

Martina Hesse

**Entwicklung einer Methode
zur Quantifizierung des
Kaskadennutzungseffektes
bei Holzprodukten**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung des Kaskadennutzungseffektes bei Holzprodukten





Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung des Kaskadennutzungseffektes bei Holzprodukten

**Dissertation zur Erlangung des
wirtschaftswissenschaftlichen Doktorgrades
der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität Göttingen**

vorgelegt von

Dipl.-Forstw. Martina Hesse

aus

Weißenfels

Göttingen, 2015



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2015

Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 2015

Erstgutachterin: Professor Dr. Jutta Geldermann

Zweitgutachter: Professor Dr. Matthias Schumann

Tag der mündlichen Prüfung: 26.6.2015

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2015

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2015

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft

ISBN 978-3-7369-9046-3

eISBN 978-3-7369-8046-4



Sapere Aude.





Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	xi
Formelverzeichnis	xiii
1 Einführung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Lösungsweg	2
2 Holz, Wald und Klimaschutz	5
2.1 Arten und Eigenschaften von Holz	5
2.1.1 Holzarten	5
2.1.2 Holzstrukturmerkmale	6
2.1.3 Chemische Holzeigenschaften	8
2.1.4 Physikalische Holzeigenschaften	11
2.1.5 Holzsortierung und -sortimente	16
2.1.6 Maßeinheiten für Holz	19
2.2 Holzverwendung	22
2.2.1 Verwendungsarten in der stofflichen Nutzung	23
2.2.2 Verwendungsarten in der energetischen Nutzung	24
2.3 Datenquellen von Holzaufkommen und Holzverwendung in Deutschland	28
2.3.1 Bundeswaldinventuren und Waldgesamtrechnung	28
2.3.2 Weiterführende Holzbilanzen	32
2.3.3 Waldwachstums- und Holzaufkommensprognosen	33
2.4 Holzvorräte, -aufkommen und -verwendung in Deutschland	34
2.5 Die Wirkebenen von Holz innerhalb des Kohlenstoffkreislaufes	39
2.5.1 Der Kohlenstoffkreislauf	39
2.5.2 Kohlenstoffspeicherung in Waldökosystemen und Holzprodukten	41
2.5.3 Strategien in der Waldbewirtschaftung und Holzverwendung im Sinne des Klimaschutzes	44
2.6 Zusammenfassung	47



3	Kaskadennutzung von nachwachsenden Rohstoffen	49
3.1	Nutzungsarten von nachwachsenden Rohstoffen	49
3.1.1	Stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen	49
3.1.2	Energetische Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen	51
3.1.3	Konkurrenzsituation auf dem Rohstoffmarkt	52
3.2	Das Konzept der Kaskadennutzung	54
3.2.1	Grundlagen der kaskadierenden Rohstoffnutzung	54
3.2.2	Formen der stofflichen Verwendung und Verwertung von Rohstoffen	56
3.3	Kaskadennutzung von Holz	58
3.3.1	Anwendbarkeit des Prinzips auf den Rohstoff Holz	58
3.3.2	Beispiel für eine Nutzungskaskade von Holz	58
3.3.3	Arten der Weiterverwendung von Holzprodukten	59
3.3.4	Effekte einer verstärkten Kaskadennutzung von Holz in Deutschland	60
3.4	Zusammenfassung	64
4	Methodenauswahl	65
4.1	Problemformulierung: Anforderungen an das Modell	65
4.2	Auswahl der Methoden	69
4.2.1	Energiewirtschaftsmodelle (Top-down-Modelle)	69
4.2.2	Energiesystemmodelle (Bottom-up-Modelle)	74
4.3	Bewertung von Umweltwirkungen	80
4.3.1	Grundlagen der Ökobilanzierung	80
4.3.2	Methodische Erweiterungen und weitere Anwendungsgebiete von Ökobilanzen	85
4.4	Auswahl des Verfahrens	86
4.5	Zusammenfassung	88
5	Grundlagen der System Dynamics	89
5.1	Begründung und Entwicklung des Begriffes	89
5.2	Charakterisierung dynamischer Systeme	90
5.3	Das Strukturkonzept der System Dynamics	92
5.4	Qualitatives Modell	93
5.4.1	Feedback-Diagramme	94
5.4.2	Bestands- und Flussgrößendiagramme	96
5.5	Quantitatives Modell	98
5.6	Ablauf einer Simulation nach System Dynamics	101
5.7	Kritik am System-Dynamics-Konzept	102
5.8	Zusammenfassung	103



6	Allgemeines Modell für die Quantifizierung des Kaskadennutzungseffektes	105
6.1	Zielformulierung	105
6.2	Aufstellen der Referenz-Zeitverlauf-Diagramme	107
6.3	Definition der Problemgrenze	108
6.4	Qualitatives Modell	109
6.5	Quantitatives Modell	111
6.5.1	Auflistung der Schlüsselvariablen	111
6.5.2	Zeitliche Auflösung	113
6.5.3	Einheiten der Fluss- und Bestandsgrößen	114
6.5.4	Restriktion des Holzangebotes	114
6.5.5	Einbettung spezieller Fluss- und Verzögerungsstrukturen in der Nutzungsphase	115
6.5.6	Abflüsse im Fall kontinuierlicher Zuflüsse	120
6.5.7	Abflüsse im Fall variabler Zuflüsse	123
6.5.8	Kennzahlen für die Auswertung	127
6.5.9	Verknüpfung der Nutzungsphasen zu Nutzungskaskaden	128
6.6	Zusammenfassung	129
7	Anwendung des konzipierten Modells	131
7.1	Systemgrenzen und Einheiten	131
7.2	Zeitlicher Rahmen und zeitliche Auflösung	132
7.3	Festlegung der Szenarien	133
7.3.1	Szenario A und Referenzszenario R	133
7.3.2	Szenario B	134
7.3.3	Szenario C	135
7.4	Lebensdauervertiefungsfunktionen	136
7.5	Entwicklung der Eingangsmengen (Marktanteile)	138
7.6	Ergebnisse und Auswertung	140
7.6.1	Szenario A und Referenzszenario	140
7.6.2	Szenario B	148
7.6.3	Szenario C	155
7.7	Zusammenfassung der Ergebnisse für alle Szenarien	161
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	167
8.1	Schlussfolgerungen hinsichtlich des Kaskadennutzungseffektes	167
8.2	Schlussfolgerungen aus der Entwicklung und Anwendung des Modells	172
8.3	Ausblick auf weitere Einsatzbereiche und methodische Erweiterungen	174
9	Zusammenfassung	179



Literatur	183
A Datentabellen - Zeitreihen der Berechnung des Referenzszenarios	199



Abbildungsverzeichnis

2.1	Jahrringe im Querschnitt von Laub- und Nadelholz	7
2.2	Holz als Bioverbundpolymer	11
2.3	Hauptschnittrichtungen von Holz	12
2.4	Schematische Unterteilung der oberirdischen Holzmasse	20
2.5	Umrechnungsfaktoren der Holzvolumeneinheiten	22
2.6	Strukturelemente von Holzwerkstoffen	24
2.7	Holztrocknung durch BHKW-Abwärme im Biogasprozess	26
2.8	Schematische Darstellung der Waldflächenunterteilung	29
2.9	Flussdiagramm der physischen Holzaufkommens- und -verwendungsbilanz des Jahres 2004	31
2.10	Stoffflüsse in der Forst- und Holzwirtschaft im Jahr 2012 für die Bun- desrepublik Deutschland	37
2.11	Entwicklung des Holzaufkommens der zentralen Holzsortimente von 2003 bis 2013	38
2.12	Der globale Kohlenstoffkreislauf	40
2.13	CO ₂ -Vermeidungspotential durch energetische und stoffliche Nutzung von Holz	42
3.1	Übersicht der wesentlichen Nutzungs- bzw. Stoffgruppen von nach- wachsenden Rohstoffen im Nichtnahrungsmittelbereich	50
3.2	Das Prinzip der Nutzungskaskade	54
3.3	Optimierte Kaskadennutzung	55
3.4	Beispiel für eine Holznutzungskaskade	60
3.5	Schematisierte Darstellung verschiedener Holzstromszenarien I	62
3.6	Schematisierte Darstellung verschiedener Holzstromszenarien II	63
4.1	Geschachtelte Struktur der Produktionsfunktion im Allgemeine Gleich- gewichtsmodell GEM-E3	71
4.2	Wechselwirkungen zwischen Natur und Umwelt	73
4.3	Systemdynamisches Modell des Versorgungsnetzwerkes von Holzbio- masse für Österreich	75
4.4	Entscheidungsträger des Holzmarktes	78
4.5	Bestandteile einer Ökobilanz	81



5.1	Elemente der System Dynamics	92
5.2	Symbolische Kennzeichnung selbstverstärkender und zielsuchender Feedback-Schleifen	94
5.3	Symbole für Bestands- und Flussgrößendiagramme	96
5.4	Generische Bestands- und Flussgrößen-Struktur mit Informationsfluss	97
5.5	Eulerscher Polygonzug	100
6.1	Referenz-Zeitverlaufs-Diagramm für die verzögerte Kohlenstoffabgabe innerhalb einer Nutzungsphase bei einer gegebenen Lebensdauererwartungskurve	107
6.2	Betrachtete Lebenszyklusabschnitte	108
6.3	Feedback-Diagramm einer Kaskadennutzung von Holzprodukten . . .	110
6.4	Summenkurve entsorgter Produkte	116
6.5	Entsorgungsraten in Weibull- und Lognormalverteilungen	118
6.6	Summenkurve weibullverteilter Ausfallraten	119
6.7	Kontinuierliche Ausfallraten der einzelnen Alterskohorten bei gleichen Inputraten pro Zeitperiode	120
6.8	Modell der kontinuierlichen Abflüsse im Programm Vensim PLE . . .	123
6.9	Kontinuierliche Ausfallmengen der einzelnen Alterskohorten bei variablen Inputraten pro Zeitperiode	124
7.1	Systemgrenzen der Modellanwendung	132
7.2	Stoffflüsse des Referenzszenarios R und des Szenarios A	134
7.3	Stoffflüsse der Szenarien B_m und B_f	135
7.4	Stoffflüsse der Szenarien C_m und C_m	136
7.5	Funktion <i>SyntheSim</i> der Software VenSim PLE	141
7.6	Simulationsergebnisse des Referenzszenarios R im Programm VenSim PLE	144
7.7	Rohstoffzuflüsse und -abflüsse im Szenario A für die Varianten m und f sowie das Referenzszenario	145
7.8	Verhältnis der Rohstoffzuflüsse zu den Rohstoffabflüssen ψ im Szenario A für die Varianten m und f	146
7.9	Entwicklung des Produktpools $P(t)$ der Varianten m und f im Szenario A	147
7.10	Gegenüberstellung der Rohstoffzu- und -abflüsse der Nutzungsphasen des Szenarios B_m	151
7.11	Gegenüberstellung der Rohstoffzu- und -abflüsse der Nutzungsphasen des Szenarios B_f	152
7.12	Verhältnis der Rohstoffzuflüsse zu den Rohstoffabflüssen ψ im Szenario B für die Varianten m und f	153
7.13	Entwicklung des Produktpools $P(t)$ der Varianten m und f im Szenario B	154



7.14 Rohstoffzuflüsse und -abflüsse im Szenario C_m und dessen einzelne Nutzungsphasen $u=1,2,3$ 157

7.15 Rohstoffzuflüsse und -abflüsse im Szenario C_f und dessen einzelne Nutzungsphasen $u=\{1,2,3\}$ 158

7.16 Verhältnis der Rohstoffzuflüsse zu den Rohstoffabflüssen ψ im Szenario C für die Varianten m und f 159

7.17 Entwicklung des Produktpools $P(t)$ der Varianten m und f im Szenario C 160

7.18 Zeitliche Verschiebungen der Rohstoffrückläufe aller Szenarien gegenüber dem Referenzszenario 162

7.19 Dynamische Entwicklung des Produktpools $P(t)$ aller Szenarien . . . 164

7.20 Dynamische Entwicklung der in den Produkten gebundenen Kohlenstoffmenge $B(t)$ aller Szenarien 165





Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht über die Bezeichnungen ausgewählter in Deutschland gehandelte Holzarten	6
2.2	Konversionsfaktoren für Kohlenstoffanteile ausgewählter Holzprodukte [nach Rüter (2011), S. 6]	44
2.3	Funktionsmechanismen der <i>Wald-Holz-Option</i> zur Minderung des anthropogenen Treibhauseffektes	45
3.1	Übersicht über die Altholzkategorien nach AltholzV (2012)	61
4.1	Literaturüberblick	68
4.2	Untergruppen der Modelltypen innerhalb der Energiewirtschafts- und Energiesystemmodelle (in Anlehnung an Koch u. a. (2003), S. 47 und Möst und Fichtner (2009), S. 18)	70
4.3	Gliederung möglicher Gütergruppen für Holz- und Holzprodukte in der Input-Output-Rechnung	72
4.4	Treibhauspotenzial ausgewählter Gase mit einem gewählten Zeitbezug von 100 Jahren (Solomon u. a. 2007)	84
6.1	Beispielzahlen für die Zuordnung der Eingangsmenge einer Alterskohorte zu ihren entsprechenden Stellen einer Weibull-Ausfalldichtefunktion	124
7.1	Übersicht der in den Szenariorechnungen verwendeten Parameter . . .	140
7.2	Ergebnisse der Berechnungen für die Varianten von Szenario A	142
7.3	Ergebnisse der Berechnungen für die Varianten von Szenario B	150
7.4	Ergebnisse der Berechnungen für die Varianten von Szenario C	155
7.5	Ergebniszusammenfassung aller Szenarien	161
A.1	Zeitreihen der Ergebnisse für das Referenzszenario R, t= 1–50	200
A.2	Zeitreihen der Ergebnisse für das Referenzszenario R, t= 51–100 . . .	201
A.3	Zeitreihen der Ergebnisse für das Referenzszenario R, t= 101–150 . .	202
A.4	Zeitreihen der Ergebnisse für das Referenzszenario R, t= 151–200 . .	203





Abkürzungsverzeichnis

AHG	Anhydro- β -D-Glucose
AltholzV	Altholzverordnung
BWI	Bundeswaldinventur
bspw.	beispielsweise
Destatis	Statistisches Bundesamt
dt.	deutsch
DP	Polymerisationsgrad, engl. <i>Degree of Polymerisation</i>
EFISCEN	European Forest Information Scenario Model
GE	Gewichtseinheit
engl.	englisch
ggf.	gegebenenfalls
GIS	Geografisches Informationssystem
HAM	Holzaufkommensmodellierung
HKS	Handelsklassensortierung
I-O-Modelle	Input-Output-Modelle
kg	Kilogramm
KIWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz



LCA	Ökobilanz, engl. <i>Life Cycle Assessment</i>
LIVES	Lifespan database for Vehicles, Equipment, and Structures
MAS	Multiagentensysteme
MIT	Massachusetts Institute of Technology
Mrd.	Milliarden
MW	Megawatt
o. Ä.	oder Ähnliches
S.	Seite
SD	Systemdynamik
t	Tonne
u. a.	unter anderem
UGR	Umweltökonomische Gesamtrechnung
VE	Volumeneinheit
vgl.	vergleiche
VGR	Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung
VOC	Flüchtige organische Verbindung, engl. <i>volatile organic compounds</i>
WGR	Waldgesamtrechnung
WEHAM	Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung
z. B.	zum Beispiel
ZE	Zeiteinheit



Formelverzeichnis

Bestände und Flussgrößen (werden durch Großbuchstaben ausgedrückt):

C_t	Gesamter Bestand an Kohlenstoff über alle Nutzungsphasen zum Zeitpunkt t	[GE]
$B_u(t)$	Kohlenstoffbestand der Nutzungsphase u zum Zeitpunkt t	[GE]
$P_u(t)$	Produktpool der Nutzungsphase u zum Zeitpunkt t	[GE]
$Zufl_u(t)$	Menge des in die Nutzungsphase u eingehenden Holzes zum Zeitpunkt t	[GE, VE]
$Ents_a(t)$	Menge der die Nutzungsphase verlassenden Holzprodukte aus der Alterskohorte a zum Zeitpunkt t	[%]
$AbflCont(t)$	Gesamtmenge der die Nutzungsphase verlassenden Holzprodukte aller Alterskohorten zum Zeitpunkt t im Fall konstanter Zuflüsse	[GE, VE]
$AbflVar(t)$	Gesamtmenge der die Nutzungsphase verlassenden Holzprodukte aller Alterskohorten zum Zeitpunkt t im Fall diskontinuierlicher Zuflüsse	[GE, VE]

Indexvariablen (Kleinbuchstaben):

t	Simulationsperiode	$t \in \mathbb{Z}_+$
t_0	Startzeitpunkt der Simulation	
u	Nutzungsphase	$u \in \mathbb{Z}_+$
a	Alterskohorte	$n \in \mathbb{Z}_+$
T	Simulationshorizont	[ZE]
Δt	Rechenschrittweite des Simulationslaufes	[ZE]
i	Nutzungsintensität	$i \in \{m, f\}$



Hilfsvariablen und Konstanten (Klein- und griechische Buchstaben):

m_t	Menge der Holzprodukte in Simulationsperiode t	[GE, VE]
τ_u	charakteristische Lebensdauer von Produkten der Nutzungsphase u	[a]
ρ_u	Recyclingquote von Produkten der Nutzungsphase u	[%]
k	Formparameter der Weibull-Verteilung	
ξ_u	Anteil Recyclingmaterial im Produkt	[%]
θ_t	Marktanteil von Holzprodukten im Verhältnis zu Nicht-Holz-Produkten zum Zeitpunkt t	[%]
ω	Aussonderungsrate	[%]
σ	Standardabweichung der Lognormalverteilung	
μ	Erwartungswert der Lognormalverteilung	

Kennzahlen (Zielgrößen):

t_ω	Rückführungszeitpunkt, an dem $\omega\%$ der eingegangenen Rohstoffe wieder entsorgt sind	[ZE]
ψ_t	Verhältnis von ausgehender zu eingehender Rohstoffmenge	[%]
$t_{\psi max}$	Zeitpunkt, an dem das Verhältnis von ausgehender zu eingehender Rohstoffmenge im Vergleich zum Referenzszenario maximal ist	[ZE]
$P(t_\omega)$	Menge der im Nutzungspool befindlichen Holzprodukte zum Zeitpunkt t_ω	[GE, VE]
$B(t_\omega)$	Menge des im Nutzungspool befindlichen Kohlenstoffes zum Zeitpunkt t_ω	[GE]



1 Einführung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Der Klimawandel und die Verknappung fossiler Ressourcen stellen für die industrielle Wirtschaft große Herausforderungen dar. Zur Sicherung des Rohstoff- und Energiebedarfes haben nachwachsende Rohstoffe in den letzten Jahren stetig an Bedeutung gewonnen. Dabei lag der bisherige Fokus in Deutschland bedingt durch staatliche Fördermaßnahmen überwiegend auf der Ausweitung der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Aber auch für die stoffliche Nutzung von Biomasse wird ein erhebliches Marktwachstum erwartet (Arnold u. a. 2009). Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit land- und forstwirtschaftlicher Nutzflächen ist die Menge nachhaltig angebauter und geernteter Biomasse ebenfalls limitiert. Daraus ergeben sich Konkurrenzen zwischen der Nahrungs- und Futtermittelproduktion sowie zwischen der energetischen und stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Unter den nachwachsenden Rohstoffen nimmt Holz durch seine natürliche Festigkeit und Langlebigkeit eine Sonderrolle ein. Es kann in heimischer Forstwirtschaft in großen Mengen nachhaltig produziert werden und ist ein vielseitig einsetzbarer Rohstoff. Aber auch bei der Nutzung von Holz konkurrieren die stofflichen Einsatzmöglichkeiten als Roh- und Baustoff mit der energetischen Nutzung als Brennstoff. So rückt eine möglichst effiziente Ausnutzung des Rohstoffes in den Fokus des wissenschaftlichen Interesses.

Als möglicher Lösungsansatz zur Steigerung der Rohstoffeffizienz gilt die sogenannte *Kaskadennutzung*. Grundidee des Kaskadennutzungskonzeptes ist die (mehrfache) Hintereinanderschaltung stofflicher Nutzungen und der abschließenden energetischen Verwertung von Biomasse. Eine direkte energetische Verwertung, die mit einer unwiederbringlichen Zerstörung des Rohstoffes einhergeht, soll auf diese Weise zugunsten eines vorangehenden stofflichen Einsatzes verhindert werden. Bringezu u. a. (2008) fassen in ihrer Studie zu Nutzungskonkurrenzen bei Biomasse zusammen, dass derzeit die Konkurrenzsituation im Bereich Holz nicht genau eingeschätzt werden kann. Diese Aussage begründen sie damit, dass durch eine mehrfache stoffliche Nutzung von Holz die Rohstoffkonkurrenz entschärft werden könnte, allerdings



können sie den Umfang und die Relevanz solcher Maßnahmen nicht klar einschätzen. Arnold u. a. (2009) befassen sich in einer Studie umfassend mit dem Prinzip der Kaskadennutzung als Grundlage zur Optimierung der Biomassenutzung. Sie sehen die Kaskadennutzung als grundsätzlich geeignet an, die Rohstoffeffizienz zu erhöhen und weisen weitergehende Anforderungen an eine nachhaltige Gestaltung von Biomasse-Kaskaden aus. Die Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme werden von Gärtner u. a. (2013) vergleichend untersucht. Sie stellen fest, dass in Deutschland zunächst kein prinzipieller Konflikt zwischen stofflicher und energetischer Holznutzung vorliegt, da sämtliches Holz früher oder später energetisch verwertet wird. Allerdings ergibt sich aus der Erhöhung der stofflichen Holznutzung ein Übergangseffekt, der die Menge des energetisch nutzbaren Holzes vorübergehend verringert. Um die Wirkung der Anwendung des Kaskadennutzungskonzeptes quantitativ abschätzen zu können, ist eine detaillierte und langfristige Darstellung und Modellierung der Rohstoffdynamik sowie der für diese Übergangsphase erwähnten Verzögerungseffekte notwendig. Die in diesem Zusammenhang für eine Einschätzung der zukünftigen Rohstoffverfügbarkeit bedeutsame Frage lautet, wie lange eine bestimmte Inputmenge Holz in einem komplexen System aus mehrfachen Nutzungen und unterschiedlichen Produktlebensdauern in der stofflichen Verwendung verbleibt, bevor es einer thermischen Verwertung zugeführt werden kann.

1.2 Zielsetzung und Lösungsweg

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, die die langfristigen Effekte einer verstärkten Holznutzung in Form einer Kaskadennutzung quantifizierbar macht. Die hierfür notwendige dynamische Methode zur Quantifizierung von Rohstoff-Fluss- und Speichersystemen berücksichtigt im Rahmen einer kaskadierenden Holznutzung die Hintereinanderschaltung von Nutzungsphasen. Erstmalig sollen die für Produktlebensdauern typischen nichtlinearen Lebensdauerverteilungen in einem Modell berücksichtigt werden, womit die vorgestellte Methode von den in der Kohlenstoffbilanzierung verwendeten Modellen mit konstanten Zuflüssen (vgl. Pingoud und Wagner 2006) abweicht. Mithilfe der vorgestellten Methode kann das Systemverhalten bei Änderung von Schlüsselfaktoren wie Nachfrage oder Produktlebensdauern untersucht werden. Verschiedene Szenarien werden so miteinander vergleichbar gemacht. Aus den Ergebnissen der Szenarienanalysen wiederum können durch eine Anwendung der vorgestellten Methode auf konkrete Marktparameter Rückschlüsse auf die Rohstoffversorgung in Supply Chains von Holz- und Holzprodukten getroffen werden.