced domestically.
- Parties may also choose to account for carbon in exported harvested wood products originating from domestic harvest based on changes in the exported HWP pool.
- Estimation of net-emissions from harvested wood products shall specify product categories and underlying assumptions for both domestic and export markets. Where exported wood is accounted for, such estimations shall be reported separately for each country to which the harvested wood products are exported.
- Emissions, occurring during the commitment period, from the harvested wood pool arising from wood harvested prior to 31 December 2007 shall also be accounted, using the same procedure as in indent I.”

Im Kern sah dieser EU-Vorschlag demnach ein dreigliedriges Vorgehen vor:

- Annahme einer sofortigen Emission (s. Kap. 3.2.1.1) sofern keine verlässlichen Daten vorhanden sind;
- verpflichtende Anrechnung der Netto-Emissionen von heimisch verbrauchtem Holz, welches heimisch produziert wurde und aus Wald stammt, dessen Netto-Emissionen ebenfalls angerechnet werden, sofern transparente und verifizierbare Daten vorliegen;
- optionale Anrechnung der Netto-Emissionen aus dem Verbrauch von exportiertem Holz unter den gleichen genannten Bedingungen möglich, sofern verlässliche Daten vorliegen. Falls keine verifizierbaren Daten vorhanden sind, wird eine sofortige Emission angenommen.

Zugleich reflektiert die unter dem ersten und zweiten Gliederungspunkt des EU-Vorschlages genannte Beschränkung die in Kapitel 3.2.2.3 beschriebene Vorgehensweise, nur heimisch produzierte und verbrauchte Holzprodukte aus Wald zu berücksichtigen, dessen CO<sub>2</sub>-Bilanz ebenfalls angerechnet wird. Durch die Beschränkung der verpflichtenden Produkthanrechnung auf Holzprodukte, über welche die Länder detaillierte Daten und Informationen über ihre Verwen-

dung besitzen, und durch die Vermeidung eines potentiell einseitigen Aufbaus des Holzspeichers zu Lasten der Waldspeicher (vgl. Kap. 3.2.2.2) sollte die Umweltintegrität eines möglichen internationalen Klimaschutzabkommens gewahrt bleiben, deren Sicherstellung durch die bisherigen Vorschläge nicht hätte gewährleistet werden können. Zugleich wird sichergestellt, dass sich eine mögliche Reduzierung der anrechnungsfähigen Kohlenstoffmengen im Waldbereich (z. B. durch einen Diskontierungsfaktor, hier „*ratio*“ genannt) ebenso im Produktbereich widerspiegelt. Die Einschränkung der Möglichkeit einer Anrechnung von Holzprodukten auf Basis von Speicheränderungen (d. h. *wann* Emissionen stattfinden) auf das Vorhandensein transparenter und verifizierbarer Daten geht ebenfalls auf die vorliegende Arbeit zurück: die Analyse zahlreicher bestehender Modelle hatte gezeigt, dass die Verweildauern des Kohlenstoffs im Produktspeicher oftmals auf Basis jährlicher Daten zum Holzeinschlag in Kombination mit konstant angenommenen Nutzungsmustern abgeschätzt werden – ohne jedoch die tatsächlichen Schwankungen der Nachfrage bzw. die Produktionsmengen nach Holzprodukten abzubilden (vgl. Kap. 2.2.1 und 5.1.2.1). Zwar sollte die unter dem dritten Gliederungspunkt ermöglichte Einbeziehung von exportiertem Holz, wie sie vor allem von Rundholz exportierenden Ländern wie Neuseeland oder Schweden gefordert wurde, im Sinne einer Kompromisslösung als freiwillige Option erlaubt sein, doch hatte auch die unter dem vierten Gliederungspunkt geforderte Spezifizierung der Produktkategorien und die verpflichtende Berichterstattung getrennt nach Ländern das Ziel, die Nachvollziehbarkeit der Abschätzungen sicherzustellen und mit der Einbeziehung von Exporten verbundene mögliche negative Anreize (vgl. Kap. 3.2.1.3) so gering wie möglich zu halten. Der letzte Gliederungspunkt wurde in Reaktion auf den geforderten Ausschluss der geerbten Emissionen aus dem bestehenden Produktspeicher (*emissions to atmosphere* Ansatz) aufgenommen, der in Kombination mit einer Brutto/netto-Anrechnung enorme Gutschriften ermöglicht hätte (s. Kap. 3.2.2.5 und 6.2.3.1).

Neben der grundsätzlich bestehenden Möglichkeit, Holzprodukte auch in einem post-Kyoto Abkommen weiterhin nicht zu berücksichtigen, wie von einigen Nicht-Annex I-Staaten favorisiert, konnten sich die Annex I-Staaten im Laufe zwei weiterer Sitzungen der AWG-KP im Herbst 2009 in Bangkok und Barcelona von ursprünglich drei vorgeschlagenen Anrechnungsoptionen (EU, CH und CA) auf eine Option einigen<sup>4</sup>, wonach Holzprodukte als weiterer Kohlenstoffspeicher berücksichtigt werden sollten (UNFCCC 2009c; UNFCCC 2009a; UNFCCC 2009b; UNFCCC 2009e):

“[Option 2: (*paragraphs 21 ter through 21 novies*)

21 ter. Emissions from carbon in wood removed from forests accounted for under Article 3 shall be accounted for by the producing country, as a default, on the basis of instantaneous oxidation, or on the basis

<sup>4</sup> In eckige Klammern gesetzter Text in UN-Dokumenten stellt lediglich ein Vorschlag dar, über welchen keine Übereinstimmung zwischen den verhandelnden Vertragsstaaten besteht. Im Sinne des Völkerrechts müssen Vorgaben von der Konferenz der Vertragsstaaten (COP) jedoch einstimmig beschlossen werden.

of estimates of when emissions occur, provided that verifiable and transparent data are available. Accounting<sup>15</sup> shall be confined to harvested wood products<sup>16</sup> originating from harvested forest for which emissions and removals have been included in the accounting of the Party.

21 quater. Emissions from carbon in wood removed from forests accounted for under Article 12 shall be accounted, as a default, on the basis of instantaneous oxidation, or on the basis of estimates of when emissions occur, provided that verifiable and transparent data are available. Accounting shall be confined to harvested wood products originating from harvested forest for which emissions and removals have been included in the accounting of the afforestation/reforestation project activity.

21 quinquies. Accounting may be on the basis of when emissions occur for the domestically produced and consumed harvested wood products pool only, and may also be on the basis of when emissions occur for the exported harvested wood products pool.

21 sexies. Estimates of net emissions from harvested wood products shall specify product categories and the underlying assumptions used for both domestic and export markets.

21 septies. When a Party accounts for exported harvested wood products on the basis of when emissions occur, estimates shall be reported separately for each country to which the harvested wood products are exported, using nationally specific data on the fate of the wood in the importing country.

21 octies. Emissions from harvested wood products in solid waste disposals sites shall be accounted for on the basis of instantaneous oxidation.

[21 novies. Emissions that occur during the commitment period<sup>17</sup> from the harvested wood pool arising from wood harvested by the Party prior to 31 December 2007 [and since 1990] shall also be accounted for, using the same procedure as above and in line with the latest Intergovernmental Panel on Climate Change guidance, approved by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol.]

21 decies. Parties included in Annex I shall maintain consistency in the treatment of harvested wood products in the reference level and in the commitment period, and in order to do so shall make an accounting adjustment if necessary, and shall report on how the adjustment was made.]

[...]

<sup>15</sup> Where a ratio is applied for accounting of emissions and removals from forest management, it shall also apply to the harvested products pool (*will be further elaborated in the text pending on the accounting rules to be agreed*).

<sup>16</sup> Definitions and classifications of wood products provided by the Food and Agriculture Organization of the United Nations shall apply.

<sup>17</sup> Noting that emissions from harvested wood products originating from harvests accounted for under Article 3, paragraph 3, and for some parts of Article 3, paragraph 4, (for those Parties that elected forest management) over the period 2008 to 2012 have already been accounted for on the basis of instantaneous oxidation of carbon in harvested wood products.” (UNFCCC 2010b)

Insbesondere in Bezug auf den zu verwendenden Ansatz zur Ermittlung des Speichers von Kohlenstoff in Holz, das in Deponien lagert, wurde der Verhandlungstext präzisiert, um sicherzu-



stellen, dass nur Holzprodukte in der Anrechnung berücksichtigt werden, die sich in stofflicher Nutzung befinden. Besonders Australien und Kanada forderten die Einbeziehung von Holzprodukten in Deponien, wie sie vor allem in Berechnungsmodellen, die vom Holzeinschlag in der Modellierung der Kohlenstoffspeicherwirkung ausgehen, berücksichtigt werden (s. Kap. 2.2.1). In Reaktion auf diese Forderungen konnte sich die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelte deutsche Verhandlungsposition im Zuge zahlreicher Gespräche mit folgender Begründung zunächst auch als Position der EU etablieren:

Die Anrechnung von Holz in Deponien (unter allen LULUCF Anrechnungsoptionen) setzt einen Anreiz, die Speicher in Deponien zu erhöhen, was die Politik vieler Länder (u. a. der EU und Deutschlands) in ihrem Bestreben, den Anteil erneuerbarer Energie (u. a. aus Altholz) zu erhöhen, konterkarieren würde (vgl. die Abfalldeponierichtlinie der EU (1999), die Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (AltholzV 2002) und den Nationalen Biomasseaktionsplan für Deutschland, BMU/BMELV 2009). Auch beschreibt zwar eine Handvoll Publikationen die Speicherwirkung von deponiertem Holz, doch existiert keine gesicherte Datengrundlage (d. h. Statistiken) über die in Deponien jährlich eingehenden Holzmenngen, welche alle Annex I-Staaten für eine Anrechnung benötigen würden (vgl. Kap. 2.2.4 und 5.1.3). Das vielleicht wichtigste Argument gegen eine Anrechnung der Netto-Emissionen aus dem Holzkohlenstoffspeicher in Deponien ist jedoch, dass ein Großteil der existierenden Modelle (u. a. CBM-FPS, Carbon-Object Tracker, HARVCARB, WOODCARB und CO2FIX), welche im Falle einer Berücksichtigung von Holzprodukten zur Abschätzung der Netto-Emissionen herangezogen werden können, eine sehr langfristige bzw. sogar eine ewige Speicherwirkung des Kohlenstoffs in Deponien unterstellen (s. S. 54, 56 und 61). Dies bedeutet jedoch eine fortlaufende Senkenfunktion allein auf Basis der unterstellten Modellannahmen, die im Falle einer Anrechnung unter LULUCF die Reduktionsbemühungen in anderen Sektoren deutlich minimiert. Eine Einbeziehung der in Altholz deponierten Kohlenstoffmengen würde damit klar den in Kapitel 3.2.2.2 formulierten Rahmenbedingungen einer Anrechnung von Holzprodukten widersprechen und kann die Umweltintegrität eines Abkommens massiv unterminieren. Aufgrund der ablehnenden Haltung der EU wurde die, insbesondere von Kanada, mit Nachdruck hervorgebrachte Forderung einer Einbeziehung von Holz in Deponien schließlich fallengelassen.

Bis zu Beginn der Verhandlungen auf der 15. Vertragsstaatenkonferenz in Kopenhagen blieben jedoch noch zahlreiche offene Punkte ungelöst, welche eine Einigung im Vorfeld der Konferenz zumindest zweifelhaft erscheinen ließen. So sah der unter Option 2 enthaltene Verhandlungstext (vgl. S. 95) die Möglichkeit einer Anrechnung von Holzprodukten aus CDM-Forstprojekten unter Artikel 12 vor (vgl. Kap. 1.1.2) – eine Forderung, die von Neuseeland eingebracht wurde (21 quater) –, welcher eine Vielzahl von Annex I- und Nicht-Annex I-Staaten kritisch gegenüber stand (UNFCCC 2010b). Auch hätte die Formulierung des Paragraphen 21 quinquies erlaubt, wahlweise exportierte Holzprodukte in die Abschätzung der Netto-Emissionen einzubeziehen und die für den heimischen Verbrauch bestimmten Produkte, d. h. die heimischen Netto-

Emissionen aus dem Holzspeicher als sofortige Emission zu berücksichtigen und damit bei Bedarf zu ignorieren. Dies spiegelte das Bestreben einiger Vertragsstaaten wider, bei der Ausgestaltung der Regeln eine größtmögliche Flexibilität in ihrer späteren Anwendung auf nationaler Ebene zu erreichen. Vor dem Hintergrund der in Kapitel 3.2.1.3 diskutierten Nachteile der Einbeziehung der Exporte sowie der in Kapitel 3.2.2.1 genannten Voraussetzungen einer Anrechnung von Holzprodukten wäre solch ein Verfahren für eine Vielzahl von Staaten, darunter Deutschland, jedoch nicht tragbar gewesen. Auch die Frage einer Einbeziehung des bestehenden Speichers bzw. der geerbten CO<sub>2</sub>-Emissionen (i.e. Kohlenstoffabfluss, s. Kap. 2.2.3) war noch ungeklärt, weshalb der Paragraph 21 novies u. a. auf Drängen Neuseelands in Klammern gesetzt wurde. Mit dem Scheitern der Verhandlungen in Kopenhagen um ein Nachfolgeabkommen des Kyoto-Protokolls wurden auch die Diskussionen um die noch offenen Fragen im Bereich der Holzprodukte vertagt.

### 3.2.2.5 Verhandlungen bis Cancún (COP16) – Referenzwerte für Holzprodukte

Im Jahr 2010 fokussierten die Diskussionen der Staaten nach der Konferenz in Kopenhagen immer mehr auf den Referenzwert-Ansatz als Anrechnungsoption für die Waldbewirtschaftung (s. Kap. 3.1.3). Damit kristallisierte sich heraus, dass eine mögliche Anrechnung von Holz, welches aus Waldbewirtschaftung stammt, ebenfalls unter dieses Anrechnungsverfahren fallen würde. Je nachdem, wie der Referenzwert für Waldbewirtschaftung ermittelt wird, haben die geerbten Emissionen (vgl. Kap. 2.2.3) keine Auswirkungen auf die Anrechnung. Da sich Netto-Emissionen im Falle einer Anrechnung mit einem projizierten Referenzwert herausrechnen, ließ sich auch die Frage nach einer Einbeziehung der geerbten Emissionen aus dem bestehenden Produktspeicher klären. Zur Verdeutlichung dient Tabelle 3-1.

**TABELLE 3-1:** Geerbte Emissionen bei der Anrechnung mit projiziertem Referenzwert

Vorgehen bei der Anrechnung	
1) Referenzwert inkl. der geerbten Emissionen	$(A+B)$
2) Tatsächlich ermittelter Wert in der Verpflichtungsperiode	$(A+C)$
3) Anrechnung	$(A+C) - (A+B) = C - B$

*Wobei:*

$A$  = Geerbte Emissionen Jahr

$B$  = Projizierte Netto-Emissionen aus dem Produktspeicher vom Kohlenstoffzufluss während der Verpflichtungsperiode

$C$  = Beobachtete Netto-Emissionen aus dem Produktspeicher vom Kohlenstoffzufluss während der Verpflichtungsperiode

Dies spiegelte sich dann auch in einem ersten Textentwurf zur Behandlung von Holzprodukten im Referenzwert wider, wobei der Vorschlag keinem Beschluss über eine Anrechnungsmethode zu Waldbewirtschaftung vorweggreifen sollte und in der Folge noch mehrmals abgeändert wurde:

“21 sexes. [...] Emissions from harvested wood products removed from forests prior to 1 January 2013 may be excluded from the forest management reference level and accounting when the forest management reference level is based on a projection of emissions/removals in the second commitment period, subject to the provision regarding consistency in paragraph 21 septies.” (UNFCCC 2010a, S. 36)

Die Kombination mit einem Referenzwert fand nun auch die Zustimmung einiger Nicht-Annex I-Länder und man unterstützte den Vorschlag, den Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten verpflichtend anzurechnen:

“25. Each Party included in Annex I shall account for all changes in the following carbon pools: above-ground biomass, below-ground biomass, litter, dead wood, [and] soil organic carbon [and harvested wood products. With the exception of harvested wood products,] a Party may choose not to account for a given pool in a commitment period, if transparent and verifiable information is provided that demonstrates that the pool is not a source.” (UNFCCC 2011b, S. 36)

Doch auch weitere Punkte zur Anrechnung von Holzprodukten, über die bis dahin Uneinigkeit geherrscht hatte, konnten gelöst bzw. verbessert werden. So gelang es, sich darauf verständigen, dass eine Anrechnung nur auf nationaler Ebene stattfinden sollte und nur Holz aus Wald berücksichtigt wird, der von dem gleichen Land unter Artikel 3 angerechnet wird, (keine Holzprodukte unter Artikel 12 des Kyoto-Protokolls). Auf Basis der in Kapitel 5.1 beschriebenen Methodenbewertung konnte auch die in Kapitel 2.2.3.5 beschriebene Zerfallsfunktion als Defaultmethode festgeschrieben werden. Aufgrund der vorgeschlagenen verpflichtenden Anrechnung (d. h. auch im Falle einer drohenden Netto-Quelle des Produktspeichers) wurde die noch im Vorjahresentwurf (s. Kap. 4.2.2.4) enthaltene Forderung einer detaillierten Berichterstattung für exportierte Holzprodukte fallengelassen. Zugleich wurde spezifiziert, dass nur dann länderspezifische Halbwertszeiten oder Methoden verwendet werden können, die im Einklang mit den jeweils zuletzt verabschiedeten IPCC Richtlinien stehen, wenn verifizierbare und transparente Daten vorliegen. Auch der Vorschlag, die Speicherleistung von Holz aus Entwaldung aus Gründen der Umweltintegrität nur auf Basis der Annahme einer sofortigen Emission anrechnen zu dürfen (vgl. Kap. 3.2.1.1), wurde – wenn auch geklammert – aufgenommen:

“27. Emissions from harvested wood products removed from forests which are accounted for by a Party under Article 3 shall only be accounted for by that Party. Accounting shall be on the basis of the first-order decay function<sup>19</sup> with default half-lives<sup>20</sup> of two years for paper, 25 years for wood panels and 35 years for saw wood. Alternatively, for domestically produced and consumed harvested wood products only, a Party may use country-specific data to replace the default half-lives specified above, or to account

for such products in accordance with the definitions and estimation methodologies in the most recently adopted IPCC guidelines and any subsequent clarifications agreed by the Conference of the Parties, provided that verifiable and transparent data are available. [Harvested wood products resulting from deforestation shall be accounted for on the basis of instant oxidation.]

28. Where carbon dioxide emissions from harvested wood products in solid waste disposal sites are separately accounted, this shall be on the basis of instantaneous oxidation. Wood harvested for energy purposes should be accounted for on the basis of instantaneous oxidation. [...]

<sup>19</sup> Using equation 12.1 of the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

<sup>20</sup> Half-lives are based on Table 3a.1.3 of the 2003 IPCC GPG-LULUCF.” (UNFCCC 2011b, S. 34)

Zudem wurde der Text in Bezug auf die zu verwendende Methode für Holz, welches in Depo-nien lagert, ebenso wie für Holz, welches zum Zweck der Energiegewinnung geerntet wurde, präzisiert, um sicherzustellen, dass nur Holzprodukte in der Anrechnung berücksichtigt werden, die für die stoffliche Nutzung bestimmt sind.

Auf Anfrage der EU Kommission und der belgischen Ratspräsidentschaft wurden Anfang des Jahres 2011 mit Hilfe des in Kapitel 5.2 beschriebenen Modells Projektionen zur zukünftigen Entwicklung der Netto-Emissionen aus dem Produktespeicher für die Verwendung der EU-Mitgliedsstaaten gerechnet. Zu diesem Zweck wurden die bis dahin vorgeschlagenen Regeln in dem Berechnungsmodell WoodCarbonMonitor, das im Zuge der Auseinandersetzung mit dem Forschungsthema dieser Arbeit entwickelt wurde, implementiert und die projizierten Netto-Emissionen für alle EU Staaten auf Basis der verfügbaren Informationen über den zukünftigen Holzeinschlag abgeschätzt (Rüter 2011a, vgl. Kap. 6.3.2). Anschließend wurden die Werte Mitte des Jahres 2011 zusammen mit den zugrundeliegenden Annahmen von einem internationalen Expertenteam evaluiert (vgl. Kap. 3.1.3). Von den insgesamt 26 berechneten Referenzwerten für die Netto-Emissionen aus Holzprodukten in EU Mitgliedsstaaten verwendeten 17 Länder (Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Frankreich, Griechenland, Italien, Lettland, Litauen, Niederlande, Polen, Rumänien, Slowakei, Spanien, Tschechische Republik und Ungarn) die Daten zur Submission an das Klimasekretariat.<sup>5</sup> Zugleich übernahmen 16 Länder diese berechneten Werte in den Appendix des Anhangs des in Durban beschlossenen Entscheidungstextes 2/CMP.7, der im folgenden Kapitel vorgestellt wird, mit dem Ziel einer Anrechnung der Holzprodukte auf Basis eines Referenzwertes für Waldbewirtschaftung im LULUCF Sektor (UNFCCC 2012a).

### **3.2.2.6 Beschluss von Durban (COP17) zur Anrechnung und Berichterstattung von Holzprodukten**

Im Vorfeld der Vertragsstaatenkonferenz in Durban Ende des Jahres 2011 fanden weitere Sitzungen der AWG-KP in Bangkok, Bonn und Panama statt. Dabei wurde insbesondere die Eig-

<sup>5</sup> <http://unfccc.int/bodies/awg-kp/items/5896.php>

nung der vorgeschlagenen Halbwertszeiten für Halbwaren diskutiert und der Frage nachgegangen, inwieweit das Vorhandensein von Daten über die Herstellung und die Ausfuhr von Holzprodukten Voraussetzung für eine Anrechnung sein sollte (vgl. Kap. 3.2.2.2). Erst kurz vor Abschluss der Konferenz in Durban konnten sich dann alle Staaten auf folgenden Vertragstext einigen, der die Anrechnung der stofflichen Holznutzung in einer zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls regelt:

“16. Emissions that occur during the second commitment period from harvested wood products removed from forests prior to the start of the second commitment period shall also be accounted for. In the case the forest management reference level is based on a projection, a Party may choose not to account for the emissions from harvested wood products originating from forests prior to the start of the second commitment period, and shall ensure consistency in the treatment of the harvested wood products pool in the second commitment period in accordance with paragraph 14 above. Emissions from harvested wood products already accounted for during the first commitment period on the basis of instantaneous oxidation shall be excluded. The treatment of harvested wood products in the construction of a projected forest management reference level shall be on the basis of provisions outlined in paragraph 29 below and shall not be on the basis of instantaneous oxidation.<sup>2</sup> [...]

26. Each Party included in Annex I shall account for all changes in the following carbon pools: above-ground biomass, below-ground biomass, litter, dead wood, soil organic carbon and harvested wood products.<sup>3</sup> With the exception of harvested wood products, a Party may choose not to account for a given pool in a commitment period, if transparent and verifiable information is provided that demonstrates that the pool is not a source.

27. Emissions from harvested wood products removed from forests which are accounted for by a Party under Article 3, paragraphs 3 and 4, shall be accounted for by that Party only. Imported harvested wood products, irrespective of their origin, shall not be accounted for by the importing Party.

28. Accounting shall be on the basis of instantaneous oxidation.

29. Notwithstanding paragraph 28 above, and provided that transparent and verifiable activity data for the harvested wood product categories specified below are available, accounting shall be on the basis of the change in the harvested wood products pool during the second and subsequent commitment periods, estimated using the first-order decay function<sup>4</sup> with default half-lives<sup>5</sup> of two years for paper, 25 years for wood panels and 35 years for sawn wood.

30. A Party may use country-specific<sup>6</sup> data to replace the default half-lives specified above, or to account for such products in accordance with the definitions and estimation methodologies in the most recently adopted IPCC guidelines and any subsequent clarifications agreed by the Conference of the Parties, provided that verifiable and transparent activity data are available and that the methodologies used are at least as detailed or accurate as those prescribed above.

31. Harvested wood products resulting from deforestation shall be accounted for on the basis of instantaneous oxidation.

32. Where carbon dioxide emissions from harvested wood products in solid waste disposal sites are separately accounted for, this shall be on the basis of instantaneous oxidation. Carbon dioxide emissions from wood harvested for energy purposes shall be accounted for on the basis of instantaneous oxidation. [...]

<sup>2</sup> Taking in to account the provisions of paragraph 32 below.

<sup>3</sup> The accounting of this pool may be on the basis of instantaneous oxidation.

<sup>4</sup> Using equation 12.1 of the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, as a basis for estimating changes in the harvested wood products pool during a commitment period.

<sup>5</sup> Half-lives are based on table 3a.1.3 of the 2003 IPCC GPG-LULUCF.

<sup>6</sup> In the case of exported harvested wood products, country-specific data refers to country-specific half-lives and harvested wood products usage in the importing country.” (UNFCCC 2012a,; 15 ff.)

Die Ausgestaltung der Regeln scheint zunächst verwirrend: so etabliert Paragraph 26 eine verpflichtende Anrechnung von Holzprodukten, während Paragraph 28 den im Jahr zuvor noch diskutierten Vorschlag der Annex I-Staaten wieder aufgreift, die Anrechnung auf Basis der Annahme einer sofortigen Emission als Default-Methode festzulegen. Bei letzterem Artikel handelt es sich ebenfalls um eine Soll-Bestimmung (*shall*), die zur Folge hat, dass aufgrund der konservativen Annahme, der Kohlenstoffspeicher bleibe gleich groß, keine Netto-Emissionen berechnet und damit auch nicht berücksichtigt bzw. angerechnet werden müssen (s. Kap. 3.2.1.1). Der Vorschlag dieser Formulierung ging vor allem auf Tuvalu zurück und war dem Argument geschuldet, dass eine Anrechnung der verzögerten Freisetzung von Emissionen auf Basis von Speicheränderungen nur Ländern erlaubt sein könne, die auch die entsprechenden Daten hierfür zur Verfügung haben. Dementsprechend werden die Länder verpflichtet, eine Anrechnung auf Basis der Speicheränderungen vorzunehmen, sobald „transparente und verifizierbare“ Daten vorliegen. Dies hatte zur Folge, dass die Beantwortung der Frage, unter welchen Umständen Daten zu Holzprodukten transparent und verifizierbar sind, und somit die zentrale Bedingung für eine Anrechnung erfüllt ist, dem IPCC überlassen wurde. Dieser wurde im Rahmen der Entscheidung 2/CMP.7 eingeladen (vgl. Abbildung 1-3), die methodischen Grundlagen für die Umsetzung der Regeln für die Berichterstattung unter dem Kyoto-Protokoll u. a. für Holzprodukte zu begutachten und, wenn notwendig, zu aktualisieren:

“The Conference of Parties, [...]

8. Invites the Intergovernmental Panel on Climate Change to review and, if necessary, update supplementary methodologies for estimating anthropogenic greenhouse gas emissions by sources and removals by sinks resulting from land use, land-use change and forestry activities under Article 3, paragraphs 3 and 4, of the Kyoto Protocol, related to the annex to this decision, on the basis of, inter alia, chapter 4 of its Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry” (UNFCCC 2012a, S. 12).

Der eineinhalb Jahre dauernde Prozess zur Ausgestaltung der methodischen Regeln durch den IPCC, welche im Rahmen der Treibhausgasberichterstattung unter dem Kyoto-Protokoll als Leitlinien für die gute Praxis verbindlichen Charakter haben (vgl. Kap. 1.1.3), wurde im Frühjahr 2012 aufgenommen. Diese für die Berechnung des Beitrags der stofflichen Holznutzung verbindlichen methodischen Vorgaben basieren in wesentlichen Teilen auf den im Rahmen der

vorliegenden Arbeit durchgeführten Forschungsergebnissen und werden in Kapitel 4.4 vorgestellt.

Da die aufgrund der Entscheidung 2/CMP.6 für eine Anrechnung der Waldbewirtschaftung auf Basis des Referenzwert-Ansatzes ermittelten Werte aus dem Jahr 2011, welche im Appendix des Anhangs des Entscheidungstextes 2/CMP.7 für alle Kyoto-Parteien aufgelistet werden, den zum Zeitpunkt ihrer Berechnung noch nicht existierenden Regeln des IPCC gegebenermaßen nicht folgen konnten, sieht der Entscheidungstext auch die Möglichkeit einer nachträglichen technischen Korrektur vor. Diese gilt neben den Berechnungsregeln für die Auswirkungen der Kyoto-Aktivität Waldbewirtschaftung auf die Netto-Emissionen auch für die aus dieser Aktivität stammenden Holzprodukte:

“14. When accounting for forest management, Annex I Parties shall demonstrate methodological consistency between the reference level and reporting for forest management during the second commitment period, including in the area accounted for, in the treatment of harvested wood products, and in the accounting of any emissions from natural disturbances. Parties shall make technical corrections, if necessary, to ensure consistency, including applying IPCC methods for ensuring time-series consistency (e.g. overlap with historical data) and shall report on how these corrections were made. [...]”

Zugleich legt der zitierte Paragraph fest, in welcher Form diese technische Korrektur gemeldet werden soll, indem er weiter spezifiziert:

“[...] Information on technical corrections and methodological consistency shall be reported as part of the annual greenhouse gas inventories and inventory reports, in accordance with relevant decisions under Articles 5 and 7 of the Kyoto Protocol, and reviewed as part of the review of the annual greenhouse gas inventory review in accordance with relevant decisions under Article 8 of the Kyoto Protocol.” (UNFCCC 2012a, S. 15)

Ein weiterer Paragraph legt fest, dass sich im Ergebnis solch einer technischen Korrektur auch der in der Entscheidung hinterlegte Referenzwert ändert.

“15. After adoption of the reference level for forest management, if the reported data on forest management or forest land remaining forest land used to establish the reference level are subject to recalculations, a technical correction shall be applied to include in the accounting the impact of the recalculations on the reported data that have been used by the Party to set the reference level.”

Neben dem Beschluss einer Berücksichtigung von Holzprodukten unter dem Kyoto-Protokoll in der zweiten Verpflichtungsperiode beschlossen die Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention in Durban mit der Entscheidung 15/CP.17 ebenfalls, die für die Abschätzung von Treibhausgasemissionen der verschiedenen Quellgruppen bis dato geltenden IPCC Leitlinien aus dem Jahr 2003 zur Umsetzung der Regeln in der ersten Verpflichtungsperiode (s. Kap. 4.2) durch die Leitlinien aus dem Jahr 2006 zu ersetzen (UNFCCC 2012b, s. Kap. 4.3). Die methodischen

Vorgaben des IPCC zur Berechnung der Kohlenstoffspeicherwirkung in Holzprodukten werden im nachfolgenden Kapitel 4 thematisiert.



## 4 DIE IPCC LEITLINIEN MIT BEZUG ZU HOLZPRODUKTEN

Insbesondere die von der Task Force für die nationale Treibhausgasberichterstattung veröffentlichten Berichte sind für die Fragestellungen der vorliegenden Forschungsarbeit relevant. So beschreiben die bisher im Abstand von mehreren Jahren erschienenen Leitlinien, welche auf Anfrage der Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention erstellt wurden (vgl. Kap. 1.1.2), international verbindliche Vorgaben und Vorschläge für die Anwendung von Methoden zur Berechnung der nationalen Treibhausgasemissionen und ihrem Abbau durch Senken. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass die jährlichen Nationalen Treibhausgasinventare der Annex I-Staaten unter der Klimarahmenkonvention bzw. der Industriestaaten unter dem Kyoto-Protokoll mit größtmöglicher Genauigkeit erstellt werden, und diese den formulierten Qualitätsanforderungen folgen (vgl. Kap. 1.1.3).

Zu diesem Zweck tragen ausgewählte Experten auf Einladung des IPCC die aktuellsten wissenschaftlichen Methoden zusammen, um die zuvor von den Vertragsstaaten festgelegten Rahmenbedingungen für die Berichterstattung (vgl. Kap. 3) methodisch zu unterlegen und zu konkretisieren. Dies geschieht u. a. durch die Bereitstellung von Entscheidungsbäumen (*decision trees*) für komplexe Fragestellungen mit mehreren Lösungswegen. Dies soll den Inventarerstellern die Auswahl der jeweils geeignetsten Methoden unter Berücksichtigung möglicher vertraglicher Festlegungen (u. a. beim Kyoto-Protokoll) erleichtern. Gerade der letztgenannte Aspekt stellt eine Herausforderung bei der Umsetzung der Berechnungsregeln dar, da die Beschlüsse der Vertragsstaaten oftmals aufeinander aufbauen und ein guter Überblick über den gesamten Prozess und die relevanten Entscheidungsdokumente notwendig ist, um regelkonforme Berechnungen zu erstellen.

Die Beschreibung der Methoden (vgl. Kap. 1.1.3) in den jeweiligen Kapiteln folgt dem Konzept drei unterschiedlicher Qualitätsebenen (*Tiers*). Dieses umfasst die Bereitstellung von Default-Methoden und Default-Annahmen (*Tier 1*) bis hin zu Erläuterungen, wie länderspezifische Schätzverfahren (*Tier 3*) im Sinne der guten fachlichen Praxis angewandt werden können. Auch Fragen der Qualitätssicherung und -kontrolle sowie die Quantifizierung von Unsicherheiten werden behandelt.

Nachfolgend werden die wesentlichen Hauptmerkmale und Unterschiede der für Holzprodukte relevanten Richtlinien des IPCC vorgestellt. Dies beinhaltet zusätzlich zu der Erläuterung des vorgeschlagenen Vorgehens sowohl eine kurze Erwähnung der zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Richtlinien zur Verfügung stehenden Methoden (vgl. Kapitel 2) als auch einen Verweis auf die politischen Rahmenbedingungen, unter welchen sie entstanden sind und die sie reflektieren (vgl. Kapitel 3). Im Unterkapitel 4.4 werden außerdem die mit dem *2013 KP Supple-*

ment veröffentlichten Richtlinien zur Berechnung für Holzprodukte vorgestellt, die für die zweite Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls ab dem Berichtsjahr 2015 angewendet werden müssen. Sie wurden im Anschluss an den in den Kapiteln 3.1.2, 3.1.3 und 3.2.2 beschriebenen Verhandlungsprozess unter der AWG-KP ausgearbeitet und basieren in wesentlichen Teilen auf den bis dahin erzielten Ergebnissen der vorliegenden Forschungsarbeit (vgl. Rüter *et al.* 2014).

## 4.1 REVISED 1996 IPCC GUIDELINES

Die dreiteiligen *IPCC Guidelines for Greenhouse Gas Inventories* (kurz *Revised 1996 IPCC Guidelines*) legen erstmals gemeinsame Berichtsvorschriften sowie drei grundlegende Prinzipien für die Berichterstattung fest (IPCC 1997c). Neben der Definition eines gemeinsamen Formats für die Berichterstattung (*Common Reporting Format*, Abk. CRF) für die definierten Quellgruppen (vgl. Kap. 1.1.2) umfasst dies die Beschreibung von Dokumentationsstandards zur Sicherstellung von Transparenz sowie den Aspekt der Verifikation der Angaben in Bezug auf Vollständigkeit (*completeness*) und Genauigkeit (*accuracy*).

Die *Revised 1996 IPCC Guidelines*, die 1997 überarbeitet wurden, enthalten bereits Erläuterungen zum Verbleib des im geerntetem Holz enthaltenen Kohlenstoffs:

“Harvested wood releases its carbon at rates dependent upon its method of processing and its end-use: waste wood is usually burned immediately or within a couple of years, paper usually decays in up to 5 years (although landfilling of paper can result in longer-term storage of the carbon and eventual release as methane or CO), and lumber decays in up to 100 or more years. Because of this latter fact, forest harvest (with other forms of forest management) could result in a net uptake of carbon if the wood that is harvested is used for long-term products such as building lumber, and the regrowth is relatively rapid.“ (IPCC 1997b: 17)

Wie aus der Beschreibung der Entstehungsgeschichte der Forschung rund um das Thema hervorgeht (Kap. 1.1.1), standen zum Zeitpunkt der Zusammenstellung der *Revised 1996 IPCC Guidelines* jedoch nur wenige wissenschaftliche Arbeiten über die Auswirkungen der stofflichen Holznutzung zur Verfügung (vgl. auch Kap. 2.2.1). Es werden daher noch keine detaillierten Methoden beschrieben, wie mit der stofflichen Holznutzung verbundene biogene CO<sub>2</sub>-Emissionen erfasst werden können. Vielmehr schlägt der Leitfaden als IPCC Default-Methode die konservative Annahme vor, dass sich die Kohlenstoffspeicher in Produkten nicht verändern:

“For the purposes of the basic calculations, the recommended default assumption is that all carbon removed in wood and other biomass from forests is oxidised in the year of removal. This is clearly not strictly accurate in the case of some forest products, but is considered a legitimate, conservative assumption for initial calculations.” (IPCC 1997b, S. 17)

Die Empfehlung, der Annahme einer sofortigen Emission zu folgen, welche in Kapitel 3.2.1.1 detailliert beschrieben wird, basierte auch auf der „Wahrnehmung, dass sich die Bestände von Holzprodukten in den meisten Ländern nicht signifikant auf jährlicher Basis ändern“ (IPCC 1997b, S. 17). Allerdings eröffnete der Leitfaden den Ländern die Möglichkeit, Holzprodukte aufgrund ihrer Relevanz für die CO<sub>2</sub>-Bilanz als zusätzlichen Kohlenstoffspeicher in die Inventuren aufzunehmen. Als Voraussetzung hierfür wurde jedoch genannt, dass das Land über die entsprechenden Daten (d. h. Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren) zur Berechnung der Veränderung des Kohlenstoffspeichers in langlebigen Holzprodukten verfügt:

“It is the net change in stocks of forest products which should be the best indicator of a net removal of carbon from the atmosphere, rather than the gross amount of forest products produced in a given year. New products with long lifetimes from current harvests frequently replace existing product stocks, which are in turn discarded and oxidised. [...] If data permit, one could add a pool to [the] Equation 1 (1) in the changes in forest and other woody biomass stocks calculation to account for increases in the pool of forest products. This information would, of course, require careful documentation, including accounting for imports and exports of forest products during the inventory period.” (IPCC 1997b, S. 17)

Damit schlägt der Leitfaden implizit vor, die Emissionen auf Basis des Verbrauchs von Holzprodukten zu ermitteln (vgl. Kap. 3.2.1.2), um alle Emissionen innerhalb eines Landes zu erfassen.

## 4.2 2003 GOOD PRACTICE GUIDANCE FOR LULUCF

Auf Anfrage der Vertragsstaaten durch SBSTA (UNFCCC 2001b) und auf Beschluss des IPCC im Jahr 2001 wurden die *2003 Good Practice Guidance for LULUCF* (Abk. *GPG-LULUCF*) entwickelt, um die Transparenz, die Konsistenz, die Vergleichbarkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit der Treibhausgasinventuren für den LULUCF Sektor zu erhöhen. Damit sollte sichergestellt werden, dass die Informationen in einer konsistenten, transparenten und vergleichbaren Weise präsentiert werden können, die den jeweiligen Umständen der Länder Rechnung trägt (IPCC 2001, S. 15-16; vgl. Kap. 1.1.3).

Die *GPG-LULUCF* umfassen neben einem Übersichtskapitel und einem Kapitel zu Ansätzen, wie die Landflächen eines Landes in Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit repräsentiert werden können, ein Kapitel, welches die Landfläche zum Zweck der UNFCCC-Berichterstattung in sechs Landkategorien einteilt (*Chapter 3 LUCF sector good practice guidance*), und ein Kapitel, welches zusätzliche Methoden zur Berichterstattung unter dem Kyoto-Protokoll zur Verfügung stellt (*Chapter 4 Supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto Protocol*). Die Unterscheidung in Leitlinien für *LUCF* auf der einen und zusätzlichen Methoden für die Kyoto-Berichterstattung auf der anderen Seite ist insofern relevant, als dies auf definitorische und damit auch methodische Unterschiede bei der Ab-

schätzung der Netto-Emissionen zurückzuführen ist, die von den Vertragsstaaten festgelegt wurden:

„The SBSTA welcomed the work programme proposed by the IPCC relating to the development of good practice guidance for land use, land-use change and forestry including separate sections for the purposes of the UNFCCC and the Kyoto Protocol, noting specific additional requirements of the Kyoto Protocol, as elaborated in the draft decisions of the COP serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol (COP/MOP), on land use, land-use change and forestry, [...], as contained in COP decisions 11/CP.7 [...]“ (UNFCCC 2001b, S. 12)

So geht die in Kapitel 3 der *GPG-LULUCF* beschriebene Einteilung in sechs Landkategorien auf einen bereits im Jahr 2000 veröffentlichten Sonderbericht mit dem Titel *Land Use, Land-Use Change and Forestry* zurück (vgl. Kap. 1.1.3) und definiert die für den Forst- und Holzsektor relevante Quellgruppe „Wälder“ (*Forest Land*) (vgl. Umweltbundesamt 2014), welche alle bewirtschafteten Wälder nach der Definition der FAO umfasst. Das Kapitel ist weiter untergliedert und unterscheidet zwischen Methoden, mit welchen die Netto-Emissionen in den Landnutzungskategorien „Verbleibende Waldfläche“ (*Forest remaining Forest Land*) und „Neuwaldflächen“ (*Land converted to Forest Land*) abgeschätzt werden können.

Unter dem Kyoto-Protokoll kommt hingegen die in den *Marrakesh Accords* (Entscheidung 11/CP.7) hinterlegte Walddefinition zum Tragen. Diese rechtlichen Vorgaben sehen eine Anrechnung der anthropogenen Netto-Emissionen vor, die durch die in Artikel 3, Paragraph 3 des Kyoto-Protokolls genannten walddrelevanten Aktivitäten „Aufforstung“, „Wiederaufforstung“ und „Entwaldung“ sowie durch die erst mit den *Marrakesh Accords* von den Vertragsstaaten definierte Aktivität „Waldbewirtschaftung“ verursacht werden (s. Kap. 1.1.3). Letztere wird im Kyoto-Protokoll in Artikel 3, Paragraph 4 lediglich mit „zusätzlichen vom Menschen verursachten Tätigkeiten“ umschrieben (UNFCCC 1997a). Da das Kyoto-Protokoll zudem auch projektbasierte Emissionsreduktionen ermöglicht, mussten hierfür ebenfalls Leitlinien zur Verfügung gestellt werden (vgl. Kap. 1.1.2). Dies spiegelt sich im Kapitel 4 der *GPG-LULUCF* und seinen Unterkapiteln entsprechend wider.

Mit den *GPG-LULUCF* aus dem Jahr 2003 präsentiert der IPCC erstmals eine Methodenübersicht, die für die Abschätzung, die Messung, das Monitoring und die Berichterstattung von Netto-Emissionen verwendet werden können, welche durch die Nutzung von Holzprodukten verursacht werden (IPCC 2003). Wie in den Kapiteln 1.1.3 und 3.2.1 detailliert beschrieben, hatten sich die Vertragsstaaten zum Zeitpunkt der Erstellung der *GPG-LULUCF* jedoch noch nicht auf einen einheitlichen politischen Rahmen für die Berücksichtigung von Holzprodukten einigen können. Dies spiegelt sich auch in der Gliederung des Leitfadens wider: die zu Holzprodukten verfügbaren Informationen wurden in einem für die Berichterstattung der Vertragsstaaten nicht verbindlichen Appendix des Kapitels 3 gebündelt (vgl. auch Abbildung 1-3, S. 22). Damit stellen die im Appendix 3.1a enthaltenen Informationen, wie auch dessen Überschrift aussagt, le-

diglich eine „Grundlage für eine zukünftige methodische Entwicklung“ dar. Im Übersichtskapitel der *GPG-LULUCF*, heißt es:

“While many categories within the LULUCF sector are well established and relatively straightforward to estimate, LULUCF is a complex area, and it was clear from the outset that some issues remain under consideration for some emission/removal categories. In particular:

SBSTA has set out a policy process on harvested wood products (HWP) accounting and reporting that may lead to decisions by the COP and/or COP/MOP16. However, although the default assumption is that HWP pools are not increasing, the IPCC Guidelines allow inclusion of HWP in national inventories if a country can document that existing stocks of long-term forest products are increasing.” (vgl. Kap. 3.2.1.1 und 4.1.) “Good practice guidance has therefore been elaborated for the HWP pool. The material provided is in an appendix rather than part of the main text, since SBSTA is still considering this issue. The appendix makes no judgement about possible future decisions on reporting or accounting.” (IPCC 2003, S. 1.11)

In einem ersten Unterkapitel des Appendix der *GPG-LULUCF* zu methodischen Fragen werden unter der Überschrift *Methodological Issues* zunächst die bis zu diesem Zeitpunkt diskutierten Ansätze einer Berechnung von Holzprodukten vorgestellt: der *stock-change* Ansatz (s. Kap. 3.2.1.2), der Produktionsansatz (s. Kap. 3.2.1.3) und der *atmospheric-flow* Ansatz (s. Kap. 3.2.1.4).

Ebenso wie für die Berechnung der Netto-Emissionen aus anderen Kohlenstoffspeichern schlägt der Appendix auch für den Holzproduktespeicher drei *Tiers* bei der Auswahl der für das jeweilige Land passenden Methode zur Berechnung der Netto-Emissionen vor. Unter Berücksichtigung des Ausschlusses der Holzprodukte von den zu berücksichtigenden Speichern unter dem Kyoto-Protokoll (vgl. Kap. 1.1.3) empfehlen die *GPG-LULUCF*, den *Marrakesh Accords* folgend, folgende Hierarchie:

- *Tier 1*: Annahme einer sofortigen Emission (s. Kap. 3.2.1.1)
- *Tier 2*: Exponentielle Zerfallsfunktion 1. Ordnung (s. Kap. 2.2.3.5, Gleichung 10)
- *Tier 3*: Länderspezifische Methoden

Für *Tier 2* sollen die Netto-Emissionen des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten in der Nutzung als auch in deponiertem Holz mittels einer rekursiven Exponentialfunktion 1. Ordnung berechnet werden können, die Pingoud (2002) in seinem Modell EXPHWP verwendet (s. S. 62). Zu diesem Zweck werden die drei Berechnungsansätze mittels verschiedener Parameter beschrieben, welche die für den jeweiligen Ansatz relevanten Kohlenstoffflüsse repräsentieren (z. B.  $H$  = aus dem Wald abtransportiertes Holz,  $P_{IM}$  = Emissionen von importiertem Holz im eigenen Land,  $P_{EX}$  = Exporte von geerntetem Holz inklusive Rundholz, Holzabfällen und veredelte Produkte; vgl. auch Kap. 3.2.1). Als Default-Aktivitätsdaten für Holzprodukte verweist der Appendix auf die FAO-Datenbank, welche in Kombination mit angegebenen Umrechnungsfaktoren (Tabelle 3a1.2) für die Berechnung der in den Kohlenstoffflüssen enthaltenen Mengen

verwendet werden sollen. Letztere wurden in den *GPG-LULUCF* aus den Tabellen B-6 und B-7 von Haynes *et al.* (1990, S. 261) abgeleitet. Für die Ermittlung der Kohlenstoffabflüsse wird ebenfalls eine Übersicht über die in verschiedenen Publikationen angegebenen Halbwertszeiten für Halbwaren zur Verfügung gestellt (Tabelle 3a1.3).

Für die Umsetzung länderspezifischer Methoden wird lediglich kurz die Möglichkeit der Anwendung von Inventurdatenmethoden oder einer Kombination aus Inventur- und Flussdatenmethoden beschrieben (vgl. Kap. 2.1), ansonsten aber keine weitere Hilfestellung gegeben.

### 4.3 2006 IPCC GUIDELINES

Aufgrund der wachsenden Zahl zu berücksichtigender IPCC Leitlinien bei der Erstellung der Treibhausgasinventare (u. a. *Revised 1996 IPCC Guidelines, GPG-LULUCF*) sowie zahlreicher neuer Aktivitäten und wissenschaftlicher Arbeiten mit Bezug zu Methoden, Modalitäten und Regeln der Berichterstattung kamen die Vertragsstaaten zum Schluss, dass ein umfassenderer, strategischer und anwenderfreundlicher Ansatz entwickelt werden sollte, um die langfristigen Bedürfnisse des Abkommens im Bereich der Methoden zu berücksichtigen (vgl. UNFCCC 2002b). Daher lud SBSTA den IPCC Ende des Jahres 2002 ein, die bis dahin gültigen *Revised 1996 IPCC Guidelines* unter Berücksichtigung der neuen verfügbaren Informationen zu überarbeiten (UNFCCC 2003c). Für den Bereich der Landnutzung sah dies u. a. die Zusammenlegung der Leitlinien für die Quellgruppen Landwirtschaft und LULUCF in einem Band vor, um aufgetretene Inkonsistenzen und Doppelzählungen zu vermeiden. Die im Jahr 2006 veröffentlichten neuen Berichterstattungsrichtlinien, die *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (kurz *2006 IPCC GL*), präsentieren die Landnutzung daher nun unter der Überschrift „Landwirtschaft, Wälder und andere Landnutzung“, dem sogenannten AFOLU-Sektor (Abk. für *Agriculture, Forestry and Other Land Use*) (IPCC 2006).

Neben zahlreichen Verbesserungen, die bereits mit den *GPG-LULUCF* eingeführt worden waren (z. B. Entscheidungsbäume), enthalten die *2006 IPCC GL* auch die abgestufte Vorgehensweise bei der Auswahl der passendsten Methode über drei *Tiers* und tragen dem neueren Stand des Wissens Rechnung. Dies spiegelt sich auch in einer prominenteren Berücksichtigung von Holzprodukten wider, denen im Gegensatz zu den *GPG-LULUCF* in den *2006 IPCC GL* ein ganzes Kapitel (*Chapter 12*) eingeräumt wird. Zwar bestand auch zum Zeitpunkt der Erstellung der Leitlinien ab dem Jahr 2004 keine Einigung über einen einheitlichen Ansatz zur Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten (vgl. Kap. 3.2.1), doch umgehen dies die Autoren des Kapitels zu Holzprodukten, indem lediglich Hilfestellung für die Berechnung verschiedener Variablen gegeben wird, die erst in unterschiedlicher Kombination die Ergebnisse der verschiedenen Anrechnungsansätze ergeben (Pingoud *et al.* 2006a). Neben den bereits in den *GPG-LULUCF* genannten Variablen  $P_{IM}$ ,  $P_{EX}$  und  $H$ , die für die Berechnung des *atmospheric-flow* Ansatzes benötigt werden (vgl. Kap. 4.2), werden vier weitere Variablen vorgeschlagen, die den

Beitrag der Holzprodukte, der auf Basis von Speicheränderungen ( $\Delta C$ ) ermittelt wird, abbilden helfen sollen (Tabelle 4-1). Danach repräsentiert die Variablen-Gruppe 1 den *stock-change* Ansatz, und Variablen-Gruppe 2 den Produktionsansatz; Gruppe A umfasst den Kohlenstoffspeicher der Holzprodukte in Nutzung und Gruppe B das Holz in Deponien. Die Variable 6 beschreibt den *atmospheric-flow* Ansatz und beschreibt damit auch keine Netto-Emissionen, sondern, entsprechend der Erläuterungen in Kap. 3.2.1.4, tatsächliche Kohlenstoffflüsse in die Atmosphäre ( $\uparrow C$ ). Variable 7 repräsentiert den von Ford-Robertson (2003) vorgestellten *simple decay* Ansatz, der im Ergebnis dem Produktionsansatz entspricht (vgl. Kap. 3.2.1).

**TABELLE 4-1:** Übersicht der zu berechnenden Variablen für die Bestimmung des Beitrags von Holzprodukten in den *2006 IPCC GL*

Variable	Beschreibung
1A $\Delta C_{HWP IU_{DC}}$	Jährliche Speicheränderung für Holzprodukte in Nutzung aus heimischem Verbrauch ( <i>HWP in use, domestic consumption</i> )
1B $\Delta C_{HWP SWDS_{DC}}$	Jährliche Speicheränderung für Holzprodukte in Deponien aus heimischem Verbrauch ( <i>HWP in solid waste disposal sites, domestic consumption</i> )
2A $\Delta C_{HWP IU_{DH}}$	Jährliche Speicheränderung für Holzprodukte in Nutzung aus heimischem Einschlag ( <i>HWP in use, domestic harvest</i> )
2B $\Delta C_{HWP SWDS_{DH}}$	Jährliche Speicheränderung für Holzprodukte in Deponien aus heimischem Einschlag ( <i>HWP in solid waste disposal sites, domestic harvest</i> )
3 $P_{IM}$	Jährliche Importe von Holz- und Papierprodukten, inklusive Brennholz, Zellstoff, Altpapier, Rundholz und Holzhackschnitzel
4 $P_{EX}$	Jährliche Exporte von Holz- und Papierprodukten, inklusive Brennholz, Zellstoff, Altpapier, Rundholz und Holzhackschnitzel
5 $H$	Gesamte jährliche heimische Holzernte, die alles Holz und Rinde umfasst, das vom Ort der Ernte entfernt wird, inklusive Brennholz
6 $\uparrow C_{HWP DC}$	Jährliche Freisetzung von Kohlenstoff in die Atmosphäre aus der Nutzung von Holzprodukten (aus Brennholz, aus Holz am Ende der stofflichen Nutzung und aus Holz in Deponien)
7 $\uparrow C_{HWP DH}$	Jährliche Freisetzung von Kohlenstoff in die Atmosphäre aus Holz aus heimischem Einschlag (aus Brennholz, aus Holz am Ende der stofflichen Nutzung und aus Holz in Deponien)

Auch definieren die *2006 IPCC GL*, wann der Beitrag von Holzprodukten zu den Emissionen und Senken des AFOLU-Sektors nicht abgeschätzt zu werden braucht bzw. der Beitrag konsistent mit der guten fachlichen Praxis als Null berichtet werden kann (vgl. Kap. 3.2.1.1 und 4.1). Danach soll die Anwendung der bereits in den *Revised 1996 IPCC Guidelines* vorgeschlagenen Annahme einer sofortigen Emission nunmehr davon abhängig sein, inwieweit die jährli-



che Änderung im Bestand an Holzprodukten vernachlässigbar (*insignificant*) ist oder nicht. Hierzu erläutern die *2006 IPCC GL*:

„The term ‘insignificant’ in this context means that the annual change in carbon in HWP stocks, using one of the measures of carbon change above, is of a comparable size to a key category.“ (Pingoud *et al.* 2006b, S. 12.8)

Methodische Leitlinien zur Prüfung, wann ein Kohlenstoffspeicher bzw. eine Quellgruppe einer Schlüsselkategorie (*key category*) angehört, d. h. in welchem Umfang sie entweder aufgrund des Entwicklungstrends oder der absoluten Höhe ihrer Netto-Emissionen zu den Unsicherheiten der gesamten Netto-Emissionen eines Landes beiträgt, stellen die *2006 IPCC GL* ebenfalls zur Verfügung. Vor dem Hintergrund der fehlenden Einigung der Vertragsstaaten auf einen Berechnungsansatz schränken sie allerdings weiter ein:

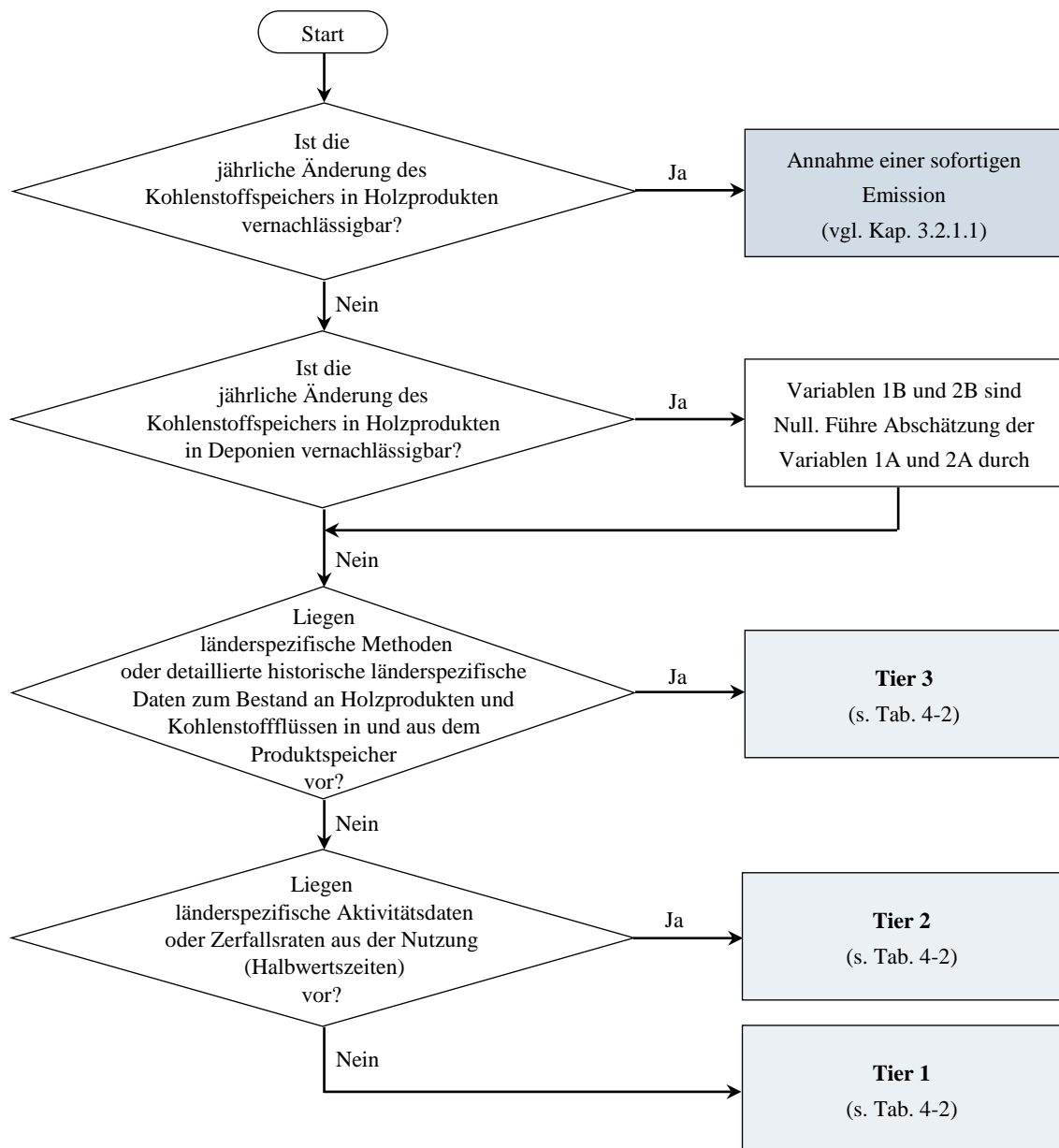
“Until the Parties to the UNFCCC decide on the approach to be used, it will not be possible to identify definitively whether or not HWP is a key category, since the magnitude of the HWP contribution depends on the approach chosen.” (Pingoud *et al.* 2006b, S. 12.8)

Nichtsdestotrotz soll diese Prüfung, einem Entscheidungsbaum folgend, für die Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten nach den *2006 IPCC GL* zunächst mit der für *Tier 1* vorgeschlagenen Methode durchgeführt werden. Abbildung 4-1 zeigt diesen Entscheidungsbaum, der für die vorliegende Arbeit angepasst und vereinfacht wurde. Die weitere Beschreibung der mit der Anwendung der drei *Tiers* verbundenen Vorgehensweisen und Berechnungsmethoden enthält Tabelle 4-2.

**TABELLE 4-2:** Zu verwendende Methoden zur Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten entsprechend des gewählten *Tiers* in den *2006 IPCC GL*

<b>Tier 3</b>	Methode A: Inventuren (vgl. Kap. 2.1)
	Methode B: Nachverfolgung der Zu- und Abflüsse von Kohlenstoff in und aus dem Produktspeicher unter Berücksichtigung detaillierter landesspezifischer Daten und Zerfallsraten (vgl. Kap. 2.2.3)
	Methode C: Direkte Schätzung des Abfluss von Kohlenstoff aus dem Produktspeicher (vgl. Kap. 2.2.4)
	Methode D: Kombination aus A, B oder C
<b>Tier 2</b>	Anwendung der unter <i>Tier 1</i> vorgeschlagenen Funktionsgleichungen unter Verwendung landesspezifischer Daten
<b>Tier 1</b>	Verwendung eines zur Verfügung gestellten Tabellenkalkulationsmodells (IPCC HWP Model) zur Berechnung der gegebenen Funktionsgleichungen auf Basis von Defaultwerten
	Abschätzung des Kohlenstoffspeichers mit Hilfe einer Exponentiellen Zerfallsfunktion erster Ordnung (s. Funktionsgleichungen 11 und 12, S. 64)
	Andere Zerfallsfunktionen können ebenfalls verwendet werden





**ABBILDUNG 4-1:** Vereinfachung des Entscheidungsbaums zur Auswahl der geeigneten Methode für Holzprodukte nach *IPCC 2006 GL* (vgl. IPCC 2006: 12.10)

Generell wird unterstellt, dass mit der Wahl eines höheren *Tiers* auch eine Verbesserung der Genauigkeit der Abschätzung der Netto-Emissionen einhergeht (vgl. S. 105). Folglich führen die Fragen im Fall einer Abschätzung auf Basis von Speicheränderungen (d. h. wenn keine sofortige Emission angenommen wird) zunächst zu einer länderspezifischen Abschätzung (*Tier 3*) und enden mit *Tier 1*, sofern keine länderspezifischen Informationen vorliegen.

Während die *GPG-LULUCF* unter *Tier 1* noch die Annahme einer sofortigen Emission vorsehen, legen die *2006 IPCC GL* als Default-Methode die Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten unter Berücksichtigung der damit verbundenen zeitlichen Verzögerung der CO<sub>2</sub>-

Emission, je nach gewähltem Ansatz, vor. Zu diesem Zweck wird das *IPCC Harvested Wood Products Model* zur Verfügung gestellt, welches im Wesentlichen auf dem von Pingoud entwickelten Berechnungsmodell EXPHWP basiert ( s. Kap. 2.2.3.5).

Für die Abschätzung der Variable 1A ( $\Delta C_{HWP IU_{DC}}$ ), die die Kohlenstoffspeicheränderung für Produkte in Nutzung und damit den *stock-change* Ansatz umschreibt, soll der jährliche Kohlenstoffzufluss (*Inflow*) zur Anwendung in der Funktionsgleichung 11 (s. S. 64) mit Gleichung 14 ermittelt werden (Pingoud *et al.* 2006b, S. 12.11, Gleichung 12.2).

$$Inflow_{DC} = P + SFP_{IM} - SFP_{EX} \quad (14)$$

Wobei:

$Inflow_{DC}$  = Kohlenstoff in jährlichem Verbrauch von Massivholz- oder Papierprodukten aus Holz, das im Land der Berichterstattung eingeschlagen wurde, in Gg C a<sup>-1</sup>

$P$  = Jährliche Produktion von Massivholz- und Papierprodukten im Land der Berichterstattung, in Gg C a<sup>-1</sup>

$SFP_{IM}$  und  $SFP_{EX}$  = Importe und Exporte von Holz- und Papierhalbwaren. Massivholzprodukte umfassen Schnittholz, Holzwerkstoffe und Anderes Industriebholz (vgl. Abbildung 2-7). Papierprodukte umfasst die Kategorie Papier und Pappe, in Gg C a<sup>-1</sup>

$$Inflow_{DH} = P \cdot \left[ \frac{IRW_H}{IRW_H + IRW_{IM} - IRW_{EX} + WCH_{IM} - WCH_{EX} + WR_{IM} - WR_{EX}} \right] \quad (15)$$

Wobei:

$Inflow_{DH}$  = Kohlenstoff in jährlicher Produktion von Massivholz- oder Papierprodukten aus Holz, das im Land der Berichterstattung eingeschlagen wurde, in Mt C a<sup>-1</sup>

$P$  = Jährliche Produktion von Massivholz- und Papierprodukten im Land der Berichterstattung, in Mt C a<sup>-1</sup>

$IRW_H$  = Ernte von Industrierundholz im Land der Berichterstattung. Das Holz ist zur Herstellung von Massivholz- und Papierprodukten, inklusive zum Export bestimmtes Industriebholz, in Mt C a<sup>-1</sup>

$IRW_{IM}$ ,  $IRW_{EX}$  = Importe und Exporte von Industrierundholz, in Mt C a<sup>-1</sup>

$WCH_{IM}$ ,  $WCH_{EX}$  = Importe und Exporte von Holzhackschnitzeln, in Mt C a<sup>-1</sup>

$WR_{IM}$ ,  $WR_{EX}$  = Importe und Exporte von Industrierestholz, in Mt C a<sup>-1</sup>

Die Gleichung 15 dient der Berechnung des jährlichen Kohlenstoffzuflusses für die Abschätzung der Variable 2A ( $\Delta C_{HWP IU_{DH}}$ ), die die Kohlenstoffspeicheränderung für Holz in Nutzung nach dem Produktionsansatz umschreibt. Der Kohlenstoffzufluss, der aus den Holz mengen berechnet wird, die im Land der Berichterstattung eingeschlagen wurden, wird hierzu ebenfalls in die von PINGOUD und WAGNER entwickelte Funktionsgleichung 11 (s. S. 64) eingesetzt (Pingoud *et al.* 2006b, S. 12.12 Gleichung 12.3). Damit umfasst die Umsetzung des Produkti-

ansatzes in den *2006 IPCC GL* nicht nur die Produktion von Holzhalbwaren (vgl. Kap. 3.2.1.3): die Gleichung 15 beinhaltet einen Multiplikator, der die Produktion von Industrierundholz ins Verhältnis zu seinem Verbrauch zuzüglich der Außenhandelsbilanz von weiteren Holzrohstoffen (d. h. Hackschnitzel und Industrierestholz) setzt. Dies hat zur Folge, dass sich der berechnete Kohlenstoffzufluss bei einem Handelsbilanzüberschuss von Industrierundholz erhöht. Die zusätzliche Einbeziehung der Handelsbilanz von Holz hackschnitzel und Industrierestholz unterstellt außerdem, dass dieses Material ausschließlich zur weiteren stofflichen Nutzung verwendet wird. Die damit verbundenen Konsequenzen sind in Kapitel 3.2.2.1 diskutiert.

Die vollständige Beschreibung des *stock-change*- und des Produktionsansatz in den *2006 IPCC GL* enthält weitere Anleitungen zur Ermittlung der in Deponien gelagerten Kohlenstoffmengen in Holzprodukten. Aufgrund des Fokus der vorliegenden Arbeit auf die Effekte der verzögerten Freisetzung von CO<sub>2</sub> durch die stoffliche Nutzung von Holz (vgl. Kap. 1.1.3), ihrer absehbar schlechten Umsetzbarkeit aufgrund mangelnder Aktivitätsdaten (vgl. Kap. 2.2.4) sowie der begründeten Ablehnung der Berücksichtigung von Holz in Deponien unter dem Kyoto-Protokoll (vgl. Kap. 3.2.2.4) wird hier jedoch nicht weiter darauf eingegangen.

Die Umsetzung des *atmospheric-flow* Ansatzes, wie er in Kapitel 3.2.1.4 beschrieben wird, ist mit der Kombination der in Tabelle 4-1 gegebenen Variablen entsprechend der Gleichung 16 möglich, wie sie der in den *2006 IPCC GL* enthaltenen Gleichung 12.5 entspricht.

$$\uparrow C_{HWP\ DH} = H + P_{IM} - P_{EX} - \Delta C_{HWP\ IU\ DC} - \Delta C_{HWP\ SWDS\ DC} \quad (16)$$

## 4.4 2013 KP SUPPLEMENT

Die Kapitel 3.1.2 und 3.2.2 beschreiben ausführlich die internationalen Verhandlungen über die Fortführung des Kyoto-Protokolls im Rahmen einer zweiten Verpflichtungsperiode im Bereich LULUCF und speziell über eine Einbeziehung des Holzproduktespeichers. Diese konnten mit der Entscheidung 2/CMP.7 Ende des Jahres 2011 erfolgreich abgeschlossen werden. Wie in Kapitel 3.2.2.6 beschrieben, war darin auch eine Einladung an IPCC enthalten, die im Kapitel 4 der *GPG-LULUCF* enthaltenen zusätzlichen Methoden zur Berichterstattung unter dem Kyoto-Protokoll (vgl. Kap. 4.2), zu „begutachten und, wenn notwendig, zu aktualisieren“ (UNFCCC 2012a). Mit dem Ziel, die aufgrund der neuen politischen Rahmenbedingungen inkonsistent gewordenen Richtlinien der ersten Verpflichtungsperiode zu überarbeiten, fand im Mai des darauffolgenden Jahres ein *Scoping meeting* des IPCC statt (vgl. Kap. 1.1.2), welches den Arbeitsauftrag (*Terms of References*) mit einem detaillierten Arbeitsplan und einem Vorschlag für eine mögliche Gliederung des zu erstellenden Berichts spezifizierte. Neben der Überarbeitung aufgrund der Änderung der Regeln für die Aktivität Waldbewirtschaftung von einer Anrechnung auf Basis eines Brutto/netto-Ansatzes in der ersten Verpflichtungsperiode hin zu einem Refe-

renzwert-Ansatz (vgl. Kap. 3.1.3) sollten auch die in den *GPG-LULUCF* fehlenden Vorgaben für Holzprodukte vollkommen neu erstellt werden. Nach Erteilung des Mandats fanden im Zuge des eineinhalb Jahre dauernden Entstehungsprozesses vier Autorentreffen mit zwei Begutachtungsrunden durch Experten und Regierungen statt, in dessen Ergebnis die *2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol* (kurz *2013 KP Supplement*) nach einer weiteren Kommentierung durch Regierungen im Oktober 2013 schließlich akzeptiert wurden (IPCC 2014; IPCC 2015a).

Für die Umsetzung des nach Entscheidung 2/CMP.7 festgelegten Berechnungsansatzes für Holzprodukte waren bis dahin ausgearbeitete Leitlinien (vgl. Kap. 4.3) in weiten Teilen unbrauchbar geworden. Lediglich die von Pingoud und Wagner (2006) entwickelte Methode zur Berechnung des Kohlenstoffspeichers (s. Funktionsgleichungen 11 und 12, S. 64) sollte als Default-Methode zur Berechnung der Speicheränderungen weiterhin Verwendung finden (vgl. Pingoud *et al.* 2006b).

Im Folgenden werden die zentralen Elemente des im *2013 KP Supplement* enthaltenen Kapitels 10 vorgestellt, das in wesentlichen Teilen auf den bis dahin erzielten Forschungsergebnissen der vorliegenden Arbeit aufbaut (vgl. Rüter *et al.* 2014). Dies betrifft sowohl methodische Verbesserungen zur Berechnung des Kohlenstoffspeichers (u. a. genauere Kohlenstoffumrechnungsfaktoren, neue Methoden zur Herleitung länderspezifischer Nutzungsdauern und zur Berechnung der geerbten Emissionen, vgl. Kap. 5.2.1, 5.2.2.2 und 5.2.3.1) als auch die nachfolgenden Aspekte und Elemente, für welche neue methodische Vorgaben des IPCC ausgearbeitet werden mussten (vgl. Kap. 3.2.2.6):

- Ermittlung der Holzprodukte, die aus heimischem Einschlag stammen,
- Zuordnung der Holzprodukte zu den Waldaktivitäten unter Artikel 3, Paragraphen 3 und 4,
- Klärung der Bedingung für eine Anrechnung, unter welchen Umständen Daten zu Holzprodukten „transparent und verifizierbar“ sind,
- Klärung wie und wann der bestehende Speicher (d. h. die geerbten Emissionen) einbezogen werden muss und
- Bereitstellung von Leitlinien für die Durchführung einer Technischen Korrektur des im Referenzwert enthaltenen Beitrags von Holzprodukten.

Speziell die bereits in Kapitel 3.2.2.6 erwähnte Verschränkung zweier sich scheinbar widersprechender Soll-Bestimmungen (*shall*) musste gelöst werden und sollte gleichzeitig nicht dem Ziel zuwiderlaufen, das relevante Kapitel in der zu erstellenden Leitlinie übersichtlich und verständlich zu strukturieren. Der in Abbildung 4-2 gezeigte Entscheidungsbaum für Holzprodukte im *2013 KP Supplement* dient der Klärung dieser Frage, wobei die farbig unterlegten Textfelder auf die zugrunde liegenden Paragraphen im Entscheidungstext 2/CMP.7 verweisen (vgl. Kap. 3.2.2.6; Rüter 2014).

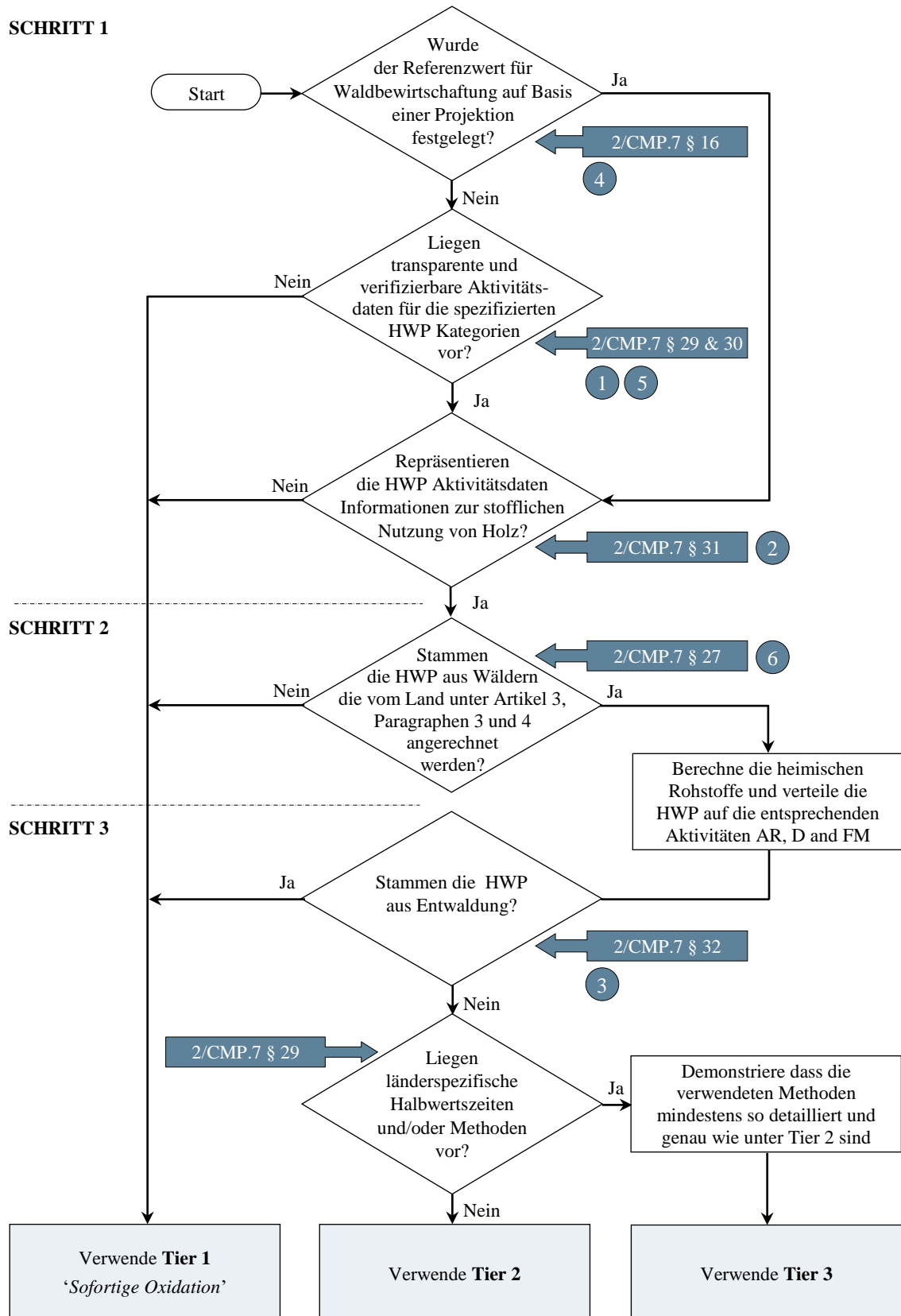


ABBILDUNG 4-2: Kommentierter 2013 KP Supplement Entscheidungsbaum für Holzprodukte

Somit wird der Inventarersteller entlang der Fragen in drei Schritten zu der am besten passenden Berechnungsmethode geführt. Zugleich wird damit die Einhaltung der Vorgaben der Vertragsstaaten gewährleistet, wonach z. B. nur dann Schätzungen der Netto-Emissionen aus der Speicheränderung von Holzprodukten in eine Anrechnung einfließen sollen, wenn:

- die entsprechende Genauigkeit der Berechnungen durch die Anwendung transparenter und verifizierbarer Daten gewährleistet ist, und
- sichergestellt ist, dass eine Anrechnung von Holzprodukten nicht den Abbau der Kohlenstoffspeicher im Wald forciert (vgl. auch Kap. 3.2.2.2).

Danach muss die im Kapitel 2.8.2 des *2013 KP Supplement* beschriebene Annahme einer sofortigen Oxidation angewendet werden (vgl. Abbildung 4-2):

- 1 Wenn keine transparenten und verifizierbaren Daten vorliegen (Paragraphen 29 und 30),
- 2 für Holzprodukte in Deponien, sowie für Holz, das für die energetische Nutzung bestimmt ist (Paragraph 31) oder
- 3 für Produkte, deren Holz aus Entwaldung stammt (Paragraph 32).

Eine Abschätzung der Netto-Emissionen auf Basis von Speicheränderungen muss hingegen durchgeführt werden:

- 4 Wenn ein projizierter Referenzwert verwendet wurde (Paragraph 16),
- 5 sobald transparente und verifizierbare Daten vorliegen (Paragraphen 29 und 30) oder
- 6 das Holz der Produkte aus Wäldern stammt, die von dem berichtserstattenden Land unter Artikel 3, Paragraphen 3 und 4 angerechnet werden (Paragraph 28).

Für die Prüfung der jeweiligen Fragen und die methodische Umsetzung verweist der im *2013 KP Supplement* enthaltene Entscheidungsbaum auf die entsprechenden Kapitel des Berichts. So wird in dem Eingangskapitel 2.8.1 des *2013 KP Supplement*, welches auch den Entscheidungsbaum und eine Erklärung der Schritte beinhaltet, bezüglich der Verfügbarkeit von transparenten und verifizierbaren Daten die ebenfalls in der vorliegenden Arbeit beschriebene Klassifizierung von Holzprodukten erläutert und die FAO Definition der anzuwendenden Halbwarengruppen Schnittholz, Holzwerkstoffe und Papier und Pappe wiedergegeben (Kapitel 2.8.1.1 des *2013 KP Supplement*). Dies dient dazu, etwaige Doppelzählungen oder eine Überschätzung des Kohlenstoffzuflusses in den Produktspeicher zu vermeiden (s. Kap. 2.2.2 und 5.1.2.2). Für die in einem weiteren Schritt notwendige Berechnung der Kohlenstoffmengen aus heimischem Einschlag und deren Zuordnung zu den Waldaktivitäten unter dem Kyoto-Protokoll (vgl. Kap. 3.2.2.3 und 3.2.2.6) wird im Kapitel 2.8.1.2 des *2013 KP Supplement* die in der vorliegenden Arbeit in Kapitel 5.2.1.4 beschriebene Methode als Default-Methode erläutert, welche in vereinfachter Form bereits bei der Berechnung der Referenzwerte für Holzprodukte zur Verwendung in Entscheidung 2/CMP.7 angewandt wurde (vgl. auch Kap. 3.2.2.5 und Rüter 2011a).

Gemäß dem Vertragstext folgt das *2013 KP Supplement* der bereits in den *GPG-LULUCF* empfohlenen *Tier*-Struktur:

- *Tier 1*: Annahme einer sofortigen Emission (s. Kap. 3.2.1.1)
- *Tier 2*: Exponentielle Zerfallsfunktion 1. Ordnung (s. Kap. 2.2.3.5, Gleichungen 11 und 12)
- *Tier 3*: Länderspezifische Methoden

Für die Umsetzung der für *Tier 2* vorgeschlagenen Methode zur Berechnung des Anfangswertes des Kohlenstoffspeichers wurde die in Kapitel 5.2.3.1 vorgestellte Funktionsgleichung 22 übernommen, um die mit der Schätzung der geerbten Emissionen verbundenen Unsicherheiten (vgl. Kap. 2.2.3.5) zu verringern. Darüber hinaus wird im *2013 KP Supplement* vorgeschlagen, die Berechnung des Kohlenstoffspeichers nicht nur auf Basis der aggregierten Produktgruppen Massivholz- und Papierprodukte vorzunehmen (vgl. Modell EXPHWP in Kap. 2.2.3.5, sowie Kap. 4.2 und 4.3), sondern für alle darunter gelisteten Halbwaren. Für die spezifische Umrechnung der Kohlenstoffmengen in den Produkten der Halbwarengruppen Holzwerkstoffe und Papier und Pappe werden die in Tabelle 5-11 (Kap. 5.2.1.3) gelisteten Faktoren angegeben. Lediglich für Schnittholz wurde nicht auf die für Deutschland spezifischen Werte verwiesen, sondern die bereits in den *GPG-LULUCF* genannten Faktoren übernommen (vgl. Rüter *et al.* 2014, S. 2.122).

Um sicherzustellen, dass die Verwendung länderspezifischer Modelle unter einem *Tier 3* Ansatz ebenfalls den Vorgaben der Vertragsstaaten entsprechen würden, sollte das *2013 KP Supplement* deutlich klarere Vorgaben diesbezüglich machen als dies beispielsweise in den *IPCC 2006 GL* der Fall ist (vgl. Tabelle 4-2). So legen die Richtlinien fest, dass es der guten fachlichen Praxis entspricht, Inventurmethode nur in Kombination mit Flussdatenmethoden zu verwenden. Zwar ist die Genauigkeit der Abschätzungen mittels Inventuren möglicherweise höher und es müssen keine Informationen über den Speicher oder mit ihm verbundene Kohlenstoffflüsse vor dem Betrachtungszeitraum ermittelt werden; es können jedoch immer nur Teile der in der Entscheidung 2/CMP.7 genannten Produkte mittels Inventuren erfasst werden: für die Kategorie Papier und Pappe sowie beispielsweise die Verwendung von Massivholzprodukten im Verpackungssektor, ist dies aufgrund der kurzen Verwendungsdauer der Halbwaren und der praktischen Schwierigkeiten bei der Anwendung der Methode kaum umsetzbar (vgl. Kap. 5.1.1). Nicht zuletzt aufgrund der verpflichtenden Anrechnung auch von exportierten Holzprodukten ist die Anwendung einer reinen Inventurmethode daher nicht möglich.

Drei mögliche Typen länderspezifischer Aktivitätsdaten werden im *2013 KP Supplement* identifiziert (Rüter *et al.* 2014, S. 125):

- (a) Daten, die der internationalen HS Nomenklatur und dem Klassifizierungssystem folgen,
- (b) Daten zu Holzfertigwaren, deren Bestandteile keine unterschiedlichen Nutzungsdauern erwarten lassen (z. B. Möbel, die aus Schnittholz und Holzwerkstoffen gefertigt sein können),

- (c) Daten zu Gebäuden, die aus verschiedenen Holzbauteilen, welche unterschiedliche Erneuerungsintervalle aufweisen, und ebenfalls wiederum aus unterschiedlichen Holzhalbwaren bestehen.

Besonders in Bezug auf die beiden Datentypen (b) und (c) weisen die Richtlinien auf die Methode der Ökobilanzierung nach ISO 14040 und 14044 für die Ermittlung passender Kohlenstoffumrechnungsfaktoren hin (vgl. Kap. 1.1.1). Außerdem sind bei der Verwendung solcher länderspezifischer Daten im Sinne der guten fachlichen Praxis der Nachweis und Bericht darüber vorgesehen, wie die Umrechnungsfaktoren hergeleitet wurden; zudem sollen Informationen über deren Repräsentativität zur Verfügung gestellt werden (Rüter *et al.* 2014, S. 126).

Unter dem Eindruck der Diskussion um das Phänomen der Obsoleszenz, welches im Zuge der Vorlaufforschung zu vorliegender Arbeit untersucht wurde (s. Kap. 5.1.2.3), wird beispielhaft für die Herleitung länderspezifischer Nutzungsdauern unter einer *Tier 3* Methode das in der Normenreihe ISO 15686 geregelte Verfahren für die Abschätzung der spezifischen Nutzungs- bzw. Nutzungsdauer (*estimated service life*, Abk. ESL) von Bauprodukten bzw. Bauteilen beschrieben.

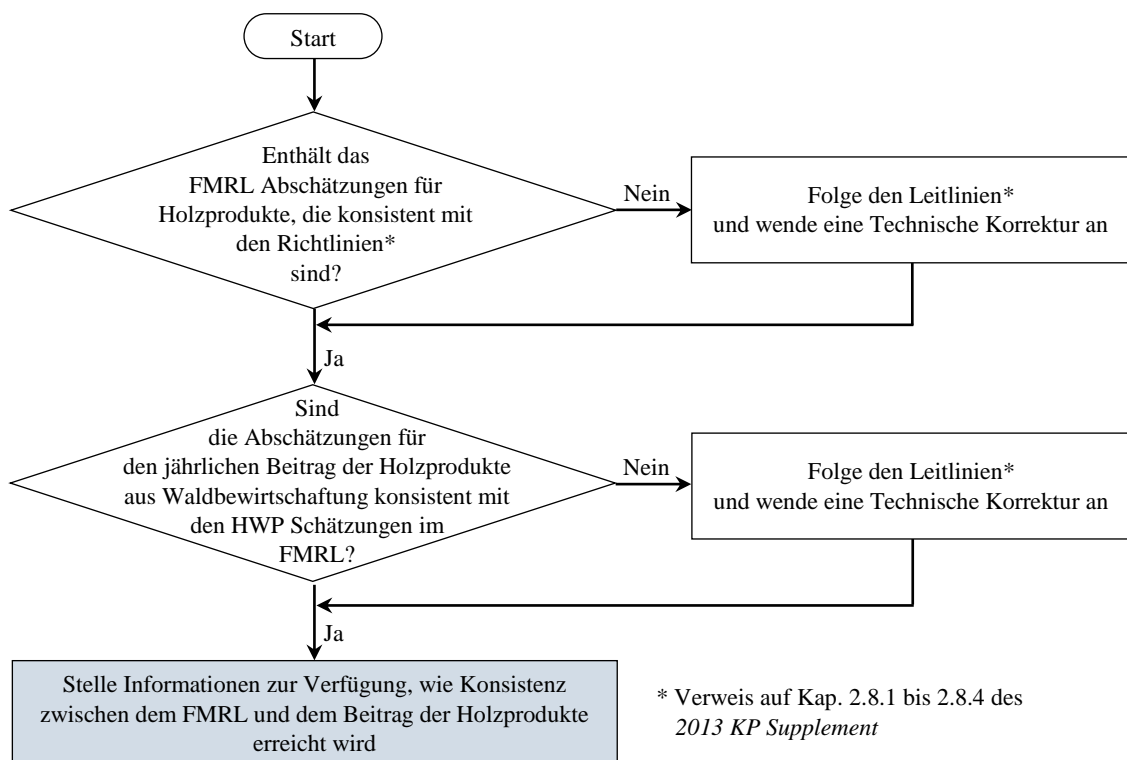
**TABELLE 4-3:** Beispiel für die Herleitung länderspezifischer Nutzungsdauern auf Basis von Marktinformationen und unter Verwendung von Informationen zur Obsoleszenz von Produkten (Rüter *et al.* 2014: 2.129)

HWP Kategorie	Markt	Marktanteil der HWP Kategorie [in %]	Nationale geschätzte Nutzungsdauer (ESL) [in Jahren]	Nationaler Obsoleszenz-Faktor (O)	Angepasste Nutzungsdauer (=ESL*O* Marktanteil-anpassung) [in Jahren]	Halbwertszeit (=angepasste ESL* ln(2)) [in Jahren]
Schnittholz	Bau	60	70	0,9	41,0	28,4
	Möbel	10	45	0,6		
	Verpackung	30	6	0,3		
	Sonstige	0	–	–		
Holzwerkstoffe	Bau	50	60	0,7	30,5	21,2
	Möbel	45	35	0,6		
	Verpackung	5	6	0,3		
	Sonstige	0	–	–		
Papier und Pappe	Bau	0	–	–	1,5	1,0
	Möbel	0	–	–		
	Verpackung	50	3	0,3		
	Sonstige	50	10	0,2		



Auch eine Methode zur Herleitung länderspezifischer Nutzungsdauern auf Basis von Informationen über die Marktverwendung von Holzhalbwerten, die im Zuge der vorliegenden Arbeit für Deutschland entwickelt wurde (vgl. Kap. 5.2.2.2, Abbildung 5-21), wird in dem entsprechenden Kapitel des *2013 KP Supplement* vorgestellt – hier allerdings in Kombination mit Informationen zur Obsoleszenz von Produkten nach ISO 15686-1:2011 (Tabelle 4-3). Der Aspekt der Obsoleszenz wird detailliert in Kap. 5.1.2.3 diskutiert.

Neben Angaben zur Abschätzung von Unsicherheiten und zur Qualitätskontrolle enthält das *2013 KP Supplement* auch ein eigenes Unterkapitel zum Umgang mit dem Holzproduktspeicher im Referenzwert für Waldbewirtschaftung (FMRL). Darin werden die von den Vertragsstaaten gewählten Ansätze und Methoden bei der Abbildung des Holzspeichers im FMRL beispielhaft beschrieben: sowohl Werte auf Basis eines projizierten Referenzwertes als auch fehlende Werte, und damit die Annahme einer sofortigen Emission, wurden im Appendix des Entscheidungstextes 2/CMP.7 hinterlegt (UNFCCC 2012a, vgl. Kap. 3.1.3 und 3.2.2.6). Um außerdem eine nachträgliche technische Korrektur der Werte zu ermöglichen, die zu einem Zeitpunkt berechnet werden mussten, an dem die methodischen Vorgaben des IPCC noch nicht vorlagen (vgl. Kap. 3.2.2.6), stellt das *IPCC KP Supplement* einen weiteren Entscheidungsbaum zur Verfügung (Abbildung 4-3), um sicherzustellen, dass die hinterlegten Werte bei Bedarf im Sinne der Anforderungen der Entscheidung 2/CMP.7 und an die gute fachliche Praxis angepasst werden.



**ABBILDUNG 4-3:** Entscheidungsbaum (modifiziert) zur Überprüfung der Konformität der HWP Abschätzung mit dem hinterlegten Referenzwert nach Entscheidung 2/CMP.7 (Rüter *et al.* 2014, S. 2.131)



## 5 ENTWICKLUNG DES MODELLS WOODCARBONMONITOR

Zentrales Ziel der vorliegenden Arbeit war die Erstellung eines Modells, das es ermöglicht, den Beitrag von Holzprodukten zur Speicherwirkung für Deutschland zu quantifizieren. Zugleich sollte das Modell aber auch die Abschätzung der mit der Holznutzung verbundenen Kohlenstoffbilanzen anderer Länder ermöglichen. Zwar wurden die diskutierten Methoden zur Berechnung der Speicherleistung, wie in Kapitel 2 beschrieben, bereits in mehreren Modellen umgesetzt, doch sollten auch die verschiedenen Methoden, z. B. die Verwendung unterschiedlicher Zerfallsfunktionen zur Abschätzung der Kohlenstoffabflüsse aus dem Speicher, miteinander verglichen werden können. Zugleich war es ein weiteres Ziel, die Ermittlung des Beitrags von Holzprodukten nicht nur auf Basis bereits bestehender Ansätze (s. Kap. 3.2.1) umzusetzen, sondern den Beitrag der stofflichen Holznutzung auch mit Hilfe des neu entwickelten Ansatzes (s. Kap. 3.2.2) quantifizieren zu können, um so die Ergebnisse auch in den klimapolitischen Kontext setzen zu können: zu diesem Zweck sollten neben den Ansätzen für Holzprodukte (Kap. 3.2) auch die für den gesamten LULUCF-Sektor relevanten Anrechnungsverfahren, wie sie in Kapitel 3.1 beschrieben sind, in das Modell integriert werden.

Die große Herausforderung bei der Erstellung des Modells lag dabei in den sich immer wieder ändernden Rahmenbedingungen und Vorgaben als Ergebnis des fortlaufenden Verhandlungsprozesses über die Fortführung des Kyoto-Protokolls (Kap. 3.1.2 und 3.2.2). Andererseits hatten die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Teilforschungsergebnisse selbst immer wieder konkrete Auswirkungen auf das Verhandlungsgeschehen und damit auf die Rahmenbedingungen und Vorgaben (vgl. Kap. 3.2.2). Dies machte eine kontinuierliche Anpassung der Modellierung bis kurz vor Fertigstellung dieser Arbeit notwendig.

Um ein valides Modell für die Abschätzung der Kohlenstoffspeicherwirkung der stofflichen Holznutzung in Deutschland zu erhalten, das z. B. auch den Ansprüchen an eine Begutachtung im Rahmen der nationalen Treibhausgasberichterstattung genügt, werden zunächst die in Kapitel 2 beschriebenen Methoden analysiert und auf ihre Relevanz und Umsetzbarkeit für Deutschland überprüft. Hierzu diskutiert Kapitel 5.1 die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Methoden und analysiert die für die Modellierung zur Verfügung stehenden Daten. In Kapitel 5.2 werden die eigentliche Umsetzung und die einzelnen Elemente des Berechnungsmodells beschrieben.

## 5.1 METHODENDISKUSSION UND WAHL EINER GEEIGNETEN VORGEHENSWEISE

Die Ergebnisse der in Kapitel 2 vorgestellten Methoden zur Berechnung der Speicherwirkung sind nur so gut wie die Informationen, die für ihre jeweilige Anwendung zur Verfügung stehen. Zugleich muss es das Ziel der Verwendung der ausgewählten Berechnungsmethoden sein, die Wirkung der stofflichen Nutzung möglichst realitätsnah zu beschreiben. Darüber hinaus muss auch auf die potentielle Vergleichbarkeit von Berechnungsergebnissen für verschiedene Länder geachtet werden, insbesondere wenn verschiedene Anrechnungsoptionen analysiert werden sollen.

Daher werden die beschriebenen Methoden anhand folgender Kriterien bewertet:

- Datenverfügbarkeit für Deutschland
- Erfüllung der Anforderungen an die fachliche gute Praxis (vgl. Kap. 1.1.3 und 4), etwaige Speichereffekte weder zu überschätzen, noch Emissionen aus dem Speicher zu unterschätzen
- Umsetzbarkeit der Anforderungen der Entscheidung 2/CMP.7 (s. Kap. 3.2.2.6)
- Vergleichbarkeit der Ergebnisse auf Länderebene

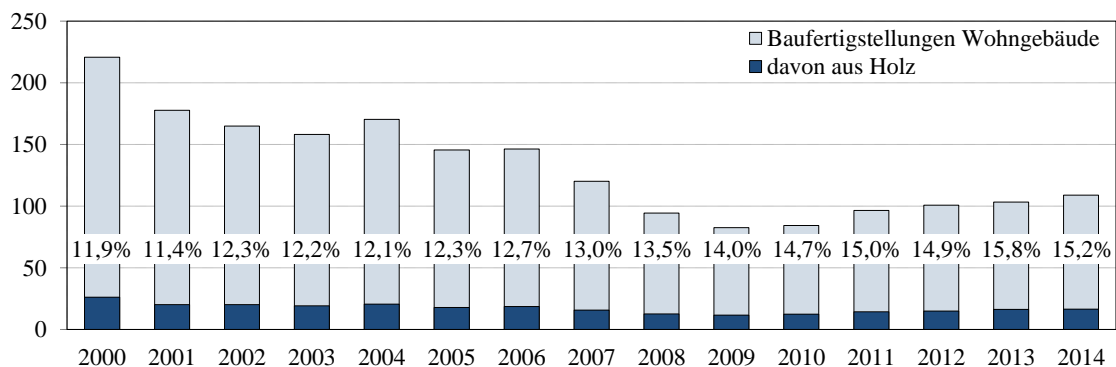
### 5.1.1 Inventurdatenmethode

Um auf Basis von Inventuren zu einer belastbaren Aussage über den Kohlenstoffspeicher in einem Land zu kommen, müssen im Prinzip alle Bereiche und Sektoren erfasst werden, in denen Holz zum Einsatz kommt: im Bau- und Wohnbereich, für Möbel und diverse Haushaltsgegenstände, die Verwendung im Verpackungssektor, in Außenanlagen (z. B. Zäune) sowie bei der Nutzung von Holz für Papier. Eine Abschätzung der jeweils aktuell gespeicherten Kohlenstoffmenge in kurzlebigen Produkten, wie z. B. in Papier, gestaltet sich allerdings schwierig, da der Gesamtspeicher bei Produkten mit einer kurzen Nutzungsdauer in einem engem Verhältnis mit den Speicheränderungen steht und sich daher innerhalb sehr kurzer Zeit deutlich verändern kann (vgl. Flugsrud *et al.* 2001). In der Praxis sind Inventuren daher sinnvollerweise auf Verwendungsbereiche zu begrenzen, in denen Produkte aus Holz über längere Zeiträume genutzt werden, wie z. B. im Gebäudebereich.

Für Deutschland liegen für den Gebäudebereich Statistiken zu Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden, sowie eine Fortschreibung des Wohngebäude- und Wohnungsbestandes und der Wohnungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden (Fachserie 5, Reihe 3) vor (Statistisches Bundesamt 2015c). Danach ist in dem Zeitraum 1996 bis 2008 der Bestand an Wohngebäuden von 15,9 auf 17,9 Mio. Einheiten und die Anzahl der Wohnungen kontinuierlich von 36,5 auf 40,1 Mio. gestiegen. Dies bedeutet gemessen an der Einwohnerzahl einen Anstieg von 445 auf 488 Gebäudeeinheiten pro 1000 Einwohner in diesem Zeitraum. Die gesamte

Wohnfläche in Deutschland nahm auf 3.462.382 Mm<sup>2</sup> zu, die im Jahr 2008 bei durchschnittlich 86,43 m<sup>2</sup> pro Wohnung bzw. 42,16 m<sup>2</sup> pro Einwohner lag.

Für die Jahre seit 1980 existiert eine statistische Zeitreihe mit Information über die erteilten Baugenehmigungen und das bei den geplanten Neubauten vornehmlich verwendete Baumaterial für die alten Länder der Bundesrepublik, und seit 1993 für Gesamtdeutschland. Für die tatsächlichen Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff existiert diese Reihe ab dem Jahr 2000 (Statistisches Bundesamt 2015b; s. Abbildung 5-1).



**ABBILDUNG 5-1:** Baufertigstellungen von Wohngebäuden in Deutschland (gesamt und Holzbau), die Prozentangaben beziffern den Holzbauanteil [in 1.000 Stk. und %] (Statistisches Bundesamt 2015b)

Weitere Informationen zum Holzhausbau in Deutschland liefert die Erhebung des verarbeitenden Gewerbes mit der Fachserie 4, Reihe 3.1 des Statistischen Bundesamtes. Unter folgenden Meldenummern besteht für Unternehmen eine Meldepflicht, die in ortsfesten Produktionsstätten folgende zur Vollmontage vorgesehene Bausätze für vorgefertigte Gebäude aus Holz serienmäßig herstellen:

- 1623 20 003<sup>6</sup>: Ein- und Zweifamilienhäuser
- 1623 20 005: Andere Wohn- und Betriebsgebäude
- 1623 20 009: Andere vorgefertigte Gebäude aus Holz (z. B. Gartenhäuser)

Die Angaben der Zeitreihen werden für diese Meldenummern in Anzahl der vorgefertigten Gebäude, ihrer Wohn- bzw. Nutzfläche in m<sup>2</sup> und Stück gemeldet. Diese Daten sind aber für die Anwendung der Inventurmethode nicht geeignet, da sie den jährlichen Zubau beschreiben.

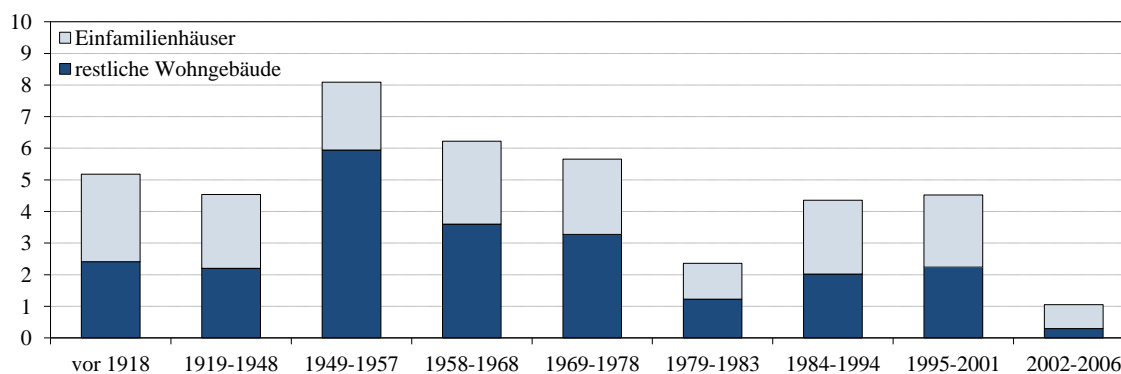
Anders als beispielsweise in Finnland (vgl. Kap. 2.1), sind für Deutschland keine statistischen Daten über die verbauten Holzmengen im bestehenden Gebäudebestand verfügbar.

1993 schätzen Burschel *et al.* die gespeicherte Kohlenstoffmenge in Wohngebäuden in Westdeutschland auf 49,2 Mt C und in Nicht-Wohngebäuden auf 25,0 Mt C (Burschel *et al.*

<sup>6</sup> nach dem Güterverzeichnis ab dem Berichtsjahr 2009 (GP2009) (vgl. Kap. 5.1.2.2)

1993a, S. 31). Für die damalige DDR werden aufgrund der Einwohnerzahl 20 % des Wertes für Westdeutschland angenommen. Neben einem Speichervorrat von insgesamt 89 Mt C im Baubereich quantifizieren die Autoren den Beitrag von Möbeln und anderen Holzwaren zum Gesamtspeicher auf 34 Mt C sowie weitere 5 Mt C in Papier, Verpackungen und Brennholz. Danach summiert sich der Kohlenstoffspeicher in Deutschland auf insgesamt 128 Mt C, was ungefähr 38 % des von Frühwald und Wegener (1993) ermittelten Wertes ausmacht. Diese beziffern den gesamten Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten in Deutschland für das gleiche Jahr auf ca. 340 Mt C, wobei alleine 260 Mt C dem Gebäudebereich zugeschrieben werden (Frühwald und Wegener 1993). Auf dieser Basis urteilt Wegener (1994), dass „die Masse an Holz, die in Deutschland im Gebrauch ist, [...] bisher nicht systematisch erhoben worden [ist] und [...] daher nur näherungsweise abgeschätzt werden [kann]“. Die beachtlichen Unterschiede der vorliegenden Zahlen zeigen, dass solche Schätzungen sehr stark von Annahmen über die Holzverwendung in den einzelnen Bereichen abhängig sind und nur einen ungefähren Eindruck der Größenordnung des Speichers liefern können.

Zur Bestimmung der gespeicherten Kohlenstoffspeichermenge mit Hilfe der Inventurmethode können im Prinzip auch Informationen über die Altersklassenverteilung des Gebäudebestandes herangezogen werden, die beispielsweise über eine Auswertung von Energieausweisdaten ermittelt wurden. Abbildung 5-2 zeigt die darüber gewonnene Information über die Verteilung des gesamten Gebäudebestandes in Deutschland (Stand 2007) in Höhe von knapp 39 Millionen auf verschiedene Altersklassen.



**ABBILDUNG 5-2:** Altersklassenverteilung im Gebäudebestand in Deutschland [in Mio. Wohneinheiten] (nach Weiß und Dunkelberg 2010, S. 17)

Zudem existiert eine Studie des Instituts für Wohnen und Umwelt, welche in Zusammenarbeit u. a. mit dem Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks insgesamt 7510 Datensätze mit Informationen über den Gebäudebestand in Deutschland zusammengetragen hat (Diefenbach *et al.* 2010). Im Zuge der Untersuchung wurden auch Informationen über das vornehmlich verwendete Baumaterial für die Gebäudewände erhoben, die in Tabelle 5-1 zusammengefasst sind.

**TABELLE 5-1:** Anteil holzbasierter Wandtypen im Wohngebäudebestand nach Regionen, Baualtersklassen und Gebäudetyp unter Angabe des Standardfehlers [in %] (nach Diefenbach *et al.* 2010, S. 52)

	Deutschland		Nord		Süd		Ost	
Fachwerk	3,1%	+/-0,3*	2,4%	+/-0,5	2,9%	+/-0,5	4,9%	+/-1,1
Holz-Fertigteile	3,7%	+/-0,3	3,3%	+/-0,5	4,3%	+/-0,5	3,2%	+/-0,6
	Altbau bis 1978		Baujahr 1979 - 2004		Neubau ab 2005			
Fachwerk	4,4%	+/-0,5	0,4%	+/-0,1	0,6%	+/-0,6		
Holz-Fertigteile	1,5%	+/-0,2	7,5%	+/-0,7	13,0%	+/-3,1		
	alle EZFH**		alle MFH***		EZFH, Altbau		MFH, Altbau	
Fachwerk	3,3%	+/-0,4	2,1%	+/-0,6	4,8%	+/-0,5	2,6%	+/-0,7
Holz-Fertigteile	4,4%	+/-0,4	0,5%	+/-0,2	1,9%	+/-0,3	0,2%	+/-0,2

\* statistischer Standardfehler (ergibt multipliziert mit dem Faktor 1,96 das 95%-Vertrauensintervall)

\*\* Einfamilienhäuser

\*\*\* Mehrfamilienhäuser

Im Prinzip ist es möglich, die verbauten Holz mengen mit Hilfe der Kombination von Informationen zum durchschnittlichen Holzeinsatz im Bausektor zu ermitteln. So beziffern Kroth *et al.* (1991) in einer detaillierten Studie über die Holzverwendung im Bauwesen die durchschnittlich in Deutschland verwendeten Holz mengen u. a. für konventionelle Wohngebäude in Massiv- und Holzbauweise sowie speziell für den Holzfertigteilbau. Während die Bestimmung des Holzeinsatzes für den konventionellen Holzbau, d. h. in individuell und handwerklich erstellten Holzhäusern, in dieser Studie über Befragungen von Architektenbüros realisiert wurde, wurde der Holzeinsatz im Holzfertigteilbau über schriftliche Erhebungen bei Herstellern von Fertigbauteilen abgeschätzt (Filippi 2015). Basierend auf diesen Angaben wurde, mit einer Abdeckung von 86 % aller im Jahr 1988 hergestellten Wohngebäude aus Holzfertigtbauweise, ein durchschnittliches Modellhaus in Holzfertigtbauweise berechnet (Kroth *et al.* 1991, S. 18, 19).

**TABELLE 5-2:** Holzverbrauch in konventionell erstellten Wohnbauten in Holzbauweise [in m<sup>3</sup>/1000m<sup>3</sup> BRI] (Kroth *et al.* 1991, S. 35)

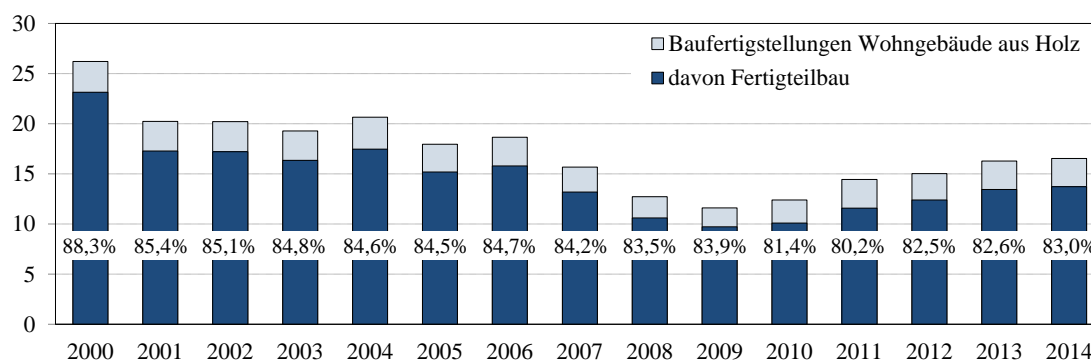
	Schnittholz		Spanplatte	Andere Holzwerkstoffe	Parkett	Gesamt
	Konstruktion	Ausbau				
Einfamilienhäuser	29,2	20,5	0,7	0,7	0,8	51,9
Zweifamilienhäuser	33,9	29,5	0,3	0,6	0,4	64,7

Im Ergebnis der Untersuchung wird der Holzverbrauch konventionell erstellter Einfamilienhäuser in Holzbauweise bezogen auf den umbauten Rauminhalt (d. h. Bruttorauminhalt, kurz BRI)

mit insgesamt  $51,9 \text{ m}^3/1000 \text{ m}^3 \text{ BRI}$  angegeben, wovon  $29,2 \text{ m}^3$  auf den Schnittholzeinsatz für die Konstruktion (d. h. ohne Ausbau) entfallen (Kroth *et al.* 1991, S. 35). In Zweifamilienhäusern in Holzbauweise sind insgesamt  $64,7 \text{ m}^3 /1000 \text{ m}^3 \text{ BRI}$  Holz verbaut, davon  $33,9 \text{ m}^3$  Schnittholz für die Konstruktion (Tabelle 5-2). Für konventionell errichtete Mehrfamilienhäuser in Holzbauweise werden keine Angaben gemacht.

Für den Fertigteilhausbau beläuft sich der berechnete Holzverbrauch im Ergebnis für das Modellhaus mit einer durchschnittlichen Netto-Wohnfläche von  $126 \text{ m}^2$  und  $634 \text{ m}^3 \text{ BRI}$  auf insgesamt  $33,1 \text{ m}^3$  Holz, wovon  $22,1 \text{ m}^3$  Vollholz und  $7,1 \text{ m}^3$  Holzwerkstoffe auf den Konstruktionsbereich (d. h. Dach, Wände, Decken inkl. Verkleidungen) entfallen (Kroth *et al.* 1991, S. 68). Bezogen auf  $1000 \text{ m}^3$  Bruttorauminhalt entspricht dies dem Holzeinsatz von insgesamt  $52,2 \text{ m}^3/1000 \text{ m}^3 \text{ BRI}$  Vollholz und Holzwerkstoffen im Fertigteilhausbau (Kroth *et al.* 1991, S. 68). 80 % der erfassten Häuser entfielen dabei auf in Holztafelbau hergestellte Gebäude und 18 % auf in Skelettbauweise erstellte Fertigteiltbauten. Nach weiterer Angabe der Hersteller repräsentieren 90,9 % der erfassten Fertigtbauten Einfamilienhäuser, 8,2 % Zweifamilienhäuser und 0,9 % Mehrfamilienhäuser (Kroth *et al.* 1991, S. 19).

Eine erst kurz vor Fertigstellung der vorliegenden Arbeit erschienene Ökobilanzstudie von Achenbach und Rüter berechnet den Holzeinsatz ebenfalls bezogen auf ein produktionsmengenewichtetes Durchschnittshaus in Fertigteilhausbauweise (Achenbach und Rüter 2016). Sie wurde in Zusammenarbeit mit 13 Unternehmen des Bundesverbandes für Fertigtbau e.V. (BdF) auf Basis von für das Jahr 2009 erhobenen Unternehmensdaten durchgeführt. Die Anzahl der von den teilnehmenden Unternehmen hergestellten Häuser beläuft sich in dieser Untersuchung auf 3618 Häuser und repräsentiert damit 37,2 % der im Jahr 2009 hergestellten Fertigteilhausbauhäuser in Holzbauweise (vgl. Abbildung 5-3) bzw. 31,2 % aller in diesem Jahr erstellten Wohngebäude aus Holz. 2,2 % der untersuchten Häuser wurden in Holzskelettbauweise und die restlichen 97,8 % in Holzrahmenbauweise errichtet (Achenbach und Rüter 2016, S. 89).



**ABBILDUNG 5-3:** Baufertigstellungen von Wohngebäuden aus Holz in Deutschland (gesamt und Fertigteilhausbauweise), die Prozentangaben beziffern den Fertigteilbauanteil [in 1.000 Stk. und %] (Statistisches Bundesamt 2015b)



Nach den Ergebnissen der Studie beträgt die durchschnittlich verbaute Holzmenge im produktionsmengengewichteten Durchschnittshaus der teilnehmenden Unternehmen 32,6 m<sup>3</sup>, wovon 19,8 m<sup>3</sup> auf Massivholzprodukte (inkl. Schnittholz, KVH, Duo- und Triobalken, Brettschichtholz und Hobelware) und die übrigen Mengen auf plattenförmige Holzwerkstoffe und Holzfaserdämmplatten (*low density fibre board*, Abk. LDF) entfallen. Für Gebäude in Skelettbauweise wird dabei ungleich mehr Holz eingesetzt: allein 37,5 m<sup>3</sup> Massivholzprodukte von insgesamt durchschnittlich 46,2 m<sup>3</sup> Holz und Holzwerkstoffe werden bei dieser Bauweise im Schnitt verbaut. Wird der gleiche Anteil von Häusern in Skelettbauweise wie bei Kroth *et al.* (1991) unterstellt (22 %), ergibt sich bezogen auf den Bruttorauminhalt ein Verbrauch von Massivholz und Holzwerkstoffen in Höhe von durchschnittlich insgesamt 50,1 m<sup>3</sup>/1000 m<sup>3</sup> BRI, d. h. ca. 4 % weniger Holz als in der Untersuchung für das Jahr 1988. Die ermittelten Kenndaten der Ökobilanzstudie für das durchschnittliche Fertigteilbauhaus aus Holz sind in Tabelle 5-3 aufgeführt.

**TABELLE 5-3:** Kenndaten des produktionsmengengewichteten Durchschnittsholzhauses in Fertigteilbauweise (Achenbach und Rüter 2016, S. 39)

Grundflächen und Rauminhalte	Einheit	
Wohnfläche ohne Keller	m <sup>2</sup>	143,13
Wohnfläche mit Keller	m <sup>2</sup>	186,44
Bebaute Fläche	m <sup>2</sup>	104,35
Bruttorauminhalt (BRI) ohne Keller	m <sup>3</sup>	549,89
Bruttorauminhalt (BRI) mit Keller	m <sup>3</sup>	688,70

Im konventionellen Hausbau in Massivbauweise belaufen sich die verbauten Holzmengen für Ein- und Zweifamilienhäuser nach Angabe von Kroth *et al.* (1991) auf etwas über 23 bzw. 22 m<sup>3</sup>/1000 m<sup>3</sup> BRI (Tabelle 5-4).

**TABELLE 5-4:** Holzverbrauch in konventionell erstellten Häusern [in m<sup>3</sup>/1000m<sup>3</sup> BRI] (nach Kroth *et al.* 1991, S. 35)

	Schnittholz		Spanplatte	Andere Holzwerkstoffe	Parkett	Gesamt
	Konstruktion	Ausbau				
Einfamilienhäuser	10,2	10,3	0,8	0,5	0,2	22,0
<i>Norddeutschland</i>	9,9	9,2	0,6	0,6	0,2	20,5
<i>Süddeutschland</i>	10,8	12,3	1,0	0,5	0,4	25,0
Zweifamilienhäuser	9,9	9,3	0,9	0,6	0,3	21,0
<i>Norddeutschland</i>	8,2	7,9	0,7	0,8	0,3	17,9
<i>Süddeutschland</i>	11,8	9,8	1,1	0,4	0,2	23,3
Mehrfamilienhäuser	6,4	3,8	0,5	0,5	0,2	11,4

Einer Studie von Höglmeier *et al.* (2013) zufolge, die die verbauten Holzmen-gen für Wohn- und Nichtwohngebäuden in Bayern quantifiziert, werden in Wohngebäuden insgesamt 25,8 m<sup>3</sup>/1000m<sup>3</sup> BRI Holz eingesetzt, wovon 18 m<sup>3</sup> auf den Rohbau entfallen. Dies entspricht einem durchschnittlichen Holzeinsatz von insgesamt 30,2 m<sup>3</sup> pro Gebäude. Weiter geben die Autoren an, dass sich die verwendeten Holzmen-gen in Nichtwohngebäuden 4,7 m<sup>3</sup>/1000m<sup>3</sup> BRI (bzw. 3,1 m<sup>3</sup>/1000m<sup>3</sup> BRI im Rohbau) und damit im untersuchten Gesamtbestand auf durchschnittlich insgesamt 18,9 m<sup>3</sup>/1000m<sup>3</sup> BRI belaufen (Höglmeier *et al.* 2013).

Obgleich Pingoud *et al.* (2003, S. 3) und Flugsrud *et al.* (2001, S. 6) die Abschätzung des Kohlenstoffspeichers mittels Inventuren als die insgesamt robustere Methode bezeichnen und gute Daten über die durchschnittliche Holzverwendung in errichteten Gebäuden für Deutschland vorliegen, erweist sich die Datenlage für eine Anwendung der Inventurmethode als unzureichend, um die in bestehenden Gebäuden gespeicherte Kohlenstoffmen-gen in Deutschland hinreichend genau ermitteln zu können. Eine Erfassung des verbauten Holzes in dem für die Holzverwendung wichtigen Bausektor mittels Inventuren ist nur schwer durchführbar. Zudem sind für die Ermittlung von Netto-Emissionszeitreihen Daten aus mehr als einer Erhebung notwendig.

Neben der Schwierigkeit, den sich ändernden Holzproduktespeicher für einen definierten Zeitraum zu erfassen, besteht ein weiterer Nachteil der Inventurmethode außerdem darin, dass keine Aussagen über die Herkunft des Materials getroffen werden können (vgl. Kap. 3.2.2.3) und immer nur Teile der tatsächlich in Nutzung befindlichen Holzprodukte erfasst werden können.

#### Bewertung der Inventurmethode

- ⊕ Keine unsicheren Annahmen über Nutzungsdauern notwendig
- ⊖ Beschränkung auf die Verwendung von Holz im Bausektor
- ⊖ Methode aufgrund mangelnder Verfügbarkeit von Daten kaum anwendbar
- ⊖ Länderspezifische Vorgehensweise notwendig, daher sind Ergebnisse kaum vergleichbar
- ⊖ Abschätzung der Netto-Emissionen nur unter Berücksichtigung von Produkten mit bestimmter Herkunft nicht möglich

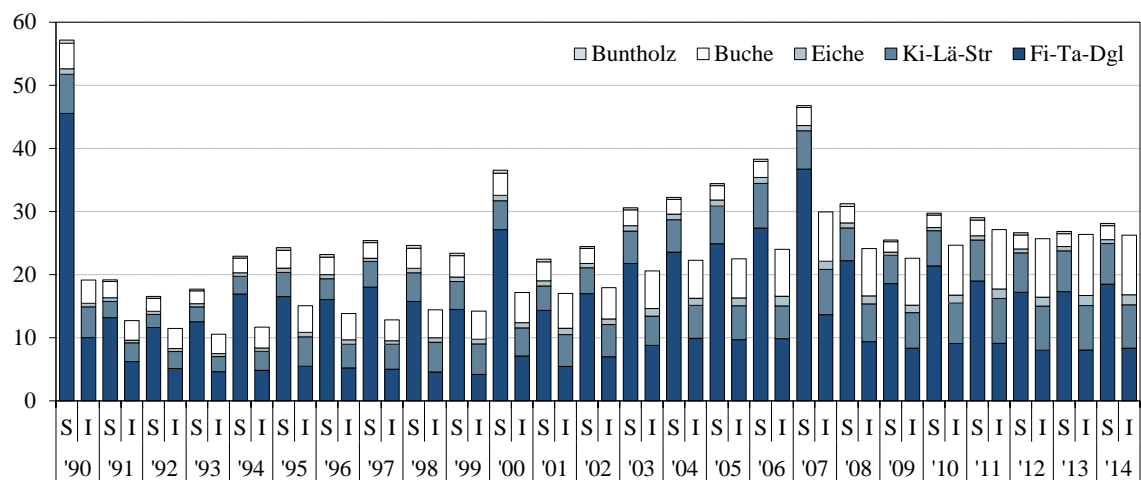
### 5.1.2 Flussdatenmethode

Im Gegensatz zu Informationen über den Bestand von Produkten aus Holz liegen für Deutschland und viele weitere Länder Daten über den Holzeinschlag, die Produktion und den Außenhandel von Holzhalb- und Holzfertigwaren auf jährlicher Basis vor. Da der Kohlenstoffzufluss sowohl direkt über die Produktions- und Außenhandelsstatistik für Holzprodukte als auch über ein Stoffstrommodell abgebildet werden kann, welches den Kohlenstoff aus dem jährlichen Holzeinschlag verteilt, werden diese beiden Möglichkeiten wiederum separat erörtert (vgl.

Kap. 2.2). Der Abfluss des Kohlenstoffs aus dem Produktspeicher kann mit Hilfe von Nutzungsdauern und Zerfallsfunktionen oder mit Hilfe von direkten Schätzungen, z. B. mittels Daten zum Altholzaufkommen bzw. Abfalldaten, abgeschätzt werden. Da letztere Möglichkeit methodisch einer direkten Schätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gleichkommt (s. Kap. 2.2.4), werden diese Vorgehensweisen gemeinsam auf ihre Eignung hin analysiert.

### 5.1.2.1 Kohlenstoffzufluss über den Holzeinschlag

Die amtliche Holzeinschlagstatistik der Bundesländer, die zwischen Stammholz (inkl. Stangen und Schwellen), Industrieholz, Energieholz und nicht verwertetem Holz sowie den Hauptbaumarten unterscheidet, stellt für Deutschland detaillierte Datensätze zum Rundholzeinschlag zur Verfügung (Abbildung 5-4) (Statistisches Bundesamt 2014).



**ABBILDUNG 5-4:** Daten der Holzeinschlagstatistik in Deutschland, dargestellt getrennt nach Stammholz (S) und Industrie- und Energieholz (I) sowie Hauptbaumarten ab dem Jahr 1990 [in Mm<sup>3</sup>, ohne Rinde]

Informationen zum Holzeinschlag können auch in den internationalen Datenbanken der FAO und UNECE gefunden werden, welche auf den Werten der von den nationalen Behörden in offiziellen Submissionen gemeldeten Mengen beruhen. Sie stellen somit ebenfalls länderspezifische Informationen dar und sollten mit den in den nationalen Statistiken geführten Datensätzen zu Produktion von Rundholz im Prinzip übereinstimmen.

Um die Verteilung des Kohlenstoffs entlang der Verarbeitungsketten für Rundholz in Deutschland abbilden zu können, müssen diese Datensätze mit Informationen über den Einsatz von Rundholz zur Herstellung von Holzhalbwerten (Schnittholz, Holzwerkstoffe) und Papierprodukten oder über den Gebrauch des Holzes in verschiedenen Verwendungsbereichen kombiniert werden. Tabelle 5-5 stellt die von Burschel *et al.* (1993a) unterstellte Verwendung des in Deutschland eingeschlagenen Holzes für das Jahr 1989 dar. Allerdings zeigt sich der Autor von der Qualität dieser Daten nicht überzeugt, wenn er schreibt:

„Die in der Tabelle genannten Werte können nur Näherungen sein, da die Verwendung des in Deutschland eingeschlagenen Holzes nur schwer nachzuverfolgen ist. Es wird auf seinem Weg durch die bearbeitenden Betriebe und den Handel um Importe ergänzt und durch Exporte vermindert, sodaß sich sein Anteil an den verwendeten Endprodukten nicht genau bestimmen läßt. Zudem bereitet es Schwierigkeiten, den Weg und die endgültige Nutzung von Produktionsabfällen aufzuklären. Die angegebenen Werte sind daher unter Vorbehalt zu sehen.“ (Burschel *et al.* 1993a, S. 30)

**TABELLE 5-5:** Anteile des Holzeinschlags im Jahr 1989 nach Baumart und Sortiment sowie seine Verteilung auf Endverwendungen in Deutschland, nach Burschel *et al.* 1993a, S. 30

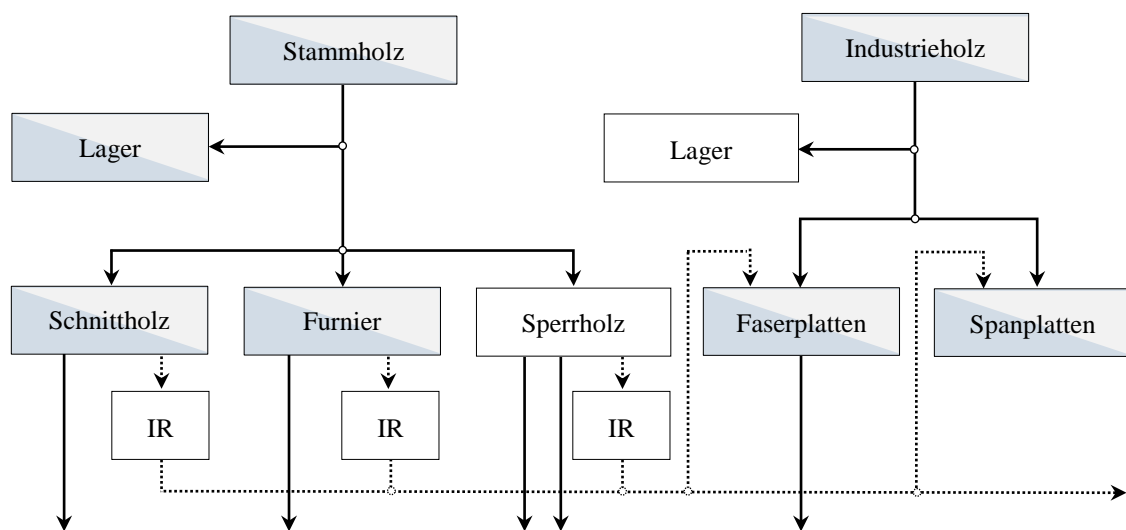
Baumart	Sortiment	Einschlag	Verwendung			
			Bauwesen	Möbel und Holzwaren	Papier, Verpackungen	Energie
Fichte	Stammholz	41	47	13	21	19
	Industrieholz	20	7	9	65	19
Kiefer	Stammholz	8	35	32	19	14
	Industrieholz	9	21	29	15	35
Buche	Stammholz	9	8	43	23	26
	Industrieholz	10	13	19	13	55
Eiche	Stammholz	2	29	54	2	15
	Industrieholz	1	8	10	0	82
Anteil am Einschlag		100	28	19	28	25

Die Aufteilung des Kohlenstoffs in den verschiedenen Rohholzsortimenten auf die nachgelagerten Weiterverarbeitungsketten stellt insofern eine Herausforderung dar, als die Verteilungsmuster nicht konstant sind, sondern in Abhängigkeit vom Rohholzangebot und der Nachfrage nach einzelnen Holzprodukten von Jahr zu Jahr variieren. Auch wird ein Teil des während der Herstellung der Halb- bzw. Fertigwaren anfallenden Industrierestholzes als Rohstoff für die Herstellung von weiteren Produkten (z. B. in Span- oder Faserplatten) verwendet, während ein anderer Teil – oftmals auch im Werk selber – für die Energiegewinnung eingesetzt wird und somit als Zufluss für den Produktspeicher ausfällt.

Im Prinzip bieten sich für eine Allokation des Kohlenstoffs die Ergebnisse detaillierter Ökobilanzstudien an, deren Sachbilanzen Aufschluss über den produktspezifischen Rohstoffeinsatz und den Materialverlust entlang der Wertschöpfungskette zulassen. Die Qualität der Verschnittfaktoren und Verteilungsparameter hängt dabei allerdings in hohem Maße von der zeitlichen und räumlichen Repräsentativität der Ökobilanzen ab, die im Idealfall mit dem Untersuchungsraum des Kohlenstoffspeichereffektes, also den nationalen Grenzen, übereinstimmen sollte. Für Deutschland kommen hier beispielsweise für das Jahr 2009 repräsentative Ökobilanzdaten in

Frage, welche im Rahmen eines Projektes in Zusammenarbeit mit zahlreichen Unternehmen der deutschen Holzindustrie erhoben wurden (Rüter und Diederichs 2012).

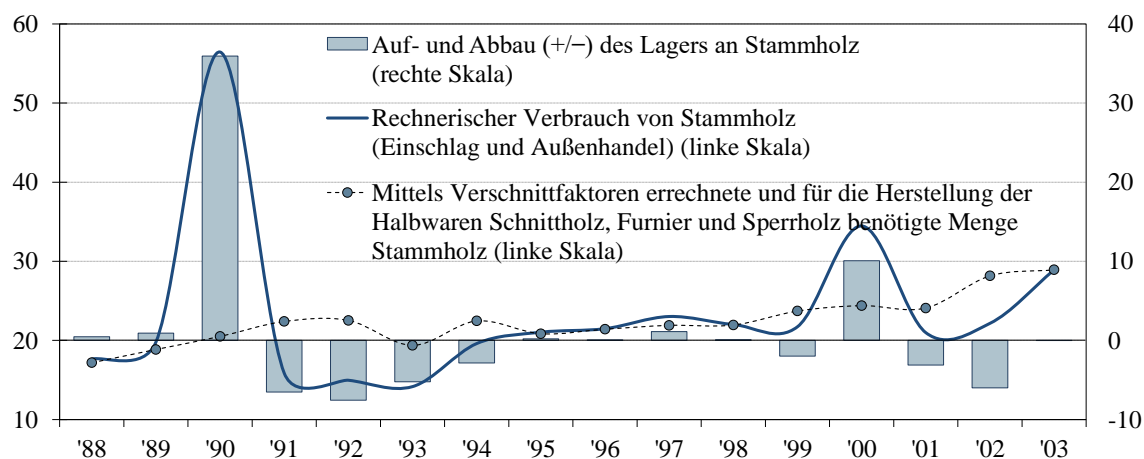
Um die Qualität der Herangehensweise, die Höhe und die Entwicklung der Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten über die Kohlenstoffflüsse entlang der Verarbeitungskette von Laub- und Nadelholzrundholz (vgl. Kap. 2.2.1) abbilden und einschätzen zu können, wurde in Anlehnung an Scharai-Rad und Welling (1999, S. 20) zu Beginn der Arbeit ein einfaches Stoffstrom-Modell in dem Tabellenkalkulationsprogramm MS EXCEL implementiert (Abbildung 5-5).



**ABBILDUNG 5-5:** Modellerte Kohlenstoffflüsse entlang der Verarbeitungsketten von Nadel- und Laubholz (Stamm- und Industrieholz) zu Holzhalbwerten (farbig hinterlegt: Nadel- und Laubholz; weiß hinterlegt: unspezifisch)

Für jede der in diesem Versuch berücksichtigten Halbwerten aus Holz (ohne Zellstoff und Papier) wurden Daten zu Produktion und Außenhandel für die Jahre 1984 bis 2007 hinterlegt (s. Kap. 5.2.1). Die Datensätze hierfür entstammen den Berichten der ehemaligen Zentralen Markt- und Preisberichtsstelle GmbH (ZMP), die Daten der Holzverarbeitenden Industrie nach den Angaben des Statistischen Bundesamtes, der Landesforstverwaltungen und des BMELV bis 2009 jährlich veröffentlicht hat. Die Höhe der Ausbeute bei der Schnittholzherstellung in Deutschland wurde Mantau und Sörgel (2004, S. 5) entnommen, die das Verhältnis des Rohstoffeinsatzes zum fertigen Schnittholzprodukt für das Jahr 2002 für Nadelholz mit 1 : 0,61 und für Laubholz mit 1 : 0,67 angeben. Die benötigten Rohholzmengen für die Furnier- und Sperrholzherstellung wurden aus dem durchschnittlichen Holzverbrauch der Furnier- und Sperrholzwerke der Jahre 1997 bis 2000 ermittelt. Für die Faser- und Spanplattenherstellung wurden Sachbilanzdatensätze aus der Ökobilanzuntersuchung von Hasch (2002) hinterlegt. Der für die Herstellung der Halbwerten errechnete Rohholzbedarf bzw. der jährliche Rohholzverbrauch in Deutschland wurde anschließend mit den Zahlen aus der Einschlagstatistik abgeglichen.

Abbildung 5-6 zeigt eine Gegenüberstellung des aus den Daten der Statistik berechneten Verbrauchs von Stammholz (Einschlag und Außenhandel<sup>7</sup>) und den Verschnittfaktoren zufolge benötigten Rohholzmengen (errechnete Verbrauchswerte in Kombination mit den Produktionsdaten für Schnittholz, Furnier und Sperrholz).



**ABBILDUNG 5-6:** Gegenüberstellung der Höhe des Stammholzverbrauchs (StBA) mit der benötigten Menge an Rohholz für die Höhe der Produktion von Halbwaren (StBA) [in Mm<sup>3</sup>]

Gut sichtbar ist das deutlich erhöhte Stammholzaufkommen aufgrund der beiden Stürme Wiebke (Ende Februar 1990) und Lothar (Ende Dezember 1999) und die davon unberührte kontinuierliche Nutzung von Stammholz als Rohstoff für die Herstellung der Halbwaren. Das Überangebot an Stammholz der Jahre 1990 und 2000 wurde offensichtlich gelagert und ergänzte den in den Folgejahren verringerten Einschlag bzw. rechnerischen Verbrauch von Stammholz, der für sich genommen nicht zur Deckung des Rohstoffbedarfs für die Schnittholz-, Furnier- und Sperrholzproduktion in Deutschland ausreichend gewesen wäre.

Um die jährlichen Veränderungen des Produktkohlenstoffspeichers über den Holzeinschlag abzuschätzen, müssen offenkundig mehrere Annahmen für die Verteilungsmuster des Rohholzes entlang der Verarbeitungsketten für die Herstellung der Holzprodukte getroffen werden, die aufgrund biotischer und abiotischer Ursachen bei der Waldbewirtschaftung und der Dynamik der wirtschaftlichen Entwicklung teilweise sehr starken jährlichen Veränderungen unterliegen. Das obige Beispiel verdeutlicht somit sehr gut die Grenzen dieser Vorgehensweise. Denn die tatsächliche jährliche Rohholznutzung, die auf Basis statistischer Daten zur Herstellung der aus dem Rohholz produzierten Halbwaren und Verschnittfaktoren bestimmt werden kann, korreliert nicht mit einem errechneten Verbrauchsmuster auf Basis des Holzeinschlags und des Außenhandels mit Rohholz. Dies gilt für Industrieholz gleichermaßen wie für Stammholz. Auch wird der Außenhandel in manchen der im Kapitel 2.2.1 beschriebenen Modelle nicht oder nur mittels

<sup>7</sup> Die Außenhandelsstatistik des Statistischen Bundesamtes weist ab dem Berichtsjahr 1993 nicht mehr Stammholz, sondern Rohholz aus. Der Einfachheit halber wird angenommen, dass es sich bei dem gehandelten Rohholz wie in den vorherigen Berichtsjahren um Stammholz handelt.

über den Zeitverlauf konstant gehaltener Faktoren berücksichtigt (vgl. Pingoud *et al.* 2001: S. 101). Auf diese Weise lassen sich zwar festgelegte Kohlenstoffmengen in Produkten ermitteln, deren Rohstoffherkunft durch die Systemgrenze eindeutig definiert wird (z. B. Forstamt, Bundesland oder Staat), doch ist es nicht möglich, auch eine Aussage über den Ort der Speicherung und des Kohlenstoffabflusses aus dem Speicher und damit der CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb eines Landes zu treffen. Zugleich lässt eine direkte Verknüpfung des jährlichen Rohholzaufkommens mit der nachgelagerten Produktion von Holzwaren außer Acht, dass nicht vornehmlich das Angebot an Rohholz die Nachfrage nach Holzwaren bestimmt; vielmehr beeinflussen die Bedürfnisse der Endverbraucher auch den Verbrauch von Rohholz (vgl. Abbildung 5-6).

Brown *et al.* (1998, S. 14) weisen auf die oft mangelnde Qualität von Einschlagstatistiken hin. Zweifel an der Zuverlässigkeit der deutschen Einschlagstatistik hegen auch Dieter und Englert (2005a), wenn sie bemerken, dass die offiziellen Zahlen der Statistik den tatsächlichen Einschlag unterschätzen. So beschreiben die Autoren, dass zwar die „amtliche Erfassung des Einschlags nach Holzarten, Sorten und Waldeigentumsarten geregelt“ ist, doch das Statistische Bundesamt von eingeschlagenen Holzmengen spricht, die „eingeschlagen und verbucht“ wurden: in Abhängigkeit vom Buchungssystem (Revierbuch, Lohnbuch- oder Finanzbuchhaltung) könne diese Menge vom Einschlag „mehr oder weniger stark abweichen“. Eine weitere Unsicherheitsquelle besteht nach Angabe von Dieter und Engert darin, dass die staatlichen Forstverwaltungen, die für die Einschlagserfassung zuständig sind, „den Holzeinschlag in den anderen Eigentumsarten nur gutachterlich schätzen, [und] nur den Teil angeben, der über [...] ihre eigene Holzbuchführung vermarktet wird oder gar keine Angaben machen.“ So werden z. B. durch Selbstwerber entstandene Biomasseabgänge, die meistens energetisch genutzt werden, zwar implizit durch Inventuren erfasst, aber sie tauchen nicht in der offiziellen Einschlagsstatistik auf.

Daher ist davon auszugehen, dass eine Modellierung des Kohlenstoffzuflusses in den Holzproduktespeicher auf Basis allein der Daten zum Holzeinschlag die Kohlenstoffmengen systematisch unterschätzt. Nur über die Verwendung auch der jährlich vorliegenden Zahlen aus der Produktionsstatistik zu Holzhalbwaren lassen sich die Unsicherheiten der zu treffenden Annahmen über die Materialflüsse entlang der Verarbeitungskette minimieren und Inkonsistenzen zwischen modellierten und offiziellen Daten aus der Statistik vermeiden. Die Verwendung dieser Daten als Grundlage für eine Modellierung wird im nächsten Kapitel diskutiert.

### Bewertung der Abschätzung des Kohlenstoffzuflusses über den Holzeinschlag

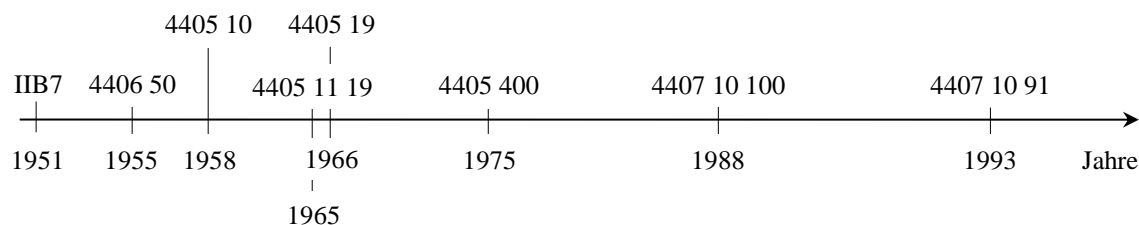
- ⊕ Ermöglicht die Untersuchung von Zusammenhängen der Waldbewirtschaftung und ihrer Auswirkung auf ein sich änderndes Holzaufkommen auf die Kohlenstoffspeicherung in Produkten
- ⊖ Tatsächlicher Einsatz von Rohholz korreliert nicht mit seinem rechnerischen Verbrauch
- ⊖ Unsichere Annahmen über die Verteilung des Kohlenstoffs auf die Produkte
- ⊖ Mindere Datenqualität der Zahlen zum Holzeinschlag

#### 5.1.2.2 Kohlenstoffzufluss über Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren

Für Deutschland geben Wegener *et al.* (1994) die in den im Jahr 1992 produzierten Sägewerksprodukten und Spanplatten enthaltenen Kohlenstoffmengen an. Allerdings weisen sie mit den Werten, die sie über die Daten des Statistischen Bundesamtes in Kombination mit Dichteangaben herleiten und „CO<sub>2</sub>-Potential“ nennen, lediglich den Kohlenstoffzufluss in den Speicher aus. Zugleich enthält die Studie auch die gutachterliche Schätzung der im Produktspeicher enthaltenen Kohlenstoffmengen (vgl. Kap. 5.1.1).

#### Nationale Statistiken

Statistische Zahlen zur Produktion von Gütern und dem Außenhandel von Waren werden von den nationalen Behörden jedes Landes erhoben. In Deutschland ist das Statistische Bundesamt (StBA) gesetzlich verpflichtet, Datensätze über die Herstellung und den Außenhandel von Gütern und Waren zusammenzustellen (AgrStatG 2006; BStatG 2008). Seit dem Jahr 1949 liegen die Datensätze zum Holzeinschlag und zu Produktion und Außenhandel der Holzverarbeitenden Industrie in Form detaillierter Verzeichnisse vor, die ab dem Jahr 2003 in elektronischer Fassung veröffentlicht werden. Im Laufe der Jahre wurden die den produzierten Gütern und gehandelten Waren aus Holz zugeordneten Melde- und Warennummern immer wieder verändert (vgl. Abbildung 5-7).



**ABBILDUNG 5-7:** Verbuchung von Fichtenschnittholz unter der jeweils relevanten Warennummer (Außenhandel) im Verlauf der Jahre



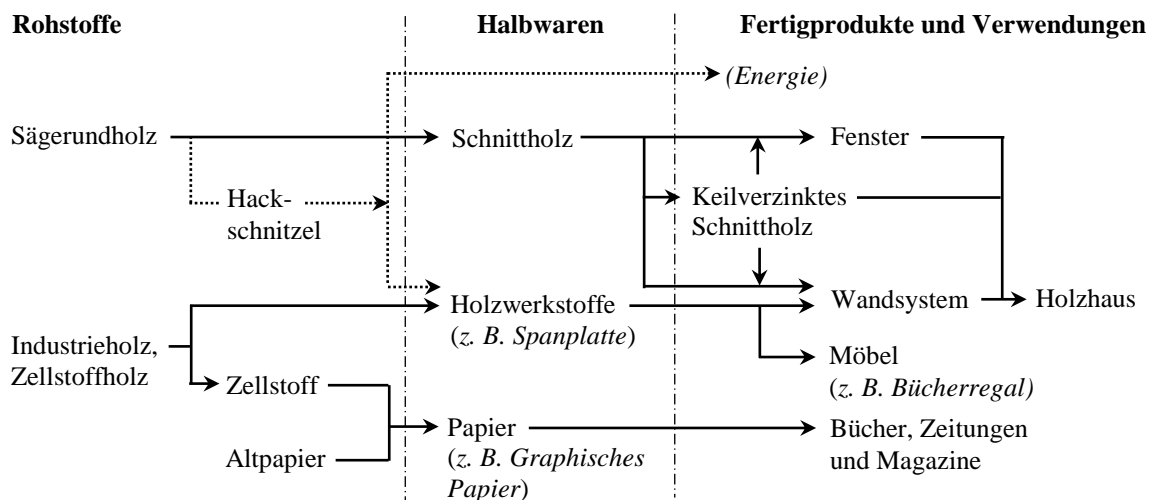
So wurde beispielsweise im Jahr 1987 im Rahmen der Bemühungen um eine gemeinsame Handelspolitik in Europa die Kombinierte Nomenklatur (KN) in der Europäischen Gemeinschaft und damit auch in Deutschland eingeführt, wodurch in der Folge die vordem siebenstelligen Warennummern in neunstelligen Nummern abgeändert wurden. Sie basiert auf der HS Nomenklatur der WCO (vgl. Kap. 2.2.2) und wird jährlich auf Basis der aktuell gültigen Zuordnung der gehandelten Waren vom Statistischen Bundesamt in Form des Warenverzeichnisses für die Außenhandelsstatistik veröffentlicht. Hierauf basiert die europäeinheitliche Güterklassifikation (Prodcom-Liste), die jeder Produktkategorie einen achtstelligen Code zuordnet und insgesamt ca. 4.500 Produktkategorien umfasst (Europäische Kommission 2008). Sie wurde aufgrund der Änderungen der internationalen Systematik letztmalig mit dem Berichtsjahr 2009 angepasst.

Auch die Klassifizierung der produzierten Güter, die auf dem im Jahr 1947 für das Vereinigte Wirtschaftsgebiet eingeführten Warenverzeichnis zum Industriebericht basiert und in Deutschland im Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken festgelegt wird, änderte sich immer wieder im Laufe der Zeit. Die Wirtschaftsklassifikation basiert auf der Europäischen Systematik für Wirtschaftszweige (NACE). Sie wurde eingeführt, um den Erfordernissen des europäischen Binnenmarktes nach vergleichbaren wirtschaftlichen Informationen Rechnung zu tragen und baut ihrerseits auf der Internationalen Systematik der Vereinten Nationen auf (s. Kap. 2.2.2). Sie ist für alle Mitgliedsstaaten verbindlich und definiert mit vier Ziffern die Gruppe und Klasse eines Wirtschaftszweiges innerhalb einer Abteilung (Tabelle 5-6).

**TABELLE 5-6:** Gruppierung der Holz verarbeitenden Industrie nach der Klassifikation der Wirtschaftszweige 2003 und 2008 (Statistisches Bundesamt 2008a)

WZ 2003	Bezeichnung	WZ 2008	Bezeichnung
20.10	Säge-, Hobel- und Holzimprägnierwerke	16.10	Säge, Hobel- und Holzimprägnierwerke
20.20	Herstellung von Furnier-, Sperrholz und Holzfasern- und Holzspanplatten	16.21	Herstellung von Furnier-, Holzfasern- und Holzspanplatten
20.30	Herstellung von Konstruktionsteilen, Fertigbauteilen, Ausbauelementen und Fertigteilbauten aus Holz	16.22	Herstellung von Parketttafeln
20.40	Herstellung von Verpackungsmitteln, Lagerbehältern und Ladungsträgern aus Holz	16.23	Herstellung von sonstigen Konstruktionsteilen, Fertigbauteilen, Ausbauelementen und Fertigbauteilen aus Holz
20.51	Herstellung von Holzwaren, anderweitig nicht genannt (ohne Möbel)	16.24	Herstellung von Verpackungsmitteln, Lagerbehältern und Ladungsträgern aus Holz
21.12	Herstellung von Papier, Karton und Pappe	16.29	Herstellung von Holzwaren, Kork-, Flecht- und Korbwaren (ohne Möbel)
		17.12	Herstellung von Papier, Karton und Pappe

Die Produktions- und Außenhandelsstatistiken umfassen Holzwaren der unterschiedlichen Fertigungsgrade – vom Rohstoff Rohholz über die diversen Halbwaren bis hin zu Fertigwaren aus Holz (vgl. Abbildung 2-7, S. 48). Während die Außenhandelsstatistik alle erfassten Warenmengen seit Beginn der Aufzeichnungen in Dezitonnen (dt) ausweist, werden die produzierten Gütermengen in den unterschiedlichsten Maßeinheiten ausgewiesen. Insbesondere Fertigwaren aus Holz werden oftmals nur in Stückangaben gemeldet. Dies gilt für das in Kapitel 2.1 erläuterte Beispiel zu Holzfertiggebäuden ebenso wie für die gemeldeten Produktionsmengen von Fenstern, Türen, Treppen, Saunakabinen, Kisten, Särgen, Möbel und zahlreicher weiterer Fertigwaren. Des Weiteren werden Zahlen zu den hergestellten Flächen oder den produzierten Laufmetern z. B. für diverse Holzleisten gelistet. Der Großteil der produzierten Halbwaren wird hingegen in Kubikmetern angegeben. Die in Holzprodukten enthaltenen Kohlenstoffmengen können über die Angaben ihrer Holzmasse oder aus der Kombination der Volumenangaben mit der durchschnittliche Dichte der produzierten Güter berechnet werden. Fehlen diese Angaben, ist eine Berechnung der enthaltenen Kohlenstoffmengen nur unter Zuhilfenahme grober Annahmen über die durchschnittlich in den Produkten verwendeten Holzmengen möglich. Dies trifft im Wesentlichen auf alle gemeldeten Fertigwaren zu. Zugleich ist es essentiell, Doppelzählungen von Kohlenstoff aufgrund der unterschiedlichen Verarbeitungsstufen der Produkte zu vermeiden. So wird der in der Halbfertigware Schnittholz enthaltene Kohlenstoff einmal von den herstellenden Sägewerken gemeldet und ein weiteres Mal von Betrieben, die für ihre Produktion von Fertigwaren selber kein Schnittholz produzieren, sondern dieses als Rohstoff zukaufen (vgl. Abbildung 5-8).

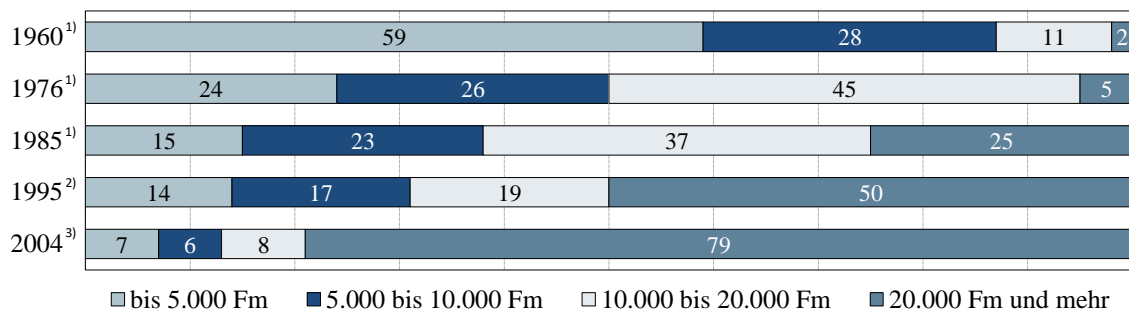


**ABBILDUNG 5-8:** Beispiel für Verarbeitungsketten vom Rohholz bis zum Fertigprodukt (vgl. Rüter *et al.* 2014, S. 2.113)

Während aufgrund zolltariflicher Bestimmungen die gehandelten Mengen von Holzwaren fast vollständig erfasst werden (Mindestwert 1.000 €), umfasst die von den Statistischen Landesämtern durchgeführte Totalerhebung der Produktion grundsätzlich nur alle Betriebe des produzie-

renden Gewerbes mit im Allgemeinen 20 und mehr Beschäftigten. Da die Holzverarbeitung in Deutschland traditionell sehr handwerklich und mittelständisch geprägt ist, ist für die Herstellung von Fertigwaren aus Holz davon auszugehen, dass diese zum großen Teil statistisch nicht erfasst wird. So belief sich die durchschnittliche Beschäftigungszahl von Schreinereien im Jahr 2010 auf durchschnittlich sechs Mitarbeiter (Anonymus 2013). Für die industriell hergestellten Holzwerkstoffe kann man hingegen aufgrund der hohen Kapitalintensität und den damit verbundenen großen Produktionseinheiten im Prinzip von einer vollständigen Erfassung der Produktion ausgehen (vgl. Dieter *et al.* 2004, S. 54).

Eine Ausnahme von der Erfassungsschwelle von zwanzig und mehr Beschäftigten bilden Sägewerke, die die Menge und den Wert ihrer produzierten Erzeugnisse bereits ab einer Mindestanzahl von zehn Beschäftigten an das Statistische Bundesamt melden müssen. Bis zum Berichtsjahr 1992 galt für Sägewerke eine Erfassungsuntergrenze von einer Jahreseinschnittleistung von 1.000 fm (bezogen auf Rohholz), die für den Berichtszeitraum von 1993 bis 2008 auf 5.000 fm angehoben wurde. Zur Vergleichbarkeit der Daten innerhalb der Zeitreihen schreibt das Statistische Bundesamt in Bezug auf die letzte Änderung ab dem Berichtsjahr 2009, dass es zu „leichten Einschränkungen in der Vergleichbarkeit“ kommen kann (Statistisches Bundesamt 2010a, S. 6). Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Änderung der Erfassungsschwelle im Jahr 1993 zu ungleich größeren Schwankungen in der Statistik für Schnittholzprodukte geführt hat. In diesem Zusammenhang spielt auch der seit dem Beginn der Erfassung statistischer Daten fortschreitende Strukturwandel in der Sägeindustrie von Schnittholz eine Rolle (Abbildung 5-9), der ebenso Auswirkung auf die tatsächlich erfassten Produktionsmengen haben dürfte.



**ABBILDUNG 5-9:** Anteil der Sägewerke in Deutschland an der Gesamteinschnittmenge nach Einschnittgrößenklassen und Jahren (nach <sup>1</sup>Schreiber 1988, S. 30, <sup>2</sup>Lückge und Weber 1997, S. 8 und <sup>3</sup>Sörgel und Mantau 2005)

Einer Untersuchung der Zentralen Holzmarktforschungsstelle e.V. aus dem Jahr 1988 zufolge wurden noch im Jahr 1960 von 59 % aller Betriebe weniger als 5.000 fm Rundholz eingeschnitten (Schreiber 1988, S. 32). Der Anteil der Sägewerke mit einem Einschnittvolumen unter 1.000 fm und damit unter der zu dieser Zeit geltenden Erfassungsschwelle lag laut Schreiber im Jahr 1976 unter 3 % und im Jahr 1985 sogar unter 1 %. Laut Lückge und Weber (1997), deren Untersuchung ebenfalls auf Basis einer Stichprobenerhebung durchgeführt wurde, wurden im

Jahr 1995 jedoch aufgrund der zu diesem Zeitpunkt bereits auf 5.000 fm angehobenen Erfassungsschwelle ca. zwei Drittel der Sägewerke in Deutschland mit einem Anteil von 14 % an der gesamten Schnittholzproduktionskapazität nicht erfasst. Mantau *et al.* (2001) vermuten sogar, dass das von Lückge und Weber für das Jahr 1995 ermittelte Einschnittvolumen um den Faktor 1,44 größer ist als das statistisch erfasste:

„Lückge/Weber stellten im Jahr 1995 für die Sägeindustrie einen Einschnitt von Rundholz von 29,4 Mio. fm (o.R.) fest, während die Statistik eine Rundholzverwendung in Sägewerken von 20,7 Mio. fm (o.R.) auswies.“ (Mantau *et al.* 2001, S. 20)

Zwar kann man, wie zuvor beschrieben (s. Kap. 5.1.2.1), nicht vom rechnerischen Stammholzverbrauch auf die für den Einschnitt zur Verfügung stehende Menge an Sägeholz schließen, doch deutet Abbildung 5-6 für das Jahr 1995 – zumindest theoretisch – auf eine ausgeglichene Massenbilanz zwischen dem eingeschlagenem Stammholz und seinem Verbrauch als Rohstoff für die daraus gefertigten Halbwaren hin. Die Daten des Statistischen Bundesamtes weisen für das Jahr 1995 einen Einschlag von 39,3 Mio. fm Rohholz aus, wovon 24,3 Mio. fm auf Stammholz und der Rest auf Industrieholz entfallen (vgl. Abbildung 5-4, S. 131). Im gleichen Jahr wurden 1,7 Mio. fm Rohholz importiert und 4,9 Mio. fm exportiert. Da aus den Außenhandelsdaten nicht ersichtlich ist, ob es sich dabei um Rohholz handelt, welches zum Einschnitt in Sägewerken bestimmt ist, da erst ab dem Jahr 2002 zwischen Sägerundholz und anderem Rohholz in der Statistik unterschieden wird, beläuft sich die zur Verfügung stehende Sägeholzmenge für das Jahr 1995 also theoretisch auf eine Menge zwischen 19,4 und 26,0 Mio. fm<sup>8</sup>. Die Höhe der vom Statistischen Bundesamt ausgewiesenen Schnittholzproduktion wird von Mantau *et al.* für das Jahr 1995 mit 12,4 Mm<sup>3</sup> angegeben. Summiert man alle Meldenummern, die in der Längsrichtung gesägtes oder gesäumtes, gemessertes oder geschältes Holz mit einer Dicke über 6 mm enthalten<sup>9</sup>, weist das Statistische Bundesamt für das Jahr 1995 jedoch eine Gesamtproduktion in Höhe von knapp 14,5 Mm<sup>3</sup> aus (davon 13,2 Mm<sup>2</sup> zum Absatz bestimmt). Darüber hinaus macht die Statistik Angaben über die Herstellung von 336 Mio. lfm Holzleisten. Diese sind aber aufgrund der Definition der FAO, welche profiliertes Holz ausschließt, und aufgrund der fehlenden Information über ihre Dimension für die Umrechnung in Volumen nicht in diesem Wert enthalten.

Unterstellt man nun, ebenso wie Mantau *et al.* (2001) bzw. Lückge und Weber (1997), eine Ausbeute von 61 % beim Einschnitt, errechnet sich ein im Jahr 1995 statistisch erfasstes Einschnittvolumen in Höhe von mindestens 23,9 Mio. fm. Wie in Tabelle 5-7 dargestellt, ergibt dies zusammen mit den nach Lückge und Weber nicht erfassten Mengen einen Rundholzeinschnitt von insgesamt 29,0 Mio. fm. Der von den Autoren ursprünglich genannte Wert kann

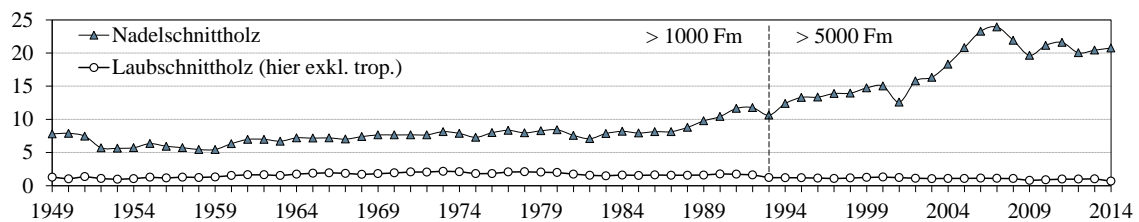
<sup>8</sup> In Abhängigkeit vom Stammholzanteil an den gehandelten Rohholzmengen (s. Fußnote 7, S. 134) und ohne Berücksichtigung von gelagertem Stammholz

demnach ebenso wie der ermittelte Anteil des nicht erfassten Einschnitts in Höhe von 14 % als realistisch eingeschätzt werden. Den Untersuchungen von Mantau *et al.* (2001) und Mantau und Sörgel (2004) für die Jahre 2000 und 2003 zufolge reduzierten sich die nicht erfassten und für den Einschnitt bestimmten Rohholzmengen in den nachfolgenden Jahren wieder (Tabelle 5-7).

**TABELLE 5-7:** Aufgrund der Erfassungsschwelle in Deutschland statistisch nicht erfasste Einschnittmengen (aus 1) Lückge und Weber 1997, 2) Mantau *et al.* 2001 und 3) Mantau und Sörgel 2004, nach unterschiedlichen Erhebungsverfahren abgeschätzt)

Jahreseinschnitt	1995 <sup>1)</sup>	2000 <sup>2)</sup>	2003 <sup>3)</sup>
bis 999 fm	683.000	381.401	444.654
1000 bis 4.999 fm	4.354.000	2.575.322	2.186.280

Zwar sind diese Werte für die Schnittholzproduktion der Betriebe unter 5.000 fm Einschnitt aufgrund der unterschiedlichen Erhebungsverfahren (Stichproben- und Vollerhebung) nur bedingt miteinander vergleichbar. Sie können auch nicht mit den vom Statistischen Bundesamt gemeldeten Produktionsmengen verrechnet werden, da beispielsweise Mantau *et al.* (2001) für das Jahr 2000 eine gesamte Schnittholzproduktion in Höhe von 20 Mm<sup>3</sup> angeben (davon 18,3 Mm<sup>3</sup> von Sägewerken mit > 5.000 fm Einschnitt), während das Statistische Bundesamt eine Produktionsmenge in Höhe von 16,4 Mm<sup>3</sup> Schnittholz<sup>9</sup> ausweist. Doch bestätigen die Ergebnisse den in Abbildung 5-9 dargestellten Trend eines kontinuierlichen Ausbaus der Einschnittkapazität der Betriebe. Zusammenfassend lässt sich folgern, dass sich der Anteil der nicht erfassten Schnittholzproduktion aufgrund der Umstellung der Erfassungsschwelle mit dem Berichtsjahr 1993 zwar vergrößert, in den darauffolgenden Jahren aufgrund des andauernden Strukturwandels aber wieder verringert hat.



**ABBILDUNG 5-10:** Schnittholzproduktion in Deutschland nach den Daten des Statistischen Bundesamtes [in Mm<sup>3</sup>] (Statistisches Bundesamt 2015d)

Für die Abschätzung der Kohlenstoffflüsse in und aus dem Speicher, wie sie im Kapitel 2.2.3 beschrieben wird, bedeutet die festgestellte Nichterfassung eines Teils des produzierten Schnitt-

<sup>9</sup> Enthält die Meldenummern 2010 10 310, 2010 10 330, 2010 10 350, 2010 10 370 und 2010 10 390 für Nadelholz sowie die Meldenummern 2010 10 530, 2010 10 550, 2010 10 570 und 2010 10 590 für Laubholz

holzes eine Unterschätzung der in der Vergangenheit in den Speicher eingegangenen Kohlenstoffmengen. Inwieweit aber der in Abbildung 5-10 dargestellte Anstieg der Schnittholzproduktion in Deutschland auf eine zunehmende Erfassungsquote des Einschnitts aufgrund einer kontinuierlichen Vergrößerung der durchschnittlichen Einschnittkapazität der Sägewerke zurückzuführen ist, bleibt unklar. Die Anwendung einer exponentiellen Trendschätzung zur Abschätzung der nicht erfassten Schnittholzproduktion, wie sie von Dieter *et al.* (2004, S. 54) im Rahmen der Forstwirtschaftlichen Gesamtrechnung für den Zeitraum 1991 bis 2002 beschrieben wird, ist für den gesamten Zeitraum seit 1949 jedoch nicht zielführend. Die Datenlage auf Basis der oben diskutierten Informationen kann hierfür als nicht ausreichend erachtet werden und würde im Gegenteil die Unsicherheiten deutlich erhöhen. Abgesehen von den durch die Änderungen bzw. die Existenz der Erfassungsschwelle bestehende Unterschätzung der produzierten Mengen an Schnittholz wird die Qualität der in Deutschland durch das Statistische Bundesamt erfassten Daten jedoch als „präzise und zuverlässig“ eingeordnet (Statistisches Bundesamt 2010a, S. 5).

### Internationale Statistiken

Die FAO stellt Zeitreihen zu Produktion und Außenhandel von Holzprodukten ab dem Jahr 1961 für fast alle Länder der Erde in einer im Internet frei zugänglichen Datenbank FAOSTAT zur Verfügung (FAO 2015). Die detaillierte Auflistung der international gültigen FAO Klassifikation kann auf der entsprechenden Internetseite der FAO eingesehen werden<sup>10</sup>. Für die Staaten Europas und Nordamerikas sowie für Russland führt die Erhebung dieser Daten die *United Nations Economic Commission for Europe* (UNECE) mit Hilfe standardisierter Fragebögen bei den zuständigen nationalen Koordinationsstellen durch. Diese Zeitreihen stellt die UNECE zudem in einer eigenen TIMBER DATABASE zur Verfügung (UNECE 2011). Die Zeitreihen seit dem Jahr 1964 stammen zumeist von den nationalen Statistikbehörden und werden von den zuständigen Ministerien und Industrieverbänden überprüft, bevor sie gemeldet werden. Seit 1998 werden die Holzeinschlagsdaten ebenso wie die Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwerten in Zusammenarbeit mit der Europäischen Statistikbehörde EUROSTAT und der *International Tropical Timber Organization* (ITTO) mit Hilfe eines gemeinsamen Fragebogens, dem sogenannten *Joint Forest Sector Questionnaire* (JFSQ), mit dem Ziel erhoben, die Konsistenz zwischen den Datenbanken sicherzustellen sowie den Anforderungen einer harmonisierten Güterklassifikation zu entsprechen (*Harmonized System* (HS96) und *Standard International Trade Classification* (SITC)).

Basierend auf den Daten der *Commodity Trade Statistics Unit of the United Nations Statistical Division* (UNSTAT-COMTRADE), die für den Forst- und Holzsektor Europas, Nordamerikas und Russlands von der UNECE in Genf erhoben werden, stellen Mitchie und Wardle (2002) ebenfalls eine Datenbank mit Außenhandelsdaten des Sektors zur Verfügung, die sie nochmals auf Richtigkeit und Konsistenz überprüft haben und in der Datensätze gegebenenfalls korrigiert sind. Zusammenfassend werten sie ihre Bemühungen wie folgt:

<sup>10</sup> <http://faostat.fao.org/site/630/default.aspx>

“In general we conclude that the UNSTAT COMTRADE database provides a data source that permits the construction of a credible and comprehensive database of forest product trade flows.” (Michie und Wardle 1998, S. 20)

Zur Qualität der von der FAO zusammengestellten nationalen Daten aus den Statistiken zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren zitieren Brown *et al.* im Jahr 1998 Bruce Mitchi<sup>11</sup>, wonach die Datenqualität der Datenbank für OECD Länder zwischen +/- 10 bis 15 % und für nicht-OECD Länder bis zu +/- 50 % schwankt (Brown *et al.* 1998, S. 14). Von diesem Zitat wird in der Folge auch von weiteren Autoren Gebrauch gemacht (Pingoud *et al.* 2003, S. 50; Marland *et al.* 2010, S. 75). Dennoch stellen die historischen Daten zu Produktion und Außenhandel die einzigen global verfügbaren Aktivitätsdaten dar, die für die Erstellung der nationalen Treibhausgasinventare verwendet werden können (vgl. Pingoud und Wagner 2006).

Im Zuge der Erfassung der nationalen Daten aus der UNECE-Region werden die Datensätze zur Sicherstellung der Datenqualität jedoch einem teilweise sehr langwierigen Validierungsprozess unterworfen (McCusker 2008). Die Unsicherheiten der Daten werden daher von Nabuurs und Sikkema (2001, S. 388) als „wahrscheinlich sehr klein“ und ihre Qualität, mit Ausnahme der Energieholzdaten, als „vertrauenswürdig“ bewertet. Neuere Schätzungen zur Datenqualität der über das JFSQ erhobenen Informationen in den internationalen Statistiken gehen ebenfalls von einer höheren Qualität aus. So werden die geschätzten Unsicherheiten der gemeldeten Werte in den neuen IPCC Guidelines zu Holzprodukten zwischen -25% bis +5% angegeben (Rüter *et al.* 2014, S. 2.122). Dies bedeutet, dass die gemeldeten Mengen die tatsächlichen Produktions- und Außenhandelsmengen tendenziell eher unterschätzen (vgl. Tabelle 5-7). Im Sinne der guten fachlichen Praxis werden mit einer Verwendung dieser Daten etwaige Speichereffekte daher nicht überschätzt, sondern bedeuten eine konservative Herangehensweise.

#### Bewertung der Abschätzung des Kohlenstoffzuflusses über Daten zu Holzhalbwaren

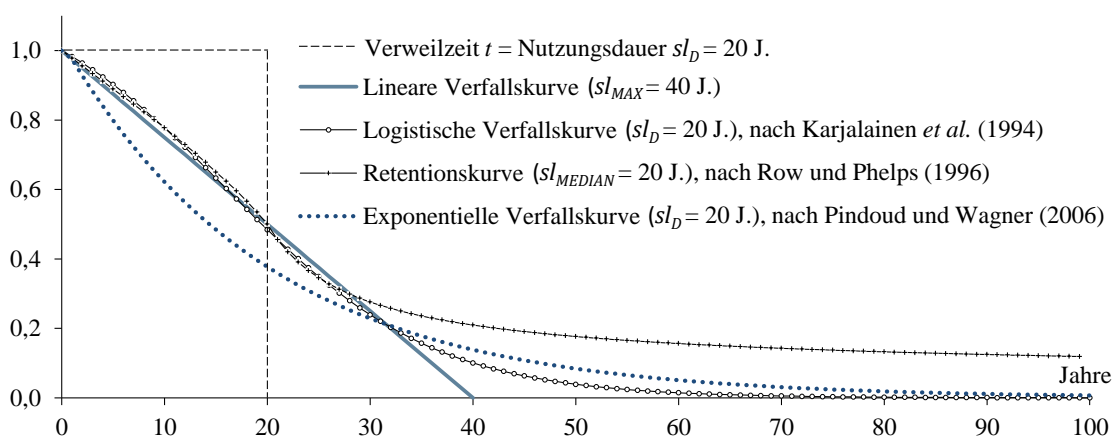
- ⊕ Daten zu Produktion und Außenhandel von Halbwaren aus Holz liegen jährlich in Form sehr detaillierter Zeitreihen vor
- ⊕ Datensätze sind international vergleichbar und über öffentliche Datenbanken zugänglich
- ⊖ Schwankungen in den erfassten Produktmengen aufgrund von Änderungen der statistischen Erfassungsschwelle und eines Strukturwandels der Sägeindustrie in Deutschland
- ⊖ Belastbare Berechnungen für Fertigwaren auf Basis von Statistikdaten kaum möglich (Maßeinheiten, keine Erfassung aufgrund handwerklich geprägter Struktur des Sektors)

<sup>11</sup> Bruce Mitchi war zu diesem Zeitpunkt Mitarbeiter des Europäischen Forstinstitutes (EFI) in Joensuu



### 5.1.2.3 Kohlenstoffabfluss über Zerfallsfunktionen und Nutzungsdauern

Aus der Beschreibung der unterschiedlichen Berechnungswege zur Ermittlung des Kohlenstoffabflusses aus dem Speicher in Kapitel 2.2.3 wird ersichtlich, welche große Bedeutung der unterstellten Dauer der Bindung des Kohlenstoffs in den Holzwaren zukommt. Je nach Art und Zusammensetzung der Holzprodukte, die als Zufluss in den Speicher definiert worden sind, wird der in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmenge eine bestimmte Verweildauer im Speicher unterstellt. Und die mit diesen Produkten verbundenen Nutzungsmuster wirken sich auf den Verbleib der Produktmengen im Speicher über die Zeit aus. Es ist daher entscheidend, auf welcher Ebene der Verarbeitungskette der Zufluss in den Speicher mit welcher Zerfallsfunktion kombiniert wird, d. h. ob und inwieweit für die Berechnung der in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmengen Daten für Holzhalbwaren oder Fertigwaren Anwendung finden.



**ABBILDUNG 5-11:** Kurvenverlauf verschiedener Zerfallsfunktionen zur Ermittlung der jährlichen Kohlenstoffabgänge aus dem Produktspeicher

Im Prinzip werden die Gebrauchs- und damit die Kohlenstoffspeicherdauer der Produkte sehr unterschiedlich ausfallen. So kann man davon ausgehen, dass die durchschnittliche Bindungsdauer von Kohlenstoff in Papierprodukten mit hoher Wahrscheinlichkeit im Schnitt sehr viel kürzer ist als in der Halbfertigware Schnittholz. Die Auswahl einer geeigneten Zerfallsfunktion wird daher vom Detaillierungsgrad einer Modellierung ebenso wie von der Genauigkeit und Qualität der Aktivitätsdaten, die den Kohlenstoffzufluss beschreiben, abhängig sein. Abbildung 5-11 bietet eine Übersicht über die in der Literatur beschriebenen und in Kapitel 2.2.3 vorgestellten Zerfallskurven.

Sofern die jedes Jahr mit der stofflichen Nutzung in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmenge nur durch eine oder wenige Größen definiert ist, wird eine Kohortenrechnung (Kap. 2.2.3.1) den Kohlenstoffabfluss aus dem Speicher nur sehr grob abbilden können. Anders als bei tatsächlichen Zerfallskurven unterstellt eine Kohortenrechnung den Verbleib der in den Speicher eingegangenen Kohlenstoffmenge über die gesamte Speicher- bzw. Nutzungsdauer. Für die



Betrachtung eines einzelnen Produktes ist diese Unterstellung im Prinzip richtig. Allerdings dürften die zu erwartenden Ergebnisse einer Anwendung dieser Methode auf den gesamten Produktspeicher mit der Realität sehr wenig zu tun haben (vgl. Abbildung 2-9). Schließlich setzt sich der Kohlenstoffzufluss aus einer Vielzahl an einzelnen Produkten aus Holz zusammen, die wiederum völlig verschiedene „Zerfallszeitpunkte“ erwarten lassen. Die Herausforderung an eine Modellierung, die diesem Umstand gerecht wird, taucht auch bei anderen vorgeschlagenen Ansätzen immer wieder auf und wird im Folgenden diskutiert.

Die bestehenden Modelle, die ein lineares Zerfallsmuster unterstellen, verwenden Datensätze zum Holzeinschlag oder zu Holzhalbwaren als Kohlenstoffzufluss (vgl. Kap. 2.2.3.2). Dies bedeutet u. a., dass die entlang der Verarbeitungskette entstehende Verschnittmenge im Jahr der Herstellung eines Fertigproduktes als genauso hoch angesehen wird wie die aus dem Speicher abfließende Holzmenge z. B. am Ende der maximalen Nutzungsdauer des jeweiligen Produktes. Die Verwendung eines linearen Zerfallsmusters ist also eine sehr vereinfachende Annahme.

Anders als ein lineares Zerfallsmuster bilden Retentionskurven die zeitliche Dynamik des Zerfalls bzw. Kohlenstoffabflusses besser ab. Nach einem festen Verteilungsschlüssel gliedern Thompson und Matthews (1989a) den Kohlenstoff des eingeschlagenen Rohholzes auf neun Produktgruppen auf. Der Verlauf der in Abbildung 2-11 auf Seite 53 dargestellten Kurven sieht auf den ersten Blick plausibel aus. Allerdings wirken die Auswahl der Produktgruppen (u. a. Zellstoff, Mitteldichte Faserplatten, Zäune und Bergbau) und die Untergliederung des Speichers in Halbwarengruppen und Verwendungsbereiche willkürlich. Ebenso wie bei Apps *et al.* (1999) und Hennigar *et al.* (2008) werden die zugrundeliegenden Gleichungen der Retentionskurven in der zitierten Literatur nicht beschrieben.

Row und Phelps (1996) hingegen teilen das eingeschlagene Holz erst auf Halbwarengruppen und anschließend mittels fester Allokationsparameter entlang typischer Nutzungsmuster für die Halbwaren und unter Annahme von Abfallfaktoren auf elf bzw. zwölf Verwendungsbereiche auf (Abbildung 2-4, Tabellen 2-2 und 2-10). Die errechneten Holzmengen repräsentieren demnach Fertigwaren. Das gleiche Vorgehen wählen Skog und Nicholson (1998), deren Modell HARVCARB auf dem WOODCARB Modell von Row und Phelps aufbaut. Nach der Verrechnung mit den Außenhandelsdaten werden dem heimisch verwendeten Holz je nach Verwendungsbereich typische durchschnittliche Nutzungsdauern bzw. Halbwertszeiten zugeordnet. Diese dienen als Schlüsselparameter in den von Row und Phelps beschriebenen Gleichungen zur Ermittlung der dreiteiligen Zerfalls- bzw. Retentionskurven. Leider ist die auf Seite 55 wiedergegebene Gleichung 4 in der Modellbeschreibung der originalen Veröffentlichung jedoch fehlerhaft abgebildet, so dass das beschriebene Vorgehen zur Berechnung der Zerfallskurven mit Hilfe der von den Autoren angegebenen Halbwertszeiten nicht überprüft werden kann (vgl. Row und Phelps 1996, S. 37). Anders als bei dem S-förmigen Verlauf der zusammengesetzten Zerfallskurven nutzen die Autoren für Ein- und Mehrfamilienhäuser, die seit 1950 errichtet wurden, eine logistische Zerfallskurve, die auf Seite 57 beschrieben wird. Im Zusammenspiel

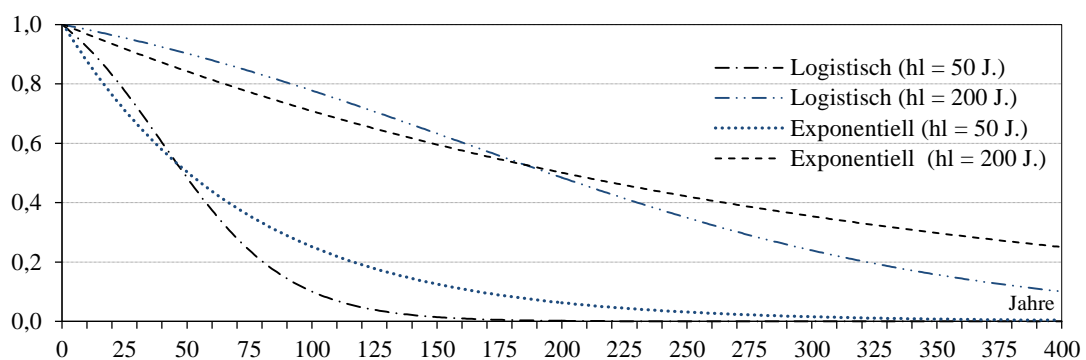
mit den unterstellten Medianen der Nutzungsdauer von 150 bzw. 200 Jahren ergibt dies einen konkaven Kurvenverlauf (vgl. Abbildung 2-13, S. 56).

Die Zerfallskurve für Bauholz bei Thompson und Matthews ist ebenfalls konkav und unterstellt somit, dass der größere Anteil des enthaltenen Kohlenstoffs tendenziell eher gegen Ende der durchschnittlichen Nutzungsdauer wieder aus dem Speicher entweicht. Row und Phelps (1996, S. 38) schreiben bezugnehmend auf ihre Modellierung der Kohlenstoffspeicherung in Gebäuden seit 1950: „die Ergänzung [der Retentionskurven, Anm. d. Verf.] um eine logistische Zerfallskurve scheint ein besserer Weg, den Anteil des noch im Speicher verbliebenen Kohlenstoffs wiederzugeben“. Eine Begründung hierfür liefern die Autoren jedoch nicht. Die auch von Karjalainen *et al.* (1994) und Eggers (2002) verwendete erweiterte logistische Funktionsgleichung 6 kann aufgrund der Parameter sehr flexibel an das vermutete Zerfallsmuster angepasst werden. Dennoch entschieden sich Nabuurs *et al.* (2002), deren Modell CO2FIX V2.0 auf dem Modell von Karjalainen *et al.* basiert (vgl. S. 45), die logistische Funktion in ihrer 2002 erschienenen Studie gegen eine exponentielle Zerfallskurve auszutauschen.

Auch Pingoud verwendet im darauffolgenden Jahr in seinem Modell EXPHWP eine exponentielle Zerfallsfunktion, die er in den Folgejahren weiterentwickelt (s. S. 61 ff.). Diese 2006 vorgestellte und rekursiv anzuwendende Funktionsgleichung von Pingoud und Wagner trägt mit ihren realistischeren Annahmen der unbekanntenen Dynamik sich ändernder Kohlenstoffspeicher sowie der Unsicherheit über die ihrer Änderung zugrunde liegenden Prozesse Rechnung. Somit entspricht die Anwendung dieser Methode nach Meinung der Autoren auch der Forderung des IPCC, allgemein verfügbare Daten für eine Abschätzung der Emissionen im Sinne der guten fachlichen Praxis optimal zu verwenden, so dass etwaige Senkeneffekte weder über- noch Emissionen unterschätzt werden.

Physikalische und biologische Zerfallsprozesse folgen oft einem exponentiellen Zerfallsmuster. Wird solch ein Muster auf den Abgang von Kohlenstoff aus dem Speicher am Ende des Produktlebenszyklus angewendet, unterstellt man damit einen höheren Verlust an Kohlenstoff aus dem Speicher vor dem Erreichen der Halbwertszeit, als beispielsweise bei Anwendung der logistischen Funktionsgleichung 6 (vgl. auch Abbildung 2-14). Tatsächlich stellen alle im Kapitel 2.2.3 diskutierten Funktionsgleichungen mit ihren in Abbildung 5-11 dargestellten Zerfallsmustern, ebenso wie alle Modelle, nur eine idealisierte Annäherung an den tatsächlichen Verlust an Kohlenstoff aus dem Speicher dar. Gerade in der Kombination mit Datensätzen zu dem in Halbwaren aus Holz gespeicherten Kohlenstoff scheint das konvexe Kurvenverlaufsmuster eines exponentiellen Zerfalls der Realität jedoch am nächsten zu kommen. Im Gegensatz zu den anderen vorgestellten Zerfallskurven ergibt sich zudem mit der Anwendung des in Gleichung 11 beschriebenen exponentiellen Zerfallsmusters ein einfacher Zusammenhang zwischen der unterstellten Nutzungsdauer bzw. der Halbwertszeit der jährlich in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmenge und ihrem Zerfall.

In den vorgestellten Modellen und Ansätzen, die Kohlenstoffspeicherung in Produkten zu erfassen, zeigen sich – unabhängig von den gewählten Zerfallsfunktionen – besonders für das in Gebäuden verwendete Holz z. T. deutliche Unterschiede in den von den Autoren unterstellten Nutzungsdauern (vgl. Kap. 2.2.3, UNFCCC 2003a). Während manche Autoren für den Baubereich pauschal eine Halbwertszeit von 20 Jahren unterstellen, reichen die Angaben in anderen Quellen von durchschnittlich 50 Jahren Halbwertszeit bis zu einem Median der Lebensdauer von 200 Jahren. Für den letzteren Wert bedeutet dies, dass unter Anwendung der logistischen Funktionsgleichung 6 auch nach 400 Jahren noch 10 % des Kohlenstoffs im Gebäudespeicher verbleiben (Abbildung 5-12).



**ABBILDUNG 5-12:** Vergleich des Kurvenverlaufs der logistischen und exponentiellen Funktionsgleichungen 6 und 11 (s. S. 57 und 64) unter Anwendung der Halbwertszeiten 50 und 200 Jahre für die Holzverwendung in Gebäuden

Holz in Gebäuden wird für die verschiedensten Verwendungen eingesetzt: die Dachkonstruktion besteht in den meisten Bauwerken zumeist aus Holz. Auch in Häusern aus konventionellen Baumaterialien sind Fenster und Türen oft aus dem nachwachsenden Rohstoff hergestellt. Auch Treppen, Bodenbeläge und Wand- und Deckenverkleidungen sind in vielen Fällen aus Holz gefertigt. In Holzgebäuden entfällt zudem eine große Holzmenge auf die Wand- und Deckenaufbauten (vgl. u. a. Pohlmann 2002, S. 150 ff.). Ebenso wie in Deutschland wird Row und Phelps (1996) zufolge beispielsweise ein Großteil des Schnittholzes in den Vereinigten Staaten im Gebäudebereich für dauerhafte Konstruktionen eingesetzt. Daraus könnte man also schließen, dass die dem Gebäudebereich zugeordnete Zerfallskurve konkav sein müsste (vgl. Abbildungen 2–11 und 2–13).

Die Frage, inwieweit sich eine unterstellte Nutzungsdauer eines Produktes auf ein Gebäude, oder seine Einzelteile bezieht, erinnert an ein in der Philosophie unter dem Namen „Schiff des Theseus“ diskutiertes Paradoxon, welches der Frage nachgeht, inwieweit es sich bei einem Gegenstand noch um ein Original handelt, wenn alle seine Bestandteile im Laufe der Zeit ausgetauscht werden.

„Theseus besitzt ein etwas älteres, aber seetaugliches Schiff. Er beschließt eines Tages, es in die Werft zu bringen und dort erneuern zu lassen. Er bittet den Werfteigner, die 1000 Planken gegen neue auszutau-

schen. Der Eigner der Werft besitzt mehrere Docks und findet es schade, die alten Planken von Theseus' Schiff einfach wegzuerwerfen, also beschließt er, in Dock A das Schiff des Theseus nach und nach auseinander bauen und ersetzen zu lassen und die Planken in Dock B zu bringen, wo sie in der ursprünglichen Reihenfolge und an ihrer ursprünglichen Position wieder zu einem Schiff zusammen gesetzt werden. Was gelingt.“ (Essler 1995)

Es ist zu vermuten, dass sich die Nutzungsdauerangaben für den Baubereich in manchen der vorgestellten Modelle oftmals auf die Gebäude beziehen – also die äußere Form und nicht auf das diese Form ausmachende Material –, die Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen. So wird die Verwendungsdauer beispielsweise von Außen- und Innenwandverkleidungen, Fenstern, Türen oder Bodenbelägen aus Schnittholz oder Holzwerkstoffen kürzer ausfallen als diejenige von tragenden Teilen, wie z. B. Dachbalken und Außenwandkonstruktionen bei Holzhäusern. Unterstellt man einen gleichbleibenden Anteil von Bauprodukten aus Holz an den verschiedenen Bauteilen im bestehenden Gebäudebestand, d. h. jedes Bauteil aus Holz wird bei Bedarf im Zuge der Instandhaltungszyklen eines Gebäudes ersetzt, bedeutet dies, dass der Anteil kurzlebiger Produkte am jährlichen Gesamtverbrauch von Holz im Baubereich größer ist als derjenige von Holzprodukten mit einer sehr langlebigen Verwendungsdauer.

Zur Verdeutlichung dieser Überlegung kann man den verschiedenen Bauteilen eines fiktiven Holzgebäudes geschätzte Lebensdauern (von 10 bis 150 Jahren) zuordnen. Beispielsweise sind 65 % des eingesetzten Holzes in Bauteilen mit einer Dauerhaftigkeit von über 50 Jahren verbaut, wovon 60 % sogar die kompletten 150 Jahre der angenommenen Gebäudelebensdauer im Originalzustand erhalten bleiben (Dachbalken und Teile der tragenden Konstruktion). Nur 30 % der Bauteile aus Holz in diesem Beispiel lassen eine Dauerhaftigkeit von weniger als 50 Jahren erwarten (z. B. Wandverkleidungen, Dachsparren oder Laminat). Witterungseinwirkung, Abnutzung und Alterung rufen bauliche Mängel an Gebäuden hervor, die im Zuge von Instandhaltungsmaßnahmen (d. h. Erneuerungen und Reparaturen) beseitigt werden müssen. Die alten Bauteile werden also durch neue ersetzt, um die jeweiligen Funktionen im Gebäude aufrechtzuerhalten. Addiert man nun das über die gesamte Nutzungsdauer des Gebäudes benötigte Holz auf, erhält man den Holzverbrauch für die entsprechenden Bauteile über die gesamte Gebäudenutzungsdauer. Im Ergebnis wird deutlich, dass sich der Anteil der langlebigeren Produkte am rechnerischen Holzverbrauch über den gesamten Zeitraum auf unter 25 % verringert, während sich der Anteil des Holzes in Bauteilen mit kürzeren Instandhaltungszyklen auf knapp 70 % erhöht.

Dieses Beispiel verdeutlicht, wie Holzprodukte mit einer kurzen Nutzungsdauer und einem geringen Mengenanteil am Gebäudebestand aufgrund der kurzen zeitlichen Abstände zwischen ihrer Erneuerung zu einem hohen Holzverbrauch bzw. Materialdurchsatz beitragen. Diese Vermutung wird auch von Daten untermauert, wonach ca. 56 % des Verbrauchs an Schnittholz im Bausektor für Instandhaltungsmaßnahmen am Gebäudebestand verwendet werden (Mantau 2005, S. 5). Zudem deutet das Ergebnis dieses Beispiels darauf hin, dass der Verlauf einer Zerfallskurve, so sie für den gesamten Gebäudesektor verwendet wird, entgegen der ersten Annah-

me und anders als z. B. bei Thompson und Mathews (1989a) unterstellt, eher einen konvexen Verlauf aufweisen könnte. Row und Phelps (1996) teilen zwar einen Teil des in den Speicher eingehenden Kohlenstoffs einer Produktgruppe zu, die für Instandhaltung und Reparatur eingesetzt wird. Doch ist deren Verweildauer, ebenso wie bei den anderen Verwendungsgruppen, abhängig von der Funktion des zu ersetzenden Bauteils bzw. Holzproduktes und sollte sich daher von den übrigen Verwendungsbereichen eigentlich nicht unterscheiden (vgl. Modellbeschreibung S. 40 und Tabelle 2-10).

**TABELLE 5-8:** Durchschnittliche Nutzungsdauer von Fertigwaren und Holz im Bausektor (Frühwald *et al.* 2001, S. 8)

Produkt	Jahre
Tageszeitung	0,2
Illustrierte	0,5
Bücher	25
Holzverpackung, Paletten	2
Möbel im unteren/mittleren Preissegment	10
in höheren Preissegmenten	30
Holz im Garten und Landschaftsbau	15
Holz im Innenausbau	30
Holz im konstruktiven Bau	75
Durchschnitt für alle Holz- und Papierprodukte (Verbrauchsmengen berücksichtigt)	33

Für Deutschland unterscheiden Burschel *et al.* (1993a) bei ihrer Ermittlung des Beitrags von Holzprodukten zum Kohlenstoffhaushalt des Forst- und Holzsektors die drei Verwendungsbereiche 1) *Bauwesen* 2) *Möbel und Holzwaren* und 3) *Papier, Verpackungen und Brennholz*, welchen eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 65, 15 und 1 Jahren zugeordnet wird. Die Werte wurden dabei in Form eines passend erscheinenden Durchschnittswertes aus der Literatur übernommen. Für Deutschland und weitere europäische Länder ermitteln Kohlmaier *et al.* (2007) die Lebensdauer für Massivholzprodukte, indem er von Eggers (2002) für 1) *Gebäude* 2) *Möbel* und 3) *Verschalungen und Parkett* angegebene Lebenszeiten mittels der in Scharai-Rad und Welling (1999) für Schnittholz und Holzwerkstoffe angegebenen Verteilung des Verbrauchs in diesen Bereichen kalibriert. Allerdings kann der von den Autoren angegebene Wert von 35 Jahren für Massivholzprodukte nicht rekonstruiert werden. Frühwald *et al.* (2001) beziffern die durchschnittliche Nutzungsdauer für alle Holz- und Papierprodukte auf 33 Jahre, die sich aus dem mengengewichteten Angaben für die einzelnen Verwendungsbereiche ergibt (Tabelle 5-8).

Doch nicht in allen Modellen werden die in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmengen eindeutig bestimmten Verwendungsbereichen zugeordnet. Karjalainen *et al.* (1994), Schlamadinger und Marland (1996), Nabuurs *et al.* (2002) und Eggers (2002) verteilen die Holz mengen auf

kurz- und langfristige Speicher, welchen zwar bestimmte Verwendungen unterstellt sind, deren zugrundeliegende Verwendungsmuster aber nicht immer nachvollziehbar sind. Auch Winjum *et al.* (1998), die erstmalig aus der Statistik entnommenen Werte für Holzhalbwaren nutzen, klassifizieren den Kohlenstoff in Kurz- und Langzeitspeicher. Pingoud *et al.* (2001) passen die von Karjalainen *et al.* vorgeschlagenen Nutzungsdauern mit Hilfe von detaillierten Informationen aus Inventaren zur Holzverwendung in Gebäudebestand in Finnland für die logistische Zerfallsfunktion an (s. S. 58). Pingoud (2002) weist in seinem Modell EXPHWP schließlich den Gruppen von Holzhalbwaren direkt bestimmte Oxidationsraten bzw. Halbwertszeiten zu, was in der Folge auch vom IPCC als Defaultmethode vorgeschlagen wird (vgl. Kap. 4.2). Pingoud *et al.* (2003) begründen ihre Vorgehensweise, die Kohlenstoffmengen in Holz- und Papierhalbwaren nicht wie in anderen Modellen auf finale Verwendungsbereiche aufzuteilen, u. a. wie folgt:

„Increased complexity does not necessarily make such models more reliable or their parameter estimation easier. The main problem is the lack of reliable data.“ (Pingoud *et al.* 2003, S. 49)

Für die Verwendung der auf Pingoud und Wagner (2006) zurückgehenden Funktionsgleichung 11 (S. 64) wird für alle Vollholzprodukte (Schnittholz und Holzwerkstoffe) eine Default-Halbwertszeit von 30 Jahren vorgeschlagen, was einer angenommenen durchschnittlichen Nutzungsdauer von ca. 43 Jahren und einer Zerfallsrate von  $k = 0,0231$  entspricht (Pingoud *et al.* 2006b, S. 12.17). Wie in Tabelle 2-16 auf Seite 63 beschrieben, stellt die Verweildauer bzw. die Produktlebensdauer den Kehrwert der Zerfallskonstante dar. Allerdings hatte Pingoud der gleichen Produktgruppe ursprünglich eine Zerfallsrate von  $k = 0,0335$  zugeordnet, was bei einem exponentiellen Zerfall der Produktlebensdauer von 30 Jahren und einer Halbwertszeit von ca. 21 Jahren entspricht.

Laut Pingoud und Wagner (2006, S. 963) stellt die fehlende Unterscheidung zwischen verschiedenen Elementen im Produktespeicher die Schwachstelle der Berechnung des Speichers mit Hilfe der exponentiellen Zerfallsfunktion erster Ordnung dar. Aus diesem Grund kritisieren Marland und Marland (2003) die Annahme einer exponentiellen Zerfallsfunktion grundlegend. Um die große Bandbreite möglicher Nutzungsdauern in verschiedenen Verwendungsbereichen abzubilden, schlagen Pingoud und Wagner daher vor, bei der Berechnung des Kohlenstoffspeichers, anders als in dem von Pingoud entwickelten Modell EXPHWP, die Speicherbestandteile nicht nur in Massivholz- und Papierprodukte zu unterscheiden:

“To obtain a more realistic description of the real process it thus it advisable to use a model with multiple-pools having different half-lives. For instance, solid wood products (sawn wood and wood-based panels) and paper products could be divided into separate pools in the model, or also many more than two separate pools could be used.” (Pingoud und Wagner 2006, S. 972)

Zugleich zeigt die Analyse der Beschreibungen vorhandener Modelle zur Abbildung der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten (vgl. Kap. 2), dass gerade im Englischen die verwendeten Begriffe Lebens- und Nutzungsdauer häufig nicht klar voneinander abgegrenzt sind und teilwei-

se synonym verwendet werden (vgl. Evans und Gier 2007). Auch werden insbesondere bei Bauprodukten für den Zeitraum der Verwendung eines Bauteils zahlreiche verschiedene Begriffe verwendet, auf die hier kurz eingegangen werden soll. In vielen Publikationen, in denen Lebensdauerangaben zu Produkten oder Bauteilen gemacht werden, ist die technische Lebensdauer gemeint. Nach Pfründer (2010, S. 51) bestimmt die **technische** Lebensdauer, wann „eine Instandsetzung bzw. Bestandserhalt technisch nicht mehr sinnvoll ist [...]“. Sie stellt eine Obergrenze für die Haltbarkeit von Bauteilen dar und ist erreicht, wenn eine Anlage oder ein Bauteil die ihm zugedachte Funktion nicht mehr erfüllen kann, eine Instandsetzung technisch nicht mehr möglich ist und die Anlage oder das Bauteil ausgetauscht werden muss. Die Anlage oder das Bauteil ist technisch obsolet. Die **funktionelle** Lebensdauer ist die Zeitspanne, innerhalb der eine Anlage oder ein Bauteil wunsch- und ordnungsgemäß genutzt werden kann [...]. [...] Sie endet beim Erreichen des Zeitpunktes, an dem die vorgegebene Funktion nicht mehr erfüllt werden kann. Die Anlage oder das Bauteil ist funktional obsolet.“ Als natürlicher Rohstoff ist Holz unter Einfluss von Umweltfaktoren einem natürlichen Abbau durch holzerstörende Organismen unterworfen. Verschiedene holzerstörende Organismen können Holz besiedeln und biologisch abbauen (vgl. Brischke 2007). Ob und wie dieser Abbau eintritt ist abhängig von Ort und Art der Nutzung sowie der Holz Auswahl und den verschiedenen Maßnahmen, die zum Schutz des Holzes getroffen werden. Entscheidend für die Verarbeitung von Holz sind daher zunächst seine technischen Eigenschaften, welche bestimmen, in welchem Verwendungsbereich es eingesetzt werden kann. Die Norm EN 335-2 dient in diesem Zusammenhang der „Bestimmung einer zutreffenden Gebrauchsklasse und zur Auswahl eines geeigneten Grades der Dauerhaftigkeit“ des verwendeten Holzes (DIN 2006).

Die technische Lebensdauer von Holz im Innenraum (Holzfeuchte max. 20 %), geschützt vor exogenen Faktoren, ist daher im Prinzip in den meisten Fällen zunächst unbeschränkt (Gebrauchsklasse 1). Die Verwendungsdauer geschützter Holzbauteile der tragenden Konstruktion wird demzufolge in erster Linie an die Nutzungsdauer eines Gebäudes gekoppelt sein. Im Außenbereich hängt die technische Lebensdauer dagegen von endogenen Faktoren und der materialinhärenten Fähigkeit des unbehandelten Holzes ab, von außen einwirkenden Beanspruchungen zu widerstehen (Brischke 2007). So kann man davon ausgehen, dass für die Verwendung z. B. im Außenbereich Holz mit einer höheren natürlichen Dauerhaftigkeit nach EN 350-1 bzw. niedrigen Resistenzklasse nach DIN 68364 eingesetzt wird (DIN 1994b), da äußere Einflüsse wie z. B. die Witterung die technisch mögliche Lebensdauer eines Produktes begrenzen. Nach EN 350-1 (DIN 1994a) wird die Dauerhaftigkeit als Materialeigenschaft verstanden, die als „die dem Holz eigene Widerstandsfähigkeit gegenüber einem Angriff durch holzerstörende Organismen“ definiert ist. Brischke betont, dass im Gegensatz hierzu die Norm ISO 15686-1 Dauerhaftigkeit nicht als Materialeigenschaft versteht, sondern als „die Fähigkeit eines Gebäudes oder seiner Teile, eine geforderte Funktion über eine bestimmte Zeitspanne unter dem Einfluss von während des Gebrauchs zu erwartenden Agenzien zu erfüllen“ (ISO 2011 in Brischke 2007, S. 20). Hier ist die Dauerhaftigkeit also abhängig von den jeweilig wirkenden Umweltein-

flüssen. Durch das Einbringen chemischer Holzschutzmittel oder durch die Anwendung konstruktiver Holzschutzmaßnahmen kann die technische Dauerhaftigkeit in Abhängigkeit von der jeweiligen Einbausituation erhöht werden (vgl. Augusta 2007). Darüber hinaus ist der Zeitpunkt, wann Bauteile aus Holz oder Holzwaren aus der Nutzung genommen werden, vor allem auch von wirtschaftlichen Entwicklungen und modischen Trends abhängig. So ist das Ende der **wirtschaftlichen** Lebensdauer erreicht, wenn die Kosten für die Instandhaltung oder den Unterhalt eines Produktes oder Bauteils die Kosten für dessen Substitution überschreiten. Neben der Instandhaltung von Bauteilen aus Holz aufgrund von Verschleiß, also dem Ende der technischen Lebensdauer, sorgen gerade in dem für die Holzverwendung mengenmäßig wichtigen Bausektor sich ändernde Nutzungsansprüche an Gebäude oder ein Wandel des Geschmacks dafür, dass die theoretisch erreichbare technische Lebensdauer von Bauteilen aus Holz oft nicht voll ausgeschöpft wird.

Speziell für den Gebäudebereich liegen für Deutschland umfassende Informationen mit Lebensdauerangaben von Bauteilen vor (u. a. Arlt und Pfeiffer 2005; Asam *et al.* 2008; Bahr und Lennerts 2010). Ritter (2011) beschreibt ausführlich die verschiedenen Schädigungsmechanismen für verschiedene Bauteilgruppen und benennt Referenzlebensdauern für verschiedene Bauteile. Die Referenzlebensdauer einer Gebäudekomponente (*Reference Service Life*, kurz RSL) dient als Ausgangspunkt des in der Normenreihe DIN ISO 15686 geregelten Verfahrens für die Lebensdauerabschätzung von Bauprodukten bzw. Bauteilen, welches als Faktorenmethode bezeichnet wird, und bezieht sich auf ein Bauteil von durchschnittlicher Qualität unter durchschnittlichen Rahmenbedingungen (ISO 2008).

**TABELLE 5-9:** Einflussfaktoren auf die Lebensdauer nach DIN ISO 15686-4 am Beispiel von Holz (vgl. Brischke 2007, S. 41)

Kategorie	Faktor	Faktorklasse	Beispiele
Qualität	A	Materialqualität	Natürliche Resistenz, Schutzmittelbehandlung
	B	Konstruktionsqualität	Konstruktiver Holzschutz
	C	Ausführungsqualität	Einbau, Personal, Wetter auf Baustelle
Umgebung	D	Inneneinflüsse	Temperatur, relative Luftfeuchte, Kondensation
	E	Außeneinflüsse	Standort, Wetter, Beschattung
Nutzung	F	Nutzungsintensität	Mechanische Einflüsse, Verschleiß
	G	Instandhaltungsqualität	Qualität und Häufigkeit, Zugänglichkeit

Dabei wird unter Berücksichtigung von beispielhaft für Holz in Tabelle 5-9 gelisteten Einflussfaktoren, welche die Referenzlebensdauer verringern können, die spezifische Lebensdauer einer Gebäudekomponente (*Estimated Service Life*, Abk. ESL) nach folgender Gleichung ermittelt:

$$ESL = RSL \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \cdot G \quad (17)$$



Zudem definiert die Norm ISO 15686-1:2011 mit dem Begriff **Obsoleszenz** den Verlust der Fähigkeit eines Elements [d. h. Bauteils, Anm. d. Verf.], aufgrund geänderter Anforderungen diese zufriedenstellend zu erfüllen (ISO 2011, S. 2) und unterscheidet hierbei in funktionale, technische und wirtschaftliche Obsoleszenz. Die technische Obsoleszenz darf jedoch nicht mit der technischen Lebensdauer verwechselt werden. Während beim Ende der technischen Lebensdauer das Bauteil defekt ist, führen bei der technischen Obsoleszenz technische Innovationen in Form von neuartigen Produkten dazu, dass Produkte obsolet werden. Bahr und Lennerts (2010) unterscheiden darüber hinaus in modische, baurechtliche und ökologische Obsoleszenz. Mit der baurechtlichen Obsoleszenz gehen die Autoren z. B. auf Verordnungen ein, die zu einem vorzeitigen Austausch von Produkten führen können. So führten z. B. die Wärmeschutzverordnungen ab dem Jahr 1978 dazu, dass Fenster aufgrund ihrer Verglasung ausgetauscht wurden, obgleich sie noch voll funktionsfähig waren. Insbesondere bei Möbeln und bei Produkten des Innenausbaus spielt die modische bzw. ästhetische Obsoleszenz eine große Rolle. Farbe, Form und Oberfläche von Produkten haben einen großen Einfluss auf die Nutzer und bestimmen, wann ein Produkt den ästhetischen Anforderungen des Nutzers nicht mehr genügt. In der Realität haben also unterschiedliche Konsummuster von Verbrauchern einen Einfluss auf die Verteilung der Häufigkeit von Verwendungsdauern von Fertigwaren, die jeweils einem bestimmten Zweck dienen. Diese können sich im Verlauf der Zeit ändern und somit auch die Nutzungsdauern von Produkten. In Anwendungsbereichen von Holz, in welchen weniger die technischen Eigenschaften, sondern das Erscheinungsbild der Produkte eine Rolle spielt, kann es sogar im Interesse der Industrie liegen, Trends zu generieren, um den Absatz ihrer Produkte zu steigern (vgl. u. a. Cooper 2005).

Aus den genannten Gründen können die für die Modellierung des Kohlenstoffabflusses aus dem Produktspeicher verwendeten Lebens- bzw. Nutzungsdauern daher nur ungefähre Mittelwerte darstellen. Auch die Annahme konstanter Nutzungsdauern in einer Modellierung von Langzeitreihen des Zu- und Abflusses von Kohlenstoff können folglich Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Ergebnisse haben.

An dieser Stelle sei als weiterer Aspekt der Abschätzung des Kohlenstoffabflusses über Zerfallsfunktionen und Nutzungsdauern auch der methodische Umgang mit den aktuell ermittelten Kohlenstoffabgängen im Verhältnis zu den aktuellen Kohlenstoffzuflüssen genannt, welche durch den historischen Kohlenstoffzufluss verursacht werden. Durch eine in den vorgestellten Modellen unklare bzw. unterschiedliche Handhabung der geerbten Emissionen, die entweder gar nicht oder nur für vorhandene Zeitreihen seit 1961 berechnet werden, entstehen weitere mit dieser Methode verbundene Unsicherheiten (vgl. Kapitel 2.2.3.2 und 2.2.3.5). Auch Pingoud *et al.* (2001) bemängeln:

“Some proposed calculation models, intended to be applied, for example, in national C budget reporting, rely on theoretical oxidation factors and estimates of inherited emissions from old decaying products, which are not sufficiently well tested in practice (Winjum *et al.* 1998). As a consequence of uncertainty of

the output flow of the C pool, i.e. decay rate, the estimates of the pool and pool changes are highly uncertain.” (Pingoud *et al.* 2001, S. 92)

Doch auch die von Pingoud (2002) vorgeschlagene Extrapolation der Aktivitätsdaten bis ins Jahr 1900 unter der Annahme von Wachstumsraten des Holzeinschlags führt in Kombination mit der Annahme gleichbleibender Nutzungsdauern vermutlich zu verzerrten Ergebnissen. Zugleich zeigen die Diskussionen um die politischen Rahmenbedingungen einer Anrechnung von Holzprodukten, in deren Verlauf auch Vorschläge mit methodischen Vorgaben zur Berücksichtigung der gererbten Emissionen gemacht wurden (s. Kap. 3.2.2.4 und 3.2.2.5), welche Bedeutung ihrer adäquaten Berücksichtigung bei der Berechnung des Kohlenstoffspeichers zukommt.

Ein großer Vorteil der Modellierung mit Hilfe von Zerfallsraten bzw. Produktlebensdauern ist hingegen die direkte Proportionalität der Kohlenstoffmengen im Zufluss und im Abfluss über die Gesamtlebensdauer. Die mit dieser Methode verbundenen Unsicherheiten über den Zeitpunkt des Abflusses scheinen besser handhabbar zu sein als die Unsicherheiten über die Mengen des aus dem Speicher abgehenden Kohlenstoffs, der bei der im folgenden Kapitel vorgestellten Methode thematisiert wird.

#### Bewertung der Abschätzung des Kohlenstoffabfluss über Zerfallsfunktionen

- ⊕ Der Zufluss verhält sich in der Summe über die gesamte Zeit direkt proportional zum Abfluss von C; die Unsicherheit Speichereffekte zu überschätzen und Emissionen zu unterschätzen, wird daher minimiert
- ⊕ Methode erlaubt eine Berechnung mit Hilfe von jährlich vorliegenden Datensätzen ohne großen Aufwand
- ⊖ Informationen über Nutzungsdauern von Holzprodukten erscheinen in vielen Fällen nicht belastbar bzw. werden in den vorliegenden Modellen nur in sehr grober Form verwendet
- ⊖ Nutzungsdauern sind in der Realität nicht konstant, sondern unterliegen Veränderungen

### 5.1.3 Direkte Abschätzung von Emissionen

Wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben, können die Emissionen aus Holzprodukten im Prinzip zwar direkt ermittelt werden, doch muss diesen der Kohlenstoffzufluss in den Speicher gegenübergestellt werden, um einen Kohlenstoffspeichereffekt zu bestimmen. Da es aber das Ziel ist, den Effekt der Kohlenstoffbindung in Wald und Holz und dessen verzögerte Freisetzung durch die stoffliche Nutzung zu ermitteln, ist *de facto* kein Fall bekannt, in welchem ausschließlich die Emissionen direkt, z. B. über Feuerungsanlagen, abgeschätzt werden.

Die in Kapitel 2.2.4 erwähnten Beispiele versuchen zwar, eine verbleibende Menge an Kohlenstoff in den Speicher über den Verbrauch und die Emissionen aus der Holznutzung zu ermitteln,

doch stellen sie keine *Inflow-Outflow* (Zufluss-Abfluss) Methode dar, welche zum Ziel hat, die Netto-Emissionen mittels der Veränderung des Speichers über die Zeit zu quantifizieren (vgl. Kap. 2.2.4, S. 65).

Eine direkte Abschätzung des Abflusses an Kohlenstoff zur Ermittlung einer „CO<sub>2</sub>-Speicherung“ in Holzprodukten wurde von Scharai-Rad (2002) vorgestellt. In dem sehr einfachen Modell werden die jährlich verbrauchten Holzhalbwaren den anfallenden Altholzmengen gegenübergestellt. Der Autor geht dabei in Bezug auf Frühwald und Lang (2001) von einer erfassten Altholzmenge von 8 Mt atro aus, „die in Wirklichkeit nur das jährlich vom Markt erfasste Altholz widerspiegeln dürfte. Das wahre Altholzvorkommen inkl. Altpapier beläuft sich mit großer Wahrscheinlichkeit auf 20 Mt atro pro Jahr.“ (Scharai-Rad 2002, S. 41) Neben dem Holzverbrauch und der damit verbundenen Speicherwirkung wird vom Autor allerdings auch ein durch die energetische Verwertung entstehender Substitutionseffekt in die Klimawirkung einberechnet, um für das Jahr 1999 einen „Senkeneffekt“ des Sektors im Vergleich zu 1990 zu beziffern.

Ähnlich wie bereits Scharai-Rad und Welling (1999, S. 20) ermitteln auch Mantau und Bilitewski (2010) mit Hilfe eines Stoffstrommodells den Verbrauch von Holzprodukten (vgl. Abbildung 5-5). Wie bereits in Kapitel 5.1.2.1 dargestellt, merken die Autoren in diesem Zusammenhang an, dass die offizielle Statistik bei der Zuordnung der Rohstoffe zu den einzelnen Produkten „auf Grenzen“ stößt (Mantau und Bilitewski 2010, S. 16). Die Halbwaren Schnittholz und Holzwerkstoffe werden ähnlich wie in anderen Modellen auf die Verwendungsbereiche 1) *Bauen*, 2) *Möbel und Einrichtungen*, 3) *Verpackungsmaterial* und 4) *Sonstige Holzwaren* aufgeteilt. Für jeden dieser Bereiche wird für alle Holzhalbwaren ein bei der Weiterverarbeitung anfallender Industrierestholzanteil festgelegt, so dass unter Berücksichtigung des Außenhandels der Verbrauch von Fertigwaren aus Holz errechnet werden kann. Für einzelne Bereiche werden Schätzungen angewandt, deren „Auswirkungen auf wichtige Abläufe im Stoffstrommodell“ nach Meinung der Autoren als „relativ gering eingestuft werden“ können (Mantau und Bilitewski 2010, S. 7). Nach dieser Bilanz wurden im Jahr 2007 34,7 Mm<sup>3</sup> Holzfertigwaren verbraucht. Diesen Holz mengen der vier Endverwendungssektoren werden insgesamt 9,9 Mm<sup>3</sup> Altholz aus der Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes zugeordnet (vgl. Statistisches Bundesamt 2015e).

Die Abfallstatistik klassifiziert die über Abfallentsorgungsanlagen erhobenen Abfallmengen nach dem Europäischen Abfallverzeichnis (EAV) in zwanzig Abfallarten, wovon in fünf Abfallgruppen Holz vorkommt (vgl. Statistisches Bundesamt 2015e). Während die Zuordnung des Abfallschlüssels 150103 zum Verpackungssektor bzw. die unter der Nummer 170201 gemeldeten Holz mengen zum Bausektor eindeutig möglich ist, müssen die Holzanteile anderer Kategorien mit Hilfe zahlreicher Literaturangaben geschätzt werden. So enthalten beispielsweise die unter der Nummer 170904 gemeldeten gemischten Bauabfälle in der Regel noch große Mengen an Holz (z. B. Fensterrahmen mit Glasresten, Türen und andere Holzreste), dessen Anteil auf 22 % geschätzt wird. Verunreinigte Holzanteile und Altholz, welches gefährliche Stoffe enthält,

werden in der von Mantau und Bilitewski vorgestellten Bilanz nicht berücksichtigt. Die Autoren stellen nach eigener Aussage lediglich mögliche Wege dar, die aus der Statistik ersichtlichen Altholzmengen den vier Endverwendungssektoren zuzuordnen, und schränken ein:

„Eine differenzierte und komplexe Untersuchung der betrachteten Abfallarten ist für den Stoffstrom der Verwertung bisher nicht unternommen worden.“ [...] „Weiterhin geht man davon aus, dass an der Entsorgungswirtschaft vorbei Altholz zur Verwertung gelangt ohne abfallwirtschaftliche Anlagen zu durchlaufen.“ (Mantau und Bilitewski 2010, S. 48 ff.)

Aus der Gegenüberstellung der in den Verbrauch gehenden und entsorgten Holzmengen ermitteln die Autoren einen Verbleib an Holzwaren in Höhe von 24,8 Mm<sup>3</sup>, den sie unter Annahme einer Dichte von 0,5 g/cm<sup>3</sup> in die gesamte Holzmasse und dessen Kohlenstoffanteil wiederum mit dem Faktor 3,67 in die „CO<sub>2</sub>-Speicherung“ in Höhe von 22,7 Mio. t CO<sub>2</sub> umrechnen. Über die Vorzüge dieser Vorgehensweise schreiben sie:

„Der Vorteil der Stoffstromanalyse liegt in ihrer empirischen Fundierung, die einen eindeutigen Bezug zu der CO<sub>2</sub>-Bindungsleistung eines Sektors in einem Jahr ermöglicht. Als Freisetzung wird gemessen, was im Verlaufe eines Jahres tatsächlich in die Entsorgung geht. Gelingt es einer Industrie ihre Produkte länger in der stofflichen Bindung zu halten, führt das auch direkt zu einem stärkeren Speichereffekt. Dieser wird direkt gemessen und nicht aus Lebenszyklusmodellen oder Vergangenheitswerten theoretisch ermittelt.“ (Mantau und Bilitewski 2010, S. 14)

Wie von den Autoren auch erwähnt wird, werden in der Abfallstatistik jedoch nicht alle Holzmengen erfasst. Es zeigt sich, dass eine Quantifizierung des Holzanteils in den erfassten Abfallmengen auf zahlreichen Annahmen basieren muss, welche von den Autoren der vorliegenden Studie im Vergleich zu früheren Untersuchungen z.T. verändert wurden. So schlussfolgern Mantau und Bilitewski (2010, S. 10) denn auch, dass die in der Studie vorgenommene gutachterliche Zuordnung der Abfallarten „der maximal erreichbare Kompromiss zwischen gewünschter Differenzierung und statistischer Belegbarkeit“ darstellt. Während beispielsweise der Holzanteil des unter der Schlüsselnummer 150106 aufkommenden Holzes in 2002 noch auf 35 % geschätzt wurde, wurde er in der Studie für das Jahr 2007 mit 15,3 % angegeben (Mantau und Bilitewski 2010, S. 71).

Eine weitere Schwachstelle bei der Verwendung von Daten der Abfallstatistik stellt laut Qualitätsbericht der Abfallstatistik auch die Zuordnung des Abfalls selbst dar:

„Eine Kontrolle der korrekten Zuweisung von Abfallarten zu Abfallschlüsseln des EAV ist durch Plausibilitätsprüfungen nur bedingt möglich. Eine weitere Schwierigkeit liegt in der Abgrenzung des Berichtskreises. Im Wesentlichen maßgebend für die Befragung von Entsorgungsanlagen ist deren Genehmigung nach der 4. Bundesimmissionsschutzverordnung (4. BImSchV). Dazu kommen Entsorgungsanlagen, die auf Grund länderspezifischer Genehmigungsgrundlagen zu befragen sind. Abfallmengen, die mehrere Anlagen durchlaufen, werden an jeder Anlage gezählt. Dabei kann sich der Abfallschlüssel ändern.“ (Statistisches Bundesamt 2015e, S. 3)

Um die Netto-Emissionen nicht über den Weg der direkten Verrechnung des Zu- und Abflusses an Kohlenstoff in und aus dem Speicher, sondern über die Änderung des Speichers über die Zeit zu berechnen, müssten diese Bilanzen mittels Langzeitreihen der Abfallstatistik aufgestellt werden. Das Statistische Bundesamt stellt diese Daten seit dem Jahr 1996 für Deutschland zur Verfügung. Allerdings schränkt es im Qualitätsbericht zur Erhebung der Abfallentsorgung ein, dass „in der Datenreihe Datenvergleiche nur mit einigen Einschränkungen durchgeführt werden“ können (Statistisches Bundesamt 2015e, S.4). Auch Flugsrud *et al.* (2001) und Pingoud *et al.* (2003) bemängeln, dass es im Gegensatz zu den Waren- und Außenhandelsstatistiken keine verlässlichen Statistiken über anfallende Holzmengen im Abfallaufkommen gibt.

Das Vorgehen, die Holzmengen am Ende ihrer stofflichen Nutzung mit Hilfe der Abfallstatistik zu ermitteln, ist aufgrund der geschilderten großen Unsicherheiten und der wahrscheinlich großen Mengen nicht erfassten Holzes daher nicht zielführend. Die mit dieser Methode verbundene tendenzielle Unterschätzung des aus dem Speicher abfließenden Kohlenstoffs resultiert in einer Überschätzung des Speichereffektes bzw. in einer Unterschätzung der am Ende der stofflichen Nutzung von Holzwaren auftretenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Gleichsam unmöglich ist eine Differenzierung des Materials nach seiner Herkunft, die im Zuge der politischen Berücksichtigung des Speichereffektes, wie sie in Kapitel 3.2.2 beschrieben wird, jedoch unabdingbar ist.

#### Bewertung der direkten Abschätzung von Emissionen

- ⊕ Keine möglicherweise ungenauen Informationen über die Speicherdauer notwendig
- ⊖ Der Zufluss verhält sich in der Summe über die gesamte Zeit nicht proportional zum Abfluss von C; weshalb Speichereffekte tendenziell überschätzt und Emissionen unterschätzt werden
- ⊖ Notwendige Annahmen über das Holzaufkommen in Abfallstatistiken erhöhen die Unsicherheit
- ⊖ Keine oder nur ungenaue Information über den Verbleib von Holz nach seiner stofflichen Nutzung abseits der Abfallstatistik vorhanden
- ⊖ Keine Aussage über die Herkunft des Holzes möglich

### 5.1.4 Schlussfolgerung

Während Flussdatenmethoden sensitiv auf Fehler bei der Quantifizierung des Zu- und Abflusses von Kohlenstoff reagieren, die sich auf die zu ermittelnde Speicheränderung auswirken, die ihrerseits wiederum oft nur eine kleine Differenz zwischen großen Kohlenstoffzu- und -abflüssen ausmacht, liegt der Hauptnachteil der Inventurmethode in der mangelnden Datenverfügbarkeit. Zwar liegen für Deutschland Informationen über die Holzverwendung in Gebäuden vor, doch müssen verschiedene Datenquellen kombiniert werden, um die verbauten Holzmengen grob er-

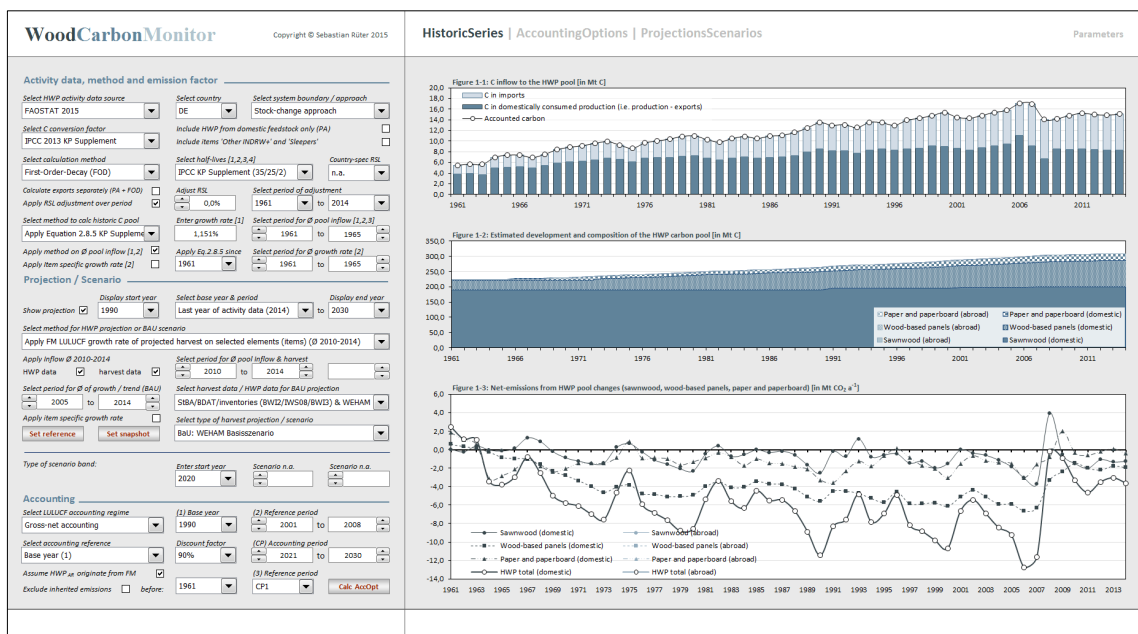
mitteln zu können. Daraus lassen sich aber keine gesicherten Rückschlüsse auf die gespeicherte Kohlenstoffmenge bzw. ihre zeitliche Veränderung ziehen, denn die Informationen stammen aus einmaligen Erhebungen und Untersuchungen, die unabhängig voneinander durchgeführt wurden. Für andere Verwendungsbereiche von Holz als den Bausektor, wie dem Einsatz für Papier oder Verpackungen, sind Inventardaten aufgrund der kurzen Lebenszyklen dieser Produkte überhaupt nicht vorhanden. Der große Vorteil von Inventuren, die tatsächliche Speicherhöhe und damit die Netto-Emissionen auf Basis von Speicheränderungen ohne zusätzliche Annahmen zu erfassen, kann für Deutschland bei der gegebenen Datenlage demnach nicht zum Tragen kommen. Auch gestaltet es sich bei einer Inventarisierung des genutzten Holzes schwierig, die Herkunft des Holzes noch unterscheiden zu können; ein Aspekt, der bei der Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten im Rahmen der von der Politik gesetzten Bedingungen (vgl. Kap. 3.2.2.6) eine zentrale Rolle spielt.

Mit Hilfe von Flussdaten hingegen kann solch eine Zuordnung relativ einfach vollzogen werden. Folgt man dem Holzeinschlag entlang der Verarbeitungskette von Holz bis zu den Produkten, so werden nur die in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmengen ermittelt, welche in Deutschland durch das Baumwachstum sequestriert wurden. Allerdings stellt die Verteilung des Kohlenstoffs auf die verschiedenen Produktgruppen insofern eine Herausforderung dar, als die Verteilungsparameter sich von Jahr zu Jahr ändern und der tatsächliche Einsatz von Rohholz nicht mit seinem rechnerischen Verbrauch für die Herstellung von Holzwaren korreliert. So ermöglicht die Verwendung von Holzeinschlagsdaten zwar die Untersuchung von Zusammenhängen eines sich ändernden Holzaufkommens auf die Kohlenstoffspeicherung in Produkten; doch anstatt den Kohlenstoffzufluss in den Produktspeicher mühsam auf Basis des Holzeinschlags zu ermitteln, können die Kohlenstoffmengen gleich direkt über die ebenfalls jährlich vorliegenden und genaueren statistischen Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren berechnet werden. Diese Zahlen sind aufgrund standardisierter Güter- und Warenverzeichnisse international vergleichbar und in Datenbanken nationaler und internationaler Organisationen öffentlichen zugänglich. Als Nachteil dieser Datenreihen kann für Deutschland jedoch angeführt werden, dass aufgrund von Änderungen der statistischen Erfassungsschwelle und eines Strukturwandels der Sägeindustrie in Deutschland von Schwankungen in den erfassten Mengen an Holzhalbwaren ausgegangen werden muss. Auch sind verwertbare Daten nur für Halbwaren und nicht für Fertigwaren verfügbar, welche den eigentlichen Kohlenstoffspeicher der in Nutzung befindlichen Produkte ausmachen. Doch lassen sich Erstere mit entsprechenden Zerfallskurven und Nutzungsdauern von Holzprodukten kombinieren, so dass dem Materialverlust bei der Verarbeitung von Halb- zu Fertigwaren Rechnung getragen werden kann.

Der große Vorteil von Methoden, die den Kohlenstoffabfluss aus dem Speicher mit Hilfe von Nutzungsdauern berechnen, liegt über den gesamten Zeitraum betrachtet in der Wahrung der Proportionalität der abfließenden mit den zufließenden Kohlenstoffmengen im Holz. Es kann hier rechnerisch nur die Menge an Kohlenstoff aus dem Speicher entweichen, die zuvor bereits als Zufluss in den Speicher gezählt wurde. Im Gegensatz zu direkten Abschätzungen des Koh-

lenstoffabflusses aus dem Speicher wird die Unsicherheit, die Speichereffekte zu überschätzen und Emissionen zu unterschätzen, daher minimiert. Die für die Abschätzung der aus dem Speicher abfließenden Kohlenstoffmengen verwendeten Angaben zu Nutzungsdauern von Holzprodukten scheinen zwar oft unsicher, zumal diese in der Realität auch nicht konstant sind, sondern Veränderungen unterliegen; bei einer direkten Abschätzung des Kohlenstoffabflusses brauchen also keine möglicherweise ungenauen Annahmen zu Nutzungsdauern getroffen werden. Allerdings ist die Verwendung der Abfallstatistik zur Abschätzung des Altholzaufkommens, wie beschrieben, mit sehr großen Unsicherheiten verbunden. Da keine Informationen über den Verbleib von Holz abseits der Abfallstatistik vorliegen und nicht alles Holz am Ende seiner stofflichen Nutzung auch als Abfall in der Statistik erfasst wird, ist davon auszugehen, dass eine direkte Erfassung der den Speicher verlassenden Holzmenge die im Speicher verbleibende Holzmenge überschätzt. Aus genannten Gründen kommen daher bereits andere Autoren zu dem Schluss, dass sich die Nutzungsdauer-Methode auch hinsichtlich möglicher Fehler beim Zufluss von Kohlenstoff in den Speicher als belastbarer erweist (vgl. Flugsrud *et al.* 2001, S. 18; Pingoud *et al.* 2003, S. 49).

## 5.2 BESCHREIBUNG DES MODELLS UND SEINER BE- RECHNUNGSPARAMETER



**ABBILDUNG 5-13:** Screenshot der Steuerungsoberfläche des WoodCarbonMonitor, hier: historische Entwicklung der Netto-Emissionen (Stand Oktober 2015)

Als Konsequenz der im vorherigen Kapitel beschriebenen Datenlage und den jeweiligen Vor- und Nachteilen der verschiedenen Methoden ist in dem Modell WoodCarbonMonitor die Flussdatenmethode umgesetzt, welche die mit der Kohlenstoffspeicherwirkung in Holzprodukten verbundenen Netto-Emissionen auf Basis der statistischen Daten zu Produktion und Außenhandel sowie Informationen zu Nutzungsdauern abschätzt (vgl. Kapitel 2.2.2 und 2.2.3). Um möglichst viele Fragestellungen rund um die Berechnung der biogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Holzprodukten beantworten zu können, wurde ein modularer Aufbau für das im Tabellenkalkulationsprogramm MS EXCEL implementierte Modell gewählt, wodurch die hinterlegten Daten und Methoden sehr flexibel miteinander kombiniert werden können. So können die Auswirkungen der Verwendung unterschiedlicher Parameter und Annahmen im Detail untersucht und Unsicherheiten der Abschätzung benannt werden. Eine detaillierte Zusammenstellung der im WoodCarbonMonitor verwendeten und in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Funktionsgleichungen ist im Anhang enthalten.

Das Modell besitzt eine Steuerungsoberfläche (Abbildung 5-13), über die sich alle hinterlegten Einstellungen der Berechnung zentral auswählen lassen. Zugleich werden die jeweiligen Berechnungsergebnisse grafisch aufbereitet und in verschiedenen Abbildungen angezeigt, so dass eine sofortige Einschätzung und Kontrolle der Ergebnisse möglich ist.

Das Berechnungsmodell lässt sich in fünf Bereiche unterscheiden, die im Folgenden genauer beschrieben werden:

- die Ablage und Aufbereitung der **Aktivitätsdaten**, die die Kohlenstoffhöhe des jährlichen Speicherzuflusses bestimmen;
- die Bindungs- bzw. Nutzungsdauer von Holzprodukten bestimmen die Dynamik der verzögerten Freisetzung des Kohlenstoffs aus dem Speicher, daher auch **Emissionsfaktoren**;
- die **Methodik** zur Berechnung der Netto-Emissionen;
- die Möglichkeit zur Berechnung von **Szenarien und Projektionen**;
- die **LULUCF Anrechnungsoptionen** mit Auswirkung auf die Einbindung der Holzprodukte in die Klimapolitik.

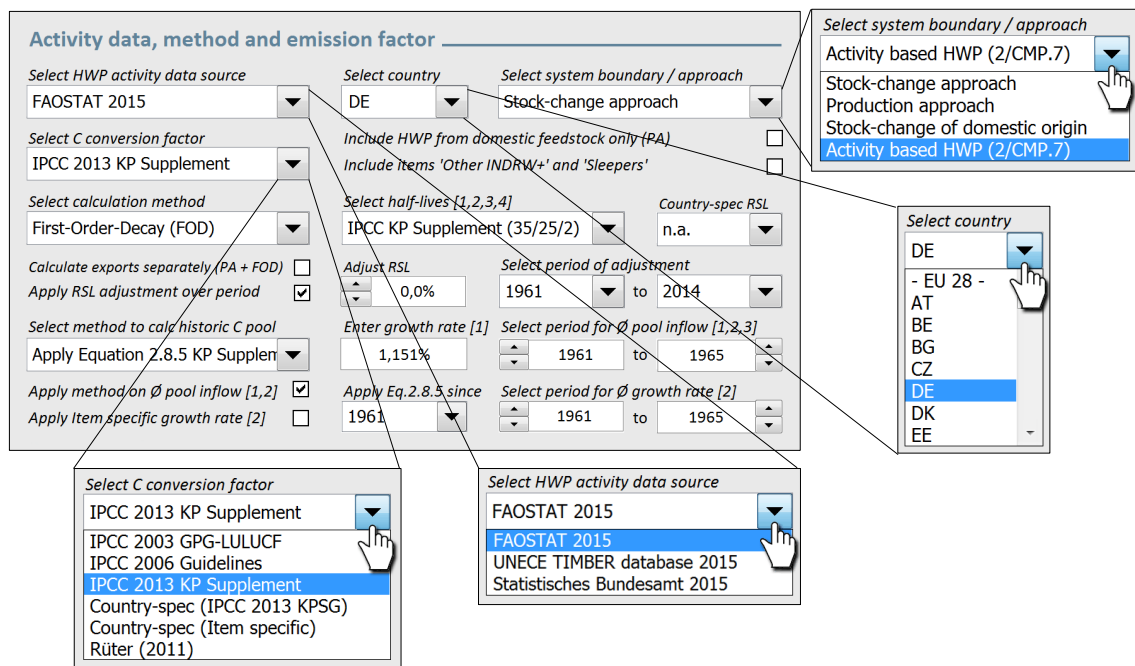
### 5.2.1 Aktivitätsdaten

Die Berechnung der in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmengen im Modell WoodCarbonMonitor basiert auf den jährlichen Daten zu Produktions- und Außenhandel von Holzhalbwaren in Kombination mit hinterlegten Kohlenstoffumrechnungsfaktoren, welche in Abhängigkeit von der gewählten Systemgrenze bzw. dem gewählten Berechnungsansatz verwendet werden. In Teilen sind hierfür auch weitere Datenreihen über den jährlichen Holzeinschlag sowie die jährliche Produktion von Rundholz und Zellstoff notwendig. Dabei wurde die Tabellenstruktur von vornherein so angelegt, dass die in der vorliegenden Studie beschriebene Abschätzung des Beitrags der stofflichen Holznutzung in Deutschland auch auf weitere Länder ausge-



weitert werden kann, nachdem die entsprechenden länderspezifischen Rohdaten in das Modell eingelesen wurden (vgl. Kapitel 3.2.2.5).

Alle für die Aktivitätsdaten relevanten Auswahloptionen sind in Abbildung 5-14 dargestellt. So können neben dem gewünschten Land, für welches die Berechnung durchgeführt werden soll, auch die jeweils hinterlegte Datenquelle und die gewünschten Umrechnungsfaktoren ausgewählt werden. Liegen also beispielsweise für ein Land nur die Daten der FAO vor, erscheint in dem jeweiligen Auswahlfeld auch nur diese eine Datenquelle.

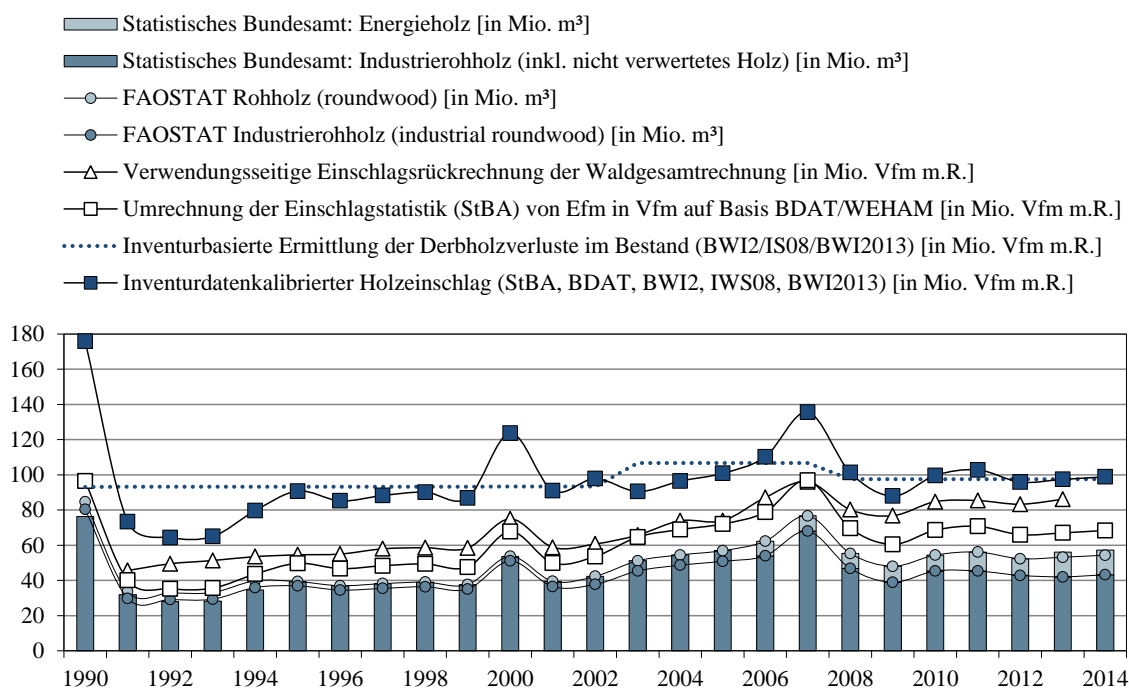


**ABBILDUNG 5-14:** Screenshot der Auswahlmenüs zu Aktivitätsdaten-relevanten Steuerungsparametern (Stand August 2015)

### 5.2.1.1 Daten zum Holzeinschlag

Zur Ermittlung der aus heimischem Einschlag stammenden Holzmenen, die für die Abschätzung der anrechenbaren Netto-Emissionen aus heimisch produzierten Holzprodukten notwendig sind (vgl. Kap. 3.2.2.6, 4.4 und 5.2.1.4) sowie für deren Zuordnung zu den Kyoto-Aktivitäten Waldbewirtschaftung (FM), Aufforstung/Wiederaufforstung (AR) und Entwaldung (D) werden die Zeitreihen zum jährlichen Holzeinschlag benötigt. Um auch die Vorgaben für eine Anrechnung von Holzprodukten auf Basis eines projizierten Referenzwertes in der zweiten Verpflichtungsperiode unter dem Kyoto-Protokoll erfüllen zu können, wurden neben den Datenreihen der amtlichen Holzeinschlagstatistik, welche Industrierohholz (Stamm- und Industrieholz), Energieholz und nicht verwertetes Holz in Erntefestmetern ohne Rinde (Efm o. R.) ausweist (vgl. Kap. 5.1.2.1), auch noch weitere Zeitreihen zum Holzeinschlag hinterlegt (Abbildung 5-15). Anders als die von der Holzeinschlagstatistik ausgewiesenen Derbhohlmengen (Zopfdurchmes-

ser > 7 cm) enthalten diese in Vorratsfestmeter angegebenen Zeitreihen auch die Rindenanteile und Ernteverluste und können daher mit verfügbaren Daten zum zukünftigen Holzeinschlag in Deutschland verglichen werden (s. Kap. 5.2.4.2).



**ABBILDUNG 5-15:** Holzeinschlag für Deutschland nach eigener Berechnung und verschiedenen Quellen [in Mm<sup>3</sup> oder Mio. Vfm]

Dies sind zum einen die verwendungsseitigen Einschlagsrückrechnungen aus der Waldgesamtrechnung des Thünen-Instituts für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie (Dieter und Englert 2005b; Bormann *et al.* 2006), die 2011 für die Festlegung des Referenzwerts für Holzprodukte verwendet wurden (Rüter 2011a). Da diese Zeitreihe aber nicht konsistent mit der Entwicklung des amtlich erfassten Einschlages ist, wurde eine weitere Zeitreihe zum Holzeinschlag in Vorratsfestmetern ermittelt. Hierfür wurden die Erntefestmeter der amtlichen Einschlagstatistik zunächst mit Hilfe von Schätzgrößen in Vorratsfestmeter mit Rinde (Vfm m. R.) umgerechnet. Zu diesem Zweck wurden baumartengruppenspezifische Umrechnungsfaktoren aus der ebenfalls nach Hauptbaumarten unterteilten Einschlagsprojektion aus WEHAM und dem hierfür verwendeten BWI-Unterprogramm BDAT abgeleitet (Kublin und Scharnagl 1988; Kublin 2002), welches die Differenz zwischen Ernte- und Vorratsfestmeter auf Einzelbaumebene berechnet. Um Konsistenz zwischen den so ermittelten Daten und den Berechnungen der Kohlenstoffspeicherentwicklung im Wald herzustellen, wurden in einem weiteren Schritt auch die Ergebnisse der in Deutschland durchgeführten Waldinventuren zum Derbholzverlust berücksichtigt. Bislang wurden vier Inventuren durchgeführt<sup>12</sup>:

<sup>12</sup> [www.bundeswaldinventur.de](http://www.bundeswaldinventur.de)

- Bundeswaldinventur 1986-1989 (BWI1)
- Bundeswaldinventur 2001-2002 (BWI2)
- Inventurstudie 2008 (IWS08)
- Bundeswaldinventur 2011-2012 (BWI-2012)

Für den Zeitraum von 1990 bis 2002 lagen Zahlen zum Holzeinschlag allerdings nur für die alten Bundesländer vor. Die Herleitung gesamtdeutscher Zahlen erfolgte daher aus dem Flächenverhältnis zwischen neuen und alten Bundesländern, welches dann für die Schätzung der Zahlen für die neuen Bundesländer herangezogen wurde (Stümer 2014). Danach belief sich der Verlust an Derbholz bis zur BWI2 auf 93,2 Mio. Vfm, welcher zwischen den Jahren 2003 und 2007 auf 106,7 Mio. Vfm anstieg (vgl. Polley *et al.* 2009) und im Zeitraum 2008 bis 2012 wieder auf 97,5 Mio. Vfm zurückging.

Schließlich wurde die Differenz der in Vorratsfestmeter umgerechneten Datensätze der amtlichen Einschlagstatistik zu den inventurbasierten Ergebnissen entsprechend der jährlichen Einschlagshöhe den jeweiligen Jahren zugeordnet. Somit ist die berechnete zweite Zeitreihe zum Holzeinschlag in Vorratsfestmetern konsistent mit den Ergebnissen der Bundeswaldinventuren und den ebenfalls mit Inventurdaten kalibrierten Projektionen zum Holzeinschlag (s. Kap. 5.2.4.2). Auch kann sie für die Zuordnung der Holzprodukte zu den Waldaktivitäten unter dem Kyoto-Protokoll verwendet werden (s. Kap. 5.2.1.4). Der jährliche Anteil der Holzprodukte aus der jeweiligen Waldaktivität unter dem Kyoto-Protokoll, der bei der Berechnung des aktivitätsbasierten Ansatzes nach Entscheidung 2/CMP.7 berücksichtigt werden muss, wird im WoodCarbonMonitor, wie von den *2013 KP Supplements* vorgesehen, mit Gleichung 18 berechnet (vgl. Gleichung 2.8.3, Rüter *et al.* 2014, S. 2.116).

$$f_j(i) = \frac{\text{harvest}_j(i)}{\text{harvest}_{TOTAL}(i)} \quad (18)$$

Wobei:

$f_j(i)$  = Anteil der Kyoto-Aktivität  $j$  (Waldbewirtschaftung, FM; Aufforstung und Wiederaufforstung, AR; Entwaldung, D) am Gesamtholzeinschlag im Jahr  $i$

Nach den Erhebungen des Thünen-Instituts für Waldökologie stammten bis 2002 durchschnittlich 942.157 Vfm Derbholz im Jahr aus Entwaldungsflächen, für den Zeitraum der BWI2 bis zur Inventurstudie 2008 fielen jährlich 851.233 Vfm an und bis zum Jahr 2012 können 1.091.217 Vfm jedes Jahr der Kyoto-Aktivität Entwaldung zugeordnet werden (Stümer 2014).

### 5.2.1.2 Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren

In dem Modell sind die Produktions- und Außenhandelsdaten folgender Organisationen und Behörden hinterlegt:

- FAO
- UNECE
- Statistisches Bundesamt

Zwar liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Modellierung und Ermittlung des Beitrags von Holzprodukten in Deutschland, doch wurden aus den verfügbaren Datenbanken der FAO und UNECE auch die Daten für andere Länder (EU 28, alle Annex I- und weitere Nicht-Annex I-Staaten) aufbereitet und hinterlegt. So können insbesondere die Auswirkungen unterschiedlicher Anrechnungsoptionen auf verschiedene Länder und die damit verbundenen Vor- und Nachteile ermittelt werden.

Anders als beispielsweise in dem Modell EXPHWP von Pingoud bzw. bei der *Tier 1* Defaultmethode in den *2006 IPCC GL* (s. Kapitel 4.3) werden die Produkte nicht zu den Produktgruppen Massivholzprodukte und Papier und Pappe aggregiert (vgl. Seite 63). Vielmehr werden die Zeitreihen der entsprechenden Unterkategorien der Halbwarengruppen Schnittholz, Holzwerkstoffe und Papier und Pappe getrennt erfasst (vgl. Tabelle 5-10). Dies soll zum einen eine genauere Umrechnung in die in den Produkten enthaltenen Kohlenstoffmengen ermöglichen (s. folgendes Kapitel 5.2.1.3) und zum anderen eine produktspezifische Anpassung von unterstellten Nutzungsdauern bzw. Halbwertszeiten erlauben (s. Kapitel 5.2.2.2). Abbildung 5-16 zeigt die für die Berechnung des aktivitätsbasierten Ansatzes verwendeten FAO Daten zu Produktion und Export zusammengefasst für die Halbwarenkategorien Schnittholz und Holzwerkstoffe seit 1990.

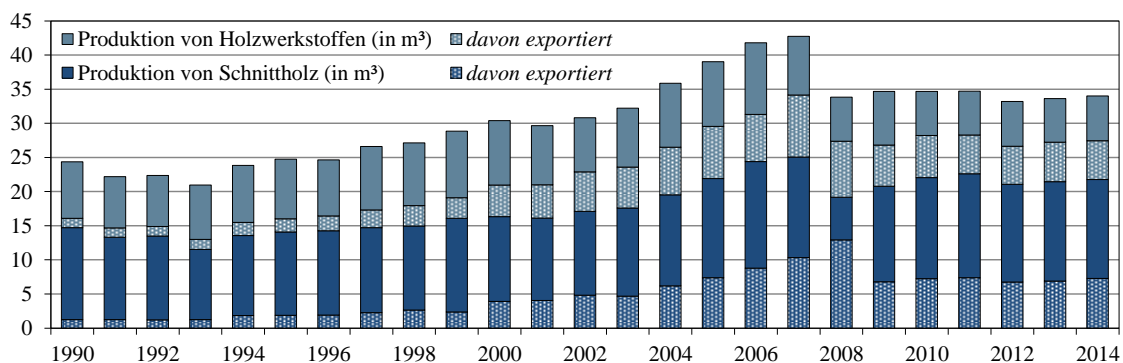


ABBILDUNG 5-16: Produktion und Export von Massivholzhalbwaren in Deutschland nach FAO (2015)

Um neben den relativ einfach verfügbaren aggregierten Daten der FAO und UNECE weitere spezifische Datensätze für Deutschland in dem Modell verwenden zu können, wurden die Daten

der Produktionsstatistik (Fachserie 4 Reihe 3.1) und der Außenhandelsstatistik (Fachserie 7 Reihe 1) des Statistischen Bundesamtes mit den seit 1949 definierten Melde- bzw. Warennummern erfasst und digitalisiert (Statistisches Bundesamt 2015a; Statistisches Bundesamt 2015d). Die Datensätze wurden im WoodCarbonMonitor organisiert und den verschiedenen Produktkategorien nach der FAO Klassifikation zugeordnet.

Auf Basis der vom Statistischen Bundesamt bereitgestellten Klassifikation wurden den Melde-nummern der Produktionsstatistik die zugehörigen Warennummern der Außenhandelsstatistik gegenübergestellt (u. a. Statistisches Bundesamt 2008b) sowie holzartenspezifische Dichte- und produktspezifische Kohlenstoffumrechnungsfaktoren hinterlegt. Als besondere Herausforderung bei dieser Zuordnung zu den Produktgruppen gestaltete sich die in Kapitel 5.1.2.2 beschriebene fortlaufende Änderung der Melde- und Warennummern.

Für die Daten zur Produktion und dem Außenhandel von Holzprodukten in der ehemaligen DDR konnten Informationen aus dem Statistischen Jahrbuch der DDR von 1990 des Statistischen Amtes der DDR über das Statistische Bundesamt ermittelt werden. Weitere und detailliertere Informationen befinden sich nach Auskunft des Bundesarchivs in Berlin in den Archivbeständen „Staatliche Zentralverwaltung für Statistik (SZS)“ (DE 2), „Ministerium für Land-, Forst- und Nahrungsgüterwirtschaft“ (DK 1), „Ministerium für Leichtindustrie“ (DG 4) und „Ministerium für Außenhandel und Innerdeutscher Handel“ (DL 2) (Statistisches Bundesamt 2006; Bundesarchiv 2006). Da ein Großteil dieser Daten aber nur über sehr zeitintensive und komplizierte Recherchen in den an verschiedenen Standorten archivierten Zahlenberichten erfasst werden kann (z. B. über die Abrechnung von Planpositionen und Entschlüsselung einzelner Positionen über Schlüssel Listen für Produktion, Materialwirtschaft und Außenhandel), wurde auf eine weitere Recherche verzichtet.

Zur Identifizierung der Daten sind alle Zeitreihen der Rohstoff- und Halbwarengruppen aus den verschiedenen Datenquellen mit einem eindeutigen Produktcode versehen, der aus dem Code der FAO<sup>13</sup> (vgl. Tabelle 5-10) und der Bezeichnung des jeweiligen Elements (Produktion, Import, Export bzw. Verbrauch) besteht (z. B. *1646prod* für die Produktion von Spanplatte). Weitere Metadaten sind z. B. das Anfangs- und Endjahr der jeweiligen Zeitreihe, welche je nach gewählter Methode eine dynamische Erstellung von projizierten Zeitreihen ermöglichen. So wird im Auswahlmenü sogleich das Jahr der Veröffentlichung angezeigt und das letzte Jahr der Zeitreihe an die nachfolgenden Berechnungsmodule kommuniziert.

---

<sup>13</sup> <http://www.fao.org/forestry/statistics/80572/en/>

**TABELLE 5-10:** Codierung relevanter Rohstoff- und Halbwarenkategorien nach FAO und UNECE

Bezeichnung	Produktcode	Code
Nadelrundholz	1866	1.2.C
Laubrundholz	1867	1.2.NC
Holzzellstoff	1875	7
Altpapier	1669	8.2
Nadelschnittholz	1632	5. C
Laubschnittholz	1633	5.NC
Furnier	1634	6.1
Sperrholz	1640	6.2
Spanplatte	1646	6.3
Hochdichte Faserplatte (HDF)	1647	6.4.1
Mitteldichte Faserplatte (MDF)	1648	6.4.2
Faserplatte, verdichtet	1649	6.4.x
Andere Faserplatte (Faserdämmplatte, LDF)	1650	6.4.3
Papier und Pappe	1876	10

Je nach gewünschtem Berechnungsansatz (s. Kap. 5.2.5), der ebenfalls über ein Menü ausgewählt wird, werden die Produktions- und Außenhandelsdaten in unterschiedlicher Weise miteinander verschnitten (vgl. auch Kapitel 3.2). Während die Rohstoffkategorien Rundholz, Zellstoff und Altpapierfasern für die Berechnung des Anteils an Holzprodukten aus heimischem Einschlag verwendet werden können (s. Kap. 3.2.2.6, 4.4 und 5.2.1.4), wird aus den anderen in Tabelle 5-10 gelisteten Produktgruppen der Kohlenstoffzufluss berechnet. So lassen sich mit dem WoodCarbonMonitor durch die Kombination der statistischen Zeitreihen die jährlich in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmengen ( $Inflow(i) = HWP(i)$ ) für die Berechnungsansätze umsetzen:

- *Stock-change* Ansatz  $\rightarrow Inflow = \text{Verbrauch} = \text{Produktion} + \text{Import} - \text{Export}$
- Produktionsansatz  $\rightarrow Inflow = \text{Produktion}$
- *Stock-change of domestic origin* Ansatz  $\rightarrow Inflow = \text{Produktion} - \text{Export}$
- Aktivitätsbasierter Ansatz nach 2/CMP.7  $\rightarrow$  Berechnung des *Inflow* s. Kap. 5.2.1.4

Durch die Modifizierung weiterer Parameter lassen sich darüber hinaus auch die in den Verhandlungen diskutierten *restricted stock-change* Ansatz (s. Kap. 3.2.2.3) und *Emissions To Atmosphere* Ansatz berechnen (s. Kap. 3.2.2.4).

Neben den durch die Produktkategorien ‚Schnittholz‘, ‚Holzwerkstoffe‘ und ‚Papier und Pappe‘ abgedeckten Holzprodukten (vgl. Kapitel 3.2.2.6 und 4.4) können über die Benutzeroberfläche bei Bedarf auch weitere Produktgruppen (z. B. ‚Eisenbahnschwellen‘ und ‚Masten und Pfähle‘) in die Berechnung einbezogen werden (vgl. Abbildung 5-14).

### 5.2.1.3 Kohlenstoff-Umrechnungsfaktoren

Für die Berechnung des Kohlenstoffgehaltes in den Produkten wurden mehrere Quellen für Umrechnungsfaktoren hinterlegt. Zwar gibt es letztlich immer nur einen „richtigen“ Umrechnungsfaktor, doch kann z. B. aufgrund politischer Vorgaben die Verwendung eines von IPCC vorgegebenen Faktors im Rahmen der Berichterstattung notwendig sein. Zudem wird die Analyse der Sensitivität verschiedener Angaben in der Literatur ermöglicht. Daher wurden alle in den relevanten IPCC-Berichten enthaltenen Kohlenstoff-Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 4) in dem Modell hinterlegt, ebenso wie die für die Berechnung der Referenzwerte verwendeten Faktoren, welche z. B. für Laubschnittholz die für Deutschland repräsentative Baumartenzusammensetzung wiedergeben (Rüter 2011a, S. 6). Tabelle 5-11 enthält diese für Deutschland spezifischen Umrechnungsfaktoren.

**TABELLE 5-11:** Länderspezifische Dichten und Umrechnungsfaktoren der Holzproduktkategorien für Deutschland (vgl. Rüter *et al.* 2014, s. 2.122 und Rüter 2011a, s. 6)

Produktkategorie	Dichte (atro) [Mg/m <sup>3</sup> ]	C-Umrechnungsfaktor [Mg C/m <sup>3</sup> ]
Nadelschnittholz	0,435	0,225
Laubschnittholz	0,670	0,335
Furnier	0,560	0,253
Sperrholz	0,542	0,267
Spanplatte	0,596	0,269
OSB	0,573	0,265
HDF	0,788	0,355
Faserplatte, verdichtet	0,739	0,315
MDF	0,691	0,295
LDF	0,159	0,075
	Dichte (atro) [Mg/Mg]	C-Umrechnungsfaktor [Mg C/Mg]
Papier und Pappe	0,900	0,386

Die sowohl im WoodCarbonMonitor als auch im *2013 KP Supplement* als Default-Umrechnungsfaktoren vorgeschlagenen Werte für ‚MDF‘, ‚HDF‘ und ‚Spanplatte‘ stammen aus einer detaillierten Ökobilanzstudie, in welcher für zahlreiche Holzprodukte die für Deutschland repräsentativen Dichten und Materialzusammensetzungen berechnet werden konnten (Rüter und Diederichs 2012).

Die in den *2003 GPG-LULUCF* bzw. im *2013 KP Supplement* enthaltenen Umrechnungsfaktoren für ‚Schnittholz‘ sind ebenfalls länderspezifische Werte: sie referenzieren auf die in Haynes *et al.* veröffentlichten Faktoren, die sich aus den gewichteten Durchschnittsdichten der Baumart-

ten ergeben, die in einer 1986 durchgeführten Waldinventur in den Vereinigten Staaten von Amerika ermittelt wurden (Haynes *et al.* 1990, S. 262 in IPCC 2003, S. 3.265, s. Kap. 4.2).

Während der in Tabelle 5-12 dargestellte Faktor für ‚Laubschnittholz‘ v.a. auf die Baumartenzusammensetzung unterschiedlicher Länder zurückzuführen ist und in den 2006 IPCC GL nur ein Default-Faktor für alle Massivholzprodukte angegeben wird, weichen die in den Leitfäden vorgeschlagenen Umrechnungsfaktoren für ‚Spanplatte‘ deutlich voneinander ab. So basiert der in Hasch (2002) ermittelte Wert zwar ebenso wie in Rüter und Diederichs (2012) auf Ökobilanzuntersuchungen, doch konnte für Letzteren in Zusammenarbeit mit den Unternehmen der deutschen Holzindustrie eine Repräsentativität der Erhebung von fast 100 % erreicht werden (Rüter und Diederichs 2012, S. 282).

**TABELLE 5-12:** Unterstellte Dichteangaben verschiedener Quellen für ausgewählte Produkte [in Mg/m<sup>3</sup>]

	2003 GPG-LULUCF	2006 IPCC GL	Rüter 2011	Hasch 2002	2013 KP Supplement
Laubschnittholz	0,560	0,450	0,670	–	0,560
Spanplatte	0,260	0,628	0,630	0,642	0,596

#### 5.2.1.4 Ermittlung des Anteils an Holzprodukten aus heimischem Einschlag und Zuordnung zu Kyoto-Aktivitäten im Forstsektor

Um die Vorgaben der Entscheidung 2/CMP.7 umzusetzen, wonach nur Holzprodukte aus heimischen Wäldern zu berücksichtigen sind, deren Emissionen bzw. Senkenwirkung ihrerseits angerechnet werden (s. Kap. 3.2.2.6 und 4.4), wurde im Zuge der Berechnung von Referenzwerten für Holzprodukte die vereinfachende Annahme getroffen, dass alles Industrierohholz, welches in einem Land verbraucht wird, zur Verarbeitung zu Holzhalbwaren (d. h. Schnittholz, Holzwerkstoffe und Zellstoff) verwendet wird (vgl. Rüter 2011a).

In diesem Sinne berechnet Gleichung 19 (S. 169) einen jährlichen heimischen Rohstofffaktor  $f_R(i)$ , der den Anteil der jeweils heimisch produzierten Rohstoffkategorie  $R$  an dessen inländischem Gesamtverbrauch beschreibt. Dies entspricht dem im Kapitel 2.8.1.2 des 2013 KP Supplement genannten ersten Berechnungsschritt.

Für die Holzproduktkategorien ‚Schnittholz‘ und ‚Holzwerkstoffe‘ wird ‚Industrierohholz‘ als Rohstoffkategorie verwendet. Da ‚Industrierohholz‘ die Rohstoffverwendung bei der Herstellung von Papier und Pappe unzureichend abbildet, wird für die Berechnung des Anteils an der Produktkategorie ‚Papier und Pappe‘ aus heimischem Einschlag auch die Rohstoffkategorie ‚Zellstoff‘ berücksichtigt (vgl. Rüter *et al.* 2014, S. 2.115, 2.118). Zudem spielt bei der Herstellung von Papier und Pappe auch die Wiederverwendung von Altpapier eine bedeutende Rolle, da sich der Einsatz von Altpapier in Deutschland in den letzten Jahren kontinuierlich auf nunmehr über 70 % erhöht hat (Abbildung 5-17). Daher wird in dem Modell WoodCarbonMonitor



über den im 2013 KP Supplement beschriebenen Rohstofffaktor für Papier hinaus auch ‚Altpapier‘ als Rohstoffkategorie (vgl. Tabelle 5-10) berücksichtigt:

$$f_R(i) = \frac{R_P(i) - R_{EX}(i)}{R_P(i) + R_{IM}(i) - R_{EX}(i)} \quad (19)$$

mit  $R :=$  *IRW* für Holzrohstoffkategorie ‚Industrierohholz‘ (*industrial roundwood*),  
*PULP* für Holzrohstoffkategorie ‚Holzzellstoff‘ (*wood pulp*) und  
*RecP* für Holzrohstoffkategorie ‚Altpapier‘ (*recovered paper*).

Wobei:

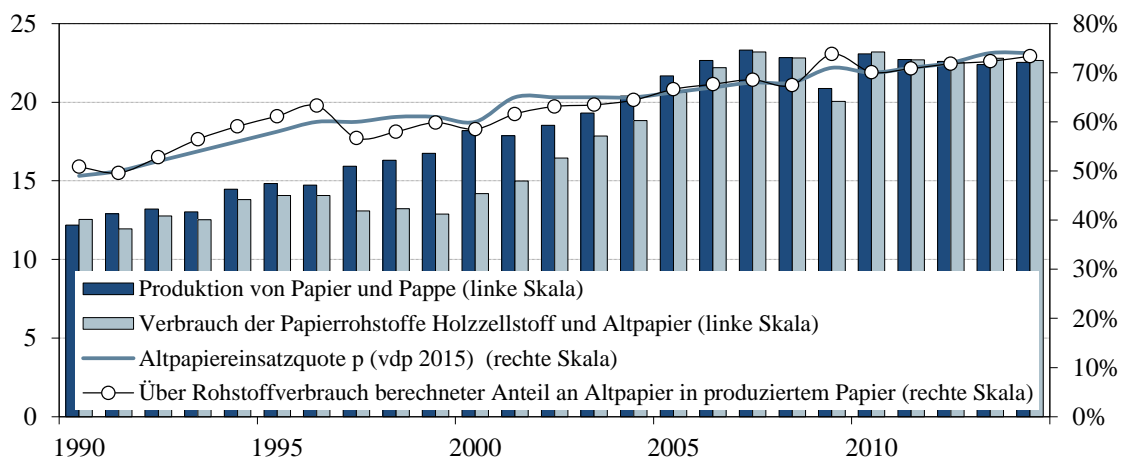
$f_R(i)$  = Anteil Holzrohstoffkategorie  $R$  für die heimische Produktion von HWP aus heimischem Einschlag im Jahr  $i$ .

$R_P(i)$  = Produktion der Holzrohstoffkategorie im Jahr  $i$ , Gg C a<sup>-1</sup>

$R_{IM}(i)$  = Import von Holzrohstoffkategorie im Jahr  $i$ , Gg C a<sup>-1</sup>

$R_{EX}(i)$  = Export von Holzrohstoffkategorie im Jahr  $i$ , Gg C a<sup>-1</sup>

Die Berechnung der Anteile von Holz Zellstoff und Altpapier in den jährlichen hergestellten Papiermengen kann sowohl über die errechneten Verbrauchsmengen dieser zwei Rohstoffkategorien oder vereinfachend über die jährliche Altpapiereinsatzquote  $q$  erfolgen (Abbildung 5-17). Da die Altpapiereinsatzquote in manchen Ländern jedoch bei über 100 % liegen kann und der darüber ermittelte Anteil nicht unbedingt der tatsächlich im hergestellten Papier enthaltenen Altpapiermenge entspricht, wird der Altpapieranteil im WoodCarbonMonitor standardmäßig über die Verbräuche der beiden Rohstoffkategorien ermittelt.



**ABBILDUNG 5-17:** Berechneter und über Altpapiereinsatzquote  $q$  geschätzter Altpapieranteil in der jährlichen Papierproduktion in Deutschland (FAO 2015; Verband Deutscher Papierfabriken e.V. 2014) [in Mt und %]

Gemäß der Entscheidung 2/CMP.7 und in Anlehnung an Gleichung 2.8.4 des *2013 KP Supplement* wird der jährliche Kohlenstoffzufluss an Holzprodukten aus heimischem Einschlag über die Gleichung 20 berechnet, welche die ermittelten Halbwarenmengen mit dem für die jeweilige Produktgruppe berechneten Rohstofffaktor  $f_R$  kombiniert (vgl. in Rüter *et al.* 2014, s. 2.118).

$$HWP_{DP}(i) = HWP_P(i) \cdot f_R(i) \quad (20)$$

mit  $f_R(i) = f_{IRW}(i)$  für Kategorien ‚Schnittholz‘ und ‚Holzwerkstoffe‘ und

$$((f_{IRW}(i) \cdot (1 - q) \cdot f_{PULP}(i)) + q \cdot f_{RecP}(i)) \text{ für Kategorie ‚Papier und Pappe‘}$$

mit  $f_{IRW}(i) := 0$  falls  $f_{IRW}(i) < 0$  und  $f_{PULP}(i) := 0$  falls  $f_{PULP}(i) < 0$  und  $f_{RecP}(i) := 0$  falls  $f_{RecP}(i) < 0$

Wobei:

$HWP_{DP}(i)$  = Hergestellte Holzproduktmengen aus heimischem Einschlag aus der Kyoto-Aktivität  $j$  im Jahr  $i$ , in  $\text{m}^3 \text{a}^{-1}$  oder  $\text{Mt a}^{-1}$

$HWP_P(i)$  = Produktion der jeweiligen Holzproduktkategorie (s. Tabelle 5-10) im Jahr  $i$ , in  $\text{m}^3 \text{a}^{-1}$  oder  $\text{Mt a}^{-1}$

Die Berechnung über Gleichung 20 wird im WoodCarbonMonitor nach Auswahl des aktivitätsbasierten Ansatzes nach 2/CMP.7 oder nach Aktivierung des Auswahlfelds ‚*Include HWP from domestic forests only*‘ für die produktionsmengenbasierten Ansätze automatisch durchgeführt. Um außerdem bei der Berechnung des heimischen Kohlenstoffspeichers nach Entscheidung 2/CMP.7 die jeweiligen Holzproduktkategorien auch mit länderspezifischen Nutzungsdauern kombinieren und zugleich die vorgegebenen Werte für den Export unterstellen zu können, besteht die Möglichkeit, die Berechnung der heimisch verbrauchten und der exportierten Mengen der produzierten Holzprodukte bei aktiviertem Auswahlfeld getrennt voneinander vorzunehmen (s. Abbildung 5-14).

In einem weiteren Berechnungsschritt werden mit Gleichung 21 auf Basis der Ergebnisse aus den Gleichungen 18 und 20 die jährlich in den jeweiligen KP-Aktivitäten anfallenden Holzproduktmengen  $HWP_j(i)$  berechnet (vgl. Gleichungen 2.8.3 und 2.8.4 im *2013 KP Supplement*, Rüter *et al.* 2014, s. 2.116).

$$HWP_j(i) = HWP_{DP}(i) \cdot f_j(i) \quad (21)$$

Wobei:

$HWP_j(i)$  = Hergestellte Holzproduktmengen aus heimischem Einschlag aus der Kyoto-Aktivität  $j$  im Jahr  $i$ , in  $\text{m}^3 \text{a}^{-1}$  oder  $\text{Mt a}^{-1}$

## 5.2.2 Emissionsfaktoren und Nutzungsdauern

Die Berechnung der aus dem Speicher ausgehenden Kohlenstoffmengen wird in dem Modell WoodCarbonMonitor mit Hilfe hinterlegter Nutzungsdauern bzw. Halbwertszeiten der Produkte vorgenommen. Dabei kann wieder über ein Auswahlménü (Abbildung 5-18) sowohl auf in der Literatur vorhandene bzw. vorgegebene Emissionsfaktoren zurückgegriffen (Kap. 5.2.2.1) als auch für Deutschland spezifische Nutzungsdauern verwendet werden, deren Berechnung auf Marktinformationen beruht (Kap. 5.2.2.2).

The screenshot displays the 'Activity data, method and emission factor' configuration panel. Key elements include:

- Activity data, method and emission factor:**
  - Select HWP activity data source: FAOSTAT 2015
  - Select country: DE
  - Select system boundary / approach: Stock-change approach
  - Select C conversion factor: IPCC 2013 KP Supplement
  - Select calculation method: First-Order-Decay (FOD)
  - Calculate exports separately (PA + FOD):
  - Apply RSL adjustment over period:
  - Select method to calc historic C pool: Apply Equation 2.8.5 KP Supplern
  - Apply method on  $\emptyset$  pool inflow [1,2]:
  - Apply item specific growth rate [2]:
- Adjustment Parameters:**
  - Adjust RSL: 0,0%
  - Adjust service life: -5,0%
  - Enter growth rate [1]: 1,151%
  - Apply Eq.2.8.5 since: 1961
- Half-lives and RSL Selections:**
  - Select half-lives [1,2,3,4]: IPCC KP Supplement (35/25/2)
  - Country-spec RSL: n.a.
  - Country-spec RSL dropdown:  $\emptyset$ , Min(Q5%), Max(Q95%)
- Periods of Adjustment:**
  - Select period of adjustment: 1961 to 2014
  - Select period for  $\emptyset$  pool inflow [1,2,3]: 1961 to 1965
  - Select period for  $\emptyset$  growth rate [2]: 1961 to 1965

**ABBILDUNG 5-18:** Screenshot der Auswahlménüs und Steuerungsparameter für hinterlegte Nutzungsdauern (Stand Oktober 2015)

Um die Sensitivität der Annahmen zu den Nutzungsdauern auf die Berechnungen zu analysieren, können diese über die gesamte Zeitreihe der Aktivitätsdaten sowohl verringert als auch erhöht werden. Für die Analyse auch der Auswirkungen der in Kapitel 5.1.2.3 diskutierten möglichen Verzerrung der Ergebnisse aufgrund der Annahme gleichbleibender Nutzungsdauern über die gesamte Zeitreihe kann die Speicherentwicklung zudem auf Basis einer graduellen Veränderung der Nutzungsdauern berechnet werden. Eine Anpassung der Nutzungsdauern, die mittels Interpolation zwischen dem gewählten Anfangs- und Endjahr vorgenommen wird, kann für die Zeitreihe der in der Statistik vorhandenen Aktivitätsdaten (z. B. 1961-2013, s. Abbildung 5-18), für einen gewählten Projektionszeitraum (z. B. 2013-2020) oder aber den gesamten Berechnungszeitraum (z. B. 1961-2020) unterstellt werden.

### 5.2.2.1 Verwendung vorhandener Informationen zu Nutzungsdauern

In dem Modell sind alle als Default-Halbwertszeiten der in Kapitel 4 vorgestellten IPCC Leitlinien hinterlegt. Damit ist eine Berechnung des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten sowohl auf Basis des in den *2006 IPCC GL* formulierten *Tier 1* Default-Ansatzes als auch nach Entscheidung 2/CMP.7 bzw. *2013 KP Supplement* zur Berichterstattung unter dem Kyoto-Protokoll möglich (Tabelle 5-13).

**TABELLE 5-13:** Im Modell WoodCarbonMonitor hinterlegte Halbwertszeiten

IPCC Leitlinie	Schnittholz <sup>1</sup>	Holzwerkstoffe <sup>1,2</sup>	Papier und Pappe
<i>GPG-LULUCF</i>	35	30 bzw. 20	2
<i>2006 IPCC GL</i>	30	30	2
<i>2013 KP Supplement</i>	35	25	2

<sup>1</sup> in den *2006 IPCC GL* zusammengefasst zur Kategorie Massivholzprodukte

<sup>2</sup> in den *2003 GPG-LULUCF* unterschieden in die Kategorien Bauplatten und sonstige Platten

### 5.2.2.2 Berechnung länderspezifischer Nutzungsdauern auf Basis von Marktdaten

Wie in Kapitel 5.1.2.3 diskutiert, liegt eine Schwachstelle der Modellierung mit Hilfe von Zerfallsfunktionen in Kombination mit Daten zu Holzhalbwaren in den unterstellten Nutzungsdauern, welche die verschiedenen Verwendungsbereiche der Produkte möglicherweise unzureichend widerspiegeln. Anders als z. B. für Finnland in Pingoud *et al.* (2001) beschrieben, liegen für Deutschland keine Informationen aus Inventaren zur Holzverwendung in Gebäudebestand zur Kalibrierung auf länderspezifische Nutzungsdauern vor, um die Ungenauigkeit bei der Abschätzung der Speicheränderungen zu reduzieren (vgl. S. 58 und 149).

Um trotzdem länderspezifische Daten zu erhalten, werden im WoodCarbonMonitor detailliert vorliegende Informationen über Marktanteile von Holzhalbwaren aus verschiedenen Marktanalysen über die Verwendung von Holzprodukten im Baubereich für Deutschland mit Nutzungsdauerangaben in einer Tabellenmatrix miteinander kombiniert. Deren Struktur ist in Abbildung 5-19 abgebildet. Sie besteht im Kern aus den im Rahmen eines Mail-Panels mit einer Stichprobe von 11.000 Haushalten von Mantau und Kaiser ermittelten Verwendungsanteilen für Holzwerkstoffe, Laub- und Nadelschnittholz in 14 Einsatzbereichen und insgesamt 70 Verwendungen im Modernisierungsmarkt für das Jahr 2001 (Mantau und Kaiser 2002a, Mantau und Kaiser 2002b). Diese Marktanteile nach Verwendung im jeweiligen Einsatzbereich bei der Modernisierung in den Segmenten Wohnungs- und Nichtwohnbau wurden mit den von Mantau (2005) für das Jahr 2003 erhobenen Holzmengen bzw. Marktanteilen für die beiden Marktbereiche Modernisierung und Neubau verschnitten. Dabei wurden die für Holzwerkstoffe angegebenen Ver-

wendungsanteile unter Berücksichtigung ihrer technischen Eigenschaften auf die in Tabelle 5-11 genannten Produkte gutachterlich verteilt. Damit ergibt sich für den Bausektor eine Matrix von insgesamt 2.800 produktspezifischen Verwendungsbereichen (*10 Holzhalbwaren • 70 Verwendungen • 2 Marktbereiche • 2 Marktsegmente*), die in dem Modell hinterlegt sind.

Marktsektor	Marktbereich	Segment	Einsatzbereich	Verwendung
Bausektor	Neubau	Wohnbau	Dachkonstruktion	Dachbalken
Möbelsektor		Nichtwohnbau	Fassaden	Dachsparren
Verpackungssektor	Modernisierung		Innenwände	Dachlatten
Sonstiges			Decken	Rauhspund
			Fenster	Spanplatten/OSB
			Sonnenschutz	Holzschindeln
			Innentüren	
			Außentüren	
			Innenbekleidung	
			Fußböden	
			Treppen	
			Gartenausstattung	
			Sonst. Ausstattung	
			Gebäudeerweiterung	

**ABBILDUNG 5-19:** Tabellenstruktur der im WoodCarbonMonitor hinterlegten Marktinformationen am Beispiel des Einsatzbereichs Dachkonstruktion im Segment Wohnbau im Marktbereich Neubau (nach Mantau und Kaiser 2002b)

In einer weiteren Tabelle, die die Bereiche der Holzverwendung nach Sektoren und den für den Holzbaubereich relevanten Kostengruppen 300 und 500 nach DIN 276-1 sowie genaue Verwendungsbezeichnung gliedert, sind die jeweiligen Nutzungsdauerangaben aus zahlreichen Studien, inklusive evtl. vorhandener Angaben zu Minima ( $Q_{0,05}$ ) und Maxima ( $Q_{0,95}$ ), hinterlegt. Neben den Arbeiten von Arlt und Pfeiffer (2005) und Ritter (2011) ist insbesondere die detaillierte Studie von Asam et al. (2008) zu nennen, welche in der offiziellen Liste des Bundesamtes für Bauen, Stadtentwicklung und Raumordnung (BBSR) zu Bauteilnutzungsdauern auf dem Online Informationsportal Nachhaltiges Bauen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bauen und Reaktorsicherheit (BMUB) zur Verfügung gestellt wird (BBSR 2009; BMUB 2014). Für einzelne Holzverwendungen, für die sowohl detailliertere Marktdaten als auch Nutzungsdauerangaben vorliegen, sind auch die Ergebnisse weiterer Studien hinterlegt, beispielsweise aus Nebel (2002, S. 14) für Holzböden.

Um aus diesen Informationen die für Deutschland spezifischen Nutzungsdauern ableiten zu können, werden die Bezeichnungen der Holzverwendung aus den Marktinformationen den aus den Bauteilkatalogen entnommenen Bezeichnungen für die Holzverwendung mittels einer detaillierten Zuordnungsliste gegenübergestellt (vgl. Tabelle 5-14).

**TABELLE 5-14:** Beispiele aus der hinterlegten Zuordnungsliste mit Bezeichnungen der Holzverwendung aus Marktinformationen und Bauteilkatalogen

Bezeichnung aus Marktinformation	Bezeichnung aus Bauteilkatalog
NH/Dachkonstruktion/Dachlatten	Dachkonstruktion/geneigtes Dach/Weichholz
NH/Fassaden/Fassadenbekleidung	Außenwände/Bekleidungen/Weichholz
LH/Treppen/Stufen, massiv	Treppen/Treppenstufen/Hartholz
LH/Fußböden/Stabparkett	Decken/Bodenbeläge/Parkettstäbe und Tafeln
HWS/Fußböden/Laminat	Decken/Bodenbeläge/Laminat

In dem Modell werden hierzu aus den Abkürzungen der Halbwarenkategorien Holzwerkstoffe, Laub- und Nadelholz (HWS, LH, NH), sowie den Namen für die Einsatzbereiche und deren jeweilige Verwendung eindeutige Deskriptoren erstellt (s. Abbildung 5-20).

Marktdeskriptoren	Zuordnungsliste	Selected RSL	Quelle
Rüter, München, 05.10.2007	Select	∅	
LH(Erneuerung) FussbödenLandhausdielen, massiv	Bau/Deckenbeläge, Dielen (NH/LH/HWS)	52,5	[5] Nebel et al. (2002)
LH(Erneuerung) FussbödenFertigdielen, mehrsch.	Bau/Deckenbeläge, Fertigparkett (NH/LH/HWS)	35,0	[5] Nebel et al. (2002)
LH(Erneuerung) FussbödenLaminat	Bau/Deckenbeläge, Laminat (HWS)	20,0	[4] Arlt und Pfeiffer (2005)
LH(Erneuerung) FussbödenSonstiges	Bau/Deckenbeläge, Sonstiges (NH/LH/HWS)	26,7	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
LH(Erneuerung) TreppenUnterkonstruktion	Bau/Treppen, Tragkonstruktion (LH)	85,0	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
LH(Erneuerung) TreppenStufen, massiv	Bau/Treppen, Treppenstufen (LH)	35,0	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
LH(Erneuerung) TreppenStufen (Holz)	Bau/Treppen, Treppenstufen (LH)	35,0	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
LH(Erneuerung) TreppenBodentreppe	Bau/Treppen, Tragkonstruktion (LH)	85,0	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
LHGartenausstattungenPalisaden	Bau/Eingangsüberdachung (NH/LH/HWS)	30,0	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
LHGartenausstattungenZaun, Sichtschutz, Tür	Bau/Dachbekleidungen (HWS)	28,3	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
LHGartenausstattungenHolzpfasterwege	Bau/Dachbeläge, Schindeln	20,0	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
LHGartenausstattungenPergola	Bau/Deckenunterkonstruktion (NH/LH)	7,5	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
LHGartenausstattungenGartenhäuschen	Bau/Deckenbekleidungen (NH/LH/HWS)	70,0	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
LHGartenausstattungenCarport	Bau/Deckenkonstruktionen (NH/LH/HWS)	7,5	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
LHGartenausstattungenGaragentore (Holz)	Bau/Fensterrahmen und -flügel (NH)	7,5	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
LHsonst. AusstattungenWintergarten	Bau/Fensterrahmen und -flügel (LH)	28,3	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
	Bau/zäune, sichtschutz, zäuntdüren (LH)	40,0	[1] Asam et al. (2008) / BBSR (2009)
	Bau/Überdachung mit Glas (NH/LH/HWS)		

**ABBILDUNG 5-20:** Screenshot eines Auszugs aus der Zuordnungsliste mit Auswahlmenü der Verwendungsdeskriptoren (Stand Juni 2015)

In manchen Fällen unterscheiden die in der Literatur beschriebenen Nutzungsdauern nicht zwischen Laub- bzw. Nadelholz (Hart- bzw. Weichholz) und die nach Bauteilkatalog fehlende Einordnung wurde gutachterlich vorgenommen. Auch werden in dem Modell aus mehreren Einträgen zu Bauteilen (z. B. Schräg- und Flachdach, gedämmt und ungedämmt) Durchschnittswerte gebildet, um sie den allgemeineren Verwendungsbezeichnungen der Marktdaten zuzuordnen. Dieses Vorgehen scheint vor dem Hintergrund der in Kapitel 5.1.2.3 geführten Diskussion zu den Einflussgrößen auf die tatsächliche Nutzungsdauer von Holzprodukten vertretbar zu sein. Die eigentliche Berechnung der halbwarenspezifischen Nutzungsdauern wird abschließend über die Tabellenmatrix mit den hinterlegten Marktinformationen vorgenommen (vgl. Abbildung 5-19), in der die Verbrauchsmengen der Halbwaren aus dem Jahr 2003 mit den ausgewählten Nutzungsdauern verschnitten werden (s. Abbildung 5-21).





### 5.2.3.1 Berücksichtigung der geerbten Emissionen

Wie in Kapitel 5.1.2.3 dargelegt, kommt der Berechnung der geerbten Emissionen bei der Flussdatenmethode eine relativ große Bedeutung zu. Zwar haben diese bei der Anwendung eines projizierten Referenzwertes als Anrechnungsmodalität keine Auswirkung (s. Tabelle 3-1), doch wirken sich die Annahmen über den historischen Zufluss an Kohlenstoff in den Speicher zur Berechnung der gegenwärtigen Speicherhöhe deutlich auf die Ergebnisse und damit verbundene Unsicherheiten aus. Um diese mit der Berechnung des Kohlenstoffspeichers verbundenen Unsicherheiten einschätzen und minimieren, die Berechnung des Kohlenstoffspeichers gemäß den Anforderungen an eine Berichterstattung durchführen sowie die während der Klimaverhandlungen zu einem Kyoto-Nachfolgeabkommen diskutierten Vorschläge bewerten (vgl. Kap. 3.2.2.4) zu können, wurden folgende Berechnungsvarianten für den historischen Kohlenstoffzufluss implementiert:

- i) Anwendung einer definierten historischen Wachstumsrate der Aktivitätsdaten (vgl. Pingoud *et al.* 2006b, s. Kap. 2.2.3.5 und 4.3)
- ii) Anwendung einer historischen durchschnittlichen Wachstumsrate der Aktivitätsdaten einer frei wählbaren Periode (z. B. 1961-1965)
- iii) Extrapolation der Aktivitätsdaten auf Basis eines Durchschnitts einer frei wählbaren Periode (z. B. 1961-1965, vgl. Rüter 2011a)
- iv) Berechnung der Speicherhöhe zum Zeitpunkt  $t_0$  auf Basis des Durchschnitts der ersten fünf Jahre entweder iv-i) in welchen Aktivitätsdaten zur Verfügung stehen (vgl. Rüter *et al.* 2014, S. 2.121 und Kap. 4.4) oder iv-ii) ab dem Jahr 1990
- v) Keine Berücksichtigung der geerbten Emissionen vor einer Anrechnungsperiode (z. B. 2013, vgl. *emissions to atmosphere* Ansatz, s. Kap. 3.2.2.4 und 5.2.5)

Neben der von Pingoud *et al.* (2006b) vorgesehenen Ermittlung der historischen Emissionen auf Basis einer Wachstumsrate (i), ermöglicht das Modell WoodCarbonMonitor auch die Berechnung der Aktivitätsdatenzeitreihen auf Basis der durchschnittlichen Wachstumsrate (ii). Wie in den Kapiteln 5.1.2.1 und 5.1.2.2 jedoch dargelegt, sind die historischen Zeitreihen zum Holzeinschlag und insbesondere zur Schnittholzproduktion aufgrund statistisch nicht erfasster Holz-mengen mit Unsicherheiten behaftet. In Kombination mit der Annahme einer Wachstumsrate des historischen Holzeinschlags, die von Pingoud *et al.* mit 0,0151 für Europa unterstellt wird und für die Berechnung auf Basis des ersten verfügbaren Aktivitätsdatums (z. B. 1961) für die Holzprodukte übernommen wird, ist davon auszugehen, dass die Unsicherheiten noch weiter zunehmen und der aktuelle Kohlenstoffabfluss unterschätzt wird. Alternativ ermöglicht das Modell daher eine Berechnung des gegenwärtigen Kohlenstoffspeichers unter Annahme eines gleichbleibenden Kohlenstoffzuflusses, der anhand der Durchschnittsmenge der Holzprodukte einer frei wählbaren Periode ermittelt wird (iii).



Um jährliche Schwankungen der Produktions- und des Verbrauchsmengen als Ausgangswert für die Berechnung der fehlenden historischen Zeitreihenwerte auszugleichen, ist als Standard für dessen Berechnung im WoodCarbonMonitor der Durchschnitt der ersten fünf Jahre eingestellt, für welche Daten zur Verfügung stehen, (vgl. Rüter *et al.* 2014 und Kangas und Baudin 2003). Dieses Vorgehen wurde für die Berechnung des historischen Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten erstmalig bei der Berechnung der Referenzwerte gemäß Entscheidung 2/CMP.6 angewandt (Rüter 2011a, S. 7, vgl. Kap. 3.2.2.5).

$$C_{t_0} = \frac{Inflow_{average}}{k} \quad (22)$$

Wobei:

$$Inflow_{average} = \sum_{i=t_0}^{t_4} Inflow(i)/5$$

Um die mit der Anwendung der Funktionsgleichung 11 und langen Nutzungsdauern verbundene Unsicherheiten noch weiter zu reduzieren – bei einer Halbwertszeit von 35 Jahren sind nach einem Zeitraum von 1900 bis 2012 noch immer 7,8 % des Kohlenstoffs gebunden – wurde zudem die Berechnung der Speicherhöhe mittels Funktionsgleichung 22 etabliert (iv), welche die Speicherhöhe als Funktion der Halbwertszeit unter Verwendung der Zerfallskonstante  $k$  (s. S. 64) und des durchschnittlichen Kohlenstoffzuflusses beschreibt (vgl. Rüter *et al.* 2014, S. 2.121).

### 5.2.3.2 Verwendung verschiedener Zerfallsfunktionen

Für die Berechnung der Kohlenstoffabflüsse können folgende Berechnungsmethoden und Zerfallsfunktionen herangezogen werden (vgl. Anhang):

- Kohortenrechnung (s. Kapitel 2.2.3.1)
- Linearer Zerfall (s. Kapitel 2.2.3.2)
- Logistischer Zerfall (s. Kapitel 2.2.3.4)
- Exponentieller Zerfall (i.e. *First Order Decay*, s. Kapitel 2.2.3.5)

Die Anwendung der Zerfallsfunktionen erfolgt in einer Berechnungsmatrix, in der die jeweils in Halbwertszeiten umgerechneten Nutzungsdauerangaben mit den ausgewählten Aktivitätsdaten gemäß den in den jeweiligen Kapiteln vorgestellten Gleichungen implementiert sind.

## 5.2.4 Szenarien und Projektionen

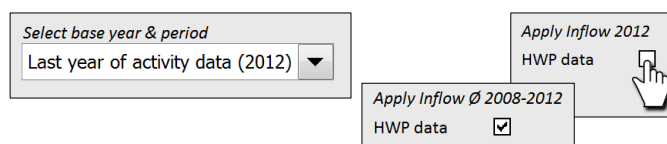
Anders als in vielen bislang entwickelten Modellen zur Berechnung der Kohlenstoffspeicherwirkung in Holzprodukten (s. Kapitel 2) erlaubt das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Mo-

dell WoodCarbonMonitor eine detaillierte Berechnung von Szenarien und Projektionen einer zukünftigen Entwicklung der Netto-Emissionen aus dem Produktspeicher.

Damit eröffnet sich sowohl die Möglichkeit, verschiedene Anrechnungsoptionen zu berechnen und zu bewerten, als auch die Auswirkungen möglicher zukünftiger Entwicklungen des Verbrauchs oder der Produktion von Holzprodukten im Hinblick auf eine Anrechnung zu untersuchen. Folgende Möglichkeiten einer Berechnung zukünftiger Netto-Emissionen sind in dem Modell implementiert:

- Projektionen, auf Basis statistischer Daten zu Holzhalbwaren, berechnet mit Hilfe
  - definierter jährlicher Wachstumsraten,
  - jahresdurchschnittlicher Wachstumsraten eines wählbaren historischen Zeitraums,
  - linearer Trends eines wählbaren historischen Zeitraums;
- Projektionen auf Basis von Szenarien zum zukünftigen Holzeinschlag;
- Szenarien auf Basis von Daten zur zukünftigen Entwicklung von Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren, z. B. aus makroökonomischen Modellen.

Abbildung 5-24 zeigt die Auswahlmenüs für die Projektionen- und Szenarienberechnung mit den für Deutschland hinterlegten Alternativen. Das Modell erlaubt die freie Auswahl eines Zeitraums, für den die Projektion erstellt und angezeigt werden sowie auf welchem Ausgangsjahr die Berechnung beruhen soll. Dabei stehen das Jahr 2000, 2009 (Jahr der Entscheidung 2/CMP7 zu Referenzwert-Projektionen), das Jahr 2012 (Jahr vor dem Start der zweiten Verpflichtungsperiode) und das letzte Jahr der jeweiligen Zeitreihe zur Wahl, für welche die tatsächlichen Werte aus der Statistik oder, ähnlich wie bei der Ermittlung des historischen Kohlenstoffspeichers (s. Kap. 5.2.3.1), ein gewählter Durchschnittswert eines frei definierbaren Zeitraums angenommen wird. Um die mit den jährlichen Schwankungen der Produktion und des Verbrauchs verbundenen Unsicherheiten auszugleichen, bezieht sich die Berechnung im WoodCarbonMonitor auch bei der Abschätzung zukünftiger Netto-Emissionen aus dem Produktspeicher als voreingestelltem Standard auf die je nach gewähltem Berechnungsansatz ermittelte durchschnittliche Kohlenstoffmenge aus den Aktivitätsdaten der letzten verfügbaren fünf Jahre (vgl. Kangas und Baudin 2003; Rüter 2011a). Enthält ein Datensatz also Zeitreihen bis zum Jahr 2012 und der *stock-change* Ansatz wurde als Systemgrenze ausgewählt, basiert die Berechnung auf dem durchschnittlichen Verbrauch der Jahre 2008 bis 2012 (s. Abbildung 5-23).



**ABBILDUNG 5-23:** Screenshot der für die Auswahl der Ausgangsdaten für die Berechnung von Projektionen relevanten Daten (Stand Dezember 2015)

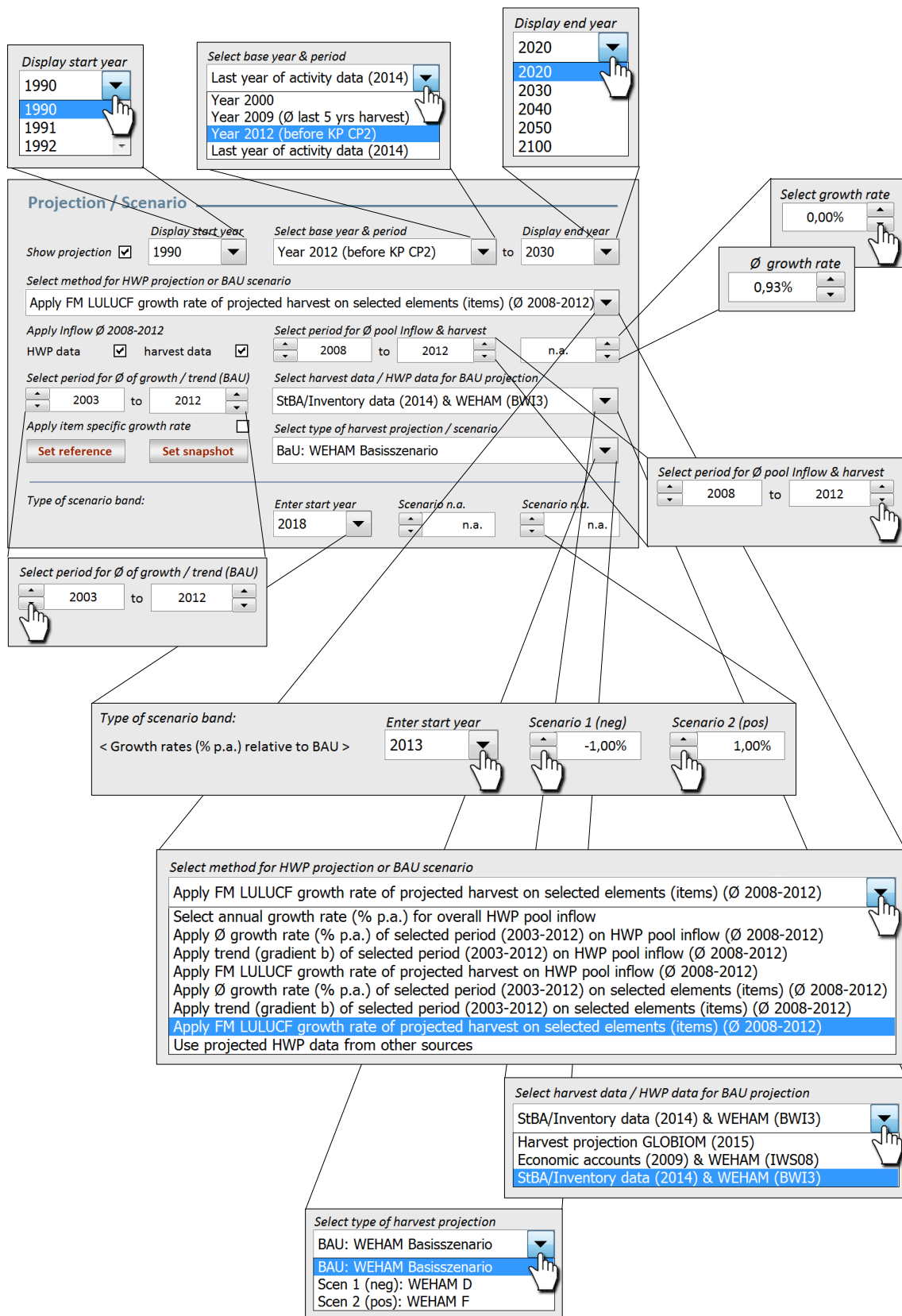


ABBILDUNG 5-24: Screenshot der Auswahlmenüs zu den für die Berechnung von Projektionen und Szenarien relevanten Steuerungsparametern für Deutschland (Stand Dezember 2015)

Dabei kann die Berechnung sich wahlweise entweder auf den ermittelten Kohlenstoffzufluss (*HWP pool inflow*) oder auf die ursprünglichen Aktivitätsdaten (*selected items*) beziehen.

Neben der Bestimmung einer Hauptprojektion können unter Auswahl eines weiteren Basisjahres, welches in dem gewählten Projektionszeitraum liegt, zwei weitere Projektionen ab dem gewählten Zeitpunkt gerechnet werden, um mit diesem Szenarienfächer die möglichen Auswirkungen einer von der Hauptprojektion abweichenden Entwicklung, z. B. auf die Ergebnisse einer Anrechnung von Holzprodukten, abzubilden. Die Wachstumsraten werden dabei in Abhängigkeit von der gewählten Projektionsmethode des Hauptszenarios entweder als absolute Werte oder in Relation zu dem definierten Steuerungsparameter ausgewählt (vgl. Abbildung 5-24).

#### 5.2.4.1 Erstellung von Projektionen auf Basis vorhandener Daten zu Holzhalbwaren

Einfache Projektionen auf Basis einer in der Vergangenheit zu beobachtenden Entwicklung können lediglich zur Abschätzung und Einordnung möglicher Auswirkungen auf die Kohlenstoffspeicherwirkung und ihre Anrechnung dienen. Kurzfristige Schwankungen oder wirtschaftliche Veränderungen können und sollen mit diesen Projektionen nicht abgebildet werden. Sie basieren entweder auf jahresdurchschnittlichen Wachstumsraten oder einfachen linearen Trends, die sowohl für jede einzelne Zeitreihe eines Holzproduktes (z. B. für *1646prod*) als auch für das gesamte jeweilige Element (Produktion, Import, Export und Verbrauch) ermittelt werden kann.

Die Bestimmung einer jahresdurchschnittlichen Wachstumsrate, die dem geometrischen Mittel der Wachstumsfaktoren abzüglich Eins entspricht, wird für alle Zeitreihen und eine gewählte historische Periode mit Hilfe der Gleichung 23 durchgeführt (vgl. Hüpen 2002).

$$\bar{p} = \sqrt[n]{(1 + p_1) \cdot (1 + p_2) \cdots (1 + p_n)} - 1 \Leftrightarrow \bar{p} = \left[ \prod_{t=1}^n (1 + p_t) \right]^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (23)$$

Wobei:

$\bar{p}$  = jahresdurchschnittliche Wachstumsrate

$n$  = Anzahl der Jahre der gewählten historischen Zeitreihe

Die Auswahl des Zeithorizonts der historischen Zeitreihe, die zur Bestimmung einer jahresdurchschnittlichen Wachstumsrate  $\bar{p}$  oder des Regressionskoeffizienten  $b$  (Steigung) herangezogen wird, die sogenannte Stützperiode, hat einen großen Einfluss auf den Verlauf der Projektion. Grundsätzlich sollte sie sowohl eine angemessene Länge als auch Aktualität haben und ist in dem Modell standardmäßig auf die letzten zehn Jahre eingestellt. Die Berechnung eines einfachen linearen Trends erfolgt nach Funktionsgleichung 24.

$$y_i = a + bt_i \quad \text{für } i = 1, \dots, n \quad (24)$$

*Wobei:*

$y_i$  = projizierte Kohlenstoffmenge eines Produkts oder Elements der gewählten Zeitreihe

$b$  = Steigung des Trends

$t_i$  = Jahr in der Stützperiode

$n$  = Anzahl der Jahre der gewählten historischen Zeitreihe (Stützperiode)

#### 5.2.4.2 Erstellung von Szenarien auf Basis der Entwicklung des Holzeinschlags

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung des in der Zukunft liegenden Netto-Emissionsbeitrags von Holzprodukten bietet die Kopplung der Holzproduktzeitreihen an Daten zum zukünftigen Holzeinschlag. Auf Basis eines geschätzten Holzaufkommenspotentials kann sowohl der potentielle Beitrag von Holzprodukten aus heimischem Einschlag geschätzt als auch die möglichen Auswirkungen unterschiedlicher Waldbewirtschaftungsregime und ein damit einhergehendes geändertes Holzaufkommen auf die Produktspeicher untersucht werden (vgl. Kap. 2.2.1). Insbesondere für eine konsistente Umsetzung der Anrechnungsregeln für Holzprodukte, wie sie für die zweite Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls beschlossen wurde, ist eine Verknüpfung der Halbwaredaten mit vorhandenen Projektionen zum zukünftigen Holzeinschlag des anrechnenden Landes notwendig (s. Kap. 3.2.2.3 ff.).

Da eine detaillierte Nachverfolgung der Holzströme entlang der Verarbeitungskette für die Abschätzung des Kohlenstoffzuflusses in den Produktspeicher nicht notwendig und, wie in Kapitel 5.1.2.1 detailliert beschrieben, zudem mit zahlreichen Unsicherheiten verbunden ist, kann für die Erstellung von Projektionen auf Basis des Holzeinschlags der Einfachheit halber angenommen werden, dass die entsprechenden Rohholzsortimente eines Landes nach den gleichen Mustern bei der Weiterverarbeitung zu Holzhalbwaren wie in der Vergangenheit verwendet werden (vgl. Rüter 2011a).

Damit wird für den projizierten Zeitraum zugleich unterstellt, dass sich an der Struktur und dem Anteil des Außenhandels an den verbrauchten Rohholzmengen nichts ändert. Um die jährlichen Schwankungen dieses Verhältnisses auszugleichen, fließen, ebenso wie bei der Abschätzung von Projektionen auf Basis des Trends oder jahresdurchschnittlicher Wachstumsraten, die arithmetischen Mittel der letzten fünf verfügbaren Jahre der Zeitreihen in die Berechnung ein (vgl. Rüter *et al.* 2014, S. 2.130). Neben der Möglichkeit, die notwendigen Datenreihen zum Holzeinschlag in Fünfjahresperioden oder mit jährlicher Auflösung zu hinterlegen, enthält das Modell WoodCarbonMonitor auch entsprechende Schnittstellen zur Abschätzung möglicher Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien über die Nutzungsintensität von Wäldern auf die Netto-Emissionen des Produktspeichers.

### Holzeinschlagsprognosen aus der „Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung“ für Deutschland (WEHAM)

Für Deutschland lassen sich mit dem Simulationsmodell WEHAM (Abk. für Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung) Holzeinschlagsprognosen auf Basis von Informationen aus den für Deutschland vorliegenden Waldinventurinformationen berechnen. Das von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg erstellte Programm ermittelt das potenzielle und nachhaltig nutzbare Rohholzaufkommen für einen Prognosezeitraum von 40 Jahren und liefert nach Holzarten-, Eigentümer- und Sortengruppen, Bundesländern und anderen regionalen Einteilungen gegliederte Ergebnisse (Bösch 2005). Die auf Basis der in der BWI1 und BWI2 (vgl. Kap. 5.2.1.1) ermittelten Zeitreihen wurden zunächst im Jahr 2009 auf Grundlage der Ergebnisse der Inventurstudie aus dem Jahr 2008 (IS 08) aktualisiert (Schmitz *et al.* 2005; Dunger und Rock 2009). Die Berechnungsergebnisse liegen in Fünfjahresschritten als Durchschnittswerte in Vorratsfestmeter mit Rinde vor. Hierfür wurden in dem in WEHAM integrierten Teilmodell ‚Nutzung‘ zahlreiche waldbauliche Steuerparameter zusammen mit Experten der Landesforstverwaltungen erarbeitet.

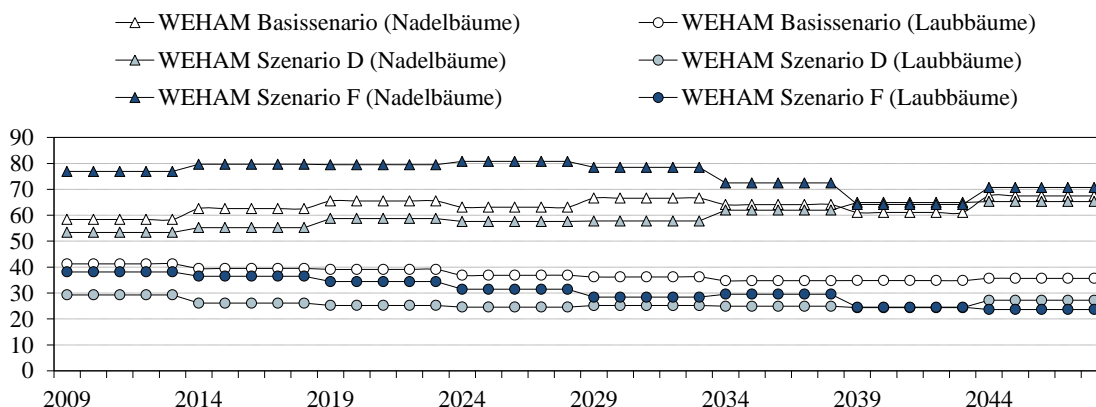


ABBILDUNG 5-25: Holzeinschlagsprognosen nach WEHAM (Stand 2009) [in Mio. Vfm m.R.]

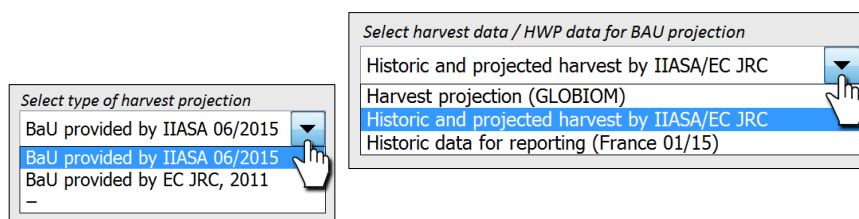
Während das ‚Basisszenario‘ dazu dient, die erwartete Waldbewirtschaftung auf Basis der herrschenden waldbaulichen Konzepte im Landeswald abzuschätzen, soll mit den beiden anderen Szenarien ein Potentialfächer aufgezeigt werden (Abbildung 5-25). Dabei beschreibt das Szenario F eine stärkere Holznutzung unter Absenkung der Holzvorräte und Szenario D einen Aufbau der Holzvorräte, was jeweils durch eine angenommene Verkürzung bzw. Verlängerung der Umtriebszeiten gegenüber dem Basisszenario in der Berechnung umgesetzt wird.

Im Jahr 2012 wurde eine dritte Bundeswaldinventur (BWI2012) durchgeführt, auf deren Basis das WEHAM Basisszenario wiederholt an die neuen Informationen angepasst wurde (Rock *et al.* 2013; BMEL 2014; BMEL 2015, Dunger 2015). Diese Zeitreihen wurden ebenfalls in dem Modell hinterlegt, so dass auf Basis der aktualisierten Daten der Inventur die nachträgliche

technische Korrektur des Referenzwertes für Holzprodukte durchgeführt werden kann (vgl. Kap. 3.2.2.6 und 4.4).

### Projektionsdaten zum Holzeinschlag aus den Modellen GLOBIOM und EFISCEN

Neben den nationalen Informationen über den Holzeinschlag aus dem WEHAM Modell wurden auch verfügbare Informationen über den zukünftigen Holzeinschlag für weitere Länder hinterlegt, um deren Beitrag des Holzproduktespeichers zum Referenzwert auf Basis der zu diesem Zeitpunkt beschlossenen Regeln zu berechnen (vgl. Kapitel 3.2.2.5). Die aus dem partiellen Gleichgewichtsmodell zur globalen Landnutzung GLOBIOM des *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) und dem vom *European Forest Institute* (EFI) betriebenen Modell EFISCEN (*European Forest Information Scenario Model*) stammenden Holzeinschlagsprojektionen liegen mit einer zeitlichen Auflösung von Fünfjahresperioden vor und wurden zu diesem Zweck von der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (*Joint Research Centre*, Abk. JRC) kalibriert und aufbereitet (European Commission Joint Research Centre 2010; vgl. UNFCCC 2014b). Beispielhaft für ein entsprechendes Auswahlmenü zur Berechnung der Netto-Emissionen für Frankreich zeigt Abbildung 5-26.



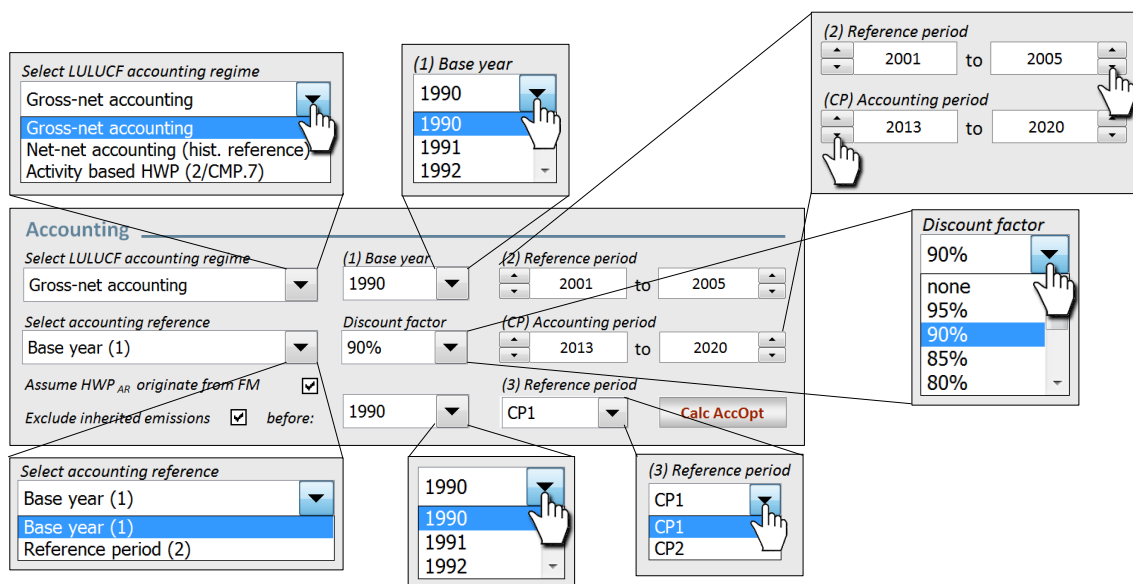
**ABBILDUNG 5-26:** Screenshot der Auswahlmenüs zur Berechnung der Netto-Emissionen für Frankreich (Stand Dezember 2015)

#### 5.2.4.3 Berechnung zukünftiger Netto-Emissionen auf Basis von Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren aus anderen Modellen

Um für die Berechnung des Beitrags von Holzprodukten auch Projektionen und Szenarien zur zukünftigen Entwicklung von Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren aus anderen Modellen verwenden zu können (z. B. makroökonomische Gleichgewichtsmodelle), enthält das Modell WoodCarbonMonitor entsprechende Schnittstellen, die ebenfalls über das Auswahlmenü angesteuert werden können („Use of projected data from other sources“, vgl. Abbildung 5-24). Sofern diese Option ausgewählt wird, rechnet das Modell direkt mit diesen hinterlegten Zeitreihen für die projizierten Rohstoff- und Halbwarenmengen (vgl. Tabelle 5-10) weiter.



## 5.2.5 Wahl der LULUCF Anrechnungsoptionen



**ABBILDUNG 5-27:** Screenshot der Auswahlmensüs zu Berechnungsmethoden des Kohlenstoffspeichers im WoodCarbonMonitor (Stand Dezember 2015)

Für alle in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Berechnungsmethoden kann der Beitrag der Holzprodukte in Abhängigkeit folgender im WoodCarbonMonitor implementierter LULUCF Anrechnungsoptionen ermittelt werden (Abbildung 5-27, vgl. Kap. 3.1):

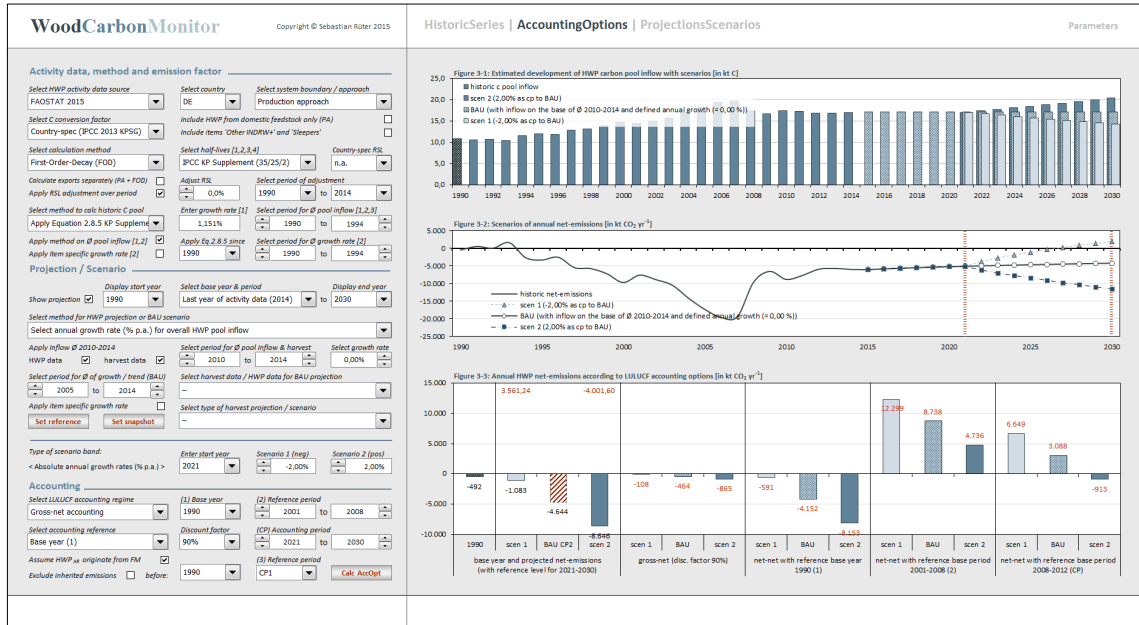
- Brutto/netto-Anrechnung mit frei wählbarer Anrechnungsperiode;
- Netto/netto-Anrechnung, entweder mit:
  - frei wählbarem Basisjahr, oder
  - frei wählbarer Basisperiode;
- Für beide dieser Anrechnungsoptionen kann ein Diskontierungsfaktor (*discount factor*) angenommen werden.
- Anrechnung mit einem projizierten Referenzwert für eine frei wählbare Anrechnungsperiode in der Zukunft.

Da während der Verhandlungen mehrere Varianten für die Referenzperiode unter einem Netto/netto-Ansatz diskutiert wurden, kann je nach gewähltem Projektions- und Anrechnungszeitraum zudem die erste bzw. zweite Verpflichtungsperiode als Referenzzeitraum gewählt werden (1998-2012 bzw. 2013-2020).

Zunächst müssen für eine Abschätzung der Auswirkungen der LULUCF Anrechnungsoption die Berechnungsmethode und der Berechnungsansatz für den Produktspeicher gewählt werden.



Um den möglichen Beitrag der Holzprodukte zur Anrechnung unter der jeweiligen Anrechnungsoption zu ermitteln, muss zudem die Projektionsmethode gewählt werden.



**ABBILDUNG 5-28:** Screenshot der Steuerungsoberfläche des WoodCarbonMonitor, hier: Anrechnungsoptionen (Stand Dezember 2015)

Sollen, wie in Abbildung 5-28 dargestellt, die Ergebnisse verschiedener Anrechnungsmöglichkeiten miteinander verglichen werden, können im WoodCarbonMonitor auf Basis der verfügbaren Daten zu Holzhalbwaren (vgl. Kap. 5.2.4.1) ein Hauptszenario definiert und zwei hiervon abweichende Szenarien gewählt werden (z. B. ein im Vergleich zum Hauptszenario höheres bzw. niedrigeres jährliches Wachstum in %). Dieser Szenarienfächer ermöglicht so die Ermittlung möglicher quantitativer Auswirkungen der Anrechnungsoptionen.

Um die tatsächliche Entwicklung des Produktspeichers und deren Auswirkung auf die Anrechnung mittels eines Referenzwertes fortlaufend kontrollieren zu können, ermöglicht das Modell auch Vergleichsrechnungen von Projektionen, die mit unterschiedlichen Methoden erstellt wurden. So kann die Referenzwertprojektion auf Basis des Holzeinschlags (Kap. 5.2.4.2), wie sie aus Konsistenzgründen für eine Anrechnung für die zweite Verpflichtungsperiode festgelegt wurde, festgeschrieben werden und anschließend mit Trendrechnungen mittels der zuletzt verfügbaren Daten zur Produktion von Holzprodukten (Kap. 5.2.4.1) verglichen werden.



## 6 MODELLERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die mit dem Modell WoodCarbonMonitor erzielten Ergebnisse werden in diesem Kapitel getrennt voneinander nach Haupteinflussgrößen vorgestellt und diskutiert. Dabei lassen sich entsprechend der Modellbeschreibung vier mit der Berechnung der Kohlenstoffspeicherwirkung in Holzprodukten verbundene Aspekte unterscheiden (vgl. Kap. 5.2): die gewählten Systemgrenzen bei der Berechnung des Produktspeichers, die angewandten Berechnungsparameter, die Abschätzung zukünftiger durch die stoffliche Holznutzung verursachter Netto-Emissionen und schließlich die Auswirkungen der Anrechnungsmodalitäten im gesamten LULUCF-Sektor.

Die Ergebnisdarstellung beginnt in Kapitel 6.1 mit historischen Zeitreihen, die unter Verwendung unterschiedlicher Systemgrenzen gerechnet wurden, welche je nach gewähltem Ansatz zur Berechnung des Produktspeichers mittels Flussdatenmethode unterschiedliche Holzmengen berücksichtigen und sich damit am deutlichsten voneinander unterscheiden. Die Ergebnisse beziehen sich somit vornehmlich auf die politische Dimension der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten und die im Kapitel 3.2 thematisierte Frage nach dem ‚richtigen‘ Ansatz zu seiner Berechnung.

Kapitel 6.2 stellt Ergebnisse der Anwendung unterschiedlicher Berechnungsparameter vor und analysiert die Sensitivität der mit ihnen ermittelten Zeitreihen. Die Ergebnisse basieren dabei auf der in Kapitel 5.1 diskutierten und im WoodCarbonMonitor umgesetzten Berechnungsmethodik.

Um, wie in Kapitel 5.2.4 beschrieben, die Auswirkungen unterschiedlicher Berechnungsansätze für den Produktspeicher und in der politischen Diskussion vorgeschlagene Anrechnungsoptionen, deren Ergebnisse in Kapitel 6.4 thematisiert werden, überhaupt berechnen zu können, stellt das Kapitel 6.3 zunächst die Ergebnisse für die mit dem WoodCarbonMonitor berechenbaren Projektionen und Szenarien vor.

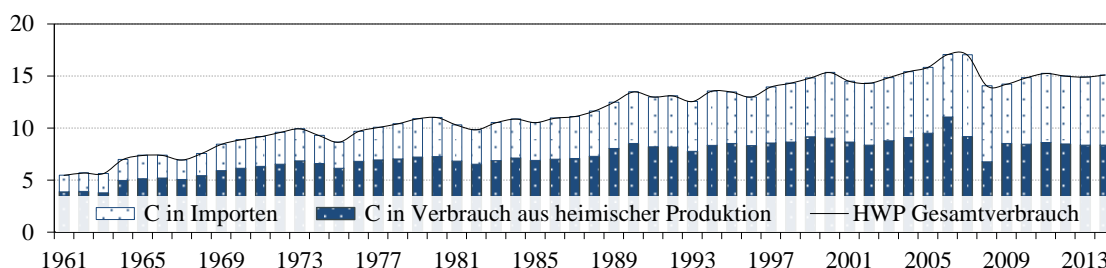
In dem Berechnungsmodell wurden neben den für die Berechnung notwendigen Rohdaten für Deutschland auch die Daten für viele weitere Länder hinterlegt (s. Kap. 5.2.1.2). Somit kann mit dem WoodCarbonMonitor eine Abschätzung des Beitrags der stofflichen Holznutzung nicht nur für Deutschland durchgeführt werden. Da das Ziel der Arbeit jedoch die fundierte Darstellung der Kohlenstoffspeicherwirkung für Deutschland ist, sich die Auswahl der in dem Modell implementierten Berechnungsmethodik daher vornehmlich nach der Verfügbarkeit von Daten für Deutschland richtet (vgl. Kap. 1.2 und 5.1) und die Abbildung der Ergebnisse auch aller weiteren im Modell hinterlegten Länder den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, werden hier nur die ermittelten Schätzungen für Deutschland vorgestellt.

## 6.1 WAHL DES BERECHNUNGSANSATZES FÜR HOLZPRODUKTE

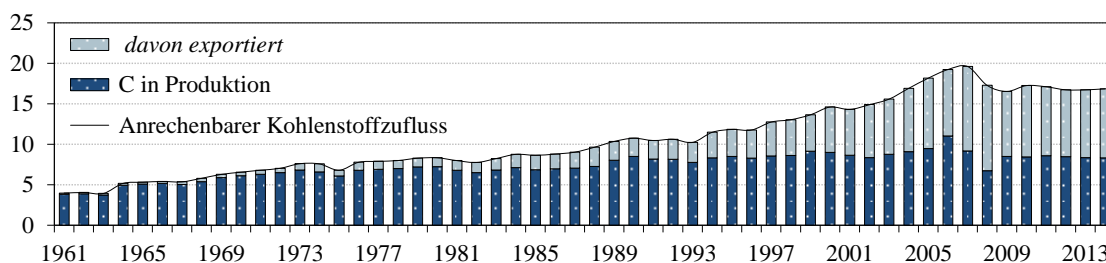
Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, hat die Wahl der Systemgrenzen einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe und Dynamik der in den Speicher eingehenden Kohlenstoffmengen. Zugleich ist die Zuordnung der Speicherwirkung zu einem hierfür verantwortlichen Staat eine politische Frage. Daher konzentriert sich dieses Kapitel zunächst auf die Ergebnisse bei der Verwendung der verschiedenen Berechnungsansätze für Holzprodukte.

### 6.1.1 Kohlenstoffzufluss

In Abhängigkeit von dem gewählten Ansatz errechnen sich die Aktivitätsdaten aus den vorliegenden Datenreihen zu Produktion und Außenhandel (Kap. 3.2 und 5.2.1.2). Um die Unterschiede der Kohlenstoffzuflüsse zwischen den Ansätzen für Deutschland abzubilden, wurden bei der nachfolgenden Ergebnisdarstellung die Daten der FAO in Kombination mit den Umrechnungsfaktoren des *2013 KP Supplement* verwendet. Die Zeitreihen umfassen die Jahre 1961 bis 2013.

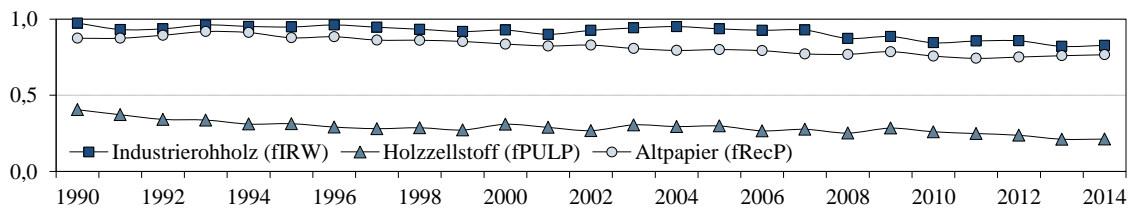


**ABBILDUNG 6-1:** Kohlenstoffzufluss nach *stock-change* Ansatz, unterschieden nach Importen und heimischem Verbrauch der Produktion (Stand Dezember 2015) [in Mt C]



**ABBILDUNG 6-2:** Kohlenstoffzufluss nach Produktionsansatz mit Abschätzung der Kohlenstoffmengen aus heimischem Einschlag (Stand Dezember 2015) [in Mt C]

Während sich für den *stock-change* (Abbildung 6-1) und Produktionsansatz (Abbildung 6-2) die für die Abschätzung des Beitrags in Holzprodukten zu berücksichtigten Kohlenstoffzuflüsse ausschließlich über die Daten zu Produktion und Außenhandel der jeweiligen Halbwarenkategorien ermitteln lassen, wird beim aktivitätsbasierten Ansatz nach Entscheidung 2/CMP.7 nur der aus heimischem Einschlag stammende Kohlenstoff berücksichtigt. Wie im *2013 KP Supplement* festgelegt, wird hierzu auf Basis der im WoodCarbonMonitor hinterlegten Daten mit Hilfe der Gleichung 19 (Kap. 5.2.1.4) der jährliche heimische Rohstoffanteil für Deutschland berechnet (Abbildung 6-3).



**ABBILDUNG 6-3:** Jährlicher Rohstoffanteil aus heimischer Produktion  $f_R(i)$  der im Modell berücksichtigten Rohstoffkategorien

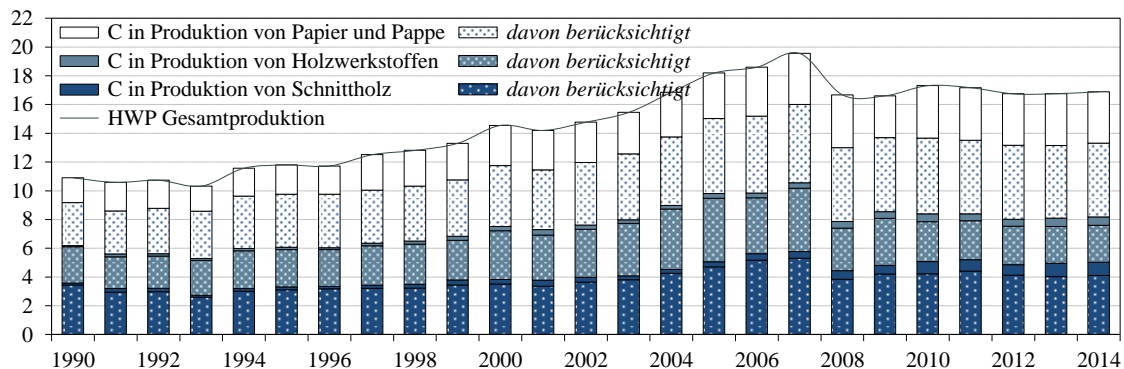
Da nach den Vorgaben für die zweite Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls Holzprodukte aus Entwaldung auf Basis einer sofortigen Emission berücksichtigt werden müssen (Kap. 3.2.1.1), ist zudem eine Zuordnung der eingeschlagenen Kohlenstoffmengen zu den im Kyoto-Protokoll definierten Aktivitäten im Waldbereich vorzunehmen. Für Deutschland lässt sich der Holzeinschlag der Landnutzungsklasse ‚Verbleibende Waldfläche‘ bzw. der Kyoto-Aktivität Waldbewirtschaftung und Flächen, die von Wald in andere Landnutzungsarten umgewandelt werden (Landnutzungsänderung) bzw. der entsprechenden Kyoto-Aktivität Entwaldung zuordnen (s. Kap. 5.2.1.1). In Tabelle 6-1 sind als Ergebnis der für Deutschland verfügbaren Inventurinformationen und der Gleichung 18 die jährlichen Holzeinschlagsanteile aus der Aktivität Waldbewirtschaftung  $f_{FM}(i)$  bzw. aus der Landnutzungsklasse ‚Verbleibende Waldfläche‘ abgebildet.

**TABELLE 6-1:** Jährlicher Anteil des Einschlags aus verbleibenden Waldflächen bzw. der Aktivität Waldbewirtschaftung

Zeitraum	$f_{FM}(i)$
1990 – 2002	0,98989
2003 – 2007	0,99202
2008 – 2012	0,98881

Auf Basis der im Modell hinterlegten Daten zu Produktion und Außenhandel (vgl. Abbildung 5-16) und den ermittelten Rohstoffanteilen aus heimischer Produktion aus der Aktivität Waldbewirtschaftung (Abbildung 6-3 und Tabelle 6-1) errechnet sich der in Abbildung 6-4 abgebil-

dete und nach Entscheidung 2/CMP.7 berücksichtigungsfähige, d. h. anrechenbare jährliche Kohlenstoffzufluss in den Holzproduktespeicher.



**ABBILDUNG 6-4:** Kohlenstoff in produzierten Holzhalbwaren und davon berücksichtigter Kohlenstoffzufluss nach aktivitätsbasiertem Ansatz (2/CMP.7) (Stand Dezember 2015) [in Mt C]

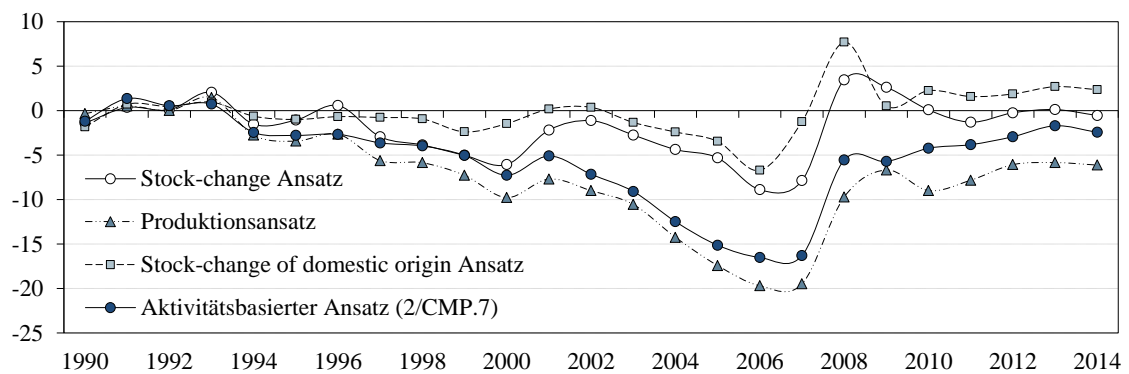
Wie beschrieben, können je nach Fragestellung und Ziel der Analyse mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Berechnungsmodell die gewünschten Systemgrenzen gewählt werden. Stellt sich die Frage nach dem durch die gesamte stoffliche Holznutzung innerhalb eines Landes hervorgerufenen Effekt auf die biogene Treibhausgasbilanz, ist der *stock-change* Ansatz zu wählen, welcher den gesamten Holzverbrauch innerhalb eines Landes berücksichtigt.

Für die Umsetzung der Beschlüsse von Durban zur Berücksichtigung des Holzproduktespeichers ist hingegen der aktivitätsbasierte Ansatz zu wählen. Dieser Berechnungsmodus ist demnach für die jährliche Treibhausgasberichterstattung unter dem Kyoto-Protokoll auszuwählen. Hierdurch kann sich die bei der Berechnung berücksichtigte Kohlenstoffmenge zwar deutlich reduzieren – insbesondere wenn, wie im Fall von Deutschland, ein Großteil des für die Produktion von Papier benötigten Zellstoffs importiert wird. Entscheidend sind bei der Verwendung dieses Ansatzes jedoch das Zusammenspiel des Produktspeichers mit der Kohlenstoffspeicherung des Waldes sowie die Wirkung der Holznutzung auf die Gesamtbilanz des Sektors und die mit einer Anrechnung verbundenen Möglichkeit der Politik, den Beitrag des Sektors zum Klimaschutz zu stabilisieren bzw. zu fördern.

Stellt sich die Frage nach dem Beitrag der heimischen Holznutzung auf die Kohlenstoffbilanz, welche ausschließlich durch die heimische Nachfrage nach Holz entsteht, so ist auffällig, dass dieser Produkt- bzw. Kohlenstoffanteil (in den Abbildungen 6-1 und 6-2 jeweils dunkelblau dargestellt) über die Zeit relativ konstant geblieben ist. Der Anteil der gehandelten Holzhalbwaren hat jedoch kontinuierlich zugenommen, er ist erst mit der durch die Finanzkrise 2007 ausgelösten Wirtschaftskrise leicht zurückgegangen und hat sich seitdem stabilisiert. Zugleich zeigt die für den aktivitätsbasierten Ansatz notwendige jährliche Berechnung der Rohstoffanteile aus heimischem Einschlag (s. Abbildung 6-3), dass auch die bei der Herstellung der Holzhalbwaren verwendeten Rohstoffe immer öfter aus Importen stammen.

## 6.1.2 Ermittelte Netto-Emissionen

Aus dem je nach Systemgrenze ermittelten Kohlenstoffzufluss errechnet sich in Kombination mit der gewählten Zerfallsfunktion zunächst die im Produktspeicher enthaltene Kohlenstoffmenge. In einem zweiten Schritt werden über die jährliche Veränderung des Speichers die Netto-Emissionen abgeschätzt. Für die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse wurden die exponentielle Funktionsgleichung 11 und die Default-Halbwertszeiten und Kohlenstoffumrechnungsfaktoren des *2013 KP Supplement* verwendet. Zudem wurde die Berechnung der geerbten Emissionen für die in diesem Abschnitt gezeigten Ergebnisse mit der Funktionsgleichung 22 und  $t_0 = 1990$  vorgenommen.

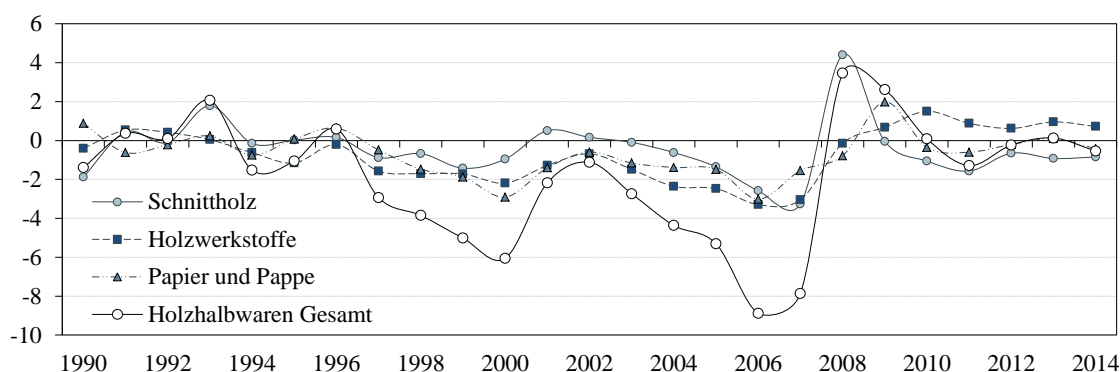


**ABBILDUNG 6-5:** Vergleich der geschätzten Netto-Emissionen des Holzproduktespeichers für verschiedene Berechnungsansätze (Stand Oktober 2015) [in Mt CO<sub>2</sub>]

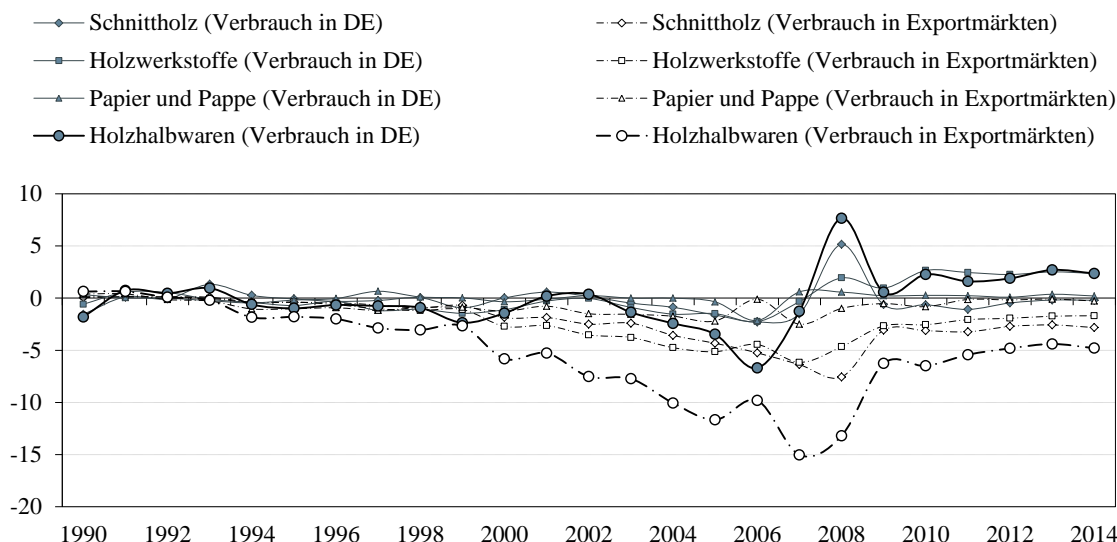
Abbildung 6-5 stellt die ermittelten Netto-Emissionszeitreihen für die vier im WoodCarbonMonitor implementierten Berechnungsansätze dar. Wie zu erwarten, bedingt die nach dem Produktionsansatz berechnete Speicherentwicklung die größte Senkenwirkung, da die Produktion von Holzhalbwaren in der Vergangenheit aufgrund des zunehmenden Exports am dynamischsten gewachsen ist (vgl. Abbildung 6-2). Zwar nahm aufgrund des wirtschaftlichen Einbruchs die Produktionsmenge in den Jahren 2007 und 2008 deutlich ab, doch konnte der im Jahr 2008 unter das Niveau der Vorjahre sinkende Verbrauch von Produkten aus heimischem Einschlag durch eine weitere Steigerung der Exporte abgemildert werden. Dies zeigt sich auch im Vergleich zu den Ergebnissen der Ansätze, die die Kohlenstoffmengen in exportierten Holzhalbwaren nicht umfassen. Betrachtet man lediglich die im Land verbleibende Teilmenge der aus heimischem Einschlag hergestellten Produkte (*stock-change of domestic origin* Ansatz), ist der Produktspeicher seit den Jahren 2007 und 2008 sogar zur Quelle biogenen Kohlenstoffs geworden, da sich der Kohlenstoffzufluss zwar einigermaßen stabilisiert hat, aber bislang nicht an die vor der Krise berücksichtigbaren Mengen anschließen konnte. Bei der Abschätzung der durch alle in Deutschland verwendeten Produkte verursachten Speicherwirkung wird deutlich, dass

sich der Speicher nahezu im Fließgleichgewicht befindet, da seit dem wirtschaftlichen Einbruch der jährliche Verbrauch von Holz stagniert (vgl. Kap. 3.2.1.1).

Für eine genauere Analyse der Treiber der Netto-Emissionsentwicklung kann die Ergebnisdarstellung im WoodCarbonMonitor nach Produktgruppen bzw. dem im In- bzw. Ausland auftretenden Speichereffekt unterschieden werden. Abbildung 6-6 stellt die mit dem Modell mögliche Differenzierung für den *stock-change* Ansatz dar. Daraus geht hervor, dass neben dem deutlichen Einbruch des Schnittholzverbrauchs im Jahr 2008 vor allem der andauernde Rückgang des Verbrauchs von Holzwerkstoffen (insbesondere Spanplatten) für die Abnahme der Senkenwirkung des Produktspeichers verantwortlich ist.



**ABBILDUNG 6-6:** Netto-Emissionen des Holzproduktespeichers in Deutschland, berechnet auf Basis des gesamten heimischen Verbrauchs (*stock-change* Ansatz), (Stand Oktober 2015) [in Mt CO<sub>2</sub>]



**ABBILDUNG 6-7:** Netto-Emissionen des aus heimischem Einschlag produzierten Holzproduktespeichers nach Produktgruppen und Verbrauchsort (aktivitätsbasierter Ansatz nach 2/CMP.7), (Stand Oktober 2015) [in Mt CO<sub>2</sub>]



Dieser Effekt zeigt sich auch in der Analyse des Ergebnisses für den aktivitätsbasierten Berechnungsansatz, auf den sich die Staatengemeinschaft unter dem Kyoto-Protokoll geeinigt hat (Abbildung 6-7). Bei der Unterscheidung der Beiträge zur Treibhausgasbilanz der im In- und Ausland verwendeten Produktkategorien wird deutlich, dass vor allem der Rückgang des heimischen Verbrauchs von Holzwerkstoffen bzw. Spanplatten zur Abschwächung der in den Jahren vor der Wirtschaftskrise deutlichen Senkenwirkung geführt hat.

## 6.2 ANALYSE DER BERECHNUNGSPARAMETER

Inhalt dieses Kapitels ist die Analyse der in den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.3 vorgestellten Berechnungsparameter des Modells und ihrer Auswirkungen auf die abgeschätzten Netto-Emissionszeitreihen.

### 6.2.1 Ergebnisse zu Aktivitätsdaten

Für die Darstellung der Ergebnisse bei der Verwendung verschiedener Datenquellen wird unterschieden zwischen den Daten zum Holzeinschlag bzw. den Informationen über die verwendeten Rohstoffe, die zur Abschätzung der aus heimischen Wäldern stammenden Kohlenstoffmengen dienen (Kap. 5.2.1.4), und den eigentlichen Aktivitätsdaten, welche zur Berechnung der Speicherentwicklung in Holzprodukten auf Basis der in Kapitel 5.2.3 diskutierten Methoden verwendet werden. Daneben haben insbesondere die Kohlenstoffumrechnungsfaktoren einen großen Einfluss auf die bei der Abschätzung berücksichtigten Kohlenstoffmengen, der im Abschnitt 6.2.1.3 analysiert wird.

#### 6.2.1.1 Daten zum Holzeinschlag und zur Rohstoffbereitstellung

Wie bereits im Abschnitt 6.1.1 vorgestellt, basiert die Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten aus heimischer Produktion auf Daten zu Produktion und Außenhandel der im Modell hinterlegten Rohstoffkategorien Industrierohholz, Holzzellstoff und Altpapier.

Anders als bei der Berücksichtigung der nur in Deutschland hergestellten Rohstoffe wirkt sich die mit Entscheidung 2/CMP.7 beschlossene Nichtberücksichtigung von Holz aus der Kyoto-Aktivität Entwaldung kaum auf die Höhe der berechneten Netto-Emissionen aus: während sich im Vergleich zum Produktionsansatz die durch die Vergrößerung des Holzproduktespeichers zu verzeichnende Senkenwirkung der letzten zehn Jahre bei der Berücksichtigung nur von Produkten aus heimischen Rohstoffen um 32,2 % reduziert (vgl. Abbildung 6-5), verringert sie sich im gleichen Zeitraum um nur 30,9 %, wenn zusätzlich nur Holz aus der Aktivität Waldbewirtschaftung berücksichtigt wird. Würde Holz aus Entwaldung bei Berechnung der Speicherwirkung also einbezogen, ergäbe sich ein geringerer Senkeneffekt. Die Ursache für dieses auf den ersten Blick widersprüchliche Ergebnis liegt in der Schwankung verfügbarer Holz mengen aus der Ak-

tivität Entwaldung (vgl. Kap. 5.2.1.1), deren Muster den Effekt einer Verringerung der berücksichtigbaren Holzmengen überlagern, wenn Holz aus Entwaldung von der Berechnung ausgenommen wird. Somit bestätigen sich die in der Diskussion um eine Anrechnung von Holz geäußerten Argumente (vgl. Kap. 3.2.2.1), dass diese Regel bei einem Netto/netto-Anrechnungsansatz kaum ins Gewicht fallen dürfte und ein Ausschluss von Holz aus Entwaldung zur Wahrung der Umweltintegrität des Anrechnungsregimes vor allem symbolischer Natur ist.

Neben der Zuordnung des Einschlags zu den Kyoto-Aktivitäten ist die Verwendung von Daten zum Holzeinschlag bei der Berechnung von Projektionen von Bedeutung. Diese Ergebnisse werden in Kapitel 6.3.2 vorgestellt.

### 6.2.1.2 Daten zur Produktion von Holzhalbwaren

Wie im Kapitel 5.2.1.2 ausführlich beschrieben, werden die Daten zur Produktion von Holzhalbwaren jährlich vom Statistischen Bundesamt erhoben, und die in den internationalen Statistiken der FAO und UNECE enthaltenen Daten werden mittels standardisierter Fragebögen von den zuständigen nationalen Koordinationsstellen gemeldet. Im Prinzip sollten die Datenzeitreihen zu den verschiedenen Halbwarengruppen aus diesen Quellen daher übereinstimmen. Für Deutschland übernimmt die Meldung an die FAO das Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie.

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommene Analyse der Zuordnung der Meldenummern zu den einzelnen Produktgruppen offenbart jedoch Abweichungen zwischen der nationalen und internationalen Statistik. Beispielhaft werden an dieser Stelle nur die Ergebnisse der Analyse für die mengenrelevanten Produktgruppen ‚Nadelschnittholz‘ und ‚Spanplatte‘ vorgestellt.

**TABELLE 6-2:** Der Produktkategorie ‚Nadelschnittholz‘ zugeordnete Meldenummern der Güterverzeichnisse seit 1995 (*kursive* Definition weichen zwischen Güterverzeichnissen ab)

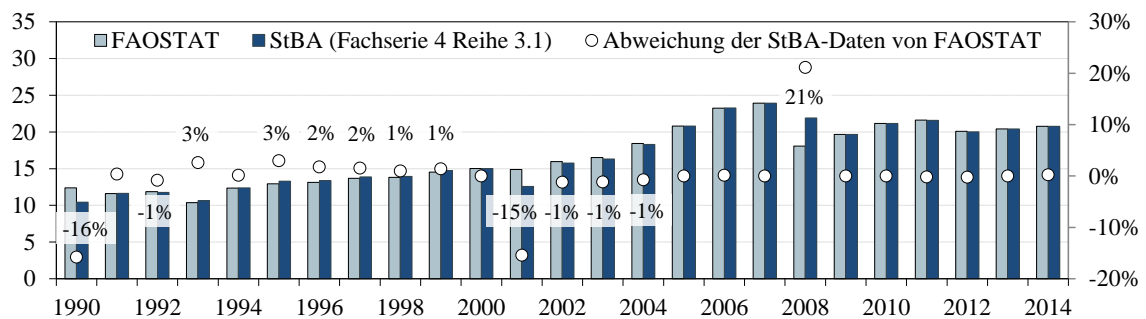
	1	2	3	4	5	6	7
GP95	2010 10 310	2010 10 320	2010 10 330	2010 10 340	2010 10 350	2010 10 370	2010 10390
GP2002	–	2010 10 320	–	2010 10 340	2010 10 350	2010 10 370	2010 10 390
GP2009	–	–	1610 10 330	–	1610 10 350	1610 10 370	1610 10 390

<sup>1</sup>keilverzinkt (gehobelt oder geschliffen), <sup>2</sup>keilverzinkt (auch gehobelt oder geschliffen), <sup>3</sup>gehobelt oder geschliffen, <sup>4</sup>gehobelt (nicht keilverzinkt oder geschliffen), <sup>5</sup>anderes FI oder TA *Schnittholz*, <sup>6</sup>KI *Schnittholz*, <sup>7</sup>anderes Nadel*schnittholz* (z. B. *Lärche, Douglasie, Weymouthkiefer/Strobe*)

In Tabelle 6-2 sind die Meldenummer seit 1995 aufgelistet, die gemäß FAO Definition der Produktgruppe ‚Nadelschnittholz‘ zuzuordnen sind. Nach gemeinsamer Definition ist dies Holz, „in der Längsrichtung gesägt oder gesäumt, gemessert oder geschält, mit einer Dicke von mehr als 6 mm“ (Statistisches Bundesamt 2015d) und beinhaltet laut FAO:

“[...] planks, beams, joists, boards, rafters, scantlings, laths, boxboards and ‘lumber’, etc., in the following forms: unplanned, planed, end-jointed, etc. It excludes sleepers, wooden flooring, mouldings (sawnwood continuously shaped along any of its edges or faces, like tongued, grooved, rebated, V-jointed, beaded, moulded, rounded or the like) and sawnwood produced by resawing previously sawn pieces.“ (FAO 1982)

Abbildung 6-8 zeigt eine Gegenüberstellung der FAO Zeitreihe zu der Zeitreihe aus den der Produktkategorie zugeordneten Meldenummern. Während Abweichungen im unteren einstelligen Prozentbereich mit Rundungsfehlern erklärt werden können, liegt die Ursache für die auffälligen Abweichungen in den Jahren 2001 und 2008 möglicherweise in der Tatsache begründet, dass bereits an die FAO gemeldete Daten nach einer Korrektur durch das Statistische Bundesamt im darauffolgenden Meldejahr nicht ebenfalls korrigiert wurden.



**ABBILDUNG 6-8:** Vergleich von Zeitreihen zur Produktion von Nadelschnittholz und deren Abweichung [in Mm³]

Noch größer sind die Abweichungen der beiden Zeitreihen bei der Produktkategorie ‚Spanplatte‘. Nach der Definition der FAO ist unter ‚Spanplatte‘ folgendes Produkt zu verstehen:

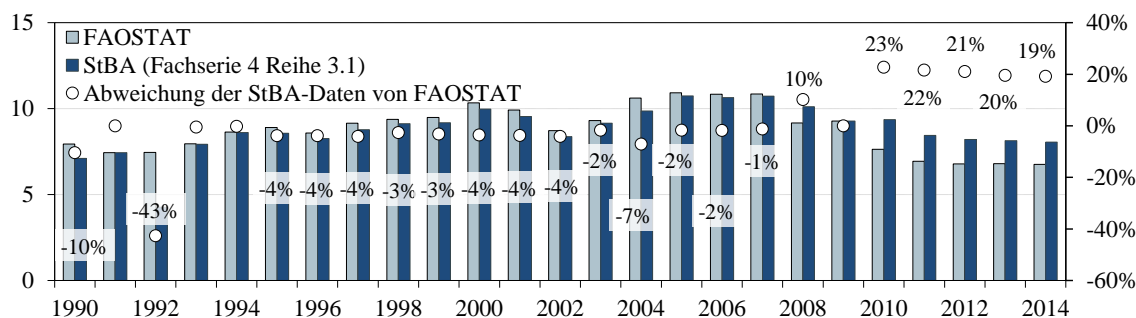
“A panel manufactured from small pieces of wood or other ligno-cellulosic materials (e.g. chips, flakes, splinters, strands, shreds, shives, etc.) bonded together by the use of an organic binder together with one or more of the following agents: heat, pressure, humidity, a catalyst, etc. The particle board category is an aggregate category. It includes oriented strandboard (OSB), waferboard and flaxboard. It excludes wood wool and other particle boards bonded together with inorganic binders“. (FAO 1982)

Dem Güterverzeichnis 2009 zufolge sind die Meldenummern 1621 13 131 bis 1621 13 190 als „Spanplatten und ähnliche Platten, aus Holz oder anderen holzigen Stoffen, auch mit Harz o.a. organischen Bindemitteln hergestellt; aus Holz“, wobei deren weitere Spezifizierung aus Tabelle 6-3 ersichtlich ist. Bei der Meldenummer 1621 12 241 hingegen, welche zum Zweck der Meldung an die FAO als ‚Sperrholz‘ eingeordnet wird, kann davon ausgegangen werden, dass hierunter von der Industrie furnierte Spanplatten an das Statistische Bundesamt gemeldet werden, die aus holztechnologischer Sicht eigentlich der Kategorie ‚Spanplatte‘ zuzuordnen wären.

**TABELLE 6-3:** Meldenummern der Produktkategorie ‚Spanplatte‘ des Güterverzeichnisses 2009

Meldenummer	Definition
1621 13 131	Spanplatten, roh oder nur geschliffen;
1621 13 132	Spanplatten, mit Hochdruckschichtpressstoffen mit Dekorschicht beschichtet
1621 13 133	Spanplatten, mit melaminharzgetränkten Papierlagen beschichtet
1621 13 161	Oriented strand board-Platten (OSB); roh/unbearbeitet
1621 13 163	Oriented strand board-Platten (OSB); bearbeitet
1621 13 190	Waferboard-Platten und ähnliche Platten, aus Holz (ohne Spanplatten und Oriented strand board-Platten)

Entsprechend wurden die Meldenummern auch der vorhergehenden Jahre der Kategorie zugeordnet (vgl. Statistisches Bundesamt 2010b) und im Ergebnis der FAO Zeitreihe gegenübergestellt (Abbildung 6-9).



**ABBILDUNG 6-9:** Vergleich von Daten zur Produktion von Spanplatte und deren Abweichung [in Mm<sup>3</sup>]

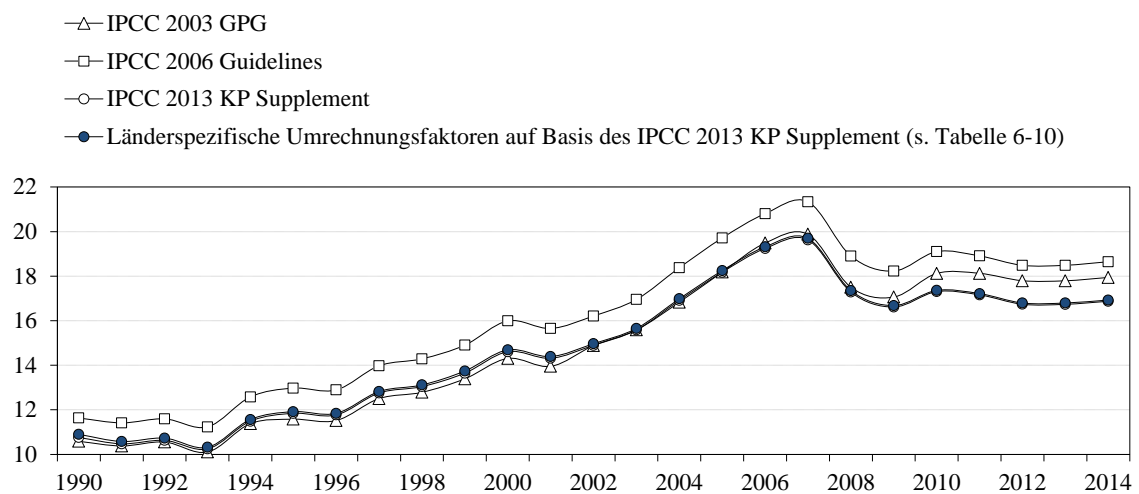
Während bei den Meldenummern der Kategorie ‚Nadelschnittholz‘ noch alle Daten seit 1990 vom Statistischen Bundesamt veröffentlicht wurden, wurden einige der die Kategorie ‚Spanplatte‘ betreffende Meldenummern als ‚Zahlenwert unbekannt oder geheimzuhalten‘ eingestuft. So sind die Zahlenwerte der kunststoffbeschichteten und anderweitig behandelten (furniert, lackiert) Holzspanplatten des Jahres 1992 mit den Meldenummern 5381 47 und 5381 48 des Güterverzeichnisses GP 89 nach Angaben des Statistischen Bundesamtes geheimzuhalten, womit sich die Differenz in der Analyse zu den in der FAO ausgewiesenen Mengen in Höhe von 43 % erklärt (Abbildung 6-9). Dies betrifft beispielsweise auch die seit dem Jahr 2009 gelisteten Meldenummern 1621 13 161 und 1621 13 190 (vgl. Tabelle 6-3). Zwar wurde für die Zuordnung, sofern Angaben zur Gesamtproduktion fehlen, ebenso wie bei allen anderen Kategorien die zum Absatz bestimmte Menge herangezogen. Doch trotz der bei diesen Meldenummern vollständig fehlenden Werte übersteigt die Summe der in der amtlichen Statistik ausgewiesenen Mengen die in der FAO Zeitreihe enthaltenen Kubikmeterangaben für die Produktkategorie ‚Spanplatte‘.

Vor dem Hintergrund der geschilderten Abweichungen zwischen den nationalen und internationalen Statistiken sind Abweichungen auch bei den Ergebnissen zu den Netto-Emissions-

zeitreihen daher erwartbar. Auch ist ein Vergleich dieser Datenquellen auf Basis der bis dato aufgenommenen offiziell verfügbaren Daten des Statistischen Bundesamtes nur wenig sinnvoll. Vielmehr wird deutlich, dass für eine fundierte Klärung der Unterschiede in den Datensätzen vor allem auch geheimzuhaltende Produktionsmengen berücksichtigt werden müssen und im Zweifelsfall jede einzelne Meldenummer der nationalen Produktionsstatistik im Detail auf ihre Konformität in Bezug auf das Berechnungsziel analysiert werden muss. Dies kann und soll im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht durchgeführt werden.

### 6.2.1.3 Verwendete Kohlenstoffumrechnungsfaktoren

Neben der Wahl der Datenquelle zu Produktion und Außenhandel spielt insbesondere die Wahl der Umrechnungsfaktoren in Kohlenstoffmengen eine große Rolle. Bereits beim Vergleich der in den verschiedenen Quellen angegebenen Werte wird ersichtlich, welch großen Einfluss die Wahl der „richtigen“ Kohlenstoff-Umrechnungsfaktoren haben kann (vgl. Kap. 5.2.1.3). Abbildung 6-10 zeigt am Beispiel der Zeitreihen der drei Holzhalbwarengruppen in Deutschland (Produktionsansatz, vgl. Abbildung 6-2) die voneinander abweichenden Kohlenstoffmengen, die sich aus der Verwendung der im WoodCarbonMonitor hinterlegten Faktoren der IPCC-Leitlinien (vgl. Kap. 4) errechnen.



**ABBILDUNG 6-10** Abgeschätzter Kohlenstoffzufluss nach Produktionsansatz bei Verwendung unterschiedlicher Umrechnungsfaktoren [in Mt C]

Danach scheint der Kohlenstoffzufluss bei der Verwendung der sehr groben Umrechnungsfaktoren der 2006 IPCC GL für Deutschland überschätzt zu werden. Die GPG-LULUCF differenzieren hingegen bereits zwischen den Produktgruppen und liegen näher an den für Deutschland typischen Dichtewerten bzw. dem für Deutschland repräsentativen Halbwarenmix. Der sich ändernde Verlauf der Abweichungen in den dargestellten Zeitreihen in Abbildung 6-10 wird durch den unterschiedlichen Differenzierungsgrad nach Produktgruppen und deren Produktionsmuster hervorgerufen. Die äußerst geringe Abweichung bei der Verwendung der länderspezifischen

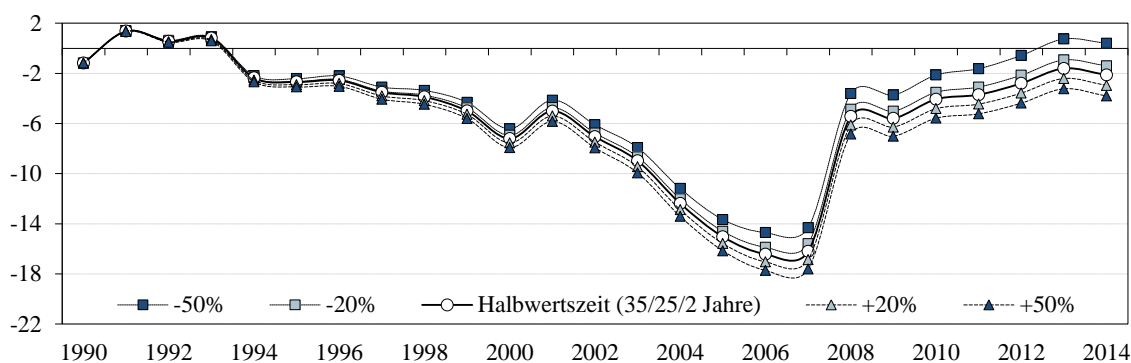
Faktoren und den im *2013 KP Supplement* hinterlegten Daten zur Ermittlung des Kohlenstoffzuflusses in Holzprodukten für den Produktionsansatz erstaunt hingegen nicht, da sich diese lediglich im Umrechnungsfaktor für die Produktgruppen Laubholzschnittholz bzw. Furnier unterscheiden (vgl. Tabellen 5–10 und 5–11).

## 6.2.2 Ergebnisse für unterschiedliche Emissionsfaktoren

Im Folgenden werden Ergebnisse zur Analyse der Sensitivität der verwendeten bzw. unterstellten Emissionsfaktoren und zum Verlauf berechneter Emissionszeitreihen unter Verwendung sich über die Zeit ändernder Nutzungsdauern bzw. Halbwertszeiten sowie Berechnungsergebnisse unter Verwendung länderspezifischer Halbwertszeiten vorgestellt.

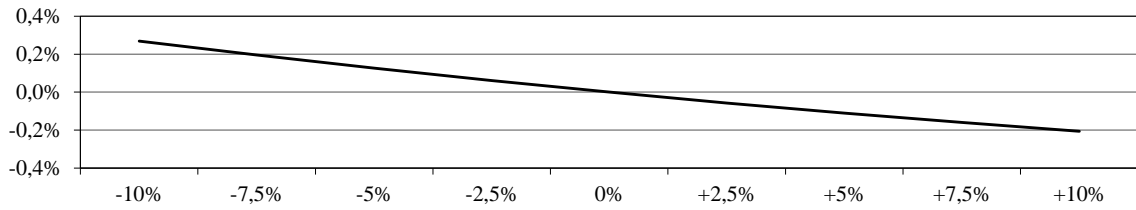
### 6.2.2.1 Veränderte Halbwertszeiten

Alle bisher vorgestellten Ergebnisse wurden mit den im *2013 KP Supplement* als Defaultwert festgelegten Halbwertszeiten gerechnet (vgl. Tabelle 5-13). Unterstellt man im WoodCarbon-Monitor eine z. B. um 50 % längere Halbwertszeit, entspricht dies für Schnittholzprodukte einer Halbwertszeit von 52,5 statt 35 Jahren bzw. einer unterstellten Verweilzeit von 75,7 statt 50,5 Jahren. Entsprechend verlängert sich die Halbwertszeit für Holzwerkstoffe um 12,5 Jahre und für Papier erhöht sie sich um ein Jahr. Abbildung 6-11 zeigt die Entwicklung der Netto-Emissionszeitreihen für den aktivitätsbasierten Berechnungsansatz unter Verwendung verkürzter und verlängerter Halbwertszeiten.



**ABBILDUNG 6-11:** Entwicklung der Netto-Emissionen nach dem aktivitätsbasierten Ansatz in Abhängigkeit veränderter Halbwertszeiten [in Mt CO<sub>2</sub>]

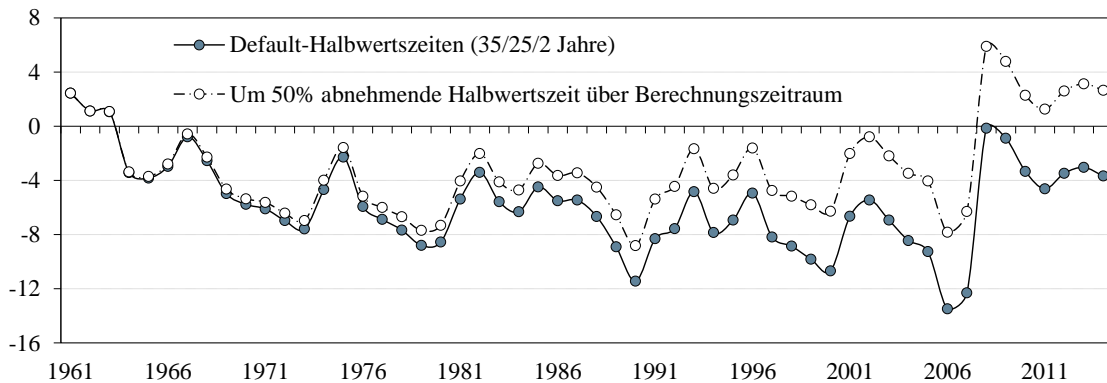
Die Sensitivität der mit der exponentiellen Funktionsgleichung 11 (s. S. 64) gerechneten Netto-Emissionen in Bezug auf eine Veränderung der Nutzungsdauer, ist in Abbildung 6-12 beispielhaft mit einer Abweichung in 2,5 % Schritten für das Jahr 2013 dargestellt.



**ABBILDUNG 6-12:** Höhe der Netto-Emissionen aus dem Produktspeicher in Abhängigkeit von veränderten Halbwertszeiten [in %]

Entscheidend für das Ergebnis ist vor allem das Verlaufsmuster des historischen Kohlenstoffzuflusses (d. h. Produktions- bzw. Verbrauchsmuster), welches auch die Höhe der zukünftigen Kohlenstoffabflüsse festlegt. Eine Veränderung der Halbwerts- bzw. Verweilzeiten des Kohlenstoffs im Produktspeicher ändert somit lediglich das Verteilungsmuster der zu verbuchenden Abgänge. So bewirkt eine Erhöhung der Halbwertszeiten für alle Halbwaren um 10 % beispielsweise eine Vergrößerung der Senkenwirkung um lediglich 0,2 %.

Die nachfolgenden Abbildungen 6–13 und 6–14 beinhalten Netto-Emissionszeitreihen, bei welchen für die jeweiligen Halbwertszeiten über den betrachteten Zeitraum (1961 bis 2014) eine kontinuierliche Verringerung auf 50 % der ursprünglichen Größe unterstellt wurde. Im Gegensatz zu den vorherigen Ergebnissen, welche die Netto-Emissionszeitreihe ab dem Jahr 1990 berechnen, wurde die Abschätzung in diesen Fällen mit der Funktionsgleichung 22 und  $t_0=1961$  durchgeführt.

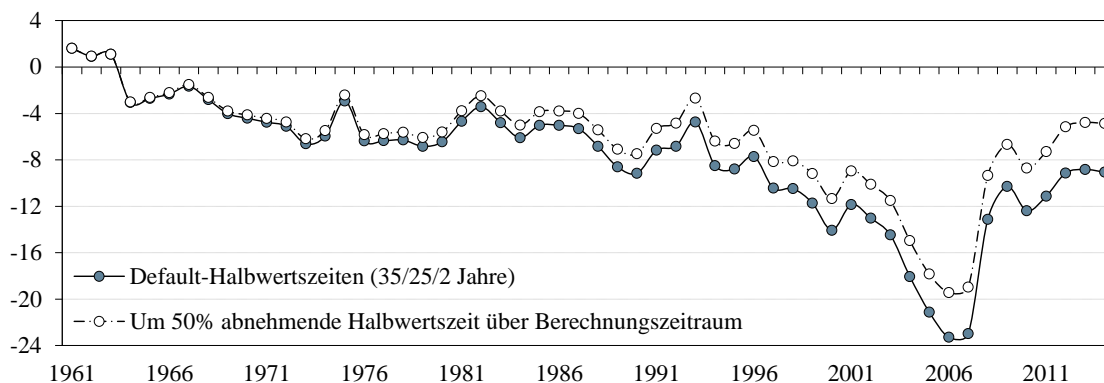


**ABBILDUNG 6-13:** Verlauf der Netto-Emissionen aus dem Verbrauch (*stock-change* Ansatz) im Vergleich konstanter und sich jährlich reduzierender Halbwertszeiten für Holzhalbwaren [in Mt CO<sub>2</sub>]

Die Abschätzung auf Basis des Verbrauchs von Holzhalbwaren in Deutschland kann somit beispielsweise eine Halbierung der stofflichen Verwendungsdauer von Holzprodukten während des Betrachtungszeitraums simulieren: geht man für Schnittholz am Anfangsjahr der Berechnung noch von umgerechnet durchschnittlich 50,5 Jahren Verwendungsdauer aus, sind es im Jahr 2014 nur noch 25,25 Jahre. Das Gleiche gilt in diesem Beispiel für die 36,1 Jahre Verwen-



ungsdauer für Holzwerkstoffe und die 2,9 Jahre für Papier, welche bis zum Jahr 2014 kontinuierlich auf die Hälfte reduziert werden.



**ABBILDUNG 6-14:** Verlauf der Netto-Emissionen nach Produktionsansatz im Vergleich konstanter und jährlich reduzierender Halbwertszeiten für Holzhalbwaren [in Mt CO<sub>2</sub>]

Das Ergebnis zeigt konsequenterweise sowohl für den *stock-change* als auch den Produktionsansatz, dass sich die geschätzte Speicherwirkung deutlich verringert (d.h. um ca. 40 % der Senkenwirkung beim Produktionsansatz). Für die Abschätzung auf Basis des gesamten Verbrauchs an Holzhalbwaren in Deutschland würde die beschriebene fortlaufende Verkürzung der Verwendungsdauern sogar bedeuten, dass der Holzproduktespeicher seit dem Jahr 2008 eine deutliche Quelle von biogenem Kohlenstoff darstellt. Nicht zuletzt um die mit der Annahme der Nutzungsdauern von Holzprodukten verbundenen Unsicherheiten im Zusammenspiel mit langen Zeitreihen zu reduzieren (vgl. Kap. 5.1.2.3), ist der Frage nach dem Umgang mit den gererbten Emissionen daher besondere Beachtung zu schenken. Die Ergebnisse zu dieser Analyse werden in Kapitel 6.2.3.1 vorgestellt.

### 6.2.2.2 Länderspezifische Nutzungsdauern und Halbwertszeiten

Anders als in den in Kapitel 2.2 beschriebenen Modellen können mit dem WoodCarbonMonitor auch länderspezifische Halbwertszeiten für Holzhalbwaren auf Basis von Marktinformationen über deren jeweilige Marktverwendung ermittelt werden.

Aus der im Kapitel 5.2.2.2 beschriebenen Verschneidung von hinterlegten Marktdaten mit den dazugehörigen Verbrauchsmengen an Schnittholz und Holzwerkstoffen aus der Statistik (FAOSTAT) und den für die jeweiligen Verwendungsbereiche ausgewählten Nutzungsdauerangaben errechnen sich die in Tabelle 6-4 gelisteten durchschnittlichen Nutzungsdauern. Da die hier vorgestellten Ergebnisse auf Marktdaten aus den Jahren 2001 bis 2003 basieren, repräsentieren die Ergebnisse lediglich eine Momentaufnahme für diesen ausgewählten Zeitraum.

Gewichtet nach den jeweiligen Verbrauchsmengen der Kategorien, weicht die ermittelte Halbwertszeit für die Kategorie Schnittholz mit 29 Jahren deutlich von dem Defaultwert 35 Jahre ab,

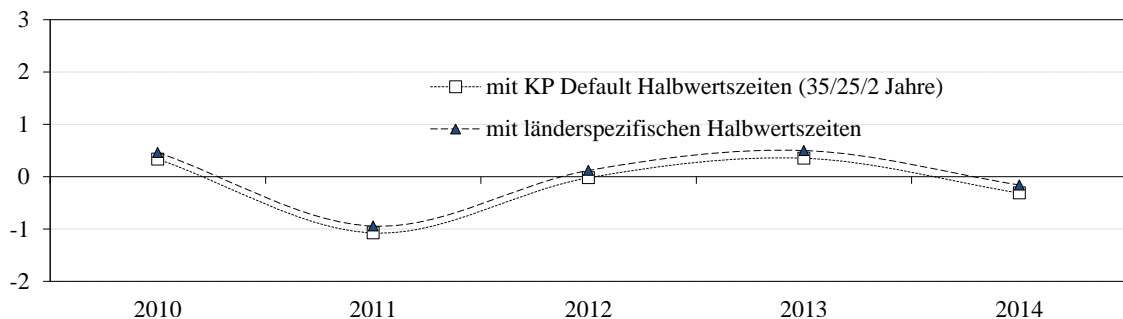


wohingegen die landesspezifische Halbwertszeit für die Halbwarengruppe Holzwerkstoffe von 24 Jahren den Defaultwert in Höhe von 25 Jahren zu bestätigen scheint. Danach betrug die Nutzungsdauer von Schnittholz in Deutschland bei der für diese Jahre ermittelten Verwendungsstruktur durchschnittlich 42 Jahre.

**TABELLE 6-4:** Spezifische Nutzungsdauern und Halbwertszeiten für Holzhalbwaren in Deutschland für die Jahre 2001-2003

Produktkategorie	Ø Nutzungsdauer	Halbwertszeit
Nadelschnittholz	41	29
Laubschnittholz	40	28
Furnier	30	21
Sperrholz	36	25
Spanplatte	37	26
Hochdichte Faserplatte (HDF)	22	15
Mitteldichte Faserplatte (MDF)	34	24
Dämmplatte (LDF)	39	27

Während sich der auf Basis des heimischen Verbrauchs (*stock-change* Ansatz) mittels der in Kapitel 5.2.3.1 beschriebenen Funktionsgleichung 22 ( $t_0=1990$ ) und unter Verwendung der Default-Halbwertszeiten berechnete Kohlenstoffspeicher im Jahr 2014 auf 347 Mt C summiert, ergibt die Berechnung auf Basis der länderspezifischen Werte eine Höhe von nur 308 Mt C. Entscheidend ist jedoch, dass die Verwendung landesspezifischer Emissionsfaktoren für Schnittholz und Holzwerkstoffe nur äußerst geringfügigen Einfluss auf die jährlich ermittelten Änderungen des Speichers und die sich daraus berechneten Netto-Emissionen hat; gerade in Kombination mit der konservativen Herangehensweise in Bezug auf die geerbten Emissionen (vgl. Kap. 6.1.2 und Abbildung 6-6) unterscheiden sich die Ergebnisse nur sehr geringfügig von den Daten, die mit den Defaultwerten gerechnet wurden (Abbildung 6-15).



**ABBILDUNG 6-15:** Verlauf der Netto-Emissionen nach *stock-change* Ansatz auf Basis von Default- und länderspezifischen Halbwertszeiten für Schnittholz und Holzwerkstoffe [in Mt CO<sub>2</sub>]

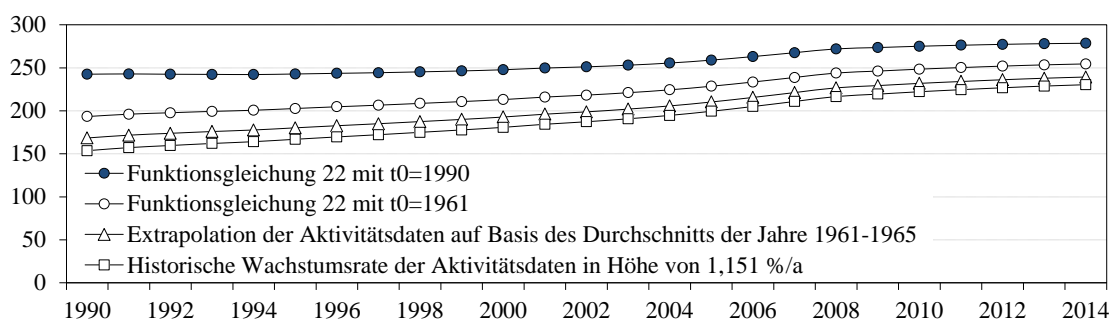
Seit Ende des Jahres 2013 liegen aktuelle Marktinformationen zur Holzverwendung für das Jahr 2012 vor (Mantau *et al.* 2013). Diese Daten konnten in der vorliegenden Arbeit nicht mehr berücksichtigt werden, doch bietet sich damit die Gelegenheit für eine zukünftige Aktualisierung der Ergebnisse bzw. Fortschreibung von Netto-Emissionszeitreihen, die auf Basis für Deutschland spezifischer Nutzungsdauern berechnet wurden.

## 6.2.3 Ergebnisse verschiedener Berechnungsmethoden

Alle Ergebnisdarstellungen der vorangegangenen Kapitel basieren auf der Speicherberechnung mit Hilfe der exponentiellen Zerfallsfunktion erster Ordnung (vgl. Kap. 6.1.2), wie sie für die Berechnung des Beitrags von Holzprodukten zum Zweck der Konventionsberichterstattung unter dem *Tier 1* Ansatz und für die Berichterstattung unter dem Kyoto-Protokoll nach *Tier 2* vorgesehen ist. Der folgende Abschnitt 6.2.3.1 zeigt zunächst die Ergebnisse der unterschiedlichen Berücksichtigung mit den geerbten Emissionen bei der Berechnung der Produktspeicherung. Das Unterkapitel 6.2.3.2 stellt die Ergebnisse der Verwendung unterschiedlicher Zerfallsfunktionen bei der Ermittlung der Netto-Emissionen vor.

### 6.2.3.1 Methoden zur Berücksichtigung der geerbten Emissionen

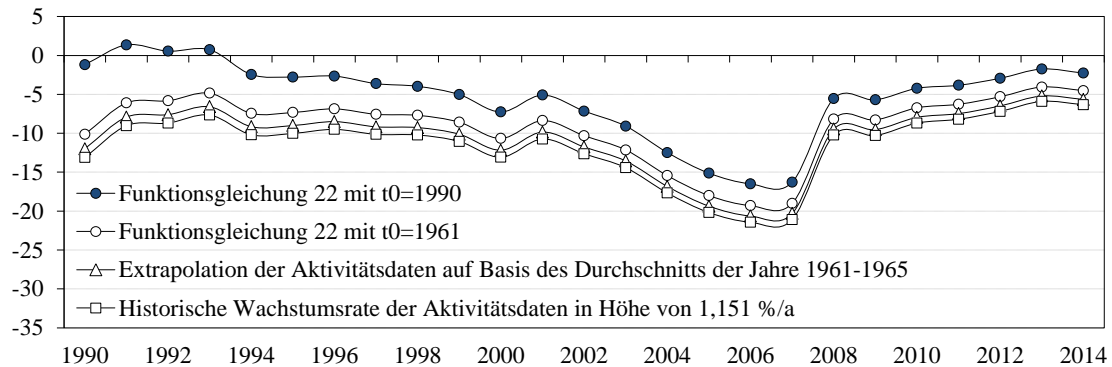
Für die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Zeitreihen wurden alle geerbten Emissionen alle mit der Funktionsgleichung 22 ermittelt, die erstmalig in Rüter *et al.* 2014 beschrieben wurde. Um die Unsicherheiten in Bezug auf die Aktivitätsdaten der FAO seit 1961 zu reduzieren, wurde der Anfangswert des Speichers für das Jahr 1990 ( $t_0=1990$ ) berechnet und nur für die Analyse sich ändernder Halbwertszeiten das Jahr 1961 als Ausgangsjahr gewählt (vgl. Abbildungen 6–13 und 6–14).



**ABBILDUNG 6-16:** Abschätzung der Entwicklung des Kohlenstoffspeichers auf Basis unterschiedlicher Methoden zur Berücksichtigung der geerbten Emissionen [in Mt C]

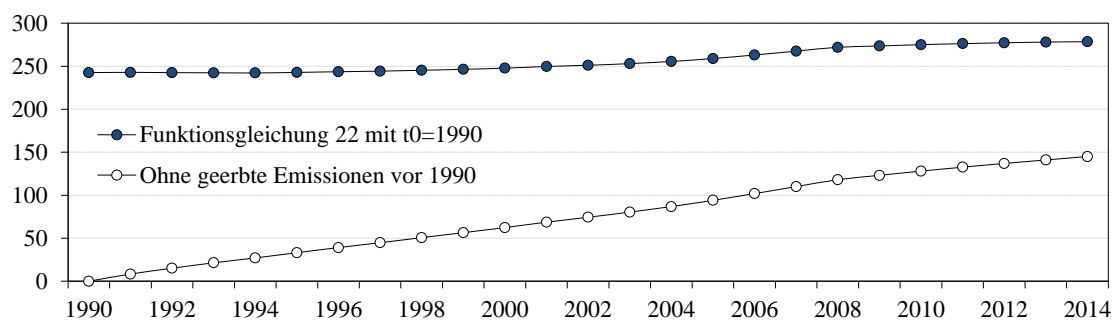
Der große Einfluss der unterschiedlichen Methoden zur Berücksichtigung der geerbten Emissionen bei der Berechnung der anfänglichen Speicherhöhe, die in Kapitel 5.2.3.1 beschrieben sind, wird durch den Verlauf der Zeitreihen der Abbildung 6-16 veranschaulicht. Sie zeigt die Entwicklung des Kohlenstoffspeichers ab dem Jahr 1990 in Abhängigkeit von der gewählten

Methode für den aktivitätsbasierten Berechnungsansatz, d. h. die Darstellung des Speichers umfasst auch die exportierten Holzhalbwaren. Aus der jährlichen Speicheränderung berechnen sich die in Abbildung 6-17 dargestellten Netto-Emissionszeitreihen (vgl. Abbildung 6-5). Gut zu erkennen ist hier der starke Einfluss der unterstellten Dynamik der Speicherentwicklung auf die daraus ermittelte Senkenwirkung des Speichers, die sich aus dem Umgang mit den geerbten Emissionen bei der Berechnung der anfänglichen Speicherhöhe ableitet.



**ABBILDUNG 6-17:** Netto-Emissionen des Produktspeichers bei Verwendung von unterschiedlichen Methoden zur Berücksichtigung der geerbten Emissionen [in Mt CO<sub>2</sub>]

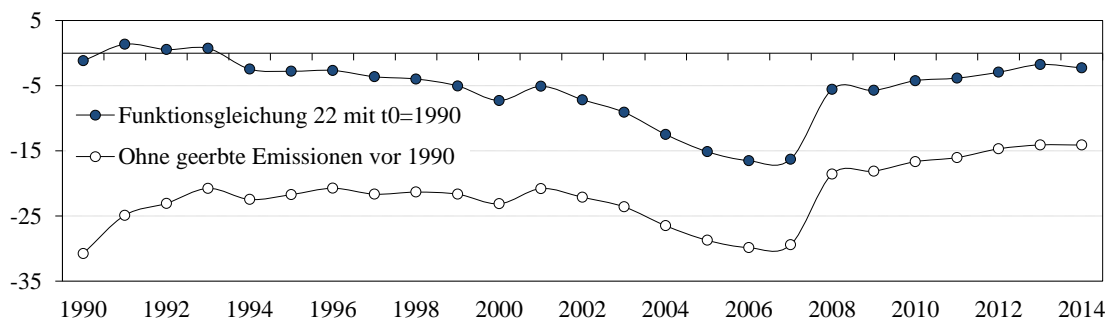
Werden die geerbten Emissionen hingegen erst ab dem Jahr 1990 in der Berechnung berücksichtigt oder, wie von Neuseeland bei den Verhandlungen zur Anrechnung von Holzprodukten in der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls vorgeschlagen, vor dem relevanten Betrachtungszeitraum von der Berechnung komplett ausgeschlossen (vgl. *Emissions to Atmosphere* Ansatz, Kap. 3.2.2.4), wird dem Speicher eine unrealistische bzw. lediglich politisch relevante Veränderungsdynamik unterstellt (Abbildung 6-18).



**ABBILDUNG 6-18:** Abschätzung der Entwicklung des Kohlenstoffspeichers mit und ohne Berücksichtigung der geerbten Emissionen vor 1990 [in Mt C]

In der Folge weisen die sich auf Basis jährlicher Speicheränderungen errechnenden Netto-Emissionen einen um ein Vielfaches höheren Speichereffekt aus (Abbildung 6-19). Dies ist insbesondere dann problematisch, wenn die allgemeinen Anrechnungsregeln für den Sektor die absolute Netto-Emissionswirkung für eine Anrechnung berücksichtigen (vgl. Kap. 3.1.1.1). Das

Ergebnis dieser detaillierten Analyse mit dem WoodCarbonMonitor konnte bereits bei den in Kapitel 3.2.2.4 beschriebenen Verhandlungen für die Ausgestaltung der Anrechnungsregeln für Holzprodukte unter dem Kyoto-Protokoll eingebracht werden: sofern nicht gegen einen projizierten Referenzwert angerechnet wird, müssen die geerbten Emissionen aus dem zu Beginn der Verpflichtungsperiode bestehenden Produktspeicher zwingend in die Berechnung des Speichers einbezogen werden, um ungerechtfertigte Gutschriften zu vermeiden.

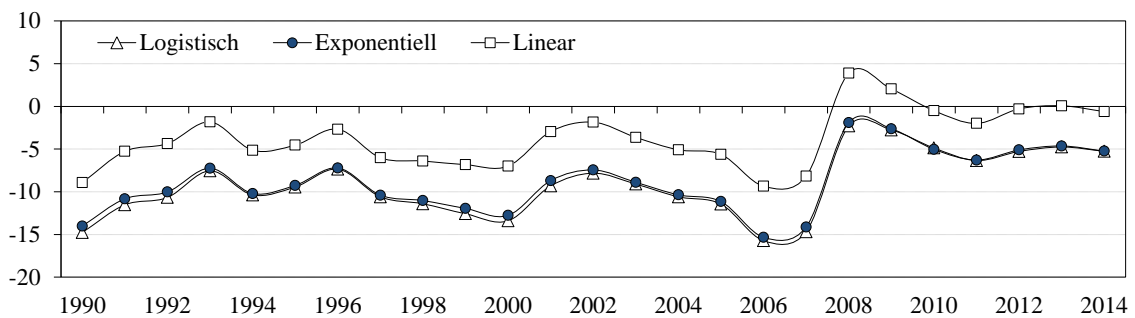


**ABBILDUNG 6-19:** Jährliche Netto-Emissionen des Produktspeichers mit und ohne Berücksichtigung der geerbten Emissionen vor 1990 [in Mt CO<sub>2</sub>]

### 6.2.3.2 Linearer, logistischer und exponentieller Zerfall

Um die unterschiedlichen Zerfallsfunktionen zur Berechnung des Kohlenstoffabflusses aus dem Speicher und die darüber ermittelte Speicherhöhe miteinander vergleichen zu können, wird der historische Kohlenstoffzufluss vor dem Jahr 1961 in diesem Abschnitt auf Basis einer Extrapolation des durchschnittlichen Verbrauchs der Jahre 1961-1965 ab dem Jahr 1900 gerechnet (vgl. Abbildung 6-16). Zunächst wird die Höhe der insgesamt in Deutschland gespeicherten Menge Kohlenstoff (*stock-change* Ansatz) unter Verwendung der länderspezifischen Kohlenstoffumrechnungsfaktoren (s. Tabelle 5-11, S. 167 und Kap. 6.2.1.3) ermittelt, die sich unter Verwendung der exponentiellen Funktionsgleichung 11 im Jahr 2014 auf 294 Mt C beläuft (267 Mt C in 2001). Wird der Zerfall mittels der logistischen Zerfallsfunktion 6 berechnet, ergibt sich eine Speicherhöhe von 335 Mt C (306 Mt C in 2001), wohingegen sich der Produktspeicher auf Basis einer Abschätzung mit einer linearen Zerfallsfunktion auf nur 169 Mt C im gleichen Jahr summiert (149 Mt C in 1993). Damit liegt die mit der linearen Zerfallsfunktion berechnete Speichermenge näher an dem von Burschel *et al.* (1993a) geschätzten Wert (128 Mt C in 1993), während die mit den beiden ersten Funktionen berechneten Ergebnisse für den Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten in etwa in der Größenordnung liegen, wie sie von Frühwald und Wegener (1993) angegeben wurde (vgl. Kap. 5.1.1, S. 126). Letztere hatten in ihrer Schätzung für das Jahr 2001 die gespeicherte Kohlenstoffmenge mit 334 Mt C kalkuliert.

Über die jährliche Änderung des Speichers (vgl. Funktionsgleichung 12) leitet sich anschließend wieder der Beitrag der stofflichen Holznutzung zu Emissionen nach Quellen und Bindung von Treibhausgasen nach Senken ab, der in Abbildung 6-20 abgebildet ist.



**ABBILDUNG 6-20:** Netto-Emissionen des heimischen Kohlenstoffspeichers (*stock-change* Ansatz) auf Basis unterschiedlicher Zerfallsfunktionen [in Mt C]

Neben einer stetigen Vergrößerung des Speichers aufgrund des zunehmenden Verbrauchs von Holzprodukten in Deutschland bis zum Jahr 2007, dem Einbruch des Verbrauchs in den darauffolgenden Jahren (vgl. Abbildung 6-1) und dem sich daraus berechnenden Muster der Senkenwirkung des Speichers, spiegeln die Ergebnisse zunächst die Tatsache wider, dass sich der mit einer linearen Funktion errechnete Produktspeicher auch schneller im Fließgleichgewicht befindet. Dies bedeutet, dass zu einem früheren Zeitpunkt der in den Speicher eingehende Kohlenstoff vollständig wieder aus dem Speicher ausgebucht wird, was wiederum die geringere Speicherrhöhe erklärt, welche mit dieser Funktion berechnet wird. Der mit der logistischen und exponentiellen Funktionsgleichung 6 bzw. 11 (vgl. S. 57 und 64) gerechnete Speicher reagiert hingegen deutlich inerte auf einen sich ändernden Kohlenstoffzufluss und findet bei gleichen Nutzungsdauern erst später ins Fließgleichgewicht. In Kombination mit den fortlaufend steigenden Verbrauchsmengen erklärt sich somit auch die mit diesen Funktionen ermittelte höhere Senkenwirkung.

Aufgrund der erwähnten Unsicherheiten in Bezug auf die angewandte Methode zur Berücksichtigung der geerbten Emissionen (vgl. Ergebnisse in Kap. 6.2.3.1) kann dieser Vergleich allerdings nur einen sehr groben Anhaltspunkt über die „richtige“ Zerfallsfunktion liefern. Doch scheinen die konkav gekrümmten Zerfallsfunktionen den durch die Nutzungsdauer der verschiedenen Holzwaren bestimmten Kohlenstoffabfluss aus dem Produktspeicher realitätsnaher abzubilden, da die lineare Funktion, wie bereits in der Diskussion um die zu verwendende Methode beschrieben, die zeitliche Dynamik des Zerfalls nur sehr vereinfachend abbildet (vgl. Kap. 5.1.2.3).

Verwendet man zur Verringerung dieser Unsicherheiten die Funktionsgleichung 22 mit  $t_0 = 1990$  zur Berechnung des Anfangswertes des Speichers in Kombination mit den errechneten länderspezifischen Nutzungsdauern (s. Tabelle 6-4, S. 201), beläuft sich die Höhe des auf Basis der exponentiellen Funktionsgleichung 11 gerechneten heimischen Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten im Jahr 2014 auf ca. 347 Mt C (vgl. Kap. 6.2.2.2).

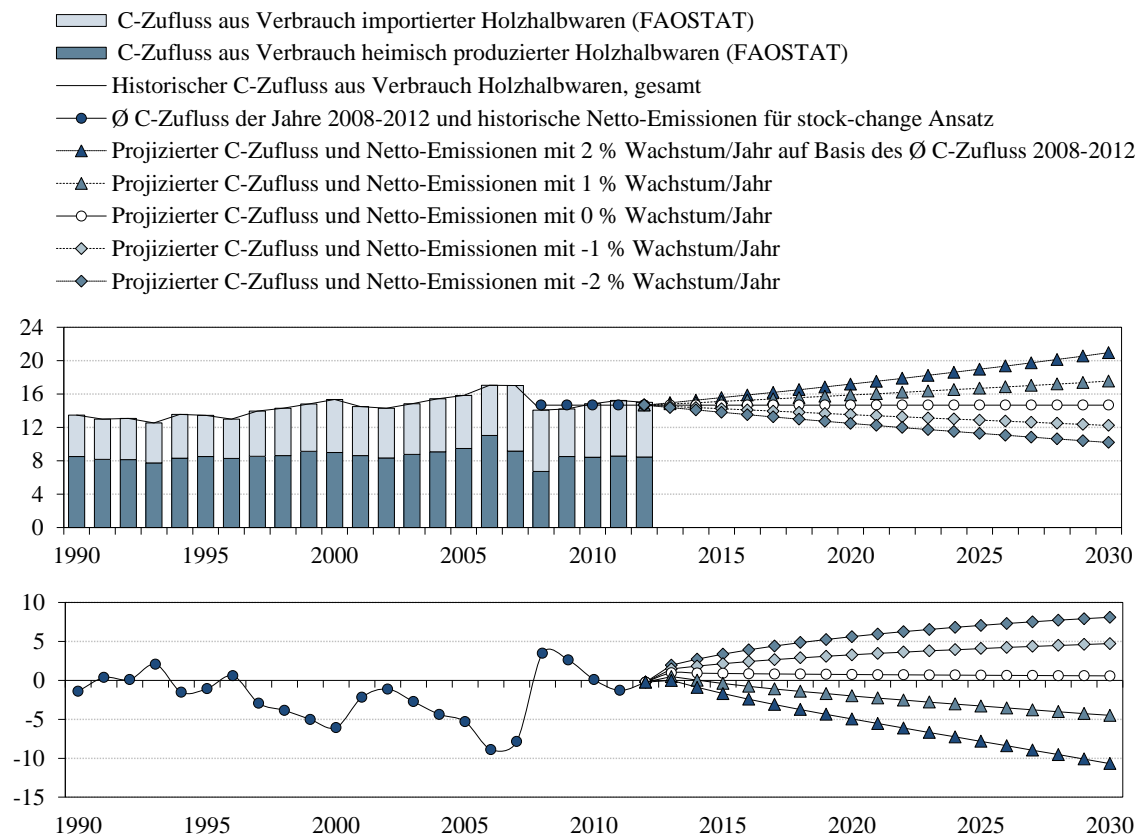
## 6.3 PROJEKTIONEN UND SZENARIEN VON NETTO-EMISSIONEN AUS DEM PRODUKTSPEICHER

Dieses Kapitel stellt die mit dem WoodCarbonMonitor berechenbaren Projektionen und Szenarien einer zukünftigen Entwicklung des Produktspeichers und der damit verbundenen Netto-Emissionen gemäß der in Kapitel 5.2.4 beschriebenen Ansätze vor.

### 6.3.1 Projektionen auf Basis historischer Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren

Die Darstellung der Ergebnisse projizierter Netto-Emissionen, die mittels Daten zu Produktion und Außenhandel errechnet wurden (s. Kap. 5.2.4.1), erfolgt zum Zweck einer besseren Nachvollziehbarkeit zusammen mit dem projizierten Zufluss an Kohlenstoff in den Produktspeicher.

#### 6.3.1.1 Verwendung definierter jährlicher Wachstumsraten

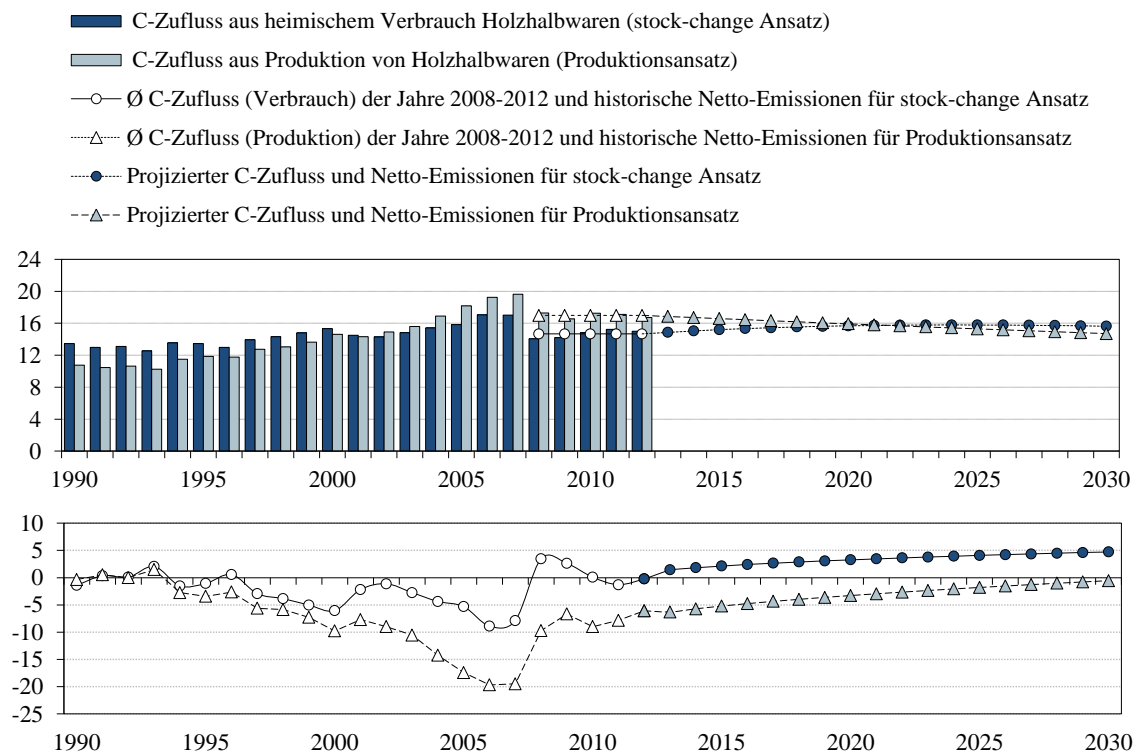


**ABBILDUNG 6-21:** Historischer und zukünftiger C-Zufluss auf Basis definierter jährlicher Wachstumsraten und die darüber ermittelten Netto-Emissionen für den *stock-change* Ansatz [in Mt C und Mt CO<sub>2</sub>]

Abbildung 6-21 zeigt projizierte Netto-Emissionszeitreihen als Ergebnis frei wählbarer Wachstumsraten in 0,25 % Schritten, die hier ab dem Projektionsjahr 2013 auf Basis des durchschnittlichen Kohlenstoffspeicherzuflusses der Jahre 2008 bis 2012 für den *stock-change* Ansatz realisiert wurden. Somit kann eine mögliche Entwicklung der Speicherwirkung mit dem WoodCarbonMonitor z. B. auf Basis von Annahmen über das wirtschaftliche Wachstum grob eingeschätzt werden.

### 6.3.1.2 Verwendung einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate eines definierten Zeitraums

Die in Abbildung 6-22 berechneten Projektionen für den *stock-change* und den *Produktionsansatz* basieren hingegen auf der durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate des Kohlenstoffzuflusses eines frei definierbaren Zeitraums (hier: 2008 bis 2012).

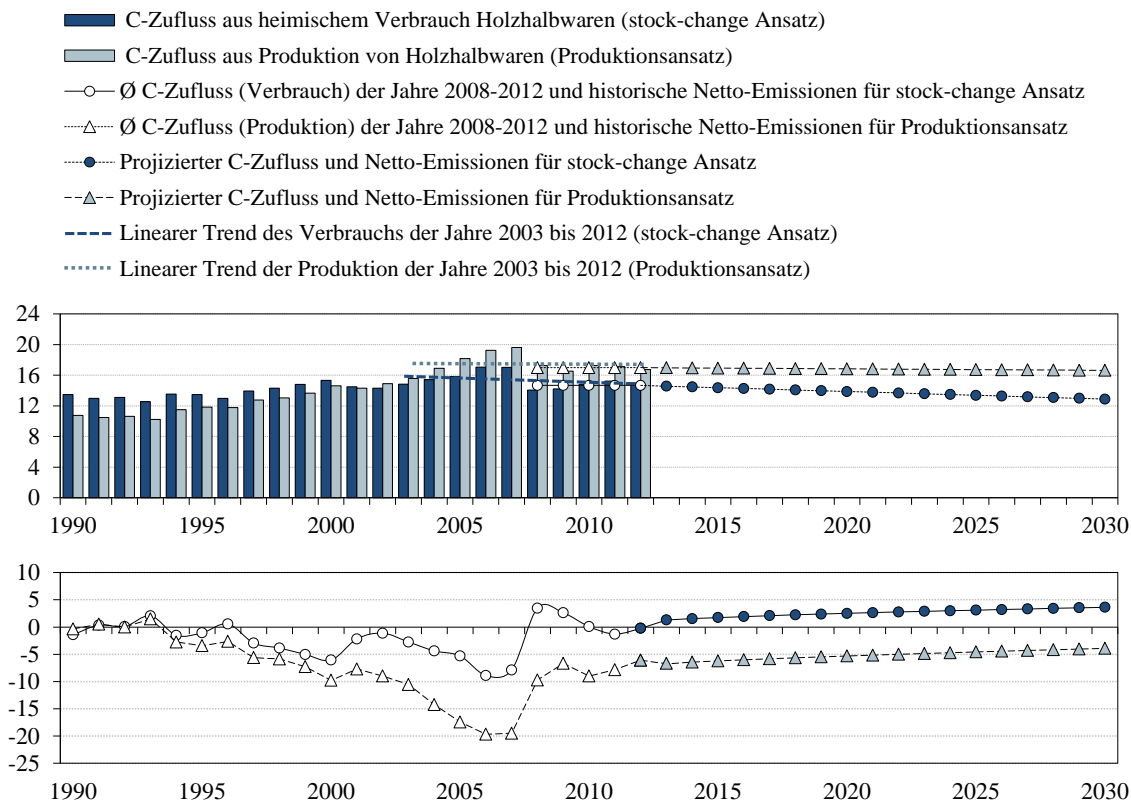


**ABBILDUNG 6-22:** Historischer und zukünftiger C-Zufluss und die auf Basis der durchschnittlichen Wachstumsrate der Jahre 2008-2012 ermittelten Netto-Emissionen für *stock-change* und *Produktionsansatz* [in Mt C und Mt CO<sub>2</sub>]

### 6.3.1.3 Verwendung eines Trends eines definierten Zeitraums

Als dritte Möglichkeit, mit dem WoodCarbonMonitor zukünftige Netto-Emissionszeitreihen auf Basis vorliegender Daten zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren zu berechnen, bietet sich die Verwendung eines linearen Trends. Die in Abbildung 6-23 enthaltenen Projektio-

nen greifen den jeweiligen Trend der zehnjährigen Stützperiode von 2003 bis 2012 auf und schreiben diesen auf Basis des durchschnittlichen Kohlenstoffspeicherzuflusses der Jahre 2008 bis 2012 fort. Auch für diesen Fall bilden die nachfolgenden Ergebnisse den *stock-change* und den *Produktionsansatz* ab.



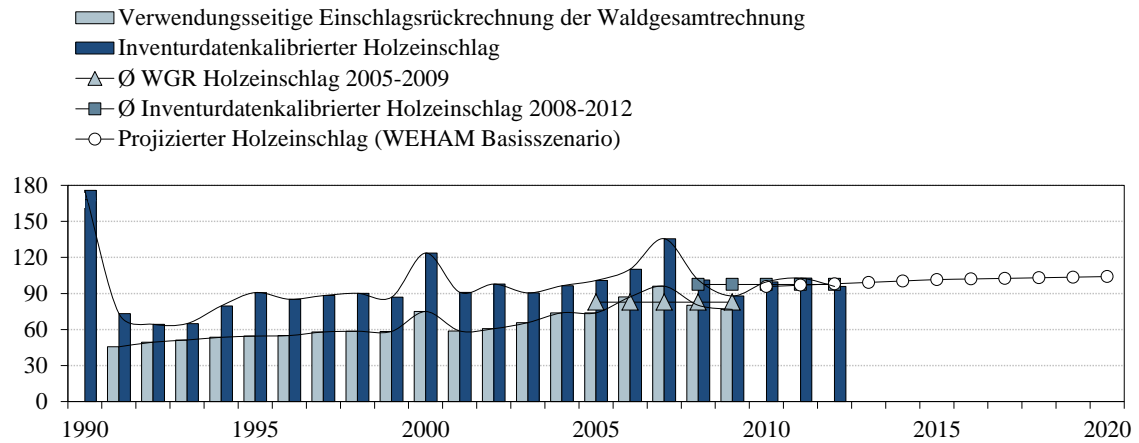
**ABBILDUNG 6-23:** Historischer und projizierter C-Zufluss auf Basis des Trends der Jahre 2003-2012 für *stock-change* und *Produktionsansatz* sowie ermittelte Netto-Emissionen [in Mt C und Mt CO<sub>2</sub>]

### 6.3.2 Projektionen unter Verwendung von Zeitreihen zum zukünftigen Holzeinschlag

Die Berechnungen zukünftiger Netto-Emissionszeitreihen, die über Daten zum zukünftigen Holzeinschlag bzw. ein projiziertes Rohholzaufkommen ermittelt werden, basieren, wie in Kapitel 5.2.4.2 beschrieben, im WoodCarbonMonitor standardmäßig auf der Übertragung des Verhältnisses der projizierten Holzeinschlagsmenge eines jeden Jahres zur durchschnittlichen Holzeinschlagsmenge der letzten fünf Jahre vor dem gewählten Projektionsstartjahr auf den Kohlenstoffspeicherzufluss bzw. die je nach Berechnungsansatz ermittelten Aktivitätsdaten für Holzhalbwaren. Damit kommt der Wahl hierfür geeigneter bzw. konsistenter Zeitreihen für den vergangenen und projizierten Holzeinschlag eine enorme Bedeutung zu (vgl. Kap. 5.2.1.1). Abbildung 6-24 zeigt eine Zusammenstellung der im Modell hinterlegten bzw. berechneten historischen Zeitreihen zum Holzeinschlag aus der Waldgesamtrechnung und den inventurdatenkalib-

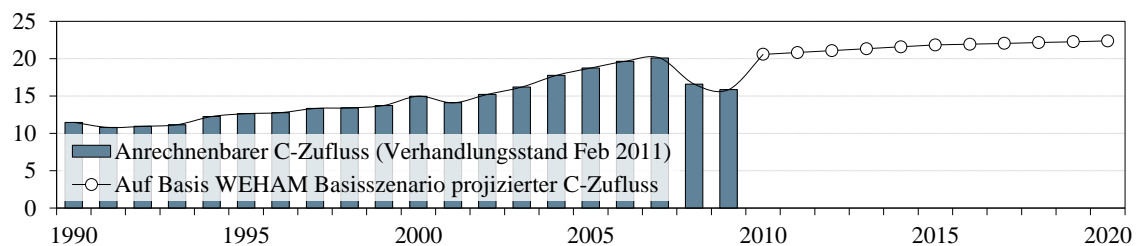


rierten Datensätzen sowie der im Jahr 2009 mit den Daten der Inventurstudie 2008 kalibrierten Holzeinschlagsdaten aus dem WEHAM Basisszenario (s. Kap. 5.2.4.2, vgl. Rüter *et al.* 2011).

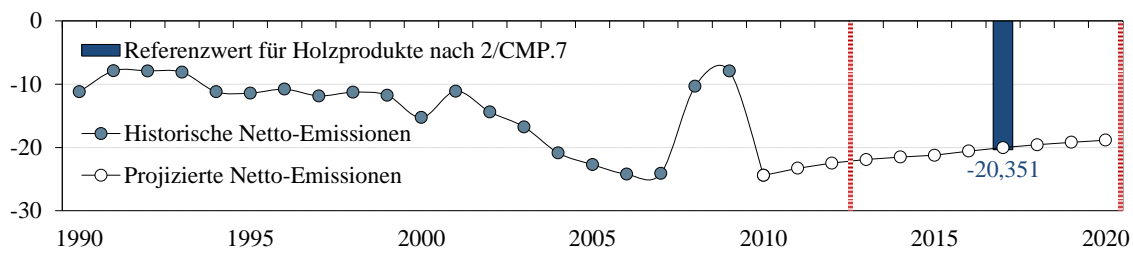


**ABBILDUNG 6-24:** Im Modell hinterlegte Zeitreihen zum Holzeinschlag (Stand August 2014) [in Mio. Vfm m. R.]

Um den in den Kapiteln 3.1.3 und 3.2.2.5 vorgestellten Beschluss der Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention über eine verpflichtende Anrechnung der Aktivität Waldbewirtschaftung mittels eines Referenzwertes für Deutschland nachzukommen, wurde das kalibrierte WEHAM2003 Basisszenario als Referenz für die Abschätzung der zukünftigen Netto-Emissionen aus dem Produktspeicher verwendet. Für die Berechnung des deutschen Referenzwertes für Holzprodukte im Frühjahr 2011 wurde für den historischen Holzeinschlag außerdem die zu diesem Zeitpunkt verfügbare Zeitreihe der Waldgesamtrechnung (WGR) verwendet. Das ermittelte Verhältnis von zukünftigem zu historischem Holzeinschlag wurde anschließend auf die Datenreihen zu Holzprodukten übertragen (Abbildung 6-25), um darüber die in Abbildung 6-26 dargestellte Netto-Emissionszeitreihe zu erhalten (Rüter 2011a). Daraus ergibt sich für den achtjährigen Zeitraum der zweiten Verpflichtungsperiode eine durchschnittliche jährliche Netto-Emission in Höhe von -20,351 Mt CO<sub>2</sub>, die als Referenzwert einer Anrechnung von Holzprodukten für Deutschland von einem internationalen Expertenteam evaluiert und als Wert im Anhang der Entscheidung 2/CMP.7 von Durban hinterlegt wurde (Spalte *Assuming instantaneous oxidation of HWP*) (UNFCCC 2012a, S. 19).



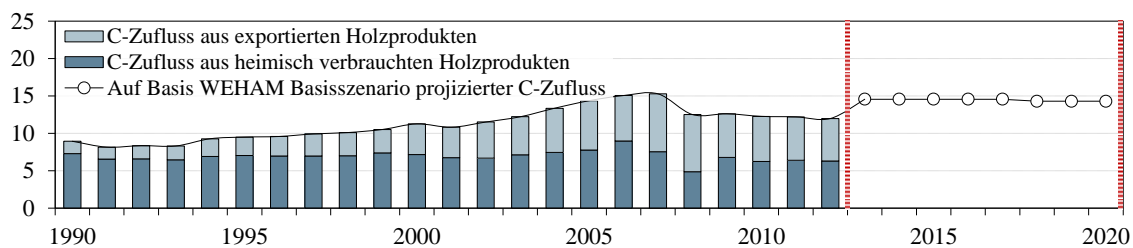
**ABBILDUNG 6-25:** Berechnung des C-Zuflusses auf Basis des Verhältnisses aus historischem zu projiziertem Holzeinschlag (Stand Februar 2011) [in Mt C]



**ABBILDUNG 6-26:** Historische und projizierte Netto-Emissionen und hinterlegter Referenzwert für Holzprodukte (Stand Februar 2011) [in Mt CO<sub>2</sub>]

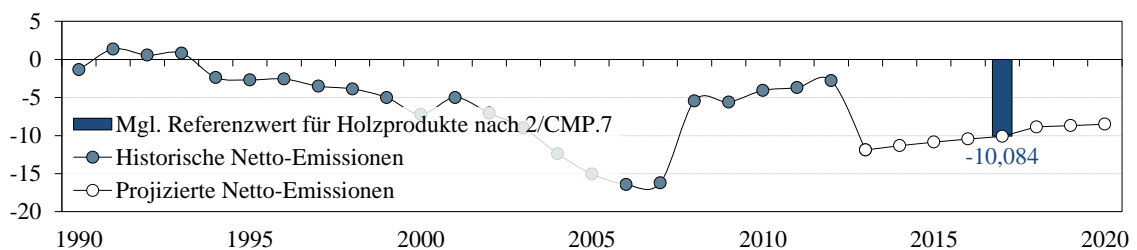
Da zur Zeit der Berechnung der Netto-Emissionszeitreihe für den Referenzwert die für die Umsetzung der Entscheidung 2/CMP.7 vorgegebenen methodischen Leitlinien des IPCC, die *2013 KP Supplements*, noch nicht erstellt und durch die Staatengemeinschaft als Grundlage für die Berichterstattung unter dem Kyoto-Protokoll verabschiedet waren, muss der angegebene Referenzwert im Rahmen einer technischen Korrektur angepasst werden. Die Grundlage hierfür wurde bereits mit der Entscheidung für eine Anrechnung auf Basis eines Referenzwertes in der Entscheidung selbst gelegt (s. Kap. 3.2.2.6), welche durch die entsprechenden Kapitel in den *2013 KP Supplements* komplementiert wird (IPCC 2014). Nähere Erläuterungen sind in Kapitel 4.4 zu finden. So wurde in den 2011 veröffentlichten Zeitreihen zwar bereits der heimische Verbrauch heimisch produzierten Industrierohholzes bei der Berechnung der Aktivitätsdaten für Holzprodukte ermittelt (vgl. Funktionsgleichung 19, S. 169), doch wurde die Gleichung nicht auch für die Rohstoffkategorien Zellstoff bzw. Altpapier angewandt. Neben der Verwendung von Daten aus der TIMBER DATABASE der UNECE (vgl. Kap. 5.2.1.2) und der Berechnung auf Basis anderer Kohlenstoffumrechnungsfaktoren für die Produktkategorien (vgl. Kap. 5.2.1.3) wurde aufgrund fehlender Angaben über die Zuordnung des Holzeinschlags zu den Kyoto-Aktivitäten außerdem angenommen, dass alles Holz aus der Aktivität Waldbewirtschaftung stammt (Rüter 2011a, S. 9). Den wohl größten Einfluss auf den Referenzwert hat allerdings das angenommene Verhältnis von zukünftigem zu historischem Holzeinschlag.

Die nachfolgende Abbildung 6–27 zeigt die auf Basis der inventurdatenkalibrierten historischen Holzeinschlagsdaten und der ebenfalls kalibrierten WEHAM2003 Basisszenario-Projektion berechneten Zeitreihe des Kohlenstoffzuflusses in den Produktspeicher.



**ABBILDUNG 6-27:** Berechnung des C-Zuflusses in den Produktspeicher auf Basis des Verhältnisses aus historischem zu projiziertem Holzeinschlag (WEHAM 2002 Basisszenario), beide BWI2012-kalibriert (Stand März 2016) [in Mt C]

Wie aus Abbildung 6-24 ersichtlich ist, können die Zeitreihen mit Daten zum historischen und projizierten Holzeinschlag in dieser Kombination als konsistent bezeichnet werden, da beide Datensätze mit den Ergebnissen der letzten Bundeswaldinventur (BWI2012) kalibriert wurden (vgl. Kap. 5.2.1.1 und 5.2.4.2). Sie bilden daher auch die Grundlage für die durchzuführende technische Korrektur des Referenzwertes aus dem Jahr 2011 (vgl. Kap. 4.4). Anders als die vorherigen Berechnungen wurden die in den Abbildungen 6–27 und 6 – 28 dargestellten Zeitreihen auf Basis der Daten der FAO zu Holzhalbwerten zudem in Kombination mit den in Tabelle 5-11 gelisteten und für Deutschland spezifischen Kohlenstoffumrechnungsfaktoren berechnet. Die nach dem aktivitätsbasierten Ansatz nach 2/CMP.7 berechneten Daten entsprechen den im 2013 *KP Supplement* formulierten Anforderungen und berücksichtigen nur aus der Aktivität Waldbewirtschaftung stammende Holzprodukte aus heimischen Rohstoffen (Industrierohholz, Zellstoff und Altpapier, vgl. S. 169). Da diese Daten erst seit dem Jahr 1990 vorliegen, wurde der Anfangswert des Speichers mit Gleichung 22 und  $t_0 = 1990$  (Kap. 5.2.3.1) gerechnet. Die Projektion startet vor dem Beginn der Verpflichtungsperiode im Jahr 2013, um mit der Berechnung zusammenhängende Unsicherheiten weiter zu reduzieren. Für die Verhältnisbildung des projizierten zum historischen Holzeinschlag in Abbildung 6-27 wurde, ebenso wie für dem im Jahr 2011 gemeldeten Referenzwert und gemäß der von IPCC vorgeschlagenen Methode, der Durchschnitt der Jahre 2005-2009 verwendet (vgl. Rüter 2011a, S. 28 und Rüter *et al.* 2014), womit implizit auch das Verhältnis der stofflichen zur energetischen Nutzung von Holz aus diesem Zeitraum auf die Projektion übertragen wird. Damit erfüllt die auf Basis der BWI2012-Daten kalibrierte WEHAM2003 Projektion berechnete Zeitreihe sowohl die politisch festgelegte Bedingung, dass nur bis zum Dezember 2009 beschlossene und umgesetzte Politiken, die Auswirkungen auf die Waldbewirtschaftung und den Holzeinschlag, und damit auf den ermittelten Referenzwert haben können, in die Festlegung des Referenzwertes eingezogen werden dürfen (vgl. UNFCCC 2011c, S. 9), als auch die Auflage, dass diese einmal getroffenen Annahmen im Rahmen einer technischen Korrektur nicht geändert werden dürfen.



**ABBILDUNG 6-28:** Historische und projizierte Netto-Emissionen und möglicher aktualisierter Referenzwert für Holzprodukte (Stand März 2016) [in Mt CO<sub>2</sub>]

Auf dieser Basis würde der im Rahmen einer technischen Korrektur zu meldende Beitrag der Holzprodukte für die Anrechnung mittels eines Referenzwertes bei jährlich -10,084 Mt CO<sub>2</sub> liegen (vgl. Abbildung 6-28).

## 6.4 ANALYSE DER ANRECHNUNGSMODALITÄTEN VON HOLZPRODUKTEN IM LANDNUTZUNGSSEKTOR

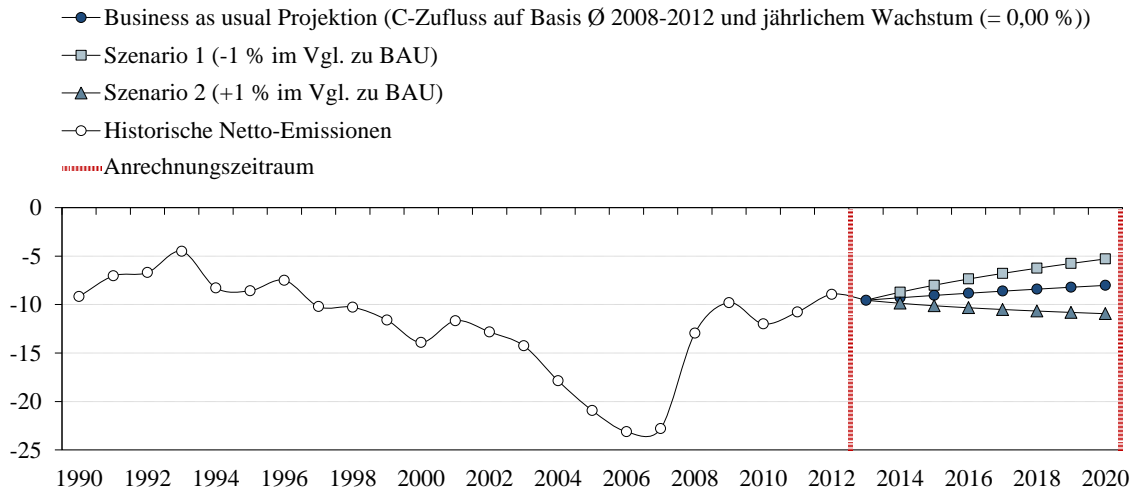
Während sich Kapitel 6.1 auf die Ergebnisse zu den spezifischen Berechnungsansätzen für den Produktspeicher beschränkt, stellt dieses Kapitel die ermittelten Zeitreihen in den Kontext einer Anrechnung des Beitrags der stofflichen Holznutzung im Landnutzungssektor.

Wie in Kapitel 3.2.2 detailliert dargestellt, lag der Fokus zu Beginn der vorliegenden Arbeit auf der Frage rund um die Berücksichtigung des Produktspeichers in einer zweiten Verpflichtungsperiode, deren Ergebnisse direkt in den Verhandlungsprozess eingeflossen sind. Mit Entscheidung 2/CMP.7 im Jahr 2011 wurde die Anrechnung der stofflichen Holznutzung von den Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention beschlossen und mit dem Berichtsjahr 2015 für das Jahr 2013 als Beginn der zweiten Verpflichtungsperiode unter dem Kyoto-Protokoll erstmalig umgesetzt (Rüter 2016). Die Frage nach möglichen Anrechnungsmodalitäten im Landnutzungs- bzw. LULUCF-Sektor im Rahmen der Fortführung des Kyoto-Protokolls in der zweiten Verpflichtungsperiode ist zwar somit gelöst, doch ist nach wie vor offen, ob und wie der Sektor in der internationalen Klimapolitik nach Ablauf des Kyoto-Protokolls im Jahr 2020 berücksichtigt werden soll. In diesem Zusammenhang ermöglicht der WoodCarbonMonitor die Analyse möglicher Optionen einer Berücksichtigung der Netto-Emissionen aus der stofflichen Holznutzung auch über die zweite Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls hinaus.

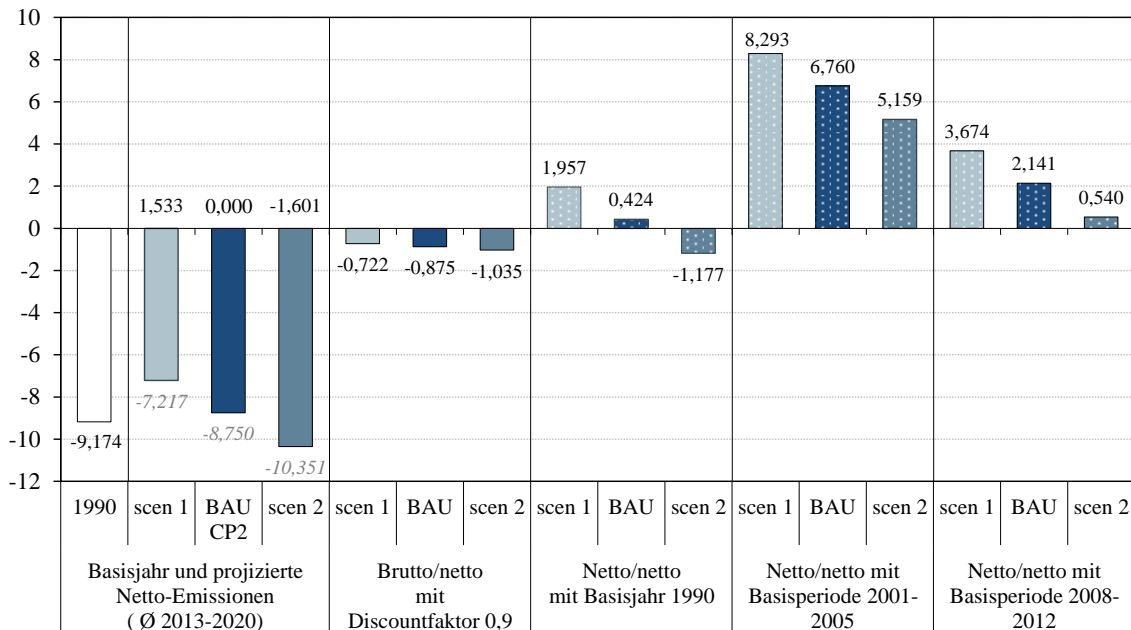
Die Abschätzung eines möglichen Beitrags der Produktspeicheranrechnung mit einem Brutto/netto-Ansatz entspricht zunächst der jeweils projizierten Netto-Emissionszeitreihe. Zwar können sich konjunkturelle Schwankungen auf den Holzverbrauch (vgl. Abbildung 6-4) und damit auch auf die Veränderung des Kohlenstoffspeichers und die darüber ermittelten Netto-Emissionen stark auswirken; unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung sollte aber eine ungefähre Abschätzung des durchschnittlichen jährlichen Beitrags für einen definierten Anrechnungszeitraum möglich sein. Neben dem Vergleich der projizierten Netto-Emissionszeitreihe mit historischen Referenzen (Basisjahr und Basisperiode) können mit dem WoodCarbonMonitor, wie in Kapitel 5.2.5 beschrieben, auch Szenarienfelder definiert werden. Dadurch kann der potentielle Betrag des Produktspeichers bei der Verwendung verschiedener Anrechnungsoptionen auch im Hinblick auf die mit den Projektionen verbundenen Unsicherheiten besser eingeschätzt werden.

Abbildung 6-29 zeigt beispielhaft die Entwicklung der Netto-Emissionen für den Produktionsansatz, wobei die *Business-as-usual* (Abk. BaU) Projektion auf Basis der Fortschreibung des durchschnittlichen Kohlenstoffzuflusses der letzten fünf Jahre berechnet wurde (0 % Wachstum). Sie wird ergänzt durch zwei abweichende Szenarien mit einer Zu- bzw. Abnahme der jahresdurchschnittlichen Wachstumsrate des Kohlenstoffzuflusses um 1 % ab dem Jahr 2013. Um auch die Netto-Emissionen unter Einbeziehung der geerbten Emissionen für das Jahr 1990 adä-

quat abzubilden, wurden die geerbten Emissionen hier mit Funktionsgleichung 22 und  $t_0 = 1961$  gerechnet.



**ABBILDUNG 6-29:** Historische und projizierte Netto-Emissionen auf Basis des Produktionsansatzes und jährlicher Wachstumsraten [in Mt CO<sub>2</sub>]

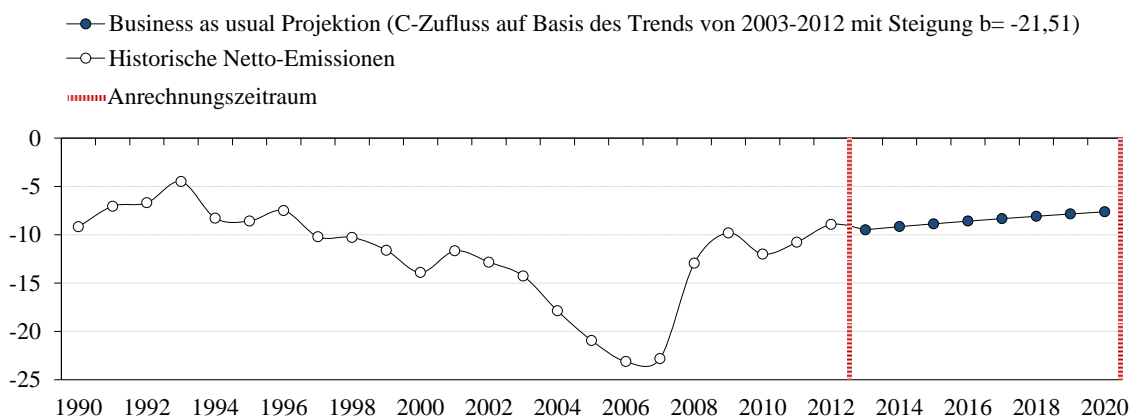


**ABBILDUNG 6-30:** Potentieller jährlicher Anrechnungsbeitrag verschiedener Anrechnungsoptionen auf Basis des Produktionsansatzes und jährlicher Wachstumsraten (s. Abbildung 6-29) [in Mt CO<sub>2</sub>]

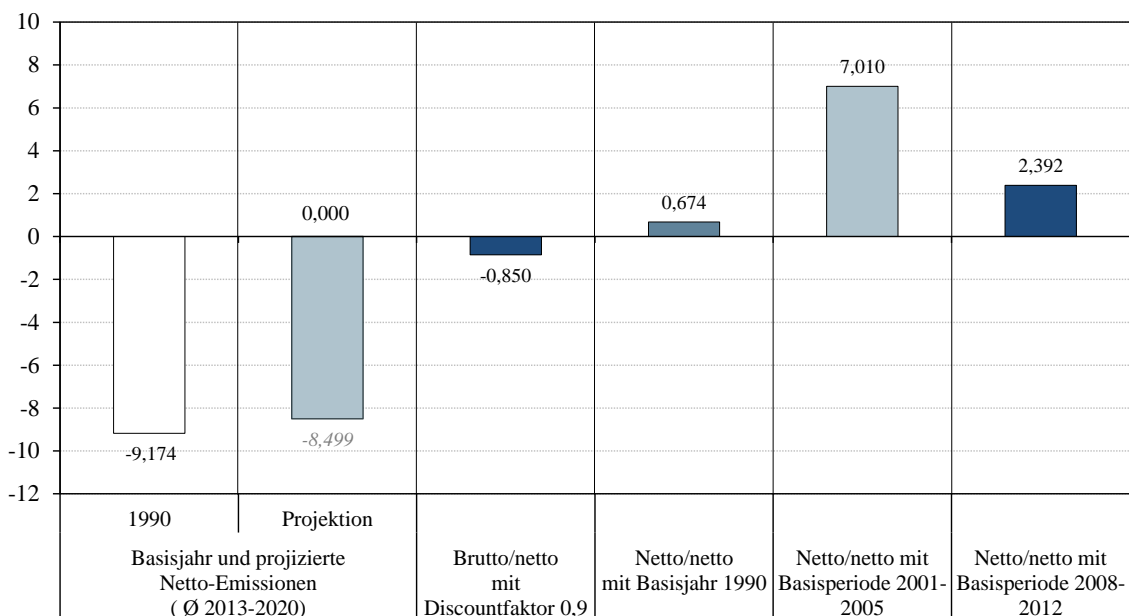
Die sich aus dem Vergleich der Netto-Emissionsverläufe ergebenden Anrechnungsbeiträge sind in Abbildung 6-30 dargestellt. Bei einer Anrechnung gegenüber einem projizierten Referenzwert (hier: 8,75 Mt CO<sub>2</sub>) beläuft sich der Anrechnungsbeitrag durch die stoffliche Holznutzung auf null, sofern die tatsächliche Entwicklung der Projektion entspricht. Die tatsächlichen jahres-

durchschnittlichen Emissionen sind für die BaU Projektion und die Szenarien im Gegensatz zu den potentiellen Anrechnungsbeiträgen gegenüber dem Referenzwert kursiv abgebildet.

Ebenfalls für den Produktionsansatz und mit den gleichen Berechnungsparametern, aber mit einer Trendfunktion (vgl. Kap. 5.2.4.1) auf Basis der zehnjährigen Stützperiode 2003 bis 2012, wurde die in Abbildung 6-31 gezeigte BaU Projektion gerechnet, deren sich daraus ergebender potentieller Beitrag für die verschiedenen Anrechnungsoptionen in Abbildung 6-32 dargestellt ist.

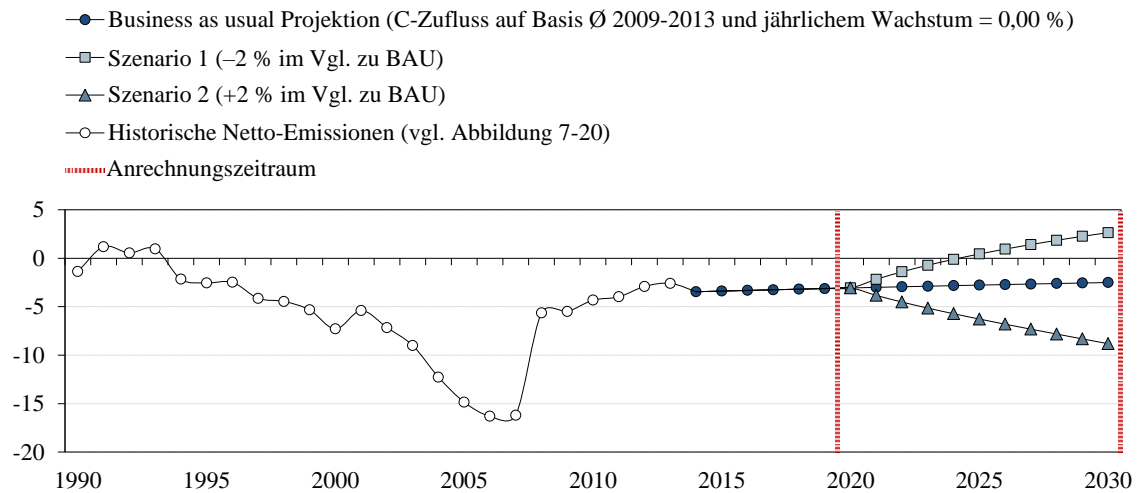


**ABBILDUNG 6-31:** Historische und projizierte Netto-Emissionen auf Basis des Produktionsansatz und einer Trendfortschreibung [in Mt CO<sub>2</sub>]

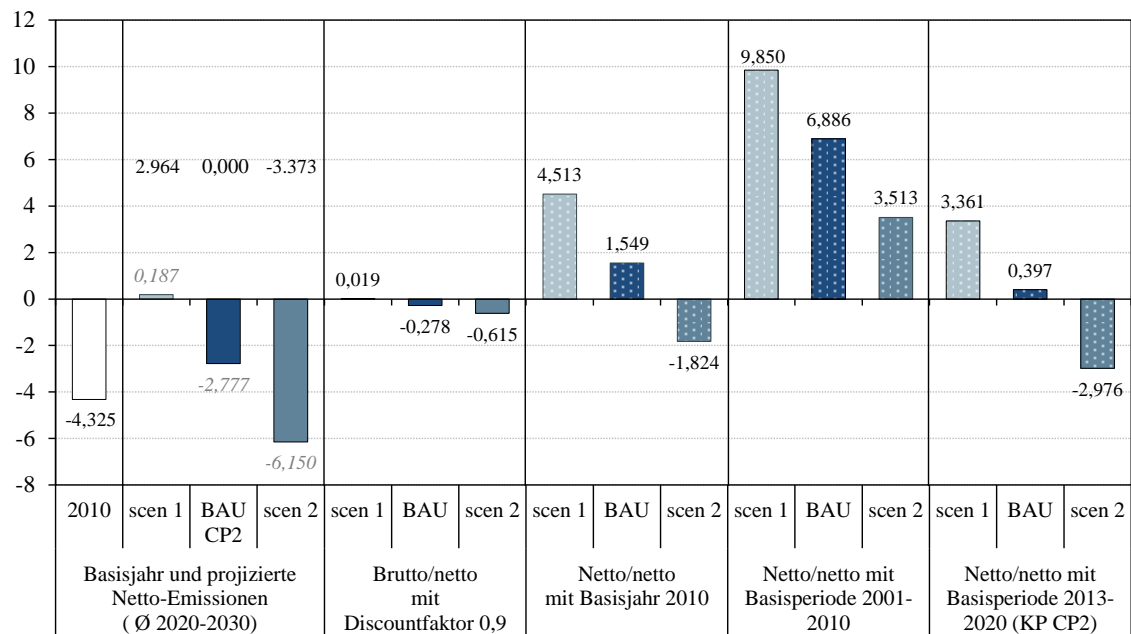


**ABBILDUNG 6-32:** Potentieller jährlicher Anrechnungsbeitrag verschiedener Anrechnungsoptionen auf Basis des Produktionsansatzes und einer Trendfortschreibung (s. Abbildung 6-31) [in Mt CO<sub>2</sub>]

Als drittes Beispiel für eine Abschätzung möglicher Anrechnungsoptionen von Holzprodukten wurden die Netto-Emissionszeitreihen in Abbildung 6-33 für den aktivitätsbasierten Ansatz bis zum Jahr 2030 projiziert, so dass Fragen rund um eine mögliche Berücksichtigung des Holzproduktespeichers in einem internationalen Klimaschutzabkommen nach dem Jahr 2020 beantwortet werden können.



**ABBILDUNG 6-33:** Historische und projizierte Netto-Emissionen auf Basis des aktivitätsbasierten Ansatzes und jährlicher Wachstumsraten [in Mt CO<sub>2</sub>]



**ABBILDUNG 6-34:** Potentieller jährlicher Anrechnungsbeitrag verschiedener Anrechnungsoptionen auf Basis des aktivitätsbasierten Ansatzes und jährlicher Wachstumsraten (s. Abbildung 6-29) [in Mt CO<sub>2</sub>]

Die geerbten Emissionen der auf einer jahresdurchschnittlichen Wachstumsrate basierenden Projektion wurden zu diesem Zweck Funktionsgleichung 22 und  $t_0=1990$  gerechnet (vgl. Abbildung 6-19). Die Szenarien gehen in diesem Beispiel von einem abweichenden jährlichen Wachstum in Höhe von  $-2$  bzw.  $+2$  % des Kohlenstoffzuflusses auf Basis des Durchschnitts der Jahre 2009 bis 2013 aus, wobei sich das Szenario 1 während des Betrachtungszeitraums von 2020 bis 2030 zur Emissionsquelle entwickelt und die Senkenwirkung im Szenario 2 gegenüber den Vorjahren wieder zunimmt. Als Anrechnungsoptionen wurden für dieses letzte Beispiel ein Basisjahr 2010, der Referenzwertansatz (hier: Referenzwert  $-2,77$  Mt CO<sub>2</sub>) und jeweils eine Referenzperiode von 2001 bis 2010 und von 2013 bis 2020 gewählt (Abbildung 6-34).

Es wird deutlich, dass die mit dem WoodCarbonMonitor gerechneten Beispiele für mögliche Ergebnisse einer Anrechnung des Holzproduktespeichers unter den verschiedenen Anrechnungsoptionen lediglich eine grobe Einschätzung liefern können; doch untermauern sie ansonsten nur theoretisch diskutierte Ansätze und können somit eine Positions- bzw. Entscheidungsfindung unterstützen. Zugleich helfen die mit dem Modell vorgenommenen Berechnungen für verschiedene Anrechnungsoptionen dabei, die Verhandlungspositionen der jeweiligen Länder besser nachvollziehen zu können. So zeigen die Ergebnisse möglicher Auswirkungen diskutierter Anrechnungsoptionen für die zweite Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls mittels eines Szenarienfächers im ersten Beispiel (s. S. 213), dass bei den unterstellten Wachstumsraten des Kohlenstoffzuflusses in den Produktspeicher insbesondere bei einem Vergleich der Projektion und Szenarien gegenüber Netto-Emissionsdaten des Zeitraums bis 2008 mit sehr hohen Lastschriften für Deutschland zu rechnen gewesen wäre. Dies bestätigen auch die Berechnungen mittels eines Trends (s. S. 214).

Auch zeigen die Ergebnisse, dass die Verwendung historischer Referenzen bei einer Anrechnung – ähnlich wie bei der Waldbewirtschaftung – aufgrund historisch verschiedener Verbrauchs- bzw. Produktionsmuster von Holzprodukten in den Ländern zu vollkommen unterschiedlichen Ergebnissen führen (hier nicht abgebildet). Dies bedeutet damit per Definition Gut- oder Lastschriften für die entsprechenden Länder. Daher wird solch ein Vorgehen kaum die Unterstützung aller Länder bekommen – insbesondere nicht von solchen, die mit Lastschriften rechnen müssen – und somit eigentlich auch keinen Handlungsanreiz für einen verbesserten Klimaschutz darstellen. Dies trifft auch bei einer möglichen Suche nach neuen oder verbesserten technischen Regeln für ein Nachfolgeabkommen des Kyoto-Protokolls zu (vgl. Kapitel 7). Ein möglicher Anrechnungsbeitrag, der auf Basis eines projizierten Referenzwertes ermittelt wird, ist hingegen für alle Länder zunächst ergebnisoffen und unabhängig von dem historischen Verlaufsmuster der Netto-Emissionen.

Neben der Analyse verschiedener Anrechnungsmodalitäten, ermöglicht der WoodCarbonMonitor auch den Vergleich eines in der Vergangenheit projizierten Emissionspfades, der z. B. für die Festlegung des Referenzwertes verwendet wurde, mit den tatsächlichen Netto-Emissionsdaten, die z. B. für die jährliche Berichterstattung verwendet werden.



## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die stoffliche Nutzung von Holz verlängert die Bindung von biogenem Kohlenstoff, den Bäume während ihres Wachstums der Atmosphäre entnommen haben. Der nachwachsende Rohstoff ist damit Teil des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs. Die Nutzung dieses Rohstoffs spielt eine zentrale Rolle bei der durch menschliches Handeln verursachten Einbringung des Treibhausgases Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre. Dennoch wurde die Kohlenstoffspeicherwirkung der stofflichen Holznutzung in der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls (2008 bis 2012) nicht berücksichtigt, da sich die Staatengemeinschaft nicht auf ein einheitliches Vorgehen zur Berücksichtigung des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten bei der Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Quellen und ihrer Einbindung durch Senken unter diesem ersten internationalen Klimaschutzabkommen einigen konnte. Für Deutschland lagen nur sehr wenige und oftmals widersprüchliche Schätzungen über die Größe des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten vor, die den vom Weltklimarat (IPCC) formulierten Anforderungen an die gute fachliche Praxis nicht genügen und eine Einordnung des klimapolitischen Beitrags der Speicherwirkung in Holzprodukten nicht ermöglichen.

Vor diesem Hintergrund war es das Ziel der vorliegenden Studie, den Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz durch die Kohlenstoffspeicherung für Deutschland abzuschätzen. Zeitgleich zum Beginn der Arbeit an der vorliegenden Dissertationsschrift wurde das Thema Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten auch ein zentraler Bestandteil des klimapolitischen Diskurses. Deshalb wurde schnell deutlich, dass eine rein naturwissenschaftliche bzw. rechnerische Herangehensweise nicht ausreichen und keine zufriedenstellende Antwort auf die Frage nach der Höhe des Beitrags der Speicherleistung zum Klimaschutz geben würde. Aus diesem Grund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit neben den methodisch-rechnerischen Aspekten auch mit dem politischen Kontext und der Frage nach dem „richtigen“ Berechnungs- bzw. Anrechnungsansatz für Holzprodukte, die als zentraler Bestandteil der klimapolitischen Diskussion über die Fortführung des Kyoto-Protokolls unter der Bali Roadmap ab dem Jahr 2008 auf der Agenda stand. Das beim Thema Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten zutage tretende Zusammenspiel von Wissenschaft und Politik war transparent zu erörtern und zwischen rein naturwissenschaftlich-technischen Aspekten und den politischen Rahmenbedingungen zu unterscheiden.

Einleitend werden zunächst der politische und wissenschaftliche Kontext der Arbeit beschrieben und die bis dahin bestehenden Methoden zur Berechnung des Kohlenstoffspeichers vorgestellt. Getrennt hiervon werden die im Rahmen des klimapolitischen Diskurses thematisierten Systemgrenzen und der Bezugsrahmen einer Abschätzung der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten erörtert. Dabei wird einerseits zwischen dem Diskussionsstand vor Beginn der Arbeit und andererseits ihrem eigenen Beitrag zur Etablierung einer deutschen Verhandlungsposition

und dem Beschluss der Staatengemeinschaft zur Berücksichtigung von Holzprodukten in der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls unterschieden. Die vorliegende Arbeit beschreibt somit auch die Entwicklung eines neuen Ansatzes zur Berücksichtigung des Holzproduktspeichers in der internationalen Klimapolitik, der parallel zu dem Forschungsprozess zu dieser Arbeit und unter ihrem wesentlichen Einfluss entstanden ist.

Als zentrales Ergebnis der vorliegenden Arbeit wird ein detailliertes Computermodell, der *WoodCarbonMonitor*, zur Berechnung der Kohlenstoffspeicherwirkung in Holzprodukten vorgestellt. In ihm werden neben technisch-methodischen Aspekten auch die klimapolitischen Rahmenbedingungen, deren Beachtung für die Aussagekraft und Verwendung von Modellergebnissen unabdingbar ist, durch die Integration verschiedener optionaler Berechnungsparameter berücksichtigt. Das Modell *WoodCarbonMonitor* implementiert mehrere beschriebene Verfahren zur Berechnung des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten. Durch ihre rechnerische Umsetzung konnten sie miteinander verglichen und ihre Vor- und Nachteile am Beispiel von Deutschland evaluiert werden. Im Ergebnis dieser Analyse wurde die Flussdatenmethode aus einer Kombination von Daten über die Produktion und den Außenhandel von Holz- und Papierhalbwaren mit Informationen über ihre durchschnittliche Nutzungsdauer als zweckmäßigste Methode für die Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten im klimapolitischen Kontext identifiziert. Zudem wurden mehrere Zerfallsfunktionen zur Berechnung der Netto-Emissionszeitreihen aus dem Produktspeicher im Modell implementiert, deren Unterschiede anhand von Beispielen analysiert und im Ergebnisteil der Arbeit vorgestellt werden. In diesem Zusammenhang kann die Eignung der von Pingoud und Wagner (2006) entwickelten exponentiellen Funktionsgleichung für Deutschland bestätigt werden.

Die folgenden methodischen Verbesserungen bei der Abschätzung der Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten konnten mit dem Modell erstmalig umgesetzt werden:

- separate Berechnung der Netto-Emissionszeitreihen für einzelne Produktkategorien unter Verwendung differenzierter Kohlenstoffumrechnungsfaktoren;
- Berechnung länderspezifischer Nutzungsdauern unter Verwendung detaillierter Marktinformationen;
- Reduzierung der Unsicherheiten durch eine neue Methode zur Berechnung „geerbter Emissionen“ aus dem bestehenden Produktspeicher.

Die für die Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten zur CO<sub>2</sub>-Bilanz eines Landes notwendige Festlegung der Systemgrenzen kann über die Benutzeroberfläche des *WoodCarbonMonitor* ausgewählt und je nach Fragestellung flexibel angepasst werden. Neben bereits bestehenden Ansätzen für die Berechnung umfasst dies u. a. die für die zweite Verpflichtungsperiode unter dem Kyoto-Protokoll beschlossenen Anrechnungsregeln für Holzprodukte. Weiter können die in den Klimaverhandlungen diskutierten Anrechnungsoptionen in dem für die Holznutzung relevanten LULUCF-Sektor flexibel mit den im Modell integrierten Berechnungsmethoden kombiniert und auf die Netto-Emissionszeitreihen des Holzproduktespeichers angewendet werden.

Da neben den für die Berechnung notwendigen Informationen für Deutschland auch die Daten der Mitgliedsstaaten der EU sowie zahlreicher weiterer Annex I- und Nicht-Annex I-Länder des Kyoto-Protokolls im *WoodCarbonMonitor* hinterlegt wurden, ermöglicht das Modell eine länderspezifische Abschätzung der historischen und zukünftigen Kohlenstoffspeicherwirkung in Holzprodukten.

Auf dieser Grundlage wurden mit dem *WoodCarbonMonitor* bereits während seiner Entwicklungsphase konkrete in den internationalen Klimaverhandlungen auftauchende Fragestellungen zur Einbeziehung des Holzproduktespeichers in die Anrechnung unter dem Kyoto-Protokoll beantwortet. Darüber hinaus wurden im Frühjahr 2011 mit dem Modell errechnete Projektionen über die zukünftige Entwicklung der Netto-Emissionen der stofflichen Holznutzung von Deutschland und weiteren 16 Mitgliedsstaaten der EU (vgl. Rüter 2011a) zur Festlegung eines Referenzwertes zur Anrechnung des Produktespeichers im Rahmen der Kyoto-Aktivität Waldbewirtschaftung ab dem Jahr 2013 verwendet.<sup>14</sup> Dadurch wurde bereits während der Entstehung der vorliegenden Arbeit die Entscheidungsfindung der Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention über die Ende des Jahres 2013 beschlossene verpflichtende Berücksichtigung des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten unterstützt. Folgende wesentliche Elemente kennzeichnen die Umsetzung des neuen Berechnungsansatzes:

- Differenzierte Ermittlung anrechenbarer Kohlenstoffmengen in Holzprodukten aus heimischem Einschlag, die stofflich genutzt werden;
- Zuordnung der anrechenbaren Holzmengen zu den Waldaktivitäten unter dem Kyoto-Protokoll;
- Ausschluss von Holz aus Entwaldung von der Anrechnung.

Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten methodischen Vorarbeiten zur Umsetzung des neuen Berechnungsansatzes für Holzprodukte bilden die wesentliche Grundlage für die Ausgestaltung der verbindlichen Vorgaben der Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention durch den IPCC (vgl. Rüter *et al.* 2014). Folglich setzt das entwickelte Berechnungsmodell auch die methodischen Vorgaben des *2013 KP Supplement* des IPCC für die verpflichtende Abschätzung der Netto-Emissionen aus dem Holzproduktespeicher um. Die vorliegende Arbeit bildet damit die Grundlage für die jährlich durchzuführende Treibhausgasberichterstattung über den Beitrag der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten zur nationalen CO<sub>2</sub>-Bilanz unter der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls und der Klimarahmenkonvention für Deutschland, die erstmals im Jahr 2015 für das Berichtsjahr 2013 am Thünen-Institut für Holzforschung durchgeführt wurde (vgl. Rüter 2016). Danach beliefen sich die aus dem Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten stammenden Netto-Emissionen auf durchschnittlich etwas über -3,5 Mt CO<sub>2</sub> a<sup>-1</sup> im Zeitraum 2009 bis 2013.

---

<sup>14</sup> <http://unfccc.int/bodies/awg-kp/items/5896.php>

Im Ergebnis wurde die Forschungsfrage der Arbeit nach dem Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz also beantwortet und in den klimapolitischen Kontext gestellt.

Mit der Fortführung der internationalen Klimaverhandlungen unter der Durban Roadmap ab dem Jahr 2012 über die Ausgestaltung der internationalen Klimapolitik nach dem Kyoto-Protokoll (UNFCCC 2012b) und der Verabschiedung des Paris Agreements Ende des Jahres 2015 (UNFCCC 2015) wird deutlich, dass die Staatengemeinschaft gewillt ist auch nach dem Jahr 2020 Treibhausgasemissionen unter der Ägide der Vereinten Nationen zu reduzieren. Eine Fortführung der Einbeziehung des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten als Teil der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung von bewirtschafteten Wäldern kann in diesem Zusammenhang als wahrscheinlich gelten. Zugleich hat die EU mit dem Beschluss Nr. 529/2013/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2013 „über die Anrechnung und Verbuchung von Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen infolge von Tätigkeiten im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft [...]“ die Regeln der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls praktisch übernommen (EU 2013), so dass entsprechende Regeln auch über das Jahr 2020 hinaus als Grundlage für die Abschätzung der Treibhausgasbudgets in der EU dienen können – unabhängig davon, ob sich die Staatengemeinschaft unter einem zukünftigen internationalen Klimaregime auf neue bzw. geänderte technische Regeln für eine Anrechnung einigen kann. In jedem Fall ermöglicht das entwickelte Modell auch zukünftig eine verhandlungsbegleitende Beantwortung methodischer Fragen sowie die Evaluierung möglicher Anrechnungsregeln in Bezug auf die Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten.

Neben der Verwendung des **WoodCarbonMonitor** zur Abschätzung des Beitrags der stofflichen Nutzung von Holz im Rahmen internationaler Verpflichtungen zur Treibhausgasberichterstattung (UN und EU), bietet das Berechnungsmodell weitere zukünftige Verwendungsmöglichkeiten rund um die Ermittlung und Darstellung des Klimaschutzbeitrages des Forst- und Holzsektors. So erlaubt die Verknüpfung des **WoodCarbonMonitor** mit Modellen zur Abschätzung der Auswirkungen unterschiedlicher Waldbewirtschaftungsregime die Berechnung der biogenen CO<sub>2</sub>-Bilanz des gesamten Sektors eines Landes. Eine weitere Spezifizierung der Berechnung für Markt- oder Anwendungsbereiche von Holz würde auch eine Abschätzung eines möglichen Klimaschutzbeitrages von bestimmten Maßnahmen erlauben. Dies kann auch die Einbeziehung der mit der Herstellung von Holzprodukten verbundenen fossilen Treibhausgasemissionen in die Bilanz beinhalten. In diesem Fall sind einfach die im **WoodCarbonMonitor** hinterlegten Zeitreihen zu Produktion- und Außenhandel von Holzhalbwaren mit Ökobilanzergebnissen zu ihrem Treibhausgaspotential über die im Modell vorhandenen Schnittstellen zu kombinieren. Sofern auch Ökobilanzergebnisse zu Holzfertigwaren und ihren möglichen Substituten aus anderen Materialien vorliegen, können zudem die mit der Verwendung von Holz verbundenen indirekten Substitutionseffekte mit dem **WoodCarbonMonitor** quantifiziert werden. Dies kann sowohl über die einfache Kombination von Aktivitätsdaten mit aggregierten Substitutionsfaktoren realisiert werden (Rüter 2011b und Rüter *et al.* 2011), als auch durch eine detaillierte Verknüpfung entsprechender Ökobilanzmodelle mit den im **WoodCarbonMonitor** hinterlegten Da-

ten der Produktions- und Außenhandelsstatistik für Holzwaren und entsprechenden Holzmarktinformationen.

Letzteres Vorgehen steht beispielsweise im Fokus des von der Generaldirektion Klimapolitik der EU-Kommission in Auftrag gegebenen Forschungsvorhabens *Study on Climate Benefits of Material Substitution by Forest Biomass and Harvested Wood Products: Perspective 2030* (Akronym: ClimWood2030, N° CLIMA.A.2/ETU/2013/0009), welches die Auswirkungen verschiedener Waldbewirtschaftungs- und Holzverwendungsszenarien auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Sektors in der EU untersucht (Rüter *et al.* 2016). Ebenso wie in weiteren laufenden Forschungsprojekten des von BMEL und BMUB geförderten Waldklimafonds (WEHAM-Szenarien, FKZ 28W-C-4-043-01; THG-Holzbau, FKZ 28W-B-3-054-03)<sup>15</sup>, wird der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte **WoodCarbonMonitor** in dem EU-Projekt ClimWood2030 in Kombination mit anderen Modellen eingesetzt, um die Möglichkeiten verschiedener Nutzungsszenarien für den nachwachsenden Rohstoff Holz im Hinblick auf eine Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz des gesamten Forst- und Holzsektors auszuloten. Dafür sind u. a. Erweiterungen des **WoodCarbonMonitor** vorgesehen, die beispielsweise die in anderen Berechnungsmodellen ermittelten Kohlenstoffflüsse und Speichereffekte des Forst- und Holzsektors zusammenführen und in Übersichtsgrafiken abbilden sollen.

Es bestehen also sehr gute Aussichten, dass der im Rahmen dieser Dissertation entwickelte **WoodCarbonMonitor** auch in Zukunft einen wichtigen Beitrag dabei leisten wird, der Politik und Gesellschaft die notwendige Datengrundlage für den Forst- und Holzsektor zur Verfügung zu stellen, um darauf aufbauend mögliche Handlungsoptionen zur Reduzierung der klimaschädlichen Treibhausgasemissionen abzuleiten.

---

<sup>15</sup> <http://www.waldklimafonds.de/projekte/> (am 20. Januar 2016)



## 8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>ABBILDUNG 1-1: Veränderung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration gemessen am Mauna Loa, Hawaii (Keeling-Kurve, Stand Januar 2015).....</i>	<i>16</i>
<i>ABBILDUNG 1-2: Organisationsstruktur des IPCC.....</i>	<i>19</i>
<i>ABBILDUNG 1-3: Ablauf des Austauschs von Informationen zwischen Politik und Wissenschaft und der Bereitstellung von wissenschaftlichen Gutachten für politisches Handeln .....</i>	<i>22</i>
<i>ABBILDUNG 1-4: Beispiel für die Übertragung von Kohlenstoff entlang der Speicherkette .....</i>	<i>27</i>
<i>ABBILDUNG 2-1: Ermittlung der Kohlenstoffspeicheränderung (<math>\Delta C</math>) mittels Inventuren zur Abschätzung der Netto-CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb eines Zeitraums.....</i>	<i>36</i>
<i>ABBILDUNG 2-2: Ermittlung der Speicherhöhe auf Basis der Kohlenstoffflüsse in den und aus dem Kohlenstoffspeicher zur Abschätzung der Netto-CO<sub>2</sub>-Emissionen über die Änderung des Speichers innerhalb eines Zeitraums .....</i>	<i>36</i>
<i>ABBILDUNG 2-3: Kohlenstoffstrom vom Rohholz zum Produktspeicher mit den in den Modellen CBM-FPS und Carbon-Object Tracker unterstellten Allokationsfaktoren.....</i>	<i>39</i>
<i>ABBILDUNG 2-4: Nutzungsmuster der Halbwaren im Modell HARVCARB.....</i>	<i>41</i>
<i>ABBILDUNG 2-5: Kohlenstoffkreislauf in den Modellen HARVCARB und WOODCARB.....</i>	<i>42</i>
<i>ABBILDUNG 2-6: Flussdiagramm des Kohlenstoffs im Holzprodukte-Modul des Modells CO2FIX V2.0. ....</i>	<i>45</i>
<i>ABBILDUNG 2-7: Vereinfachte Klassifikation von Holzprodukten auf Basis der FAO Definitionen.....</i>	<i>48</i>
<i>ABBILDUNG 2-8: Ermittlung des Verbrauchs über Daten zu Produktion und Außenhandel.....</i>	<i>48</i>
<i>ABBILDUNG 2-9: Schema der zur Ermittlung der geerbten Emissionen mittels Datenzeitreihen über den historischen Kohlenstoffzufluss in den Produktspeicher.....</i>	<i>49</i>
<i>ABBILDUNG 2-10: Schema für die Ermittlung der um die jeweilige Nutzungsdauer der Produkte verzögerten Freisetzung von Kohlenstoff aus dem Produktspeicher .....</i>	<i>51</i>
<i>ABBILDUNG 2-11: Retentionskurven für verschiedene Holzprodukte und ihre Verwendungsbereiche .....</i>	<i>53</i>
<i>ABBILDUNG 2-12: In den Modellen CBM-FPS und Carbon-Object-Tracker verwendete Retentionskurven zur Ermittlung des Anteils des im Speicher verbleibenden Kohlenstoffs .....</i>	<i>54</i>
<i>ABBILDUNG 2-13: Zusammengesetzte Zerfallskurven zur Bestimmung des im Speicher verbleibenden Anteils an Kohlenstoff.....</i>	<i>56</i>

<i>ABBILDUNG 2-14: Logistische Zerfallskurven für Holzprodukte unterschiedlicher Nutzungsdauer zur Berechnung des Anteils der im Speicher verbleibenden Produkte.....</i>	<i>58</i>
<i>ABBILDUNG 2-15: Berechnung des Anteils der im Speicher verbleibenden Produkte mittels einer exponentiellen Zerfallskurve 1. Ordnung in dem Modell CO2FIX V2.0.....</i>	<i>61</i>
<i>ABBILDUNG 2-16: Schematische Darstellung der Berechnung des Kohlenstoffspeicheraufbaus auf Basis des jährlichen Kohlenstoffzuflusses unter Verwendung der Funktionsgleichung 11 ..</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 3-1: Anrechnung der Netto-Emissionen im LULUCF-Sektor nach Brutto/netto-Methode mit Obergrenze.....</i>	<i>69</i>
<i>Abbildung 3-2: Anrechnung der Netto-Emissionen im LULUCF-Sektor nach Netto/netto-Methode, hier: Netto-Quelle aufgrund reduzierter Senkenwirkung im Vergleich zum Basisjahr 1990.....</i>	<i>71</i>
<i>Abbildung 3-3: Anrechnung der Netto-Emissionen der Waldbewirtschaftung auf Basis eines projizierten Referenzwertes.....</i>	<i>75</i>
<i>ABBILDUNG 3-4: Schema des IPCC Default Ansatzes.....</i>	<i>79</i>
<i>ABBILDUNG 3-5: Schema des stock-change Ansatzes.....</i>	<i>81</i>
<i>ABBILDUNG 3-6: Schema des Produktionsansatzes.....</i>	<i>83</i>
<i>ABBILDUNG 3-7: Schema des atmospheric-flow Ansatzes.....</i>	<i>85</i>
<i>ABBILDUNG 3-8: Schema des stock-change of domestic origin Ansatzes.....</i>	<i>86</i>
<i>ABBILDUNG 3-9: Schema des restricted stock-change Ansatzes.....</i>	<i>92</i>
<i>ABBILDUNG 4-1: Vereinfachung des Entscheidungsbaums zur Auswahl der geeigneten Methode für Holzprodukte nach IPCC 2006 GL.....</i>	<i>113</i>
<i>ABBILDUNG 4-2: Kommentierter 2013 KP Supplement Entscheidungsbaum für Holzprodukte.....</i>	<i>117</i>
<i>ABBILDUNG 4-3: Entscheidungsbaum (modifiziert) zur Überprüfung der Konformität der HWP Abschätzung mit dem hinterlegten Referenzwert nach Entscheidung 2/CMP.7.....</i>	<i>121</i>
<i>ABBILDUNG 5-1: Baufertigstellungen von Wohngebäuden in Deutschland (gesamt und Holzbau).....</i>	<i>125</i>
<i>ABBILDUNG 5-2: Altersklassenverteilung im Gebäudebestand in Deutschland.....</i>	<i>126</i>
<i>ABBILDUNG 5-3: Baufertigstellungen von Wohngebäuden aus Holz in Deutschland (gesamt und Fertigteilbauweise).....</i>	<i>128</i>
<i>ABBILDUNG 5-4: Daten der Holzeinschlagstatistik in Deutschland, dargestellt getrennt nach Stammholz (S) und Industrie- und Energieholz (I) sowie Hauptbaumarten ab dem Jahr 1990/131</i>	



*ABBILDUNG 5-5: Modellierte Kohlenstoffflüsse entlang der Verarbeitungsketten von Nadel- und Laubholz (Stamm- und Industrieholz) zu Holzhalbwaren ..... 133*

*ABBILDUNG 5-6: Gegenüberstellung der Höhe des Stammholzverbrauchs (StBA) mit der benötigten Menge an Rohholz für die Höhe der Produktion von Halbwaren (StBA) ..... 134*

*ABBILDUNG 5-7: Verbuchung von Fichtenschnittholz unter der jeweils relevanten Warennummer (Außenhandel) im Verlauf der Jahre ..... 136*

*ABBILDUNG 5-8: Beispiel für Verarbeitungsketten vom Rohholz bis zum Fertigprodukt..... 138*

*ABBILDUNG 5-9: Anteil der Sägewerke in Deutschland an der Gesamteinschnittmenge nach Einschnittgrößenklassen und Jahren ..... 139*

*ABBILDUNG 5-10: Schnittholzproduktion in Deutschland nach den Daten des Statistischen Bundesamtes..... 141*

*ABBILDUNG 5-11: Kurvenverlauf verschiedener Zerfallsfunktionen zur Ermittlung der jährlichen Kohlenstoffabgänge aus dem Produktspeicher..... 144*

*ABBILDUNG 5-12: Vergleich des Kurvenverlaufs der logistischen und exponentiellen Funktionsgleichungen 6 und 11 (s. S. 57 und 64) unter Anwendung der Halbwertszeiten 50 und 200 Jahre für die Holzverwendung in Gebäuden..... 147*

*ABBILDUNG 5-13: Screenshot der Steuerungsoberfläche des WoodCarbonMonitor, hier: historische Entwicklung der Netto-Emissionen (Stand Oktober 2015)..... 159*

*ABBILDUNG 5-14: Screenshot der Auswahlmenüs zu Aktivitätsdaten-relevanten Steuerungsparametern (Stand August 2015) ..... 161*

*ABBILDUNG 5-15: Holzeinschlag für Deutschland nach eigener Berechnung und verschiedenen Quellen..... 162*

*ABBILDUNG 5-16: Produktion und Export von Massivholzhalbwaren in Deutschland nach FAO (2015)..... 164*

*ABBILDUNG 5-17: Berechneter und über Altpapiereinsatzquote  $p$  geschätzter Altpapieranteil in der jährlichen Papierproduktion in Deutschland ..... 169*

*ABBILDUNG 5-18: Screenshot der Auswahlmenüs und Steuerungsparameter für hinterlegte Nutzungsdauern (Stand Oktober 2015)..... 171*

*ABBILDUNG 5-19: Tabellenstruktur der im WoodCarbonMonitor hinterlegten Marktinformationen am Beispiel des Einsatzbereichs Dachkonstruktion im Segment Wohnbau im Marktbereich Neubau ..... 173*

*ABBILDUNG 5-20: Screenshot eines Auszugs aus der Zuordnungsliste mit Auswahlmenü der Verwendungsdeskriptoren (Stand Juni 2015)..... 174*

<b>ABBILDUNG 5-21:</b> Screenshot eines Auszugs der Marktmatrize zur Berechnung länderspezifischer Nutzungsdauern (Stand Juni 2015).....	175
<b>ABBILDUNG 5-22:</b> Screenshot der Auswahlmenüs zu Berechnungsmethoden des Kohlenstoffspeichers im WoodCarbonMonitor (Stand Dezember 2015).....	175
<b>ABBILDUNG 5-23:</b> Screenshot der für die Auswahl der Ausgangsdaten für die Berechnung von Projektionen relevanten Daten (Stand Dezember 2015).....	178
<b>ABBILDUNG 5-24:</b> Screenshot der Auswahlmenüs zu den für die Berechnung von Projektionen und Szenarien relevanten Steuerungsparametern für Deutschland (Stand Dezember 2015) ...	179
<b>ABBILDUNG 5-25:</b> Holzeinschlagsprognosen nach WEHAM (Stand 2009).....	182
<b>ABBILDUNG 5-26:</b> Screenshot der Auswahlmenüs zur Berechnung der Netto-Emissionen für Frankreich (Stand Dezember 2015).....	183
<b>ABBILDUNG 5-27:</b> Screenshot der Auswahlmenüs zu Berechnungsmethoden des Kohlenstoffspeichers im WoodCarbonMonitor (Stand Dezember 2015).....	184
<b>ABBILDUNG 5-28:</b> Screenshot der Steuerungsoberfläche des WoodCarbonMonitor, hier: Anrechnungsoptionen (Stand Dezember 2015).....	185
<b>ABBILDUNG 6-1:</b> Kohlenstoffzufluss nach stock-change Ansatz, unterschieden nach Importen und heimischem Verbrauch der Produktion (Stand Dezember 2015).....	188
<b>ABBILDUNG 6-2:</b> Kohlenstoffzufluss nach Produktionsansatz mit Abschätzung der Kohlenstoffmengen aus heimischem Einschlag (Stand Dezember 2015).....	188
<b>ABBILDUNG 6-3:</b> Jährlicher Rohstoffanteil aus heimischer Produktion fDPi der im Modell berücksichtigten Rohstoffkategorien .....	189
<b>ABBILDUNG 6-4:</b> Kohlenstoff in produzierten Holzhalbwaren und davon berücksichtigter Kohlenstoffzufluss nach aktivitätsbasiertem Ansatz (2/CMP.7) (Stand Dezember 2015).....	190
<b>ABBILDUNG 6-5:</b> Vergleich der geschätzten Netto-Emissionen des Holzproduktespeichers für verschiedene Berechnungsansätze (Stand Oktober 2015).....	191
<b>ABBILDUNG 6-6:</b> Netto-Emissionen des Holzproduktespeichers in Deutschland, berechnet auf Basis des gesamten heimischen Verbrauchs (stock-change Ansatz), (Stand Oktober 2015) ....	192
<b>ABBILDUNG 6-7:</b> Netto-Emissionen des aus heimischem Einschlag produzierten Holzproduktespeichers nach Produktgruppen und Verbrauchsort (aktivitätsbasierter Ansatz nach 2/CMP.7), (Stand Oktober 2015) .....	192
<b>ABBILDUNG 6-8:</b> Vergleich von Zeitreihen zur Produktion von Nadelnschnittholz und deren Abweichung .....	195
<b>ABBILDUNG 6-9:</b> Vergleich von Daten zur Produktion von Spanplatte und deren Abweichung .....	196

**ABBILDUNG 6-10** *Abgeschätzter Kohlenstoffzufluss nach Produktionsansatz bei Verwendung unterschiedlicher Umrechnungsfaktoren* ..... 197

**ABBILDUNG 6-11:** *Entwicklung der Netto-Emissionen nach dem aktivitätsbasierten Ansatz in Abhängigkeit veränderter Halbwertszeiten*..... 198

**ABBILDUNG 6-12:** *Höhe der Netto-Emissionen aus dem Produktspeicher in Abhängigkeit von veränderten Halbwertszeiten* ..... 199

**ABBILDUNG 6-13:** *Verlauf der Netto-Emissionen aus dem Verbrauch (stock-change Ansatz) im Vergleich konstanter und sich jährlich reduzierender Halbwertszeiten für Holzhalbwaren*.... 199

**ABBILDUNG 6-14:** *Verlauf der Netto-Emissionen nach Produktionsansatz im Vergleich konstanter und jährlich reduzierender Halbwertszeiten für Holzhalbwaren*..... 200

**ABBILDUNG 6-15:** *Verlauf der Netto-Emissionen nach stock-change Ansatz auf Basis von Default- und länderspezifischen Halbwertszeiten für Schnittholz und Holzwerkstoffe*..... 201

**ABBILDUNG 6-16:** *Abschätzung der Entwicklung des Kohlenstoffspeichers auf Basis unterschiedlicher Methoden zur Berücksichtigung der geerbten Emissionen* ..... 202

**ABBILDUNG 6-17:** *Netto-Emissionen des Produktspeichers bei Verwendung von unterschiedlichen Methoden zur Berücksichtigung der geerbten Emissionen*..... 203

**ABBILDUNG 6-18:** *Abschätzung der Entwicklung des Kohlenstoffspeichers mit und ohne Berücksichtigung der geerbten Emissionen vor 1990*..... 203

**ABBILDUNG 6-19:** *Jährliche Netto-Emissionen des Produktspeichers mit und ohne Berücksichtigung der geerbten Emissionen vor 1990*..... 204

**ABBILDUNG 6-20:** *Netto-Emissionen des heimischen Kohlenstoffspeichers (stock-change Ansatz) auf Basis unterschiedlicher Zerfallsfunktionen*..... 205

**ABBILDUNG 6-21:** *Historischer und zukünftiger C-Zufluss auf Basis definierter jährlicher Wachstumsraten und die darüber ermittelten Netto-Emissionen für den stock-change Ansatz* 206

**ABBILDUNG 6-22:** *Historischer und zukünftiger C-Zufluss und die auf Basis der durchschnittlichen Wachstumsrate der Jahre 2008-2012 ermittelten Netto-Emissionen für stock-change und Produktionsansatz* ..... 207

**ABBILDUNG 6-23:** *Historischer und projizierter C-Zufluss auf Basis des Trends der Jahre 2003-2012 für stock-change und Produktionsansatz sowie ermittelte Netto-Emissionen*..... 208

**ABBILDUNG 6-24:** *Im Modell hinterlegte Zeitreihen zum Holzeinschlag (Stand August 2014)* 209

**ABBILDUNG 6-25:** *Berechnung des C-Zuflusses auf Basis des Verhältnisses aus historischem zu projiziertem Holzeinschlag (Stand Februar 2011)* ..... 209

**ABBILDUNG 6-26:** *Historische und projizierte Netto-Emissionen und hinterlegter Referenzwert für Holzprodukte (Stand Februar 2011)* ..... 210

<i><b>ABBILDUNG 6-27:</b> Berechnung des C-Zuflusses in den Produktspeicher auf Basis des Verhältnisses aus historischem zu projiziertem Holzeinschlag (WEHAM2003 Basisszenario). beide BWI2012-kalibriert (Stand März 2016).....</i>	<i>210</i>
<i><b>ABBILDUNG 6-28:</b> Historische und projizierte Netto-Emissionen und möglicher aktualisierter Referenzwert für Holzprodukte (Stand März 2016) .....</i>	<i>211</i>
<i><b>ABBILDUNG 6-29:</b> Historische und projizierte Netto-Emissionen auf Basis des Produktionsansatzes und jährlicher Wachstumsraten .....</i>	<i>213</i>
<i><b>ABBILDUNG 6-30:</b> Potentieller jährlicher Anrechnungsbeitrag verschiedener Anrechnungsoptionen auf Basis des Produktionsansatzes und jährlicher Wachstumsraten ....</i>	<i>213</i>
<i><b>ABBILDUNG 6-31:</b> Historische und projizierte Netto-Emissionen auf Basis des Produktionsansatz und einer Trendfortschreibung .....</i>	<i>214</i>
<i><b>ABBILDUNG 6-32:</b> Potentieller jährlicher Anrechnungsbeitrag verschiedener Anrechnungsoptionen auf Basis des Produktionsansatzes und einer Trendfortschreibung.....</i>	<i>214</i>
<i><b>ABBILDUNG 6-33:</b> Historische und projizierte Netto-Emissionen auf Basis des aktivitätsbasierten Ansatzes und jährlicher Wachstumsraten.....</i>	<i>215</i>
<i><b>ABBILDUNG 6-34:</b> Potentieller jährlicher Anrechnungsbeitrag verschiedener Anrechnungsoptionen auf Basis des aktivitätsbasierten Ansatzes und jährlicher Wachstumsraten .....</i>	<i>215</i>

## 9 TABELLENVERZEICHNIS

<i>TABELLE 2-1: Allokation des Kohlenstoffs in Rohholz auf Produktgruppen.....</i>	<i>37</i>
<i>TABELLE 2-2: Im Modell HARVCARB unterstellte Verschnittanteile bei der Verarbeitung von Halbwaren zu Fertigwaren .....</i>	<i>41</i>
<i>TABELLE 2-3: Kategorien für den Endverbrauch von Massivholz- und Papierprodukten im Modell WOODCARB .....</i>	<i>43</i>
<i>TABELLE 2-4: Verteilung von Rohholzsortimenten auf verschiedene Produktionslinien im HWP-Modell nach Karjalainen .....</i>	<i>44</i>
<i>TABELLE 2-5: Unterstellter Umwandlungsnutzungsgrad bei der Verarbeitung von Stammholz und Industrieholz für die Produktion von Schnittholz, Sperrholz, Zellstoff und Energie in Finnland in %.....</i>	<i>44</i>
<i>TABELLE 2-6: Default-Allokationsparameter für verschiedene Produktionslinien für Holzprodukte im CO2FIX V2.0 Modell in %.....</i>	<i>45</i>
<i>TABELLE 2-7: Default-Parameter für Produktmengen und Produktionsverluste entlang verschiedener Herstellungsketten Holzprodukte im CO2FIX Modell .....</i>	<i>46</i>
<i>TABELLE 2-8: Jährliche Oxidationsanteile zur Berechnung des linearen Zerfalls des Produktspeichers.....</i>	<i>52</i>
<i>TABELLE 2-9: Unterstellte Modalwerte der Kohlenstoffverweildauer und Zeitdauer bis 5 % des Kohlenstoffs im Speicher übrig sind (in Klammern), für verschiedene Produkte nach Thompson und Matthews .....</i>	<i>54</i>
<i>TABELLE 2-10: Median der zu erwartenden Nutzungsdauer von Holz in verschiedenen Verwendungsbereichen im Modell HARVCARB.....</i>	<i>55</i>
<i>TABELLE 2-11: Halbwertszeit der erwarteten Nutzungsdauer von Holz in verschiedenen Verwendungsbereichen im Modell WOODCARB.....</i>	<i>56</i>
<i>TABELLE 2-12: Verteilung der Produktgruppen auf Nutzungsdauerkategorien im finnischen HWP-Modell .....</i>	<i>58</i>
<i>TABELLE 2-13: Nutzungskategorien mit zugewiesenen Nutzungsdauern bei der Verwendung der logistischen Zerfallsgleichung (6) im Vergleich verschiedener Autoren.....</i>	<i>59</i>
<i>TABELLE 2-14: Aufteilung der Produkte auf Nutzungsdauerkategorien im Modell CO2FIX V2.0.....</i>	<i>60</i>
<i>TABELLE 2-15: Verteilung des Kohlenstoffs nach der stofflichen Nutzung im Modell CO2FIX V2.0.....</i>	<i>61</i>

<i>TABELLE 2-16: Im Modell EXPHWP ursprünglich zugewiesene Zerfallsraten mit sich daraus ergebenden Zeitparametern .....</i>	63
<i>TABELLE 3-1: Geerbte Emissionen bei der Anrechnung mit projiziertem Referenzwert.....</i>	98
<i>TABELLE 4-1: Übersicht der zu berechnenden Variablen für die Bestimmung des Beitrags von Holzprodukten in den 2006 IPCC GL .....</i>	111
<i>TABELLE 4-2: Zu verwendende Methoden zur Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten entsprechend des gewählten Tiers in den 2006 IPCC GL.....</i>	112
<i>TABELLE 4-3: Beispiel für die Herleitung länderspezifischer Nutzungsdauern auf Basis von Marktinformationen und unter Verwendung von Informationen zur Obsoleszenz von Produkten .....</i>	120
<i>TABELLE 5-1: Anteil holzbasierter Wandtypen im Wohngebäudebestand nach Regionen, Baualtersklassen und Gebäudetyp unter Angabe des Standardfehlers .....</i>	127
<i>TABELLE 5-2: Holzverbrauch in konventionell erstellten Wohnbauten in Holzbauweise ...</i>	127
<i>TABELLE 5-3: Kenndaten des produktionsmengengewichteten Durchschnittsholzhauses in Fertigteilbauweise .....</i>	129
<i>TABELLE 5-4: Holzverbrauch in konventionell erstellten Häusern .....</i>	129
<i>TABELLE 5-5: Anteile des Holzeinschlags im Jahr 1989 nach Baumart und Sortiment sowie seine Verteilung auf Endverwendungen in Deutschland.....</i>	132
<i>TABELLE 5-6: Gruppierung der Holz verarbeitenden Industrie nach der Klassifikation der Wirtschaftszweige 2003 und 2008 (Statistisches Bundesamt 2008a).....</i>	137
<i>TABELLE 5-7: Aufgrund der Erfassungsschwelle in Deutschland statistisch nicht erfasste Einschnittmengen .....</i>	141
<i>TABELLE 5-8: Durchschnittliche Nutzungsdauer von Fertigwaren und Holz im Bausektor</i>	149
<i>TABELLE 5-9: Einflussfaktoren auf die Lebensdauer nach DIN ISO 15686-4 am Beispiel von Holz .....</i>	152
<i>TABELLE 5-10: Codierung relevanter Rohstoff- und Halbwarenkategorien nach FAO und UNECE.....</i>	166
<i>TABELLE 5-11: Länderspezifische Dichten und Umrechnungsfaktoren der Holzproduktkategorien für Deutschland.....</i>	167
<i>TABELLE 5-12: Unterstellte Dichteangaben verschiedener Quellen für ausgewählte Produkte .....</i>	168
<i>TABELLE 5-13: Im Modell WoodCarbonMonitor hinterlegte Halbwertszeiten.....</i>	172

<i>TABELLE 5-14: Beispiele aus der hinterlegten Zuordnungsliste mit Bezeichnungen der Holzverwendung aus Marktinformationen und Bauteilkatalogen .....</i>	<i>174</i>
<i>TABELLE 6-1: Jährlicher Anteil des Einschlags aus verbleibenden Waldflächen bzw. der Aktivität Waldbewirtschaftung.....</i>	<i>189</i>
<i>TABELLE 6-2: Der Produktkategorie ‚Nadelschnittholz‘ zugeordnete Meldenummern der Güterverzeichnisse seit 1995 .....</i>	<i>194</i>
<i>TABELLE 6-3: Meldenummern der Produktkategorie ‚Spanplatte‘ des Güterverzeichnisses 2009 .....</i>	<i>196</i>
<i>TABELLE 6-4: Spezifische Nutzungsdauern und Halbwertszeiten für Holzhalbwaren in Deutschland für die Jahre 2001-2003 .....</i>	<i>201</i>





## 10 LITERATURVERZEICHNIS

- Achenbach, H. und Rüter, S. (2016) Ökobilanz-Daten für die Erstellung von Fertighäusern in Holzbauweise. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Report 38. 128 S.
- AgrStatG (2006) Gesetz über Agrarstatistiken (Agrarstatistikgesetz).
- Albrecht, S., Rüter, S., Welling, J., Knauf, M., Mantau, U., Braune, A., Baitz, M., Weimar, H., Sörgel, C., Kreißig, J., Deimling, S. und Hellwig, S. (2008) Ökologische Potenziale durch Holznutzung gezielt fördern. Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie, No. 2008/5, 298 S.
- AltholzV (2002) Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung).
- Anonymous (2013) Weniger Betriebe – mehr Beschäftigte. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co. KG, exact - Magazin, 70-71 S.
- Apps, M.J., Kurz, W.A., Beukema, S.J. und Bhatti, J.S. (1999) Carbon budget of the Canadian forest product sector. *Environmental Science & Policy* 2(1): 25-41.
- Arlt, J. und Pfeiffer, M. (2005) Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau. Institut für Bauforschung e.V., Forschungsbericht IFB F 2464, 138 S.
- Arrhenius, S. (1896) On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science* 41(5): 237-276.
- Asam, C., Dorn, S., Hänel, M., Mann, B. und Kerz, N. (2008) Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen und Bauteilschichten des Hochbaus für den Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“. Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. an der TU Berlin, 142 S.
- Attiwill, P.M. (1971) Atmospheric carbon dioxide and the biosphere. *Environmental Pollution (1970)* 1(4): 249-261.
- Augusta, U. (2007) Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit wirtschaftlich bedeutender Holzarten bei verschiedener Beanspruchung im Außenbereich. Hamburg, Universität Hamburg, Dissertation. 206 S.
- Bahr, C. und Lennerts, K. (2010) Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen. Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung (BBSR) / Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Endbericht, Az 10.08.17.7-08.20, 133 S.
- Bateman, I.J. und Lovett, A.A. (2000) Modelling and Valuing Carbon Sequestration in Softwood and Hardwood Trees, Timber Products and Forest Soils. Centre for Social and Economic Research on the Global Environment, University of East Anglia and University College London, CSERGE Global Environmental Change Working Paper, GEC2000-13, 53 S.

- Baumgartner, A. (1969) Meteorological approach to the exchange of CO<sub>2</sub> between the atmosphere and vegetation, particularly forest stands. *Photosynthetica* **3**: 127-149.
- BBSR (2009) Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen der Kostengruppen 300, 400 und 500 nach DIN 276-1. Bundesamt für Bauen, Raumordnung und Stadtentwicklung (BBSR), 93 S.
- Benndorf, R., Federici, S., Forner, C., Pena, N., Rametsteiner, E., Sanz, M.J. und Somogyi, Z. (2007) Including land use, land-use change, and forestry in future climate change, agreements: thinking outside the box. *Environmental Science & Policy* **10**(4): 283-294.
- BMEL (2014) Der Wald in Deutschland - Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 56 S.
- BMEL (2015) Die Bundeswaldinventur: Ergebnisdatenbank [online]. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) <<https://www.bundeswaldinventur.de/>> am 03. Oktober 2015.
- BMELV (2009) Fortschritt für den Klimaschutz - Land- und Forstwirtschaft auf gutem Weg. *Pressemitteilung Nr. 126 Ausgabedatum 12. Juni 2009*.
- BMU/BMELV (2009) Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland: Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) / Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) – Referat Öffentlichkeitsarbeit, 32 S.
- BMUB (2014) Informationsportal Nachhaltiges Bauen - Baustoff- und Gebäudedaten: Nutzungsdauern von Bauteilen [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) <<http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebuededaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html>> am 11. April 2014.
- Bolin, B. (1977) Changes of Land Biota and Their Importance for the Carbon Cycle. *Science* **196**(4290): 613-615.
- Bolin, B. (2007) A History of the Science and Politics of Climate Change: The Role of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1st Edition. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sao Paulo: Cambridge University Press
- Bormann, K., Dieter, M., Englert, H., Küppers, J.-G. und Rosin, A. (2006) Die Waldgesamtrechnung als Teil einer integrierten ökologischen und ökonomischen Berichterstattung. In: Bundesamt S. (Ed) Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Ökonomie, Umweltökonomische Gesamtrechnungen (UGR), UGR-Online-Publikation, 95 S.
- Bösch, B. (2005) WEHAM II - Modelle und Algorithmen. Forstliche Versuchsanstalt Baden - Württemberg (FVA), 77 S.
- Bowyer, J., Briggs, D., Lippke, B., Perez-Garcia, J. und Wilson, J. (2005) Life cycle environmental performance of renewable materials in the context of residential building construction. Consortium for Research on Renewable Industrial Materials (CORRIM, Inc.), CORRIM Phase I Research Report, 86 S.

- Brischke, C. (2007) Untersuchung abbaubestimmender Faktoren zur Vorhersage der Gebrauchsdauer feuchtebeanspruchter Holzbauteile. Hamburg, Department Biologie der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der Universität Hamburg, Dissertation. 321 S.
- Brown, S., Lim, B. und Schlamadinger, B. (1998) Evaluating Approaches for Estimating Net Emissions of Carbon Dioxide from Forest Harvesting and Wood Products. IPCC/OECD/IEA Programme on National Greenhouse Gas Inventories, 20 S.
- BStatG (2008) Gesetz über die Statistik für Bundeszwecke (Bundesstatistikgesetz).
- Bundesarchiv (2006) Informationen zu Statistiken zum Holzwirtschaftssektor in der DDR. Schreiben von Fr. Boissier am 15.08.2006 und Hr. Fröhlich am 11. Oktober 2006.
- Burden, R.L. und Faires, J.D. (2001) Numerical Analysis. Seventh edition. Pacific Grove, Canada: Brooks/Cole Publishing Co., 864 S.
- Burschel, P., Kuersten, E. und Larson, B.C. (1993a) Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft in Kohlenstoffgehalt - Eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayer. Forstlichen Versuch- und Forschungsanstalt, 126/1993, 135 S.
- Burschel, P., Kürsten, E., Larson, B.C. und Weber, M. (1993b) Present role of German forests and forestry in the national carbon budget and options to its increase. *Water, Air, & Soil Pollution* **70**(1-4): 325-340.
- Callendar, G.S. (1938) The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **64**(275): 223-240.
- Canada (2008) Information on Options for LULUCF Accounting. 6 S.
- Chamberlin, T.C. (1899) An Attempt to Frame a Working Hypothesis of the Cause of Glacial Periods on an Atmospheric Basis. *The Journal of Geology* **7**(6): 545-584.
- Charney, J.G., Arakawa, A., Baker, D.J., Bolin, B., Dickinson, R.E., Goody, R.M., Leith, C.E., Stommel, H.M. und Wunsch, C.I. (1979) Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment. National Academy of Science, Report of an Ad Hoc Study Group on Carbon Dioxide and Climate, 22 S.
- Chen, J., Colombo, S.J., Ter-Mikaelian, M.T. und Heath, L.S. (2008) Future carbon storage in harvested wood products from Ontario's Crown forests. *Canadian Journal of Forest Research* **38**: 1947-1958.
- Ciais, P., Schelhaas, M.J., Zaehle, S., Piao, S.L., Cescatti, A., Liski, J., Luysaert, S., Le-Maire, G., Schulze, E.D., Bouriaud, O., Freibauer, A., Valentini, R. und Nabuurs, G.J. (2008) Carbon accumulation in European forests. *Nature Geoscience* **1**(7): 425-429.
- Coenen, R. und Sardemann, G. (1998) Klimarahmenkonvention, Kyoto Protokoll und Forschung zu globalen Umweltveränderungen. Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben: Informationsstelle Umweltforschung (FKZ 01 LP 9401/5), Report No: 2002/8. 86 S.

- Cooper, C.F. (1983) Carbon storage in managed forests. *Canadian Journal of Forest Research* **13**(1): 155-166.
- Cooper, T. (2005) Slower Consumption Reflections on Product Life Spans and the “Throwaway Society”. *Journal of Industrial Ecology* **9**(1-2): 51-67.
- Cowie, A., Pingoud, K. und Schlamadinger, B. (2006) Stock changes or fluxes? Resolving terminological confusion in the debate on land-use change and forestry. *Climate Policy* **6**: 161-179.
- Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle (2015) Über IPCC [online]. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle <<http://www.de-ipcc.de/de/119.php#Organisation>> am 16. März 2015.
- Dewar, R.C. (1990) A model of carbon storage in forests and forest products. *Tree Physiology* **6**: 417-428.
- Dias, A.C., Louro, M., Arroja, L. und Capela, I. (2007) Carbon estimation in harvested wood products using a country-specific method: Portugal as a case study. *Environmental Science & Policy* **10**(3): 250-259.
- Diefenbach, N., Cischinsky, H. und Rodenfels, M. (2010) Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohnungsgebäudebestand. Institut für Wohnen und Umwelt GmbH, Forschungsbericht, 180 S.
- Dieter, M. und Englert, H. (2005a) Die Holzeinschlagstatistik muss besser werden: forstpolitische Forderungen aus aktuellen Ergebnissen zum Holzeinschlag in der Bundesrepublik Deutschland. *Holz-Zentralblatt* **131**(61): 797-798.
- Dieter, M. und Englert, H. (2005b) Gegenüberstellung und forstpolitische Diskussion unterschiedlicher Holzeinschlagsschätzungen für die Bundesrepublik Deutschland. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie, 2005/2, 14 S.
- Dieter, M., Rosin, A. und Thoro, C. (2004) Die Forstwirtschaftliche Gesamtrechnung der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des ESVG 1995 für die Jahre 1991 bis 2002. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie, 2004/15, 80 S.
- DIN (1994a) Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz - Teil 1: Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz. *DIN EN 350-1:1994-05*.
- DIN (1994b) Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz - Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa. *DIN EN 350-2:1994-10*.
- DIN (2006) Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Definition der Gebrauchsklassen - Teil 2: Anwendung bei Vollholz. *DIN EN 335-2:2006-10*.
- Dunger (2015) Aktualisierung des WEHAM2003 Basisszenarios auf Basis der BWI2012 Daten. Persönliche Kommunikation per E-Mail am 17. Dezember 2015.

- Dunger, K. und Rock, J. (2009) Projektionen zum potenziellen Rohholzaufkommen: Ergebnisse einer Kohlenstoffinventur auf Bundeswaldinventur-Basis. *AFZ - Der Wald* **64**(20): 1079-1081.
- Dyer, G. (2008) *Climate wars*. Reprinted 2010. Oxford, England and New York, USA: Oneworld Publications, 320 S.
- Eggers, T. (2002) The impacts of manufacturing and utilization of wood products on the European carbon budget. In: Päävinen R. (Ed) European Forest Institute, EFI Internal Report 9, 90 S.
- Enquete Commission "Protecting Earth's Atmosphere" of the German Bundestag (Ed) (1992) *Climate Change. A Threat to Global Development. Acting Now to Safeguard the Future. First report*. Bonn: Economica Verlag GmbH, Verlag C.F. Müller, 235 S.
- Eriksson, E. und Welander, P. (1956) On a Mathematical Model of the Carbon Cycle in Nature. *Tellus* **8**(2): 155-175.
- Essler, W.K. (1995) Was ist und zu welchem Ende treibt man Metaphysik? *Dialectica* **49**(2-4): 281-317.
- Etheridge, D.M., Steele, L.P., Langenfelds, R.L., Francey, R.J., Barnola, J.M. und Morgan, V.I. (1996) Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **101**(D2): 4115-4128.
- EU (1999) Abfalldeponierichtlinie. *Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999*.
- EU (2009) EG LULUCF Proposal on Harvested Wood Products Accounting. *Internal document provided by EU LULUCF Expert Group from 06 July 2009*.
- EU (2013) BESCHLUSS Nr. 529/2013/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Mai 2013 über die Anrechnung und Verbuchung von Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen infolge von Tätigkeiten im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft und über Informationen zu Maßnahmen in Zusammenhang mit derartigen Tätigkeiten. Amtsblatt der Europäischen Union L 165/80 vom 18. Juni 2013.
- Europäische Kommission (2008) VERORDNUNG (EG) Nr. 36/2009 der EC für die Erstellung der „Prodcom-Liste“ der Industrieprodukte für 2008 gemäß der Verordnung (EWG) Nr. 3924/91 des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union L 18 vom 22. Januar 2009.
- European Commission Joint Research Centre (2010) Historic and projected harvest data of EU MS. Provided by Grassi G am 22.Dezember 2010 and 30. Juni 2011 per E-Mail.
- Evans, A. und Gier, S. (2007) Wörterbuch Immobilienwirtschaft englisch-deutsch /deutsch-englisch. 3. Auflage. IZ IMMOBILIENZEITUNG 2007, 756 S.
- FAO (1982) Classification and definitions of forest products. In: FAO Forest Economics Policy and Products Division (Ed) FAO, Supplement 14 to volume XXXIV of the "Timber bulletin for Europe" <<http://www.fao.org/docrep/015/an647e/an647e00.pdf>>, 57 S.

- FAO (2010) Global Forest Resources Assessment 2010. FAO Forestry Paper 163, 378 S.
- FAO (2015) FAOSTAT Forestry Database [online]. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) <<http://faostat.fao.org/>> am 24. November 2015.
- Filippi, M. (2015) Erläuterung zur Studie 'Analyse und Quantifizierung der Holzverwendung im Bauwesen' (Kroth *et al.* 1991). *Persönliche Kommunikation per Telefon am 06. Oktober 2015*.
- Flugsrud, K., Hoem, B., Kvingedal, E. und Rypdal, K. (2001) Estimating the Net Emission of CO<sub>2</sub> from Harvested Wood Products - A comparison between different approaches. The Norwegian Pollution Control Authority, Climate change, air pollution and noise, TA-1831/2001, 48 S.
- Ford-Robertson, J. (2003) Implications of Harvested Wood Products Accounting - Analysis of Issues Raised by Parties to the UNFCCC and Development of a Simple Decay Approach. New Zealand Ministry of Agriculture and Forestry, MAF Technical Paper, No: 2003/5, 28 S.
- Freibauer, A., Herold, A. und Höhne, N. (2007) Kyoto-Protokoll: Untersuchung von Optionen für die Weiterentwicklung der Verpflichtungen für die 2. Verpflichtungsperiode, Teilvorhaben Senken in der 2. Verpflichtungsperiode. In: Benndorf R., Mattern K. (Eds) Umweltbundesamt, 293 S.
- Frühwald, A., Pohlmann, C. und Wegener, G. (2001) Holz - Rohstoff der Zukunft nachhaltig verfügbar und umweltgerecht. Informationsdienst Holz, DGfH e.V. und HOLZABSATZFONDS, Holzbauhandbuch, Reihe 1 Teil 3 Folge 2, 32 S.
- Frühwald, A. und Wegener, G. (1993) Energiekreislauf Holz - ein Vorbild für die Zukunft. *Holz-Zentralblatt* **119**(124): 1949 ff.
- Fry, I. (2002) Twists and Turns in the Jungle: Exploring the Evolution of Land Use, Land-Use Change and Forestry Decisions within the Kyoto Protocol. *Review of European Community & International Environmental Law* **11**(2): 159-168.
- Gjesdal, S.F.T., Flugsrud, K., Mykkelbost, T.C. und Rypdal, K. (1996) A balance of use of wood products in Norway. Norwegian Pollution Control Authority SFT, Report 96:04, 54 S.
- Grêt-Regamey, A., Hendrick, E., Hetsch, S., Pingoud, K. und Rüter, S. (2008) Challenges and Opportunities of Accounting for Harvested Wood Products. In: Harvested Wood Products in the Context of Climate Change Policies, ECE/TIM/DP/55, United Nations Palais des Nations, Geneva, Switzerland, 9-10 September 2008, S 27-40
- Gustavsson, L. und Karlsson, Å. (2006) CO<sub>2</sub> Mitigation: On Methods and Parameters for Comparison of Fossil-Fuel and Biofuel Systems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **11**(5): 935-959.
- Gustavsson, L., Madlener, R., Hoen, H.F., Jungmeier, G., Karjalainen, T., Klöhn, S., Mahapatra, K., Pohjola, J., Solberg, B. und Spelter, H. (2006) The Role of Wood Material for Greenhouse Gas Mitigation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **11**(5): 1097-1127.
- Hasch, J. (2002) Ökologische Betrachtungen von Holzspan- und Holzfaserverplatten. Hamburg, Ordinariat für Holztechnologie der Universität Hamburg, Dissertation. 301 S.

- Hashimoto, S., Nose, M., Obara, T. und Moriguchi, Y. (2002) Wood products: potential carbon sequestration and impact on net carbon emissions of industrialized countries. *Environmental Science & Policy* **5**(2): 183-193.
- Haynes, R.W., Darr, D.R., Phelps, R.B., McKeever, D.B., Spelter, H., Durbak, I., Skog, K., Oswald, D.D., Waddell, K., Setzer, T., LaBau, V.J., Carroll, G., Hiserote, B., Farrenkopf, T., Woudenberg, S., Nevel, R., Dickson, D., Frieswyk, T., Blyth, J., Smith, W.B., Tansey, J., Royer, L., Cathey, R., Bylin, C., McWilliams, W. und May, D. (1990) An Analysis of the timber situation in the United States: 1989-2040. USDA Forest Service, General Technical Report, RM-199, 279 S.
- Hennigar, C.R., MacLean, D.A. und Amos-Binks, L.J. (2008) A novel approach to optimize management strategies for carbon stored in both forests and wood products. *Forest Ecology and Management* **256**(4): 786-797.
- Henschel, C., Ward, M., Rüter, S., Ashton, R., Bird, N., Frieden, D., Lehtonen, A., Schlamadinger, B., Silvius, M., Tuerk, A. und Zanchi, G. (2008) Options for improving the treatment of LULUCF in a Copenhagen agreement: forest and wetland degradation, factoring out, harvested wood products, and approaches for fuller accounting. Climate Strategies, Working Paper, 22 S.
- Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G. und Richter, K. (2013) Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction—A case study for south-east Germany. *Resources, Conservation and Recycling* **78**: 81-91.
- Höhne, N., Wartmann, S., Herold, A. und Freibauer, A. (2007) The rules for land use, land use change and forestry under the Kyoto Protocol - lessons learned for the future climate negotiations. *Environmental Science & Policy* **10**(4): 353-369.
- Houghton, R.A. (1998) Historic Role of Forests in the Global Carbon Cycle. In: Kohlmaier G.H., Weber M., Houghton R.A. (Eds). Carbon Dioxide Mitigation in Forestry and Wood Industry. Forest Resources: Past, Present and Future Role of Managed and Unmanaged Forests in the Global Carbon Balance. Springer, Berlin / Heidelberg / New York. S 1-24.
- Houghton, R.A. (2003) Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000. *Tellus B* **55**(2): 378-390.
- Houghton, R.A. und Hackler, J.L. (2010) Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850 to 1990. Carbon Dioxide Information Analysis Division, Oak Ridge National Laboratory, Publication, No 5054, 74 S.
- Hüpen, R. (2002) Zur Berechnung von Wachstumsraten in diskreter Zeit. Fakultät für Wirtschaftswissenschaft der Ruhr-Universität Bochum, Beilage zur Lehrveranstaltung Sommersemester 2002, 10 S.
- Hutchinson, G.E. (1954) The biochemistry of the terrestrial atmosphere. In: Kujper G.P. (Ed) Chicago: University Press, The Earth as a Planet, 371-433 S.
- IPCC (1990) Climate Change - The IPCC Scientific Assessment. In: Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephraums J.J. (Eds) Cambridge University Press, 414 S.

- IPCC (1997a) Expert Group Meeting on Biomass Burning and Land-use Change and Forestry, held in Rockhampton, Australia, 15-18 September, 1997. In: Lim B., Frost P., Apps M., Brown S., Sokona Y., Bonduki Y. (Eds) IPCC/OECD/IEA Programme on National Greenhouse Gas Inventories, 24 S.
- IPCC (1997b) Greenhouse Gas Inventory Reference Manual. In: Houghton J.T., Meira Filho L.G., Lim B., Treanton K., Mamaty I., Bonduki Y., Griggs D.J., Callander B.A. (Eds) IPCC/OECD/IEA, Revised 1996 IPCC Guidelines for Greenhouse Gas Inventories, Volume 3, 76 S.
- IPCC (1997c) Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions. In: Houghton J.T., Meira Filho L.G., Lim B., Treanton K., Mamaty I., Bonduki Y., Griggs D.J., Callander B.A. (Eds) IPCC/OECD/IEA, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 1, 114 S.
- IPCC (1999) Procedures for the preparation, review, acceptance, adoption, approval and publication of IPCC reports. *Appendix A to the Principles Governing IPCC Work*.
- IPCC (2000a) Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. In: Penman J., Habetsion S., Abel K., Eggleston S., Pullus T., Frey C., Gronfors K., Höhne N., Jubb C., Mareckova K., Meijer J., Neitzert F., Ngara T., Rivièrè E., Rypinski A., Tsarukyan M., Zhou P. (Eds) Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), IPCC/IGES
- IPCC (2000b) Land Use, Land-Use Change, and Forestry. In: Watson R.T., Noble I.R., Bolin B., Ravindranath N.H., Verardo D., Dokken D.J. (Eds) Cambridge University Press, IPCC Special Report, 375 S.
- IPCC (2001) IPCC Expert Group Planning Meeting on the Elaboration of Good Practice Guidance in Land-Use Change and Forestry for the Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. In: Pipatti R., Buendia L., Tanabe K., Miwa K. (Eds) IGES, Japan 2001, Meeting Report, 47 S.
- IPCC (2003) Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. In: Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Pipatti R., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F. (Eds). Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), IPCC/IGES, Hayama, Japan.
- IPCC (2006) IPCC Guidelines for Greenhouse Gas Inventories - Vol 4 Agriculture, Forestry and other Land Use. In: Eggleston S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (Eds). IEA/OECD, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Technical Support Unit, Hayama, Kanagawa, Japan.
- IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Marquis M., Averyt K., Tignor M.M.B., Miller H.L. (Eds) Cambridge University Press, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, 996 S.
- IPCC (2010) Understanding Climate Change: 22 years of IPCC assessment. In: IPCC Secretariat (Ed) Brochure. Intergovernmental Panel on Climate Change, 12 S.



- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. In: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (Eds) Cambridge University Press, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC, 1535 S.
- IPCC (2014) 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. In: Hiraishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Baasansuren J., Fukuda M., Troxler T.G. (Eds) IPCC, Switzerland, 268 S.
- IPCC (2015a) Background of Publications: 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol (KP Supplement) [online]. Intergovernmental Panel on Climate Change <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/background.html>> am 05. Januar 2015.
- IPCC (2015b) IPCC - Organization [online]. Intergovernmental Panel on Climate Change <<http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>> am 20. Januar 2015.
- ISO (2006a) Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. *ISO 14044:2006-10*.
- ISO (2006b) Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. *ISO 14040:2006-10*.
- ISO (2008) Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 8: Reference service life and service life estimation. *ISO 15686-8:2008(E)*.
- ISO (2011) Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 1: General Principles. *ISO 15686-1:2011(E)*.
- Kangas, K. und Baudin, A. (2003) Modelling and Projections of Forest Products Demand, Supply and Trade in Europe. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Timber Section, ECE/TIM/DP/30, 206 S.
- Karjalainen, T. (1996a) Dynamics and potentials of carbon sequestration in managed stands and wood products in Finland under changing climatic conditions. *Forest Ecology and Management* **80**(1-3): 113-132.
- Karjalainen, T. (1996b) Model Computations on Sequestration of Carbon in Managed Forests and Wood Products under Changing Climatic Conditions in Finland. *Journal of Environmental Management* **47**(4): 311-328.
- Karjalainen, T. und Kellomäki, S. (1995) Simulation of forest and wood product carbon budget under a changing climate in Finland. *Water, Air, & Soil Pollution* **82**(1 - 2): 309-320.
- Karjalainen, T., Kellomäki, S. und Pussinen, A. (1994) Role of wood-based products in absorbing atmospheric carbon. *Silva Fennica* **28**(2): 67-80.
- Kauppi, P.E., Mielikäinen, K. und Kuusela, K. (1992) Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science* **256**: 70-74.
- Keeling, C. (1973) The Carbon Dioxide Cycle: Reservoir Models to Depict the Exchange of Atmospheric Carbon Dioxide with the Oceans and Land Plants. In: Rasool S.I. (Ed) Chemistry of the Lower Atmosphere.6 Springer US S 251-329.

- Keeling, C.D. (1960) The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Tellus* **12**(2): 200-203.
- Keeling, C.D., Bacastow, R.B., Bainbridge, A.E., Ekdahl, C.A., Guenther, P.R., Waterman, L.S. und Chin, J.F.S. (1976) Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Tellus* **28**(6): 538-551.
- Keeling, C.D., Chin, J.F.S. und Whorf, T.P. (1996) Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO<sub>2</sub> measurements. *Nature* **382**(6587): 146-149.
- Kohlmaier, G., Kohlmaier, L., Fries, E. und Jaeschke, W. (2007) Application of the stock change and the production approach to Harvested Wood Products in the EU-15 countries: a comparative analysis. *European Journal of Forest Research* **126**(2): 209-223.
- Kohlmaier, G., Kohlmaier, L., Fries, E. und Jaeschke, W. (2008) Carbon stocks and greenhouse gas balance of harvested wood products: focus on the Asia-Pacific Partnership countries vis-à-vis the European Union. *European Journal of Forest Research* **127**(2): 133-147.
- Kroth, W., Kollert, W. und Fillippi, M. (1991) Analyse und Quantifizierung der Holzverwendung im Bauwesen. Fraunhofer IRB Verlag, Bauforschung T 2350, 168 S.
- Kublin, E.G. (2002) Verfahrens- und Programmbeschreibung zum erweiterten BWI – Unterprogramm BDAT 2.0. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
- Kublin, E.G. und Scharnagl, G. (1988) Biometrische Lösungen für die Berechnung des Volumens, der Sortierung, der Rindenabzüge und der Ernteverluste im Rahmen der Bundeswaldinventur. Verfahrens- und Programmbeschreibung zum BWI-Unterprogramm BDAT. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
- Kurz, W.A., Apps, M., Webb, T.M. und McNamee, P.J. (1992) The C Budget of the Canadian Forest Sector: Phase I. Forestry Canada. Information Report NOR-X-326, 93 S.
- Lieth, H. (1963) The role of vegetation in the carbon dioxide content of the atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **68**: 3887-3898.
- Lim, B., Brown, S. und Schlamadinger, B. (1999) Carbon accounting for forest harvesting and wood products: review and evaluation of different approaches. *Environmental Science & Policy* **2**(2): 207-216.
- Lückge, F.J. und Weber, H. (1997) Die Struktur der Sägeindustrie in Deutschland. Vorläufige Teilergebnisse der "Untersuchung der Struktur- und Marktverhältnisse der deutschen Sägeindustrie". *Holz-Zentralblatt Special Supplement entitled: Sägeindustrie 2000* **123**(28): 8, 10.
- Mantau, U. (2005) Holzverwendung im Baubereich. Studie im Auftrag des Holzabsatzfonds (HAF), Abschlussbericht, 53 S.
- Mantau, U. und Bilitewski, B. (2010) Stoffstrom-Modell-Holz: Rohstoffströme und CO<sub>2</sub>-Speicherung in der Holzverwendung. Forschungsbericht für das Kuratorium für Forschung und Technik des Verbandes der Deutschen Papierfabriken e.V. (VDP), 77 S.

- Mantau, U., Döring, P. und Hiller, D. (2013) Holzeinsatz im Bauwesen – Verwendungsstrukturen nach Gebäuden und Gewerken. In: Weimar H., Jochem D. (Eds). Holzverwendung im Bauwesen – Eine Marktstudie im Rahmen der „Charta für Holz“. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Hamburg. S 1-139. Thünen Rep 9.
- Mantau, U. und Kaiser, C. (2002a) Holzeinsatz im Modernisierungsmarkt - Nichtwohnbau. Studie im Auftrag des Holzabsatzfonds (HAF), 85 S.
- Mantau, U. und Kaiser, C. (2002b) Holzeinsatz im Modernisierungsmarkt - Wohnungsbau. Studie im Auftrag des Holzabsatzfonds (HAF), 105 S.
- Mantau, U. und Sörgel, C. (2004) Standorte der Holzwirtschaft - Sägeindustrie. Zentrum Holzwirtschaft Arbeitsbereich: Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft, Universität Hamburg, Studie im Auftrag des Holzabsatzfonds (HAF), 20 S.
- Mantau, U., Weimar, H. und Wierling, R. (2001) Standorte der Holzwirtschaft - Sägeindustrie. Zentrum Holzwirtschaft Arbeitsbereich: Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft, Universität Hamburg, Abschlussbericht, 36 S.
- Marland, E. und Marland, G. (2003) The treatment of long-lived, carbon-containing products in inventories of carbon dioxide emissions to the atmosphere. *Environmental Science & Policy* **6**(2): 139-152.
- Marland, E., Stellar, K. und Marland, G. (2010) A distributed approach to accounting for carbon in wood products. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **15**(1): 71-91.
- Marland, G. (1988) The prospect of solving the CO<sub>2</sub> problem through global reforestation. US Department of Commerce and US Department of Energy DOE/NBB-0082
- Marland, G. und Schlamadinger, B. (1999) The Kyoto Protocol could make a difference for the optimal forest-based CO<sub>2</sub> mitigation strategy: some results from GORCAM. *Environmental Science & Policy* **2**(2): 111-124.
- Martino, D.L. (2004) A Negative View of Dakar Approaches for Reporting and Accounting Carbon in Harvested Wood Products. Carbosur SRL, Constituyente 1467/1202, 8 S.
- McCusker, A. (2008) Joint Forest Sector Questionnaire (JFSQ). In: Harvested Wood Products in the Context of Climate Change Policies, ECE/TIM/DP/55, United Nations Palais des Nations, Geneva, Switzerland, 9-10 September 2008, S 24
- Melillo, J.M., Fruci, J.R., Houghton, R.A., Moore, B. und Skole, D.L. (1988) Land-use change in the Soviet Union between 1850 and 1980: Causes of a net release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere. *Tellus B* **40**: 116-128.
- Micales, J.A. und Skog, K.E. (1997) The decomposition of forest products in landfills. *International Biodeterioration & Biodegradation* **39**(2-3): 145-158.
- Michie, B. und Wardle, P. (1998) UNSTAT Trade Data as Basis for Analysis and Projection of Forest Products Trade Flows. European Forest Institute, EFI Working Paper 17, Report No: EFI Working Paper 17. 44 S.

- Michie, B. und Wardle, P. (2002) EFI/WFSE Trade Flow Database General description. European Forest Institute, 16 S.
- Missfeldt, F. und Haites, E. (2001) The potential contribution of sinks to meeting Kyoto Protocol commitments. *Environmental Science & Policy* **4**(6): 269-292.
- Müller, M., Fuentes, U. und Kohl, H. (Eds) (2007) Der UN-Weltklimareport: Bericht über eine aufhaltsame Katastrophe. Köln: Kiepenheuer und Witsch Verlag, 429 S.
- Nabuurs, G.J., Garza-Caligaris, J.F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Lapvetelainen, T., Liski, J., Masera, O., Mohren, G.M.J., Olgin, M., Pussinen, A. und Schelhaas, M.J. (2002) CO2FIX V2.0 - manual of modeling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems and wood products., ALTERRA Report 445, 48 S.
- Nabuurs, G.J. und Sikkema, R. (2001) International Trade in Wood Products: Its Role in the Land Use Change and Forstry Carbon Cycle. *Climatic Change* **49**: 377-395.
- Nebel, B., Wegener, G. und Zimmer, B. (2002) Ökobilanzierung Holzfußböden. In: Holzforschung München - HFM T.U.M. (Ed) Holzforschung München - HFM, Technische Universität München, 24 S.
- Neilson, E.T., MacLean, D.A., Meng, F.R., Hennigar, C.R. und Arp, P.A. (2008) Optimal on- and off-site forest carbon sequestration under existing timber supply constraints in northern New Brunswick. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* **38**(11): 2784-2796.
- New Zealand (2008) New Zealand Input to AWG-KP Session 6 (Ghana, August 2008) on LULUCF Rules for post-2012. 18 S.
- Nilsson, S. und Schopfhauser, W. (1995) The carbon-sequestration potential of a global afforestation program. *Climatic Change* **30**(3): 267-293.
- Oberthür, S. und Ott, H.E. (1999) The Kyoto Protocol - International Climate Policy for the 21st Century. Heidelberg: Springer, 359 S., International and European Environmental Policy Studies
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. und Hayes, D. (2011) A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science* **333**(6045): 988-993.
- Penman, J. (2005) LULUCF and the Kyoto negotiations History, lessons, key principles, future outcomes. In: Expert Meeting on Options for Including LULUCF Activities in a Post-2012 International Climate Agreement, Graz, Austria, 5-6 May 2005
- Petersen, A.K. und Solberg, B. (2005) Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden. *Forest Policy and Economics* **7**(3): 249-259.
- Pfründer, U. (2010) Empiriegestützte, lebenszyklusorientierte Instandhaltungsstrategien für Immobilien der öffentlichen Hand. Kiel, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Dissertation. 229 S.

- Pingoud, K. (2002) SIMPLE HWP MODEL (EXPONENTIAL DECAY). MS Excel Spreadsheetmodel, internally provided to members of IEA Bioenergy Task 38 in December 2002
- Pingoud, K. (2008) Different approaches of accounting for Harvested Wood Products [Vortrag]. In: 'The role of wood products in climate change mitigation' at European Forest Week 2008, Partner Event by UNECE, vTI and Switzerland (FOEN), Rome, Italy
- Pingoud, K., Perälä, A.L. und Pussinen, A. (2001) Carbon Dynamics in Wood Products. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **6**(2): 91-111.
- Pingoud, K., Perälä, A.L., Pussinen, A. und Soimakallio, S. (2003) Greenhouse Gas Impacts of Harvested Wood Products - Evaluation and Development of Methods. VTT Technical Research Centre of Finland, VTT Research Notes 2189, 140 S.
- Pingoud, K., Savolainen, I. und Seppälä, H. (1996) Greenhouse Impact of the Finnish Forest Sector including Forest Products and Waste Management. *Ambio* **25**(5): 318-326.
- Pingoud, K., Schlamadinger, B., Grönkvist, S., Brown, S., Cowie, A. und Marland, G. (2004) Approaches for inclusion of harvested wood products in future GHG inventories under the UNFCCC, and their consistency with the overall UNFCCC inventory reporting framework. Note from Task 38: Greenhouse Gas Balances of Biomass and Bioenergy Systems (24 August 2004), 6 S.
- Pingoud, K., Skog, K., Martino, D.L., Tonosaki, M., Xiaoquam, Z. und Ford-Robertson, J. (2006a) Chapter 12: Harvested Wood Products. In: Eggleston S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (Eds) IEA/OECD, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Technical Support Unit, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 12.11-12.31 S.
- Pingoud, K., Skog, K.E., Martino, D.L., Tonosaki, M., Xiaoquan, Z. und Ford-Robertson, J. (2006b) Harvested Wood Products (Chapter 12). In: Eggleston S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (Eds). IPCC Guidelines for Greenhouse Gas Inventories - Vol 4 Agriculture, Forestry and other Land Use. IEA/OECD, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Technical Support Unit, Hayama, Kanagawa, Japan. S. 33.
- Pingoud, K. und Wagner, F. (2006) Methane Emissions from Landfills and Carbon Dynamics of Harvested Wood Products: The First-Order Decay Revisited. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **11**(5): 961-978.
- Pohlmann, C.M. (2002) Ökologische Betrachtung für den Hausbau - Ganzheitliche Energie- und Kohlendioxidbilanzen für zwei verschiedene Holzhauskonstruktionen. Ordinariat für Holztechnologie der Universität Hamburg, Dissertation, 274 S.
- Poker, J., Dieter, M. und Thoroë, C. (2003) Integration of harvested wood products into accounting approaches of the carbon dioxide cycle in the forestry sector. Federal Research Centre for Forestry and Forestry Products (BFH), Working paper of the Institute for Economics (WP2002/03), Report No: BFH/Inst.III/WP2002/03. 21 S.
- Polley, H., Hennig, P. und Schwitzgebel, F. (2009) Holzvorrat, Holzzuwachs, Holznutzung in Deutschland: Ergebnisse einer Kohlenstoffinventur auf Bundeswaldinventur-Basis. *AFZ - Der Wald* **64**(20): 1076-1078.

- Profft, I., Mund, M., Weber, G.-E., Weller, E. und Schulze, E.-D. (2009a) Forest management and carbon sequestration in wood products. *European Journal of Forest Research* **128**(4): 399-413.
- Profft, I., Mund, M., Weber, G.-E., Weller, E. und Schulze, E.-D. (2009b) Forest management and carbon sequestration in wood products - Anhang zu *Eur J Forest Res (2009) 128:399-413*. 15 S.
- Ritter, F. (2011) Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen. Darmstadt, Technischen Universität Darmstadt, Dissertation. 265 S.
- Rock, J., Bösch, B. und Kändler, G. (2013) WEHAM 2012 - Waldentwicklungs und Holzaufkommensmodellierung für die dritte Bundeswaldinventur. In: Klädtke J., Kohnle U. (Eds) Jahrestagung 13.-15. Mai 2013, Beiträge zur Jahrestagung / Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten : Sektion Ertragskunde, Rychnov nad Kneznou/Tschechien, S 127-133
- Row, C. und Phelps, R.B. (1990) Tracing the flow of carbon through US forest product sector. In: Proceedings of the Presentation at the 19th World Congress of the International Union of Forest Research Organizations, 5-11 August 1990, Montreal, Canada, S 13.
- Row, C. und Phelps, R.B. (1996) Wood carbon flows and storage after timber harvest. In: Sampson R.N., Hair D. (Eds), Forests and Global Change, Vol. 2: Forest Management Opportunities for Mitigating Carbon Emissions, American Forests, 27-58 S.
- Rüter, S. (2008a) Discussion of accounting approaches for consideration of Harvested Wood Products in post-2012 [Vortrag]. In: International Conference on 'The European Forest-Based Sector: Bio-Responses to Address New Climate and Energy Challenges', 6 - 8 Novembre 2008, Nancy, France
- Rüter, S. (2008b) Harvested Wood Products [Vortrag]. In: SB 28 IETA Side Event at the UNFCCC Sessions of the Subsidiary Bodies (SB 28/AWG-KP 5) - LULUCF in a post 2012 agreement, 11. Juli 2008, Bonn
- Rüter, S. (2011a) Projection of Net Emissions from Harvested Wood Products in European Countries : For the period 2013-2020. Thünen-Institute of Wood Research, Report No: 2011/01, 63 S.
- Rüter, S. (2011b) Welchen Beitrag leisten Holzprodukte zur CO<sub>2</sub>-Bilanz? *AFZ - Der Wald* **66**(15): 15-18.
- Rüter, S. (2013) Der Umweltbeitrag der Holznutzung. In: Cheret P., Schwaner K., Seidel A. (Eds). *Urbaner Holzbau - Chancen und Potenziale für die Stadt*. DOM Publishers, Berlin. S 86-97.
- Rüter, S. (2014) Harvested Wood Products [Vortrag]. In: JRC technical workshop 2014 on reporting LULUCF for CP2 with the IPCC 2013 KP Supplement, Arona, Italy, 5-7 May 2014
- Rüter, S. (2016) Holzprodukte (4.G). In: Gniffke P. (Ed) *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2015 - Nationaler Inventarbericht zum*

- Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2013, Umweltbundesamt (UBA), Climate Change 02/2016, Dessau, Januar 2016, S 225-228.
- Rüter, S., Alfredsen, G., de Aquino Ximenes, F., Guendehou, S., Pingoud, K., Tsunetsugu, Y. und McCusker, A. (2014) Harvested Wood Products (Section 2.8). In: Hiraishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Jamsranjav B., Fukuda M., Troxler G.T. (Eds). 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. Published: IPCC, Switzerland. S 109-134.
- Rüter, S. und Diederichs, S. (2012) Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Thünen-Institute of Wood Research, Report No: 2012/01, 316 S.
- Rüter, S., Rock, J., Köthke, M. und Dieter, M. (2011) Wieviel Holznutzung ist gut fürs Klima? *AFZ - Der Wald* **66**(15): 19-21.
- Rüter, S., Werner, F., Forsell, N., Prins, K., Vial, E. und Levet, A.-L. (2016) ClimWood2030: Climate benefits of material substitution by forest biomass and harvested wood products: Perspective 2030. Study commissioned by the European Commission Directorate-General for Climate Action (in Bearbeitung)
- Sathre, R. und O'Connor, J. (2010) A Synthesis of Research on Wood Products & Greenhouse Gas Impacts, 2nd Edition. FPInnovations, Technical Report No. TR-19R, 117 S.
- Scharai-Rad, M. (2002) Beitrag der Holzverwendung zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emission (Kyoto Protokoll). Ordinariat für Holztechnologie der Universität Hamburg, Abschlussbericht, 64 S.
- Scharai-Rad, M. und Welling, J. (1999) Biomass for Greenhouse Gas Emission Reduction: Sawn Timber and Wood based Products as Building Materials. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Arbeitsbericht des Instituts für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes 1999/1, Report No: 1999/1. 91 S.
- Scharai-Rad, M. und Welling, J. (2002) Environmental and energy balances of wood products and substitutes. In: FAO (Ed) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Schlamadinger, B., Bird, N., Johns, T., Brown, S., Canadell, J., Ciccacese, L., Dutschke, M., Fiedler, J., Fischlin, A., Fearnside, P., Forner, C., Freibauer, A., Frumhoff, P., Hoehne, N., Kirschbaum, M.U.F., Labat, A., Marland, G., Michaelowa, A., Montanarella, L., Moutinho, P., Murdiyarsa, D., Pena, N., Pingoud, K., Rakonczay, Z., Rametsteiner, E., Rock, J., Sanz, M.J., Schneider, U.A., Shvidenko, A., Skutsch, M., Smith, P., Somogyi, Z., Trines, E., Ward, M. und Yamagata, Y. (2007a) A synopsis of land use, land-use change and forestry (LULUCF) under the Kyoto Protocol and Marrakech Accords. *Environmental Science & Policy* **10**(4): 271-282.
- Schlamadinger, B., Johns, T., Ciccacese, L., Braun, M., Sato, A., Senyaz, A., Stephens, P., Takahashi, M. und Zhang, X. (2007b) Options for including land use in a climate agreement post-2012: improving the Kyoto Protocol approach. *Environmental Science & Policy* **10**(4): 295-305.
- Schlamadinger, B. und Marland, G. (1996) The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle. *Biomass and Bioenergy* **10**(5-6): 275-300.

- Schmitz, F., Polley, H., Hennig, P., Dunger, K. und Englert, H. (2005) Das potenzielle Rohholzaufkommen 2003 bis 2042: Das Wichtigste in Kürze. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).
- Schreiber, A. (1988) Strukturwandel in der Sägeindustrie. Schriftenreihe des Bundesministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Heft 351. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag GmbH, 158 S.
- Schulze, E.D., Valentini, R. und Sanz, M.J. (2002) The long way from Kyoto to Marrakesh: Implications of the Kyoto Protocol negotiations for global ecology. *Global Change Biology* 8(6): 505-518.
- Sikkema, R., Schelhaas, M.J. und Nabuurs, G.J. (2001) International Carbon Accounting of Harvested Wood Products: Evaluation of two models for the quantification of wood product related emissions and removals. Wageningen University and Research Centre, Alterra Green World Research, 11 S.
- Skog, K. und Nicholson, G.A. (1998) Carbon cycling through wood products: the role of wood and paper products in carbon sequestration. *Forest Products Journal* 48(7/8): 75-83.
- Skog, K.E. und Nicholson, G.A. (2000) Carbon sequestration in Wood and Paper Products. In: Joyce L.A., Birdsey R. (Eds) The impact of climate change on America's forests: a technical document supporting the 2000 USDA Forest Service PRA assessment, USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep RMRS-GTR-59, Madison, Wisconsin, USA, S 79-88
- Sörgel, C. und Mantau, U. (2005) Standorte der Holzwirtschaft - Sägeindustrie. Zentrum Holzwirtschaft Arbeitsbereich: Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft, Universität Hamburg, Studie im Auftrag des Holzabsatzfonds (HAF).
- Statistisches Bundesamt (2006) Informationen zu Statistiken zur Holzwirtschaft in der DDR. Schreiben von Hr. Helmke am 29. März 2006.
- Statistisches Bundesamt (2008a) Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008. StBA, 828 S.
- Statistisches Bundesamt (2008b) Klassifikation: Gegenüberstellung der Meldenummern des GP 2009 mit den Warennummern des Warenverzeichnisses für die Außenhandelsstatistik, Ausgabe 2013 (WA 2013). Statistisches Bundesamt, 163 S.
- Statistisches Bundesamt (2010a) Erhebung in den Betrieben der Holzbearbeitung: Holzbearbeitungsstatistik. StBA, Qualitätsbericht, 18 S.
- Statistisches Bundesamt (2010b) Gegenüberstellung der Meldenummern des Güterverzeichnisses für Produktionsstatistiken der Ausgaben 2009 (GP 2009) und 2002 (GP 2002). StBA, 47 S.
- Statistisches Bundesamt (2014) Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Landwirtschaftliche Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung. Fachserie 3 Reihe 3, Diverse Jahrgänge
- Statistisches Bundesamt (2015a) Außenhandel nach Waren und Ländern. StBA, Fachserie 7, Reihe 2., Diverse Jahrgänge



- Statistisches Bundesamt (2015b) Bauen und Wohnen. StBA, Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach überwiegend verwendetem Baustoff - Lange Reihen ab 2000, 92 S.
- Statistisches Bundesamt (2015c) Fortschreibung des Wohngebäude- und Wohnungsbestandes, lange Reihen 1969 bis 2014. StBA, Fachserie 5 Reihe 3
- Statistisches Bundesamt (2015d) Produzierendes Gewerbe: Produktion. StBA, Fachserie 4, Reihe 3.1. , Diverse Jahrgänge
- Statistisches Bundesamt (2015e) Umwelt: Abfallentsorgung. StBA, Fachserie 19, Reihe 1. Diverse Jahrgänge. Wiesbaden
- Stern, N. (2006) Stern Review: The Economics of Climate Change.
- Stümer, W. (2014) Herleitung gesamtdeutscher Einschlagszahlen für den Zeitraum 1990 bis 2002 auf Basis des Flächenverhältnisses zwischen neuen und alten Bundesländern. *Persönliche Kommunikation per E-Mail am 28. August 2014.*
- Tans, P. und Keeling, R. (2015) Trends in Atmospheric Carbon Dioxide [online]. U.S. Departement of Commerce <[www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/)> am 08. Februar 2015.
- Taverna, R., Hofer, P., Werner, F., Kaufmann, E. und Thürig, E. (2007) CO<sub>2</sub>-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft - Szenarien zukünftiger Beiträge zum Klimaschutz. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Umwelt-Wissen Nr. 0739, Report No: Umweltwissen Nr. 0739. 102 S.
- Thompson, D.A. und Matthews, R. (1989a) CO<sub>2</sub> in trees and timber lowers greenhouse effect. **18**: 19-24.
- Thompson, D.A. und Matthews, R.W. (1989b) The Storage of Carbon in Trees and Timber. Forestry Commission, Alice Holz Lodge Research Station, Research Information Note 160, 6 S.
- Tuvalu (2011) Submission by Tuvalu with respect to Consideration of further commitments for Annex I Parties under the Kyoto Protocol: Land use, land-use change and forestry (AWG-KP).
- Umweltbundesamt (2014) Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto- Protokoll 2014 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2012. In: Gniffke P. (Ed) Umweltbundesamt, Climate Change, 24/2014, 965 S.
- UN (1987) Report of the World Commission on Environment and Development - "Our common future". Note by the Secretary-General, *Brundtland-Report A/42/427*.
- UN (1989) Hague Declaration on the environment. UN Doc. A/44/340. *International Legal Materials* **28**(5): 1308-1310.
- UN (2012) Depositary Notification on the Doha Amendment to the Kyoto Protocol. *C.N.718.2012.TREATIES-XXVII.7.c*.
- UNECE (2011) TIMBER DATABASE 1964-2009. *TIMBER DATABASE 1964-2009*.

- UNFCCC (1992) United Nations Framework Convention on Climate Change. *FCCC/INFORMAL/84*.
- UNFCCC (1997a) Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 21 S.
- UNFCCC (1997b) Report of the AGBM on its eighth session, held in Kyoto, 30 November 1997. Addendum II: Response from Parties on Issues related to Sinks. Note by the secretariat, *FCCC/AGBM/1997/MISC.4/Add.2*.
- UNFCCC (1997c) Report of the AGBM on its eighth session, held in Kyoto, 30 November 1997. Addendum: Response from Parties on Issues related to Sinks. Note by the secretariat, *FCCC/AGBM/1997/MISC.4/Add.1*.
- UNFCCC (1997d) Report of the AGBM on its eighth session, held in Kyoto, 30 November 1997. Response from Parties on Issues related to Sinks. Note by the secretariat, *FCCC/AGBM/1997/MISC.4*.
- UNFCCC (2000a) SBSTA on its thirteenth session, held in Lyon from 11 to 15 September 2000. Methodological issues Land-Use, Land-Use Change and Forestry. Methodological issues Land-Use, Land-Use Change and Forestry. Submissions from Parties, *FCCC/SBSTA/2000/MISC.6*.
- UNFCCC (2000b) SBSTA on its thirteenth session, held in Lyon from 11 to 15 September 2000. Methodological issues Land-Use, Land-Use Change and Forestry. Methodological issues Land-Use, Land-Use Change and Forestry. Submissions from Parties, Addendum, *FCCC/SBSTA/2000/MISC.6/Add.1*.
- UNFCCC (2000c) SBSTA on its thirteenth session, held in Lyon from 11 to 15 September 2000. Methodological issues Land-Use, Land-Use Change and Forestry. Consolidated synthesis of proposals made by Parties and Compilation of country-specific data and information as submitted by Parties, *FCCC/SBSTA/2000/9/Add.1*.
- UNFCCC (2001a) Decision 5/CP.6 on the Bonn Agreements on the implementation of the Buenos Aires Plan of Action. Proceedings, *FCCC/CP/2001/5*.
- UNFCCC (2001b) SBSTA on its fifteenth session, held in Marrakesh from 29 October to 6 November 2001. Session report, *FCCC/SBSTA/2001/8*.
- UNFCCC (2001c) SBSTA on its fourteenth session, held in Bonn from 16 to 27 July 2001. Reports on inter-sessional activities - issues related to emissions from forest harvesting and wood products. Submissions from Parties, *FCCC/SBSTA/2001/MISC.1*.
- UNFCCC (2002a) Report of the COP on its seventh Session, held at Marrakesh from 29 October to 10 November 2001. The Marrakesh Accords: Decision 11/CP.7 on Land use, land use change and forestry. Addendum, *FCCC/CP/2001/13/Add.1*.
- UNFCCC (2002b) SBSTA on its seventeenth session, held in New Delhi from 23 to 29 October 2002. Review of Methodological Work under the Convention and the Kyoto-Protocol. Note by the secretariat, *FCCC/SBSTA/2002/INF.12*.

- UNFCCC (2003a) Estimation, Reporting and Accounting of Harvested Wood Products. Technical Paper, *FCCC/TP/2003/7*.
- UNFCCC (2003b) SBSTA on its eighteenth session, held in Bonn from 4 to 13 June 2003. Methodological issues: Good Practice Guidance and other Information on LULUCF - Implications for harvested wood accounting. Submissions from Parties, *FCCC/SBSTA/2003/MISC.1*.
- UNFCCC (2003c) SBSTA on its seventeenth session, held in New Delhi from 23 to 29 October 2002. Session report, *FCCC/SBSTA/2002/13*.
- UNFCCC (2004) SBSTA on its twenty-first session, held in Buenos Aires from 6 to 14 December 2004. Report on the workshop on harvested wood products. Note by the secretariat, *FCCC/SBSTA/2004/INF.11*.
- UNFCCC (2005) Report of the CMP on its first session, held at Montreal from 28 November to 10 December 2005, Addendum 1. Decision 1/CMP.1 : Consideration of commitments for subsequent periods for Parties included in Annex I to the Convention under Article 3, paragraph 9, of the Kyoto Protocol, *FCCC/KP/CMP/2005/8/Add.1*.
- UNFCCC (2007a) Report of the AWG-KP on its third session, held at Bonn from 14 to 18 May 2007: Summary report by the co-chairs of the round table. *FCCC/KP/AWG/2007/2*.
- UNFCCC (2007b) Report of the AWG-KP on the first part of its fifth session, held in Bangkok from 31 March to 4 April 2008: Land use, land-use change and forestry. *FCCC/KP/AWG/2008/2*.
- UNFCCC (2008a) AWG-KP on its fifth session, held in Bangkok, 31 March to 4 April 2008 and Bonn from 2 to 12 June 2008: Land use, land-use change and forestry. Draft conclusions proposed by the Chair, *FCCC/KP/AWG/2008/L.5*.
- UNFCCC (2008b) AWG-KP on its sixth session, held in Accra, 21-27 August 2008, and Poznan, 1-10 December 2008: Land use, land-use change and forestry. Draft conclusions proposed by the Chair, *FCCC/KP/AWG/2008/L.11*.
- UNFCCC (2008c) Report of AWG-KP on its resumed fifth session, held in Bonn from 2 to 12 June 2008. Options and issues for consideration relating to LULUCF, compiled by the Chair of AWG-KP under the Kyoto Protocol. *FCCC/KP/AWG/2008/3*.
- UNFCCC (2009a) AWG-KP on its ninth session, held in Bangkok from 28 September to 9 October 2009, and Barcelona, and 2 to 6 November 2009. Documentation to facilitate negotiations among Parties. Annex II: Options and proposals on how to address definitions, modalities, rules and guidelines for the treatment of LULUCF. Note by the Chair, Revised addendum, *FCCC/KP/AWG/2009/10/Add.3/Rev.1*.
- UNFCCC (2009b) AWG-KP on its ninth session, held in Bangkok from 28 September to 9 October 2009, and Barcelona, and 2 to 6 November 2009. Documentation to facilitate negotiations among Parties. Annex II: Options and proposals on how to address definitions, modalities, rules and guidelines for the treatment of LULUCF. Note by the Chair, Revised addendum, *FCCC/KP/AWG/2009/10/Add.3/Rev.2*.

- UNFCCC (2009c) AWG-KP on its ninth session, held in Bangkok from 28 September to 9 October 2009, and Barcelona, and 2 to 6 November 2009. Documentation to facilitate negotiations among Parties. Annex II: Options and proposals on how to address definitions, modalities, rules and guidelines for the treatment of LULUCF. Note by the Chair, *FCCC/KP/AWG/2009/10/Add.3*.
- UNFCCC (2009d) Documentation to facilitate negotiations among Parties. AWG-KP at its tenth session. Note by the Chair, Annex II: Options and proposals on how to address definitions, modalities, rules and guidelines for the treatment of LULUCF, *FCCC/KP/AWG/2009/10/Add.3/Rev.3*.
- UNFCCC (2009e) Report of the AWG-KP to the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol at its fifth session. Draft decision -/CMP.5: Land use, land-use change and forestry, *FCCC/KP/AWG/2009/L.15*.
- UNFCCC (2010a) AWG-KP on its thirteenth session, held in Bonn from 2 to 6 August 2010. Draft decision -/CMP.X on Land use, land-use change and forestry. Draft proposal by the Chair, *FCCC/KP/AWG/2010/CRP.2*.
- UNFCCC (2010b) Report of the AWG-KP on its tenth session, held in Copenhagen from 7 to 15 December 2009: Draft Decision -/CMP.5 on Land use, land-use change and forestry. *FCCC/KP/AWG/2009/17*.
- UNFCCC (2011a) AWG-KP on its sixteenth session, part four, held in Durban on 29 November 2011. Synthesis report of the technical assessments of the forest management reference level submissions. *FCCC/KP/AWG/2011/INF.2*.
- UNFCCC (2011b) Report of the AWG-KP on its fifteenth session, held in Cancun from 29 November to 10 December 2010. Addendum: Chapter II on Land use, land-use change and forestry. Addendum, Revised proposal by the Chair, *FCCC/KP/AWG/2010/18/Add.1*.
- UNFCCC (2011c) Report of the CMP on its sixth session, held in Cancun from 29 November to 10 December 2010. Addendum: Decision 2/CMP.6 on Land use, land-use change and forestry. *FCCC/KP/CMP/2010/12/Add.1*.
- UNFCCC (2012a) Report of the CMP on its seventh session, held in Durban from 28 November to 11 December 2011, Addendum: Decision 2/CMP.7 on Land use, land-use change and forestry. *FCCC/KP/CMP/2011/10/Add.1*.
- UNFCCC (2012b) Report of the COP on its seventeenth session, held in Durban from 28 November to 11 December 2011. Addendum: Decision 15/CP.17 on the Revision of the UNFCCC reporting guidelines on annual inventories for Parties included in Annex I to the Convention. *FCCC/CP/2011/9/Add.2*.
- UNFCCC (2014a) Definitions [online]. United Nations Framework Convention on Climate Change <[http://unfccc.int/ghg\\_data/online\\_help/definitions/items/3817.php](http://unfccc.int/ghg_data/online_help/definitions/items/3817.php)> am 12. Februar 2015.
- UNFCCC (2014b) Forest Management Reference Levels [online]. United Nations Framework Convention on Climate Change <<http://unfccc.int/bodies/awg-kp/items/5896.php>> am 09. Juli 2014.

- UNFCCC (2015) COP on its twenty-first session, held in Paris from 20 November to 11 December 2015. Draft decision -/CP.21: Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President, *FCCC/CP/2015/L.9*.
- Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, A.J., Schulze, E.D., Rebmann, C., Moors, E.J., Granier, A., Gross, P., Jensen, N.O., Pilegaard, K., Lindroth, A., Grelle, A., Bernhofer, C., Grunwald, T., Aubinet, M., Ceulemans, R., Kowalski, A.S., Vesala, T., Rannik, U., Berbigier, P., Loustau, D., Gumundsson, J., Thorgeirsson, H., Ibrom, A., Morgenstern, K., Clement, R., Moncrieff, J., Montagnani, L., Minerbi, S. und Jarvis, P.G. (2000) Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* **404**(6780): 861-865.
- Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (2014) Altpapierverbrauch in der Papierindustrie. Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (vdp), Papier: Ein Leistungsbericht, Diverse Jahrgänge
- WBGU (1998) Die Anrechnung biologischer Quellen und Senken im Kyoto-Protokoll: Fortschritt oder Rückschlag für den globalen Umweltschutz? Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Sondergutachten, Report No: ISBN 3-9806309-0-0. 86 S.
- WBGU (2007) Der UN-Weltklimareport: Bericht über eine aufhaltsame Katastrophe. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU). Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 248 S.
- Wegener, G. (1994) Forstwirtschaft und Holznutzung als unverzichtbare Elemente zukunftsorientierten Handclns. *Holz als Roh- und Werkstoff* **52**(4): 235-238.
- Wegener, G., Beudert, M., Frühwald, A., Dreiner, K. und Scharai-Rad, M. (1994) Bewertung von Holz im Vergleich mit anderen Werkstoffen unter dem Aspekt der CO<sub>2</sub>-Bilanz. Forschungsbericht im Auftrag des Forstabsatzfonds, 108 S.
- Weiß, J. und Dunkelberg, E. (2010) Erschließbare Potentiale im Ein- und Zeifamilienhausbestand. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Projektbericht, 113 S.
- Welzer, H. (2008) Klimakriege: Wofür im 21. Jahrhundert getötet wird. Frankfurt am Main: Fischer, 335 S.
- Werner, F., Taverna, R., Hofer, P. und Richter, K. (2006) Greenhouse Gas Dynamics of an Increased Use of Wood in Buildings in Switzerland. *Climatic Change* **74**(1-3): 319-347.
- Werner, F., Taverna, R., Hofer, P., Thürig, E. und Kaufmann, E. (2010) National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environmental Science & Policy* **13**(1): 72-85.
- Winistorfer, P., Zhangjing, C., Lippke, B. und Stevens, N. (2005) Energy consumption and greenhouse gas emissions related to the use, maintenance, and disposal of a residential structure. *Wood and Fiber Science* **37**(Corrim Special Issue): 128-139.
- Winjum, J.K., Brown, S. und Schlamadinger, B. (1998) Forest Harvests and Wood Products: Sources and Sinks of Atmospheric Carbon Dioxide. *Forest Science* **44**(2): 272-284.

Winjum, J.K., Dixon, R.K. und Schroeder, P.E. (1993) Forest management and carbon storage: An analysis of 12 key forest nations. *Water, Air, & Soil Pollution* **70**(1-4): 239-257.

### **Veröffentlichungen des Autors aus dem Themenkreis der Dissertation**

#### **Zeitschriftenbeiträge – nicht referiert**

Rüter, S. (2011b) Welchen Beitrag leisten Holzprodukte zur CO<sub>2</sub>-Bilanz? *AFZ - Der Wald* **66**(15): 15-18.

Rüter, S., Rock, J., Köthke, M. und Dieter, M. (2011) Wieviel Holznutzung ist gut fürs Klima? *AFZ - Der Wald* **66**(15): 19-21.

Rüter, S. (2012) Kohlenstoffspeicherung in Holz: die verzögerte Freisetzung von biogenem CO<sub>2</sub> als Beitrag zum Klimaschutz. *HOLZBAU - die neue quadriga* **1**(2): 20-22.

#### **Sonstige Veröffentlichungen**

Henschel, C., Ward, M., Rüter, S., Ashton, R., Bird, N., Frieden, D., Lehtonen, A., Schlamadinger, B., Silviu, M., Tuerk, A. und Zanchi, G. (2008) Options for improving the treatment of LULUCF in a Copenhagen agreement: forest and wetland degradation, factoring out, harvested wood products, and approaches for fuller accounting. *Climate Strategies, Working Paper*, 22 S.

Grêt-Regamey, A., Hendrick, E., Hetsch, S., Pingoud, K. und Rüter, S. (2008) Challenges and Opportunities of Accounting for Harvested Wood Products. In: *Harvested Wood Products in the Context of Climate Change Policies, ECE/TIM/DP/55*, United Nations Palais des Nations, Geneva, Switzerland, 9-10 September 2008, S 27-40

Rüter, S. (2008) Model for estimating carbon storage effects in wood products in Germany. In: *Harvested Wood Products in the Context of Climate Change Policies, ECE/TIM/DP/55*, United Nations Palais des Nations, Geneva, Switzerland, 9-10 September 2008, S 15-16

Rüter, S. (2010) Einbeziehung von Holzprodukten in die Klimapolitik. *Holz-Zentralblatt* **25**: 623-624.

Rüter, S. (2010) Consideration of wood products in climate policies and its linkage to sustainable building assessment schemes In: *Proceedings of the 53rd International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe - Timber Committee*, Geneva, 11. -14. October 2010, S 88-101

Rüter, S. (2011a) Projection of Net Emissions from Harvested Wood Products in European Countries: For the period 2013-2020. *Thünen-Institute of Wood Research, Report No: 2011/01*, 63 S.

Rüter, S., Alfredsen, G., de Aquino Ximenes, F., Guendehou, S., Pingoud, K., Tsunetsugu, Y. und McCusker, A. (2014) Harvested Wood Products (Section 2.8). In: *Hiraishi T., Krug T.,*

Tanabe K., Srivastava N., Jamsranjav B., Fukuda M., Troxler G.T. (Eds). 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. Published: IPCC, Switzerland. S 109-134.

Rüter, S. (2016) Holzprodukte (4.G). In: Gniffke P. (Ed) Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2015 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2013, Umweltbundesamt (UBA), Climate Change 02/2016, Dessau, Januar 2016, 225-228 S.

### Vorträge

Rüter, S. (2008) Harvested Wood Products [Vortrag]. In: SB 28 IETA Side Event at the UNFCCC Sessions of the Subsidiary Bodies (SB 28/AWG-KP 5) 'LULUCF in a post 2012 Agreement', Bonn, 11 July 2008

Rüter, S. (2008) Discussion of accounting approaches for consideration of Harvested Wood Products in post-2012 [Vortrag]. In: International Conference on 'The European Forest-Based Sector: Bio-Responses to Address New Climate and Energy Challenges', Nancy, France, 6 - 8 November 2008

Rüter, S. (2008) Estimating HWP contribution to Climate Change Mitigation [Vortrag]. In: Policy Dialogue during the FAO European Forest Week on 'The Role of Wood Products in Climate Change Mitigation', Rome, Italy, 21 October 2008

Rüter, S. (2008) Harvested Wood Products in a post-2012 Agreement [Vortrag]. In: CIFOR Forest Day 2 Side Event at the UNFCCC COP 14 'Accounting for Carbon Storage in Harvested Wood Products: Why bother?', Poznan, Poland, 06 December 2008

Rüter, S. (2009) Climate relevance of Harvested Wood Products – methods and policies [Vortrag]. In: Discussion Workshop 'Carbon in Timber within a National Emissions Trading Scheme', Sydney, Australia, 12-13 February 2009

Rüter, S. (2009) Harvested wood products [Vortrag]. In: Annex-I LULUCF Informal Workshop, Dublin, Ireland, 12-13 March 2009

Rüter, S. (2009) Kohlenstoffspeicher Holzprodukte und Substitutionseffekte [Vortrag]. In: Aktiver Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel. Beiträge der Agrar- und Forstwirtschaft, BMELV-vTI Fachtagung, Braunschweig 15.-16. Juni 2009

Rüter, S. (2009) Chancen einer Anrechnung der stofflichen Nutzung von Holz in einem zukünftigen Klimaschutzabkommen [Vortrag]. In: 15. Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Patenkirchen, 02.-4. Dezember 2009

Rüter, S. (2010) Post-Copenhagen: Implications for the Forest Products Sector [Vortrag]. In: 32<sup>nd</sup> Joint UNECE/FAO Working Party on Forest Economics and Statistics, Geneva, Switzerland, 25 March 2010

- Rüter, S. (2010) Methods to estimate net-emissions from Harvested Wood Products (HWP) and approach to account for HWP [Vortrag]. In: 3<sup>rd</sup> Meeting of Informal Expert Group under the European Climate Change Programme 'Climate Policy for Land Use, Land Use Change and Forestry, Brussels, Belgium, 23 June 2010
- Rüter, S. (2010) 2006 IPCC Guidance on estimating net-emissions from Harvested Wood Products [Vortrag]. In: IPCC Expert Meeting on HWP, Wetlands and Soil N<sub>2</sub>O, Geneva, Switzerland, 19-21 October 2010
- Rüter, S. (2010) Holz im Kohlenstoffkreislauf – ein Thema im Spannungsfeld zwischen Wissenschaft und Klimapolitik [Vortrag]. In: Wald-Klima-Konferenz 2010, BMELV Fachkonferenz, Berlin, 28.-29. Oktober 2010
- Rüter, S. (2013) Die Berücksichtigung von Holz in der internationalen Klimapolitik (UNFCCC) [Vortrag]. In: Internationales Holzbau-Forum IHF, Garmisch, 4.-6. Dezember 2013
- Rüter, S. (2014) Harvested Wood Products [Vortrag]. In: JRC technical workshop 2014 on reporting LULUCF for CP2 with the IPCC 2013 KP Supplement, Arona, Italy, 5-7 May 2014
- Rüter, S. (2015) Preparation of HWP estimates in line with 2/CMP.7 and 529/2013 [Vortrag]. In: JRC technical workshop 2015 on LULUCF reporting, Arona, Italy, 26 May 2015



## 11 DANKSAGUNG

Zuallererst danke ich meinem Doktorvater und Erstbetreuer Prof. Dr. Klaus Richter für sein Vertrauen und seine Bereitschaft, mich bei der Umsetzung der Dissertation zu betreuen. Mit Ihrer Erfahrung, Ihren wertvollen Hinweisen und Ihrem jederzeit offenen Ohr waren Sie mir eine hilfreiche Stütze bei der Fertigstellung meiner Promotion.

Ganz herzlich möchte ich auch Prof. Dr. Michael Weber und Prof. Dr. Andreas Fischlin für ihre Bereitschaft danken, die Begutachtung meiner Arbeit vorzunehmen.

Die Dissertation entstand parallel zu meiner beruflichen Tätigkeit als Wissenschaftler am Thünen-Institut für Holzforschung, damals Fachinstitut der ehemaligen Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, an dem ich im Frühjahr 2005 eingestellt wurde. Von Beginn an faszinierte mich die Möglichkeit, die eigene Forschung auf aktuelle Fragestellungen in der Politik ausrichten und ihre Ergebnisse unmittelbar zugänglich machen zu können. Verbunden mit dem enormen Gestaltungsfreiraum, der mir gegeben wurde, war dies die Grundvoraussetzung für mein nicht nachlassendes Interesse an dem Thema Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten in all seinen Facetten und für meinen Entschluss, zu dem Thema auch promovieren zu wollen. Für dieses tolle Arbeitsumfeld möchte ich stellvertretend meinem Institutsleiter Dr. Uwe Schmitt danken.

Vor allem Dr. Eckhard Heuer vom BMEL gilt mein besonderer Dank für das mir entgegengebrachte Vertrauen, das es mir ermöglicht hat, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ergebnisse über mehrere Jahre und in enger Abstimmung mit dem Ministerium direkt in die internationalen Klimaverhandlungen einzubringen. So konnte ich das Thema nicht nur wissenschaftlich bearbeiten, sondern hatte die einmalige Gelegenheit auch den dazugehörigen politischen Prozess in Absprache mit den Kolleginnen und Kollegen der deutschen Delegation maßgeblich mitzugestalten. Herzlichen Dank dafür, Eckhard!

An dieser Stelle möchte ich mich bei all den Kolleginnen und Kollegen der EU LULUCF Expertengruppe bei den internationalen Klimaverhandlungen bedanken. Insbesondere Dr. Eugene Hendrick gilt mein Dank für die unvergessliche Zeit unserer Zusammenarbeit: ohne die tage- und nächtelangen Diskussionen rund um die Anrechnung von Holzprodukten, die vielen Anregungen und Streitgespräche in und am Rande der Verhandlungen wäre es niemals möglich gewesen die Arbeit auf diesem Niveau durchzuführen. Without your enthusiasm, expertise and humour my work would not have been the same. Thanks Eugene!

Bedanken möchte ich mich weiter bei den Kolleginnen und Kollegen, die mit mir im Auftrag der internationalen Staatengemeinschaft die methodischen Regeln für die Berechnung der Treibhausgasbilanz von Holzprodukten für den IPCC ausgestalten durften. Insbesondere Dr. Kim Pingoud, mit dem ich immer wieder auch im Rahmen unserer Zusammenarbeit in der

IEA Bioenergy Task 38 Gelegenheit hatte, mich zu Berechnungsmethoden des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten auszutauschen, gilt mein ausgesprochen Dank. Thanks Kim!

Für das Verraten zahlreicher Tipps und Tricks bei der Realisierung des WoodCarbonMonitor in Excel und Visual Basic möchte ich mich ganz herzlich bei Hermann Englert vom Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie bedanken. Danke auch den Kolleginnen und Kollegen am Thünen-Institut und dem Umweltbundesamt, die mich bei der Aufbereitung der Daten für die Nationale Treibhausgasberichterstattung unterstützt haben. Eure detaillierte Überprüfung der für die Berichterstattung relevanten Ergebnisse hat auf den letzten Metern noch dazu beigetragen, Fehler im Modell zu entdecken und den WoodCarbonMonitor weiter zu verbessern.

Für ihre kritische Durchsicht meiner Dissertation und ihre Anregungen bedanke ich mich bei Gerhard Bollardt, Dr. Frank Werner und meinem Vater. Ihr habt zum letzten Feinschliff der Arbeit beigetragen. Ein herzliches Dankeschön dafür!

Weiter möchte ich die Gelegenheit nutzen, mich auch bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Thünen-Institut für Holzforschung für die gute Zusammenarbeit und das herzliche Miteinander zu bedanken. Es bereitet mir sehr viel Freude mit euch an Fragestellungen rund um das Thema Auswirkungen der Holznutzung auf Umwelt und Klima zu arbeiten.

Für ihre Geduld mit mir während der Erstellung dieser Arbeit und ihre langjährige Freundschaft danke ich außerdem Andy, Clemens, Nina und Roland.

Von ganzem Herzen danke ich im Besonderen meinen lieben Eltern Ingrid und Arnd für ihre fortwährende Unterstützung und Interesse an meiner Arbeit. Ihr habt mir all das erst ermöglicht und nicht zuletzt Euch ist diese Arbeit zu verdanken!

Für ihre unermüdliche Motivation und Aufmunterung, ihren Glauben an mich und ihre Liebe danke ich schließlich Yvonne. Schön, dass es Dich gibt!

## 12 ANHANG

In dem Modell WoodCarbonMonitor werden die jährlichen Netto-Emissionen aus dem Holzproduktspeicher für ein Land ( $\Delta CO_{2TOTAL}(i)$ ) aus der Summe der Änderungen der aus den definierten Produktkategorien bestehenden Kohlenstoffspeicher während des Jahres ( $\Delta C_l(i)$ ) auf Basis der Gleichungen A-1 und A-2 ermittelt.

$$\Delta CO_{2TOTAL}(i) = \sum_{l=1}^n \Delta C_l(i) \cdot (44/12) \quad (A-1)$$

Wobei:

$i$  = Jahr

$\Delta CO_{2TOTAL}(i)$  = Gesamte Netto-Emissionen aus dem Holzproduktspeicher während des Jahres  $i$ , in Mt CO<sub>2</sub>

$C$  = Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten (*HWP*), in Mt C

$\Delta C_l(i)$  = Änderung des Produktspeichers  $C$  der jeweiligen Holzproduktkategorie  $l$  während des Jahres  $i$ , in Mt C

$n$  = Anzahl der gewählten Produktkategorien der Holzhalbwarengruppen Schnittholz, Holzwerkstoffe und Papier und Pappe (vgl. Tab. 5-11, S. 167)

$l$  = Indexnummer der jeweiligen Produktkategorie

$$\Delta C_l(i) = C_l(i + 1) - C_l(i) \quad (A-2)$$

Wobei:

$C_l(i + 1)$  = Kohlenstoffspeicher  $C$  der jeweiligen Holzproduktkategorie am Ende des Jahres  $i$  bzw. zu Beginn des Folgejahres, in Mt C

$C_l(i)$  = Kohlenstoffspeicher  $C$  der jeweiligen Holzproduktkategorie zu Beginn des Jahres  $i$ , in Mt C

Mit der in dem Modell implementierten Flussdatenmethode (vgl. Kap. 2.2) wird die Höhe des Kohlenstoffspeichers der jeweiligen Produktkategorie  $l$  am Ende eines Jahres ( $C_l(i + 1)$ ) in Abhängigkeit von der frei wählbaren Berechnungsmethode über die in diesen Speicher eingehenden Kohlenstoffmengen (*Inflow<sub>l</sub>*) über die Zeit abgeschätzt (Gleichung A-3).

$$C_l(i + 1) := \begin{cases} g_1(i + 1) & \text{für a} \\ g_2(i + 1) & \text{für b} \\ g_3(i + 1) & \text{für c} \end{cases} \quad (A-3)$$

Bedingungen:

a = bei Annahme eines exponentiellen Zerfallsmusters → Gleichung A-4

b = bei Annahme eines logistischen Zerfallsmusters → Gleichung A-5

c = bei Annahme eines linearen Zerfallsmusters → Gleichung A-6

Wobei:

$g_1 \dots g_3$  = nachfolgend definierte Funktionsvorschriften

Die Berechnung des Kohlenstoffspeichers der jeweiligen Produktkategorie unter der Annahme eines exponentiellen Zerfallsmusters folgt der von Pingoud und Wagner (2006) beschriebenen Funktion, die von IPCC (2006, 2014) als Defaultmethode vorgeschlagen und in Kapitel 2.2.3.5 detailliert beschrieben wird (A-4).

$$g_1(i+1) = C_l(i+1) = e^{-k_l} \cdot C_l(i) + \left[ \frac{(1 - e^{-k_l})}{k_l} \right] \cdot Inflow_l(i) \quad (\text{A-4})$$

mit  $i \geq 1900$

Wobei:

$k_l$  = Zerfallskonstante der Funktion 1. Ordnung, in  $a^{-1}$  ( $k = \ln(2) / hl$ , wobei  $hl$  die Halbwertszeit (half-life) des Speichers der jeweiligen Holzproduktkategorie in Jahren ist.)

$Inflow_l(i)$  = Zufluss aus der jeweiligen Holzproduktkategorie in den Kohlenstoffspeicher während des Jahres  $i$  → Gleichung A-7

Die Berechnung des Kohlenstoffspeichers unter Annahme eines in Kapitel 2.2.3.4 beschriebenen logistischen Zerfallsmusters basiert auf der Funktionsgleichung A-5.

$$g_2(i+1) = C_l(i+1) = \sum_{t=t_0}^{t_{max}} \left\{ Inflow_l(t) \cdot \left[ A - \frac{A}{(1 + B \cdot e^{-2k_l(i+1-t)})} \right] \right\} \quad (\text{A-5})$$

mit  $t_0 = 1900$  und  $i \geq 1900$

Wobei:

$t$  = Jahr ( $t_0 \dots t_{max}$ )

$t_0$  = Startjahr der zu berechnenden Zeitreihe

$t_{max}$  = Endjahr der zu berechnenden Zeitreihe ( $i + 1$ )

$A = 120$  (dimensionsloser Parameter, vgl. S. 58)

$B = 5$  (dimensionsloser Parameter, vgl. S. 58)

$k$  = Kehrwert der Nutzungsdauer  $sl$  der jeweiligen Holzproduktkategorie ( $1/sl$ )

Wird, wie in Kapitel 2.2.3.2 beschrieben, ein lineares Zerfallsmuster unterstellt, erfolgt die Berechnung des Kohlenstoffspeichers im WoodCarbonMonitor auf Basis der Funktionsgleichung A-6.

$$g_3(i+1) = C_l(i+1) = \sum_{t=t_0}^{t_{max}} [Inflow_l(t) \cdot (1 - k_l(i+1-t))] \quad (\text{A-6})$$

Je nach ebenfalls frei wählbarem Berechnungsansatz (vgl. Kap. 3.2), der die Systemgrenzen des zu berechnenden Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten festlegt, errechnet sich der jährliche Zufluss in den Speicher der jeweiligen Produktkategorie ( $Inflow_l(i)$ ) für verschiedene Aktivitätsdaten aus den statistischen Zeitreihen für Holzhalbwaren gemäß Gleichung A-7 (vgl. Kap. 5.2.1.2)

$$Inflow_l(i) := \begin{cases} Inflow_{C_l}(i) & \text{für a} \\ Inflow_{P_l}(i) & \text{für b} \\ Inflow_{DP_l}(i) & \text{für c} \\ Inflow_{DC_l}(i) & \text{für d} \\ Inflow_{2/CMP.7_l}(i) & \text{für e} \end{cases} \quad (\text{A-7})$$

*Bedingungen:*

a = bei Verwendung des *stock-change* Ansatzes

b = bei Verwendung des Produktionsansatzes (*Berechnungsvariante 1*)

c = bei Verwendung des Produktionsansatzes (*Berechnungsvariante 2*)

d = bei Verwendung des *stock-change of domestic origin* Ansatzes

e = bei Verwendung des Berechnungsansatzes nach 2/CMP.7, zu berechnen ausschließlich mit Hilfe der Funktionsvorschrift  $g_1$

*Wobei:*

$Inflow_{C_l}(i)$  = Kohlenstoffzufluss aus dem rechnerischen Verbrauch der jeweiligen Produktkategorie im Jahr  $i$ , in Mt → Gleichung A-8

$Inflow_{P_l}(i)$  = Kohlenstoffzufluss in hergestellten Holzprodukten der jeweiligen Produktkategorie im Jahr  $i$ , in Mt → Gleichung A-10

$Inflow_{DP_l}(i)$  = Kohlenstoffzufluss in aus heimischem Einschlag hergestellten Holzprodukten der jeweiligen Produktkategorie im Jahr  $i$ , in Mt → Gleichung A-11

$Inflow_{DC_l}(i)$  = Kohlenstoffzufluss aus dem Verbrauch von Holzprodukten der jeweiligen Produktkategorie aus heimischer Herstellung im Jahr  $i$ , in Mt → Gleichung A-14

$Inflow_{2/CMP.7_l}(i)$  = Kohlenstoffzufluss in aus heimischem Einschlag unter der Kyoto-Aktivität  $j$  hergestellten Holzprodukten der jeweiligen Produktkategorie im Jahr  $i$ , in Mt → Gleichung A-22

Der Kohlenstoffzufluss in den Produktspeicher berechnet sich für den in Kapitel 3.2.1.2 beschriebenen *stock-change* Ansatz auf Basis der Gleichungen A-8, wobei die hierfür notwendigen Aktivitätsdaten über Gleichung A-9 ermittelt werden.

$$Inflow_{C_l}(i) = HWP_{C_l}(i) \cdot u_l \quad (A-8)$$

Wobei:

$HWP_{C_l}(i)$  = Rechnerischer Verbrauch von Holzprodukten der jeweiligen Produktkategorie (s. Tab. 5-11, S. 167) im Jahr  $i$ , in  $m^3$  → Gleichung A-9

$u_l$  = Kohlenstoffumrechnungsfaktor der jeweiligen Produktkategorie (vgl. Kap. 5.2.1.3)

$$HWP_{C_l}(i) = HWP_{P_l}(i) + HWP_{IM_l}(i) - HWP_{EX_l}(i) \quad (A-9)$$

mit  $HWP_{C_l}(i) = 0$ , wenn  $HWP_{C_l}(i) < 0$  oder  $HWP_{EX_l}(i) > HWP_{P_l}(i)$

Wobei:

$HWP_{P_l}(i)$  = Produktion von Holzprodukten der jeweiligen Produktkategorie im Jahr  $i$ , in  $m^3$

$HWP_{IM_l}(i)$  = Import von Holzprodukten der jeweiligen Produktkategorie im Jahr  $i$ , in  $m^3$

$HWP_{EX_l}(i)$  = Export von Holzprodukten der jeweiligen Produktkategorie im Jahr  $i$ , in  $m^3$

Entsprechend wird der Kohlenstoffzufluss in den Produktspeicher für den in Kapitel 3.2.1.3 beschriebenen Produktionsansatz auf Basis der Gleichung A-10 ermittelt. Wird die in dem WoodCarbonMonitor separat zur Verfügung stehende Berechnungsvariante gewählt, wonach nur die aus heimischem Einschlag stammenden Holzprodukte einbezogen werden sollen, wird Gleichung A-11 verwendet.

$$Inflow_{P_l}(i) = HWP_{P_l}(i) \cdot u_l \quad (A-10)$$

$$Inflow_{DP_l}(i) = HWP_{DP}(i) \cdot u_l \quad (A-11)$$

Wobei:

$HWP_{DP}(i)$  = aus heimischem Einschlag hergestellte Holzprodukte der jeweiligen Produktkategorie im Jahr  $i$ , in  $m^3$  → Gleichung A-12

Die Berechnung der in Gleichung A-11 benötigten Aktivitätsdaten, die die jährlich aus heimischem Einschlag hergestellten Holzprodukte ( $HWP_{DP}(i)$ ) beschreiben, erfolgt über die nachfolgende Gleichung A-12.

$$HWP_{DP_l}(i) = HWP_{P_l}(i) \cdot f_R(i) \quad (\text{A-12})$$

mit  $f_R(i) := f_{IRW}(i)$  für Produkte der Kategorien ‚Schnittholz‘ und ‚Holzwerkstoffe‘ und  $((f_{IRW}(i) \cdot (1 - q) \cdot f_{PULP}(i)) + q \cdot f_{RecP}(i))$  für Produkte der Kategorie ‚Papier und Pappe‘

mit  $f_{IRW}(i) := 0$  falls  $f_{IRW}(i) < 0$  und  $f_{PULP}(i) := 0$  falls  $f_{PULP}(i) < 0$  und  $f_{RecP}(i) := 0$  falls  $f_{RecP}(i) < 0$

Wobei:

$f_R(i)$  = Anteil der jeweiligen Holzrohstoffkategorie  $R$  ( $IRW$ ,  $PULP$  oder  $RecP$ ) für die Herstellung der jeweiligen Produktkategorie aus heimischer Produktion im Jahr  $i \rightarrow$  Gleichung A-13

$IRW$  = Holzrohstoffkategorie ‚Industrierohholz‘ (*industrial roundwood*)

$q$  = Altpapiereinsatzquote

$PULP$  = Holzrohstoffkategorie ‚Holzzellstoff‘ (*wood pulp*)

$RecP$  = Holzrohstoffkategorie ‚Altpapier‘ (*recovered paper*)

Die Berechnung des aus heimischer Produktion stammenden Anteils der jeweiligen Holzrohstoffkategorie  $R$  an ihrem rechnerischen Gesamtverbrauch im Jahr  $i$ , der durch den Rohstofffaktor  $f_R$  beschrieben wird (vgl. Kap. 5.2.1.4), wird auf Basis der Gleichung A-13 durchgeführt.

$$f_R(i) = \frac{R_P(i) - R_{EX}(i)}{R_P(i) + R_{IM}(i) - R_{EX}(i)} \quad (\text{A-13})$$

mit  $R := \begin{cases} IRW & \text{für a} \\ PULP & \text{für b} \\ RecP & \text{für c} \end{cases}$

Bedingungen:

a = bei Berechnung der Holzrohstoffkategorie ‚Industrierohholz‘  $IRW$  (*industrial roundwood*)

b = bei Berechnung der Holzrohstoffkategorie ‚Holzzellstoff‘  $PULP$  (*wood pulp*)

c = bei Berechnung der Holzrohstoffkategorie ‚Altpapier‘  $RecP$  (*recovered paper*)

Wobei:

$R_P(i)$  = Produktion der Holzrohstoffkategorie im Jahr  $i$ , in  $m^3$  oder Mt

$R_{IM}(i)$  = Import von Holzrohstoffkategorie im Jahr  $i$ , in  $m^3$  oder Mt

$R_{EX}(i)$  = Export von Holzrohstoffkategorie im Jahr  $i$ , in  $m^3$  oder Mt

Der Kohlenstoffzufluss des in Kapitel 3.2.1.5 beschriebenen *stock-change of domestic origin* Ansatzes wird mit Hilfe der Gleichung A-14 ermittelt, die sich wiederum aus den mit Gleichung A-15 ermittelten Aktivitätsdaten berechnet.

$$\text{Inflow}_{DC_l}(i) = \text{HWP}_{DC_l}(i) \cdot u_l \quad (\text{A-14})$$

Wobei:

$\text{HWP}_{DC_l}(i)$  = aus heimischem Einschlag hergestellte und heimisch verbrauchte Holzprodukte der jeweiligen Produktkategorie im Jahr  $i$ , in  $\text{m}^3 \rightarrow$  Gleichung A-15

$$\text{HWP}_{DC_l}(i) = \text{HWP}_{DP_l}(i) - (\text{HWP}_{EX_l}(i) \cdot f_R(i)) \quad (\text{A-15})$$

mit  $\text{HWP}_{DC_l}(i) = 0$  wenn  $(\text{HWP}_{EX_l}(i) \cdot f_R(i) > \text{HWP}_{DP_l}(i))$

Für die Berechnung des Kohlenstoffzuflusses aller durch Gleichung A-7 beschriebenen Berechnungsansätze wurden die Zeitreihen unterschiedlicher Halbwarenstatistiken im WoodCarbonMonitor hinterlegt, deren Anfangsjahr  $t_a$  jeweils voneinander abweicht (vgl. Kap. 5.2.1).

$$t_a := \begin{cases} 1949 & \text{für a} \\ 1961 & \text{für b} \\ 1964 & \text{für c} \end{cases} \quad (\text{A-16})$$

Bedingungen:

- a = bei Verwendung der Aktivitätsdaten des Statistischen Bundesamtes
- b = bei Verwendung der Aktivitätsdaten der FAO
- c = bei Verwendung der Aktivitätsdaten der UNECE

Wobei:

$t_a$  = Anfangsjahr der statistischen Zeitreihe der jeweiligen Produktkategorie von Holzprodukten

Zugleich kann auf Basis unterschiedlicher Annahmen mit dem WoodCarbonMonitor neben einem durch das Anfangsjahr der statistischen Zeitreihe definierten Startjahr  $t_a$  auch ein von den oben genannten Statistikdaten unabhängiges Startjahr für die Berechnung des Kohlenstoffspeichers ( $t_0$ ) definiert werden (Gleichung A-17).

$$t_0 := \begin{cases} t_a & \text{für a} \\ t_{def} & \text{für b} \end{cases} \quad (\text{A-17})$$

Bedingungen:

- a = bei Verwendung eines Startjahres identisch mit dem Anfangsjahr der statistischen Zeitreihe der jeweiligen Produktkategorie von Holzprodukten  $\rightarrow$  Gleichung A-16
- b = bei Verwendung eines frei wählbaren Startjahres

Wobei:

$t_0$  = Startjahr der zu berechnenden Zeitreihe



$t_{def}$  = frei wählbares Startjahr der zu berechnenden Zeitreihe (z.B. 1900, 1990 und 2013)

Um die in Kapitel 2.2.3 und 5.1.2.3 beschriebenen geerbten Emissionen im Rahmen der Abschätzung der Kohlenstoffspeicherhöhe in Holzprodukten auf Basis der gegebenen statistischen Zeitreihen zu den jeweiligen Produktkategorien berechnen und die hierfür möglichen Herangehensweisen analysieren zu können (vgl. Gleichung A-7), wurden im WoodCarbonMonitor, wie in Kapitel 5.2.3.1 beschrieben, mehrere Berechnungsoptionen für die Jahre  $1900 \leq i \leq t_a$  bzw. das Berechnungsstartjahr  $t_0$  implementiert.

Nachfolgend werden mit Gleichung A-18 diese durch den Benutzer frei wählbaren Optionen zur Berücksichtigung der geerbten Emissionen zunächst für die unter den Bedingungen a, b, c und d in Gleichung A-7 genannten Berechnungsansätze beschrieben.

$$g_1(i+1) = C_l(i+1) = e^{-k_l} \cdot C_l(i) + \left[ \frac{(1 - e^{-k_l})}{k_l} \right] \cdot Inflow_l(i) \quad (\text{A-18})$$

$$\text{mit } Inflow_l(i) := \begin{cases} \left( AD_l(t_a) \cdot (1 + \bar{p}_{def})^{(i-t_a)} \cdot u_l \right. & \text{für } 1900 \leq i < t_a \text{ und } a_1 \\ \left. \sum_{t=t_a}^{t_a+4} AD_l(t)/5 \cdot (1 + \bar{p}_{def})^{(i-t_a)} \cdot u_l \right) & \text{für } 1900 \leq i < t_a \text{ und } a_2 \\ \left( AD_l(t_a) \cdot (1 + \bar{p}_a)^{(i-t_a)} \cdot u_l \right. & \text{für } 1900 \leq i < t_a \text{ und } b_1 \\ \left. \sum_{t=t_a}^{t_a+4} AD_l(t)/5 \cdot (1 + \bar{p}_a)^{(i-t_a)} \cdot u_l \right) & \text{für } 1900 \leq i < t_a \text{ und } b_2 \\ \sum_{t=t_a}^{t_a+n} AD_l(t)/(n+1) \cdot u_l & \text{für } 1900 \leq i < t_a \text{ und } c \\ AD_l(i) \cdot u_l & \text{für } (i = t_0 = t_a \text{ oder } i = t_0 = 1990) \text{ und für } d \\ AD_l(i) \cdot u_l & \text{für } i = t_0 = 2013 \text{ und } e \end{cases}$$

$$\text{mit } C_l(i) := \begin{cases} 0 & \text{für } i = 1900 \text{ und für } (a \text{ oder } b \text{ oder } c) \\ \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0+4} AD_l(t)/5 \cdot u_l}{k} & \text{für } (i = t_0 = t_a \text{ oder } i = t_0 = 1990) \text{ und für } d \\ 0 & \text{für } i = 2013 \text{ und } e \end{cases}$$

*Bedingungen:*

a = Berechnung auf Basis einer definierten durchschnittlichen Wachstumsrate  $\bar{p}_{def}$  der Aktivitätsdaten, basierend entweder auf

$a_1$  = dem Aktivitätsdatum des Anfangsjahres der gewählten statistischen Zeitreihe, oder

$a_2$  = auf dem Durchschnitt der Aktivitätsdaten der ersten fünf Jahre der gewählten statistischen Zeitreihe

b = Berechnung auf Basis einer durchschnittlichen Wachstumsrate  $\bar{p}$  der Aktivitätsdaten einer frei wählbaren historischen Periode, basierend entweder auf

$b_1$  = dem Aktivitätsdatum des Anfangsjahres der gewählten statistischen Zeitreihe, oder

$b_2$  = auf dem Durchschnitt der Aktivitätsdaten der ersten fünf Jahre der gewählten statistischen Zeitreihe

c = für Extrapolation der Aktivitätsdaten auf Basis eines Durchschnitts einer frei wählbaren Periode

d = für Berechnung der Speicherhöhe zum Zeitpunkt  $t_0$  ausschließlich mit Hilfe der Funktionsvorschrift  $g_1$  (Gleichung A-4), auf Basis des Durchschnitts der ersten fünf Jahre, in welchen Aktivitätsdaten zur Verfügung stehen oder auf Basis des Durchschnitts ab 1990

e = für keine Berücksichtigung der geerbten Emissionen vor einer Anrechnungsperiode (*emissions-to-atmosphere* Ansatz)

Wobei:

$AD_l$  = Aktivitätsdaten der jeweiligen Produktkategorie des jeweils gewählten Berechnungsansatzes → Gleichung A-19

$\bar{p}_{def}$  = definierte jahresdurchschnittliche Wachstumsrate der jeweiligen Aktivitätsdaten (z.B. 0,0151, vgl. IPCC 2006, Tab. 12.3)

$\bar{p}_a$  = jahresdurchschnittliche Wachstumsrate der jeweiligen Aktivitätsdaten einer frei wählbaren Periode unter Einbezug des Anfangsjahres der statistischen Zeitreihe → Gleichung A-20

$n$  = Anzahl der Jahre der statistischen Zeitreihe zur Bestimmung der Stützperiode

Je nach gewähltem Berechnungsansatz weichen die zu verwendenden Aktivitätsdaten der jeweiligen Produktkategorie ( $AD_l$ ) voneinander ab (vgl. Gleichungen A-7 bis A-15), und damit auch die in Gleichung A-18 zu verwendenden statistischen Elemente der jeweiligen Holzprodukt- bzw. Rohstoffkategorie zur Berechnung der Jahre  $1900 \leq i \leq t_a$  bzw. des Berechnungsstartjahres  $t_0$ . Gleichung A-19 definiert, auf welche Aktivitätsdaten die in Gleichung A-18 beschriebenen Berechnungsoptionen in Abhängigkeit von dem gewählten Berechnungsansatz angewendet werden.

$$AD_l := \begin{cases} HWP_{C_l} & \text{für a} \\ HWP_{P_l} & \text{für b} \\ HWP_{DP_l} & \text{für c} \\ HWP_{DC_l} & \text{für d} \end{cases} \quad (\text{A-19})$$

Bedingungen:

a = bei Berechnung der Aktivitätsdaten zur Verwendung im *stock-change* Ansatz (vgl. Gleichungen A-8 und A-9)

b = bei Berechnung der Aktivitätsdaten zur Verwendung im Produktionsansatz (*Berechnungsvariante 1*) (vgl. Gleichung A-10)

c = bei Berechnung der Aktivitätsdaten zur Verwendung im Produktionsansatz (*Berechnungsvariante 2*) (vgl. Gleichungen A-11, A-12 und A-13)

d = bei Berechnung der Aktivitätsdaten zur Verwendung im *stock-change of domestic origin* Ansatz (vgl. Gleichungen A-14 und A-15)

Die Berechnung der in Gleichung A-18 als Option verwendbaren durchschnittlichen Wachstumsrate, mit der fehlende Aktivitätsdaten der jeweiligen Produktkategorie der Jahre  $1900 \leq i < t_a$  auf Basis einer frei wählbaren Periode der jeweiligen statistischen Zeitreihe ermittelt werden (vgl. Bedingung b), wird mittels Gleichung A-20 durchgeführt, wobei im WoodCarbonMonitor sowohl die produktkategorie-spezifische Wachstumsrate, als auch die durchschnittliche Wachstumsrate aller gewählter Produktkategorien des jeweiligen statistischen Elements  $E$  verwendet werden kann.

$$\bar{p}_a = \begin{cases} \left[ \prod_{t=t_a}^{t_a+n} \left( \frac{AD_l(t+1)}{AD_l(t)} \right) \right]^{\frac{1}{n}} - 1 & \text{für a} \\ \left[ \prod_{t=t_a}^{t_a+n} \left( \frac{AD_E(t+1)}{AD_E(t)} \right) \right]^{\frac{1}{n}} - 1 & \text{für b} \end{cases} \quad (\text{A-20})$$

*Bedingungen:*

a = bei Berechnung auf Basis einer produktkategorie-spezifischen Wachstumsrate

b = bei Berechnung auf Basis einer durchschnittlichen Wachstumsrate aller gewählten Holzproduktkategorien des jeweiligen statistischen Elements  $E$  (vgl. Gleichung A-1)

*Wobei:*

$E$  = statistisches Element der jeweiligen Holzproduktkategorien ( $P$  = Produktion,  $IM$  = Import,  $EX$  = Export, vgl. Gleichungen A-9 bzw. A-19)

Während die unter den Bedingungen a, b, c und d in Gleichung A-7 genannten Berechnungsansätze alle mit den Funktionsvorschriften  $g_1$ ,  $g_2$  und  $g_3$  gerechnet werden können, wird die Berechnung des mit Entscheidung 2/CMP.7 unter dem Kyoto-Protokoll beschlossenen aktivitätsbasierten Berechnungsansatzes im WoodCarbonMonitor ausschließlich über die exponentielle Funktionsgleichung  $g_1$  (vgl. Gleichungen A-4 und A-7) realisiert, wobei die Berechnung der Speicherhöhe zum Zeitpunkt  $t_0$  ausschließlich auf Basis des Durchschnitts der ersten fünf Jahre, in welchen Aktivitätsdaten zur Verfügung stehen, oder auf Basis des Durchschnitts ab 1990 möglich ist (vgl. Bedingung d der Gleichung A-18). Eine detaillierte Erläuterung zu dem Ansatz findet sich in den Kapiteln 4.4 und 5.2.1.4, welcher mit Gleichung A-21 beschrieben wird.

$$C_l(i+1) = e^{-k_l} \cdot C_l(i) + \left[ \frac{(1 - e^{-k_l})}{k_l} \right] \cdot Inflow_{2/CMP.7_l}(i) \quad (A-21)$$

mit  $i \geq t_0$  und ( $i = t_0 = t_a$  oder  $i = t_0 = 1990$ )

$$\text{mit } C_l(i) = \frac{\sum_{i=t_0}^{t_4} (Inflow_{2/CMP.7_l}(i))/5}{k} \text{ für } i = t_0$$

Wobei:

$Inflow_{2/CMP.7_l}$  = Kohlenstoffzufluss in aus heimischem Einschlag unter der Kyoto-Aktivität  $j$  hergestellten Holzprodukten der jeweiligen Produktkategorie → Gleichung A-22

Der Kohlenstoffzufluss in aus heimischem Einschlag unter der Kyoto-Aktivität  $j$  hergestellten Holzprodukten der jeweiligen Produktkategorie wird über Gleichung A-22 berechnet.

$$Inflow_{2/CMP.7_l}(i) = HWP_{DP_l}(i) \cdot f_j(i) \cdot u_l \quad (A-22)$$

Wobei:

$j$  = Index für die Kyoto-Aktivitäten Waldbewirtschaftung (FM), Aufforstung und Wiederaufforstung (AR) und Entwaldung (D)

$f_j(i)$  = Anteil der Kyoto-Aktivität  $j$  am Gesamtholzeinschlag im Jahr  $i$  → Gleichung A-23

Die Ermittlung des aus einer Kyoto-Aktivität  $j$  stammenden Rohholzanteils am Gesamtholzeinschlag ( $f_j$ ) wird mittels Gleichung A-23 vorgenommen.

$$f_j(i) = \frac{H_j(i)}{H_{TOTAL}(i)} \quad (A-23)$$

mit  $i \geq 1990$

Wobei:

$H_j(i)$  = aus einer Kyoto-Aktivität  $j$  stammendes Rohholz im Jahr  $i$ , in  $m^3$  oder Vfm

$H_{TOTAL}(i)$  = Gesamtholzeinschlag im Jahr  $i$ , in  $m^3$  oder Vfm (vgl. Kap. 5.2.1.1 und 5.2.4.2)

Für die Berechnung möglicher zukünftiger Entwicklungen des Beitrags von Holzprodukten können im WoodCarbonMonitor ebenfalls verschiedene Methoden gewählt werden (vgl. Kap. 5.2.4.). Dabei werden mit Funktionsgleichung A-24 zunächst die im Projektions- bzw. Szenarienzeitraum liegenden benötigten Aktivitätsdaten der jeweiligen Produktkategorie ( $AD_l$ , vgl. Gleichung A-19) der über das Endjahr der jeweiligen statistischen Zeitreihe  $t_e$  hinausgehenden Jahre ermittelt.

$$Inflow_l(i) := \begin{cases} \left( AD_l(t_e) \cdot (1 + \bar{p}_e)^{(i-t_e)} \right) & \text{für } a_1 \\ \left( \sum_{t=t_e-4}^{t_e} AD_l(t)/5 \cdot (1 + \bar{p}_e)^{(i-t_e)} \right) & \text{für } a_2 \\ \left( AD_l(t_e) + b \cdot (i - t_e) \right) & \text{für } b_1 \\ \left( \sum_{t=t_e-4}^{t_e} AD_l(t)/5 + b \cdot (i - t_e) \right) & \text{für } b_2 \\ \left( H_{TOTAL}(i) \cdot \frac{\sum_{t=t_s}^{t_s+n} AD_l(t)}{\sum_{t=t_s}^{t_s+n} H_{TOTAL}(t)} \right) & \text{für } c \end{cases} \quad (A-24)$$

mit  $t_e < i \leq t_{max}$  und  $1990 \leq t_s$  und  $(t_s + n) \leq t_e$

*Bedingungen:*

$a$  = Berechnung auf Basis einer durchschnittlichen Wachstumsrate der Aktivitätsdaten einer frei wählbaren Periode, basierend entweder auf

$a_1$  = dem Aktivitätsdatum des Endjahres der gewählten statistischen Zeitreihe, oder

$a_2$  = auf dem Durchschnitt der Aktivitätsdaten der letzten fünf verfügbaren Jahre der gewählten statistischen Zeitreihe

$b$  = Berechnung auf Basis eines Trends einer frei wählbaren historischen Periode, basierend entweder auf

$b_1$  = dem Aktivitätsdatum des Endjahres der gewählten statistischen Zeitreihe, oder

$b_2$  = auf dem Durchschnitt der Aktivitätsdaten der letzten fünf Jahre der gewählten statistischen Zeitreihe

$c$  = Berechnung auf Basis vorliegender Zeitreihen zum Holzeinschlag  $H$

*Wobei:*

$t_e$  = letztes verfügbares Endjahr der jeweiligen statistischen Zeitreihe der jeweiligen Produktkategorie von Holzprodukten

$\bar{p}_e$  = jahresdurchschnittliche Wachstumsrate der Aktivitätsdaten einer frei wählbaren Periode unter Einbezug des Endjahres der statistischen Zeitreihe → Gleichung A-25

$b$  = jährliche Steigung des Trends → Gleichung A-26

$t_s$  = erstes frei zu wählendes Jahr zu bestimmenden Stützperiode

Die Berechnung der als Option verwendbaren durchschnittlichen Wachstumsrate für die Abschätzung von Szenarien und Projektionen unter Einbezug des Endjahres der jeweiligen statistischen Zeitreihe (vgl. Bedingung  $a$  der Gleichung A-24) basiert auf Funktionsgleichung A-25, wobei hier ebenfalls wieder entweder die jeweilige produktkategoriespezifische Wachstumsrate oder die durchschnittliche Wachstumsrate des jeweiligen statistischen Elements  $E$  aller gewählten Produktkategorien verwendet werden kann.

$$\bar{p}_e = \begin{cases} \left[ \prod_{t=t_e-n}^{t_e} \left( \frac{AD_l(t+1)}{AD_l(t)} \right) \right]^{\frac{1}{n}} - 1 & \text{für a} \\ \left[ \prod_{t=t_e-n}^{t_e} \left( \frac{AD_E(t+1)}{AD_E(t)} \right) \right]^{\frac{1}{n}} - 1 & \text{für b} \end{cases} \quad (\text{A-25})$$

*Bedingungen:*

a = bei Berechnung auf Basis einer produktkategorie-spezifischen Wachstumsrate

b = bei Berechnung auf Basis einer für das jeweilige statistische Element  $E$  durchschnittlichen Wachstumsrate aller gewählten Holzproduktkategorien (vgl. Gleichung A-1 und A-20)

Für die Berechnung von Szenarien und Projektionen auf Basis einer als Option verwendbaren Trendfunktion (vgl. Bedingung b für Gleichung A-24) wird die hierfür zu verwendende jährliche Steigung  $b$  auf Basis der Funktionsgleichung A-26 ermittelt.

$$b = \frac{1}{n} \sum_{t=t_e-n}^{t_e} (AD_l(t+1) - AD_l(t)) \quad (\text{A-26})$$