

TEXTE

53/2017

BIOMASSEKASKADEN Mehr Ressourceneffizienz durch Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis

**Anlage: Gesamtökologische Betrachtung ausgewählter
Biomassekaskaden**

TEXTE 53/2017

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3713 44 100
UBA-FB 002490/ANL

BIOMASSEKASKADEN

Mehr Ressourceneffizienz durch Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis

Anlage Gesamtökologische Betrachtung ausgewählter Biomassekaskaden

von

Horst Fehrenbach, Susanne Köppen, Benedikt Kauertz, Frank Wellenreuther
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH

Frank Baur, Bernhard Wern
IZES gGmbH, Saarbrücken

Elke Breitmayer
nova-Institut GmbH, Hürth

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

Februar 2017

Redaktion:

Fachgebiet I 1.1 Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und -szenarien,
Ressourcenschonung
Almut Jering

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Juni 2017

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3713 44 100 finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	12
1 Hintergrund und Zielsetzung	13
2 Übersicht über die Arbeitsinhalte.....	14
2.1 Vorliegende Erkenntnisse bereits erstellter Ökobilanzen zur Kaskadennutzung.....	14
2.2 Fragestellungen dieses Projekts	15
2.2.1 Bewertung auf der Ebene des Gesamtstoffstroms	15
2.2.2 Vorgehensweise bei der Bestimmung der substituierten Alternativprodukte bzw. -prozesse	16
2.2.3 Analyse des Zeitfaktors bei der Speicherung von C in Produkten gegenüber einer Verbrennung der Biomasse.....	16
2.2.4 Sozio-ökonomische Betrachtung der Kaskadennutzung.....	17
3 Methode der Ökobilanz.....	18
3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise.....	18
3.1.1 Definition der Fragestellungen und Systembedingungen.....	18
3.1.2 Vorgehen bei der Wirkungsabschätzung	19
3.1.3 Interpretation der Ergebnisse	19
3.2 Einbeziehung der zeitlichen Dimension.....	21
4 Auswahl der Kaskadenbeispiele	23
5 Holzkaskaden.....	25
5.1 Beschreibung des Modells zur Holzkaskade	25
5.1.1 Grundlagen des Stoffstrom-Modells.....	25
5.1.1.1 Mengengerüst	25
5.1.1.2 Umsetzung in ein Umberto-Stoffstrommodell	26
5.1.1.3 Vorgehensweise zur Sicherstellung der Nutzengleichheit	27
5.1.2 Betrachtete Optionen (Szenarien)	29
5.1.3 Prozesse der Gut- und Lastschriften	33
5.1.4 Weitere Datengrundlagen.....	34
5.2 Ergebnisse der Ökobilanz zu Holzkaskaden.....	35
5.2.1 Wirkungsabschätzung	35
5.2.1.1 Ressourcenbeanspruchung	36
5.2.1.2 Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential)	38
5.2.1.3 Versauerungspotenzial	40
5.2.1.4 Eutrophierungspotenzial	40

5.2.1.5	Stratosphärischer Ozonabbau	42
5.2.1.6	Photosmog	42
5.2.1.7	Humantoxizität	43
5.2.1.8	Naturrauminanspruchnahme	45
5.2.2	Normierung und Rangbildung	45
5.2.3	Kaskadenbezogene Bewertung	48
5.3	Fazit.....	48
6	Papierkaskaden.....	49
6.1	Beschreibung der Szenarien	49
6.1.1	Vorgehen bei der Modellierung	49
6.1.2	Annahmen und Systemgrenzen	50
6.2	Ergebnisse der Ökobilanz zu Papierkaskaden.....	51
6.2.1	Wirkungsabschätzung	51
6.2.1.1	Ressourcenbeanspruchung	52
6.2.1.2	Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential)	52
6.2.1.3	Versauerungspotenzial	52
6.2.1.4	Eutrophierungspotenzial	55
6.2.1.5	Stratosphärischer Ozonabbau	55
6.2.1.6	Photo-Smog	55
6.2.1.7	Humantoxizität	55
6.2.1.8	Naturrauminanspruchnahme	57
6.2.2	Normierung und Rangbildung	57
6.2.3	Kaskadenbezogene Bewertung	59
6.3	Fazit.....	59
7	Textilkaskaden	61
7.1	Beschreibung der Szenarien zur Textilkaskade.....	61
7.1.1	Vorgehen bei der Modellierung	61
7.1.2	Annahmen und Systemgrenzen	62
7.2	Ergebnisse der Ökobilanz zu Textilkaskaden	63
7.2.1	Wirkungsabschätzung	63
7.2.2	Normierung und Rangbildung	66
7.2.3	Kaskadenbezogene Bewertung	69
7.3	Fazit.....	69
8	Kaskade zu Biokunststoffen.....	70
8.1	Beschreibung der Szenarien zur Kaskade von Biokunststoffen.....	70

8.1.1	Vorgehen bei der Modellierung	70
8.2	Ergebnisse der Ökobilanz zur Kaskade von Biokunststoffen	72
8.2.1	Wirkungsabschätzung	72
8.2.1.1	Ressourcenbeanspruchung	74
8.2.1.2	Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential)	76
8.2.1.3	Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial und Stratosphärischer Ozonabbau	76
8.2.1.4	Photosmog	78
8.2.1.5	Humantoxizität	79
8.2.1.6	Naturrauminanspruchnahme	80
8.2.2	Normierung und Rangbildung	80
8.2.3	Kaskadenbezogene Bewertung	83
8.3	Fazit.....	83
9	Ergebnisse der sozio-ökonomischen Betrachtung	84
9.1	Soziale Aspekte der Kaskadennutzung	84
9.1.1	Methodische Ansätze und Auswahl von Kriterien	84
9.1.2	Erkenntnisse mit Blick auf die Holzkaskaden	85
9.1.2.1	Räumliche Dimension	85
9.1.2.2	Stakeholderkreis	86
9.1.2.3	Zusammenfassung	88
9.1.3	Erkenntnisse mit Blick auf die Papierkaskaden.....	88
9.1.3.1	Räumliche Dimension	88
9.1.3.2	Stakeholderkreis	88
9.1.3.3	Zusammenfassung	89
9.1.4	Erkenntnisse mit Blick auf die Textilkaskaden	89
9.1.4.1	Räumliche Dimension	89
9.1.4.2	Stakeholderkreis	89
9.1.4.3	Zusammenfassung	91
9.1.5	Erkenntnisse mit Blick auf die Biokunststoffkaskaden.....	91
9.1.5.1	Räumliche Dimension	91
9.1.5.2	Stakeholderkreis	92
9.1.5.3	Zusammenfassung	93
9.2	Ökonomische Aspekte der Kaskadennutzung	94
9.2.1	Vorgehensweise	94
9.2.2	Ergebnisse	94
9.2.3	Bewertung.....	96

9.3	Betriebswirtschaftliche Aspekte	97
9.3.1	Betriebswirtschaftliche Hemmnisfaktoren	97
9.3.2	Faktoren mit potenziell positiven Effekten	98
10	Zusammenfassende Gesamtbewertung.....	100
11	Quellenverzeichnis.....	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Vorgehen bei „klassischer“ Produkt-Ökobilanz für eine Nutzungskaskade; die Systemgrenze der Kaskade bildet das Rechteck, alle Prozesse außerhalb des Rechtecks stellen in der Summe das nutzengleiche Referenzsystem dar.....	15
Abbildung 2	Systemgrenze Ökobilanz für den gesamten Stoffstrom Holz.....	15
Abbildung 3	Holzstoffstrom für Holz in Europa (Mantau 2014)	26
Abbildung 4	Umsetzung des Holzstoffstrom in ein Umberto-Modell	27
Abbildung 5	Ausschnitt aus dem Holzstoffstrom-Modell mit der Ansatzpunkt zu erhöhter Kaskadennutzung	30
Abbildung 6	Ausschnitt aus dem Holzstoffstrom-Modell: links das Basisszenario mit der direkten Verbrennung, rechts die Umlenkung in die Synthese.....	31
Abbildung 7	Maximalszenarien nach zwei unterschiedlichen Zielen der Kaskadennutzung: Ziel A: Rückzug aus der energetischen Biomassenutzung durch vollständige Unterlassung und Ziel B: durch komplette Umlenkung von Primärholz in die stoffliche Nutzung.	32
Abbildung 8	Ergebnis zum nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch (KEA _{fossil+nuklear}) für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4.....	37
Abbildung 9	Ergebnis zum nicht erneuerbaren Rohstoffaufwand (KRA _{abiotisch}) für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4	38
Abbildung 10	Ergebnis zu Treibhausmissionen (GWP100) für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft in Deutschland im Basisszenario (links) und im Vergleich mit den Optionen 1 bis 4	39
Abbildung 11	Ergebnis zu Treibhausmissionen (GWP100) für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4	39
Abbildung 12	Ergebnis zu Versauerungspotenzial für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft in Deutschland im Basisszenario	40
Abbildung 13	Ergebnis zum Versauerungspotenzial für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4	41
Abbildung 14	Ergebnis zum Eutrophierungspotenzial für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4	41
Abbildung 15	Ergebnis zum stratosphärischen Ozonabbau für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4	42
Abbildung 16	Ergebnis zum Photosmog für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4.....	42

Abbildung 17	Ergebnis zum Humantoxizitätsindikator „Krebsrisikopotenzial“ für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4	43
Abbildung 18	Ergebnis zum Humantoxizitätsindikator „Feinstaub (PM2.5)“ für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft in Deutschland im Basisszenario im Vergleich mit Option 4.....	44
Abbildung 19	Ergebnis zum Humantoxizitätsindikator „Feinstaub (PM2.5)“ für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4.....	44
Abbildung 20	Unterschiede der Optionen 1 bis 4 gegenüber der Basis normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – negative Werte bedeutet Vorteil für die Option.....	47
Abbildung 21	Unterschiede der Optionen 1 bis 3 gegenüber der Basis normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – negative Werte bedeutet Vorteil für die Option.....	47
Abbildung 22	Modulstruktur für die Ökobilanzmodellierung der Papierkaskaden.....	49
Abbildung 23	Schematisch abgeleitete Anteile an Frischzellstoff in der Gesamtheit der PPK-Produkte in Abhängigkeit der Anzahl an Recyclingstufen; Annahme: einheitlicher Substitutionsfaktor von 0,9 über alle Stufen; skaliert auf einen pro-Kopf-Verbrauch von 250 kg Papier.	50
Abbildung 24	Ergebnisse für die Papierkaskade zu nicht erneuerbaren Ressourcen (KEA _{fossil+nuklear}) (oben), nicht erneuerbarer KRA (Mitte) und erneuerbarer KRA (unten)	53
Abbildung 25	Ergebnisse für die Papierkaskade zum Treibhausgasemissionen (oben), Versauerungspotenzial (Mitte) und Eutrophierungspotenzial (unten)	54
Abbildung 26	Ergebnisse für die Papierkaskade zum stratosphärischen Ozonabbau (oben), Photo-Smog (Mitte) und zur Feinstaubbelastung (unten).....	56
Abbildung 27	Ergebnis zur Naturrauminanspruchnahme für die Papierkaskade.....	57
Abbildung 28	Veränderung gegenüber dem Status quo durch zusätzliche Kaskadennutzung der nicht recycelten 65 kg primärem Papier pro Kopf; normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – negative Werte bedeutet Entlastung der Umwelt gegenüber Status quo.	59
Abbildung 29	Modulstruktur für die Ökobilanzmodellierung der Textilien-Kaskaden.....	61
Abbildung 30	Ergebnis zu Ressourcen (links oben: KEA _{fossil+nuklear} , rechts oben: KRA _{abiotisch} , links unten: Wasser, rechts unten KRA _{bio}) für die Textilkaskade	65
Abbildung 31	Ergebnis zu den Treibhausgasemissionen (links oben), Versauerung (rechts oben), terr. Eutrophierung (links unten) und Photo-Smog (rechts unten) für die Textilkaskade	65
Abbildung 32	Ergebnis zum Flächenverbrauch für die Textilkaskade	66

Abbildung 33	Nettoergebnisse der Optionen der Textilkaskade normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – unten ohne den Ressourcenindikator Frischwasser.	68
Abbildung 34	Übersicht über das Bilanzierungsmodell	71
Abbildung 35	Umsetzung in ein Umberto-Modell.....	72
Abbildung 36	Ergebnis zum nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch ($KEA_{\text{fossil+nuklear}}$) für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung; FU: funktionale Einheit = 1 Tonne Zuckerrohr als Rohstoffbasis	75
Abbildung 37	Ergebnis zum nicht erneuerbaren Rohstoffaufwand ($KRA_{\text{abiotisch}}$) für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung; FU: funktionale Einheit = 1 Tonne Zuckerrohr als Rohstoffbasis	75
Abbildung 38	Ergebnis zu Treibhausemissionen (GWP100) für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung.....	76
Abbildung 39	Ergebnis zum Versauerungspotenzial für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung	77
Abbildung 40	Ergebnis zum Eutrophierungspotenzial für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung	77
Abbildung 41	Ergebnis zum stratosphärischen Ozonabbau für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung.....	78
Abbildung 42	Ergebnis zum Photosmog für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung	78
Abbildung 43	Ergebnis zum Humantoxizitätsindikator „Krebsrisikopotenzial“ für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung.....	79
Abbildung 44	Ergebnis zum Humantoxizitätsindikator „Feinstaub (PM2.5)“ für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung.....	80
Abbildung 45	Nettoergebnisse der Optionen der Biokunststoff-Kaskade normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW (oben) und Differenz der Kaskaden-Optionen gegenüber der Option „Benzin“ (unten).....	82
Abbildung 46:	Außenhandelsaldo der Bundesrepublik Deutschland mit Holz und Produkten auf der Basis Holz nach Warengruppen der Jahre 2010 bis 2012 in 1.000 m ³ (Quelle: Seintsch und Weimar 2013)	86
Abbildung 47	Produktionskapazitäten von Biokunststoffen nach Weltregionen 2013 und 2018; Quelle: Daten (EuBP 2014), Grafik ifeu	92
Abbildung 48	Preisentwicklungen an den Rohstoffmärkten für Holz, Ethanol, Baumwolle und Erdöl.....	98
Abbildung 49:	Übersicht über die Ökobilanzergebnisse dargestellt als Bandbreite der verschiedenen Kaskadenoptionen im Vergleich zur Ist-Situation	

(Holz) bzw. zur nur einfachen Kaskade (Papier, Textil, Kunststoff); die Prozentwerte geben die Veränderung der Gesamtumweltlast für den Durchschnitt in Deutschland an, bei vollständiger Umsetzung der Kaskaden.....101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Betrachtete Wirkungskategorien und dazu zugeordnete Sachbilanzgrößen.....	19
Tabelle 2:	Normierungsgrundlage für die betrachteten Wirkungskategorien und Rangbildung	20
Tabelle 3	Übersicht der in AP1 und 2 herausgearbeitete Kaskadennutzungen [rote Schrift: für Ökobilanz ausgewählte Kaskaden]	23
Tabelle 4	Für die Ökobilanz ausgewählte Kaskaden und Beschreibung des jeweiligen Umfangs	24
Tabelle 5	Basisdaten zu Waldholz für das Modell zum Holzstoffstrom (nach Mantau 2012)	25
Tabelle 6	Basisdaten zum Holzstoffstrom in den Segmenten Schnittholz und Holzwerkstoffe (nach Albrecht et al. 2008)	25
Tabelle 7	Output an Nutzen des Gesamtstoffstroms Holzwirtschaft (Basis)	28
Tabelle 8	Input an Holzrohmaterial in die Spanplattenfertigung	30
Tabelle 9	Veränderung der Outputs (Nutzen) des Gesamtstoffstroms gegenüber der Basis	33
Tabelle 10:	Ergebnis der Wirkungsabschätzung für die Holzkaskade im Basisszenario und in den Optionen 1 bis 4	35
Tabelle 11:	Flächeninanspruchnahme – Werte noch an Realflächen anzugleichen.....	45
Tabelle 12:	Ergebnis der Ökobilanz normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW	46
Tabelle 13	Ergebnis der Wirkungsabschätzung für die Papierkaskade.....	51
Tabelle 14:	Ergebnis der Ökobilanz für die Papierkaskade normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW und skaliert auf 250 kg grafisches Papier, dem Verbrauch pro Kopf und Jahr.	58
Tabelle 15	Ergebnis der Wirkungsabschätzung für die Textilkaskade	64
Tabelle 16:	Ergebnis der Ökobilanz für die Textilkaskade normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW, gerechnet für 80 T-Shirts	67
Tabelle 17	Übersicht über die Substitutionspaare in der Bilanzierung.....	71
Tabelle 18:	Ergebnis der Wirkungsabschätzung für die Kaskade von Biokunststoffen.....	73
Tabelle 19:	Kondensation der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Kaskade von Biokunststoffen.	81
Tabelle 20:	Kategorien im Rahmen des S-LCA-Ansatzes der UNEP/SETAC (2009).....	84

1 Hintergrund und Zielsetzung

Im Projekt „Mehr Ressourceneffizienz durch die stoffliche Biomassenutzung in Kaskaden – von der Theorie zur Praxis“ (FKZ 3713 44 100) wird das Prinzip der Kaskadennutzung, Biomasse und daraus hergestellte Produkte in zeitlich aufeinander folgenden Schritten so lange, so häufig und so effizient wie möglich stofflich zu nutzen und erst am Ende des Produktlebenszyklus energetisch zu verwerten, systematisch untersucht. Mit wissenschaftlichen Grundlagen, Maßnahmen und Instrumenten sowie einer gezielten Strategie soll die Bundesregierung und insbesondere das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) dabei unterstützt werden, das Potenzial der Kaskadennutzung von Biomasse zur Steigerung der Ressourceneffizienz besser erschließen zu können.

Das Arbeitspaket 4 mit dem Titel „Gesamtökologische Betrachtung ausgewählter Biomassekaskaden“ verfolgt das Ziel, die tatsächlich erreichbare Ressourceneffizienz ausgewählter Nutzungskaskaden anhand von Ökobilanzen zu analysieren. Darüber hinaus sollen weitere Nachhaltigkeitsaspekte wie soziale Kriterien und volks- und betriebswirtschaftliche Effekte mitbetrachtet werden.

Unter Ressourceneffizienz ist in diesem Zusammenhang zum einen die Minimierung negativer Auswirkungen auf möglichst alle Bereiche der Nachhaltigkeit zu verstehen. Zum anderen liegt der Fokus auf einem minimierten Bedarf an natürlichen Ressourcen.

Der hier vorliegende Teilbericht fasst die Herangehensweise und die Ergebnisse der Ökobilanzen sowie der sozialen und ökonomischen Betrachtungen für die Auswahl an betrachteten Biomassekaskaden zusammen. Der Bericht gliedert sich folglich in eine Übersicht über die Arbeitsinhalte (Kapitel 2), einen methodischen Teil zu den Ökobilanzen (Kapitel 3), die Auswahl der Kaskadenbeispiele (Kapitel 4), die Ökobilanzergebnisse für die Holzkaskaden (Kapitel 5), Papierkaskaden (Kapitel 6), Textilkaskaden (Kapitel 7), Biopolymer-Kaskaden (Kapitel 8) sowie die sozioökonomischen Betrachtungen (Kapitel 9). Eine Gesamtzusammenfassung findet sich in Kapitel 10.

2 Übersicht über die Arbeitsinhalte

Biomassekaskaden sind komplexe Lebenswegsysteme, genauer gesagt stellen sie Kombinationen von mehreren Lebenswegsystemen dar. Nicht weniger komplex ist der Zielanspruch, die tatsächlich erreichbare Ressourceneffizienz von Biomassekaskaden zu analysieren. Aus diesem Grund sei zu Anfang in Form einer Übersicht zusammengestellt, welche inhaltlichen Komponenten und Aspekte in diesem Arbeitspaket enthalten sind. Zuvor wird kurz beschrieben, welche Vorarbeiten bereits vorliegen, auf die dieses Projekt zurückgreifen kann.

2.1 Vorliegende Erkenntnisse bereits erstellter Ökobilanzen zur Kaskadennutzung

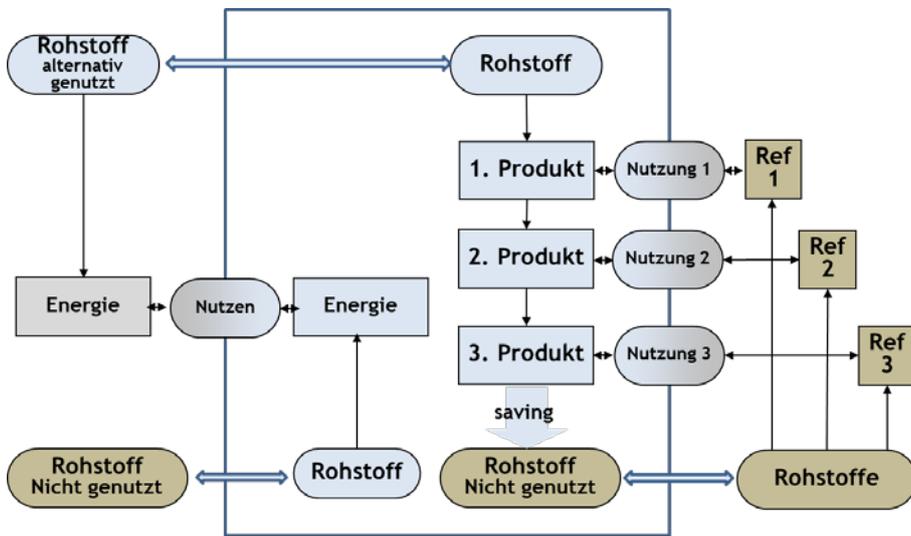
Es liegen verschiedene Ökobilanzarbeiten vor, die die Kaskadennutzung von Biomasse (konkret von Holz) bewertet haben (Gärtner et al. 2013, Rettenmaier et al. 2014). Es ist daher Ziel dieser Arbeit, über bisherige Erkenntnisse hinausgehende Fragen zu beantworten. Die wesentlichen Ergebnisse der genannten Studien zur Ökobilanz der Holzkaskade lassen sich hier wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Jegliche stoffliche Holznutzung weist verglichen mit der direkten energetischen Nutzung deutlich größere bis ähnliche Umweltvorteile auf – unabhängig von der Länge der Kaskade. (Rettenmaier et al. 2014 S. 52)
- ▶ Eine Kaskadennutzung von Holz führt in vielen Fällen zu Umweltvorteilen gegenüber konventionellen Produkten. Für das Gesamtergebnis ist v.a. entscheidend, welche konventionellen Produkte ersetzt werden. (Rettenmaier et al. 2014 S. 52)
- ▶ Der Nachteil gegenüber ersetzten nicht biogenen Produkten besteht in der Naturrauminanspruchnahme, sie kann durch mehrfache Kaskadennutzung verringert werden. (Rettenmaier et al. 2014 S. 55)
- ▶ Große Umweltvorteile, die nur in der Kaskadennutzung entstehen können, ergeben sich hier durch eine möglichst lange Nutzungsdauer und Wiederverwendung des Holzes sowie hochwertige Nutzung von Altholz in Form von Vollholzprodukten. Allerdings entsteht durch weitere Recycling-schritte in Form von Spanplatten unter den gegebenen Bedingungen kein zusätzlicher Vorteil verglichen mit der Herstellung von Spanplatten aus Frischholz. Da derzeit sehr große Mengen sowohl von Altholz als auch von Frischholz mit vergleichbaren Umweltwirkungen energetisch genutzt werden, ist es aus Umweltschutzsicht unerheblich, ob Spanplatten oder andere Holzwerkstoffe aus Frischholz oder Altholz hergestellt werden (Gärtner et al. 2013; S. 71)

Die bisherigen Studien arbeiteten deutlich somit heraus, wie sich die Ökobilanzergebnisse einer definierten Kaskadenkette gegenüber der Herstellung der im Einzelnen substituierten Produkte (nicht aus Holz, nicht in Kaskade) verhalten. Die betrachteten Systeme sind definiert anhand einer funktionalen Einheit, die sich aus der Summe der einzelnen Produkte der Kaskadenkette zusammensetzt. Abbildung 1 zeigt die Systemgrenzen in schematischer Form.

Es liegen weitere relevante Ökobilanzen für den Holzsektor vor, die für dieses Projekt ebenfalls wichtige Datengrundlagen bieten können (Albrecht et al. 2008, Rüter und Diederichs 2012). Diese Arbeiten haben sich jedoch nicht mit der Kaskadennutzung befasst.

Abbildung 1 Vorgehen bei „klassischer“ Produkt-Ökobilanz für eine Nutzungskaskade; die Systemgrenze der Kaskade bildet das Rechteck, alle Prozesse außerhalb des Rechtecks stellen in der Summe das nutzengleiche Referenzsystem dar.



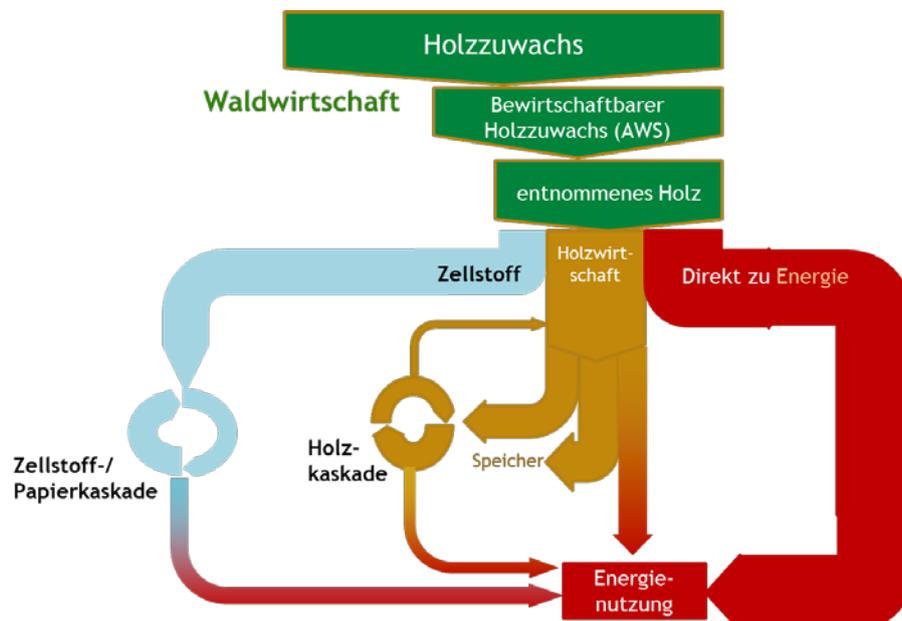
2.2 Fragestellungen dieses Projekts

2.2.1 Bewertung auf der Ebene des Gesamtstoffstroms

Das übergeordnete Ziel dieses Projekts ist es, mögliche ökologische Vorteile von Biomassekaskaden im Gesamtzusammenhang mit Blick auf ein Konzept und der Identifikation von Eckpunkten für eine Strategie herauszuarbeiten. Die bisherigen Erkenntnisse sollen nun genutzt werden, um für das Beispiel Holz die Effekte von Kaskaden auf der Ebene des gesamten Stoffstroms Holz analysieren zu können.

Abbildung 2 zeigt in starker Vereinfachung, welchen Systemumfang eine Stoffstrom-Ökobilanz im Holzsektor umfasst. Der Sinn dieses Ansatzes besteht darin, ausgehend von einem Status quo Maßnahmen zur verstärkten Kaskadennutzung als Veränderung der Gesamtbilanz des Sektors bewerten zu können.

Abbildung 2 Systemgrenze Ökobilanz für den gesamten Stoffstrom Holz.



2.2.2 Vorgehensweise bei der Bestimmung der substituierten Alternativprodukte bzw. -prozesse

Die oben genannten Studien stellen deutlich heraus, dass die Festlegung welche Produkte ersetzt werden, würde man die Kaskadennutzung nicht durchführen, von entscheidendem Einfluss auf das Ergebnis ist. Gärtner et al. (2013) zeigen, dass z.B. Regalböden aus Spanplatten bei Substitution von Stahlblechregalen sehr gut abschneiden. Werden jedoch Gipskartonplatten ersetzt, ist die Spanplatte im Nachteil. Die Auswahl des substituierten Alternativprodukts wird an zwei Maßstäben abgeleitet:

- ▶ Funktionalität: das Alternativprodukt muss die äquivalenten Funktionen erfüllen; ggf. müssen Substitutionsfaktoren bestimmt werden, um Ungleichheiten auszugleichen (Materialmenge z.B. bei Schichtdicken, zeitliche Faktoren bei unterschiedlicher Materiallebensdauer).
- ▶ Marktkompatibilität: ersetzt werden kann ein bestimmtes Alternativprodukt nur, wenn es die gleichen Marktsegmente anspricht.

Wenn eine Produktart den entsprechenden Markt bereits weitgehend dominiert (z.B. Vollholzmöbel in vielen Möbelsegmenten), wird die Substitutionsfrage eine zentrale Fragestellung in der Zieldefinition der Ökobilanz. Für Substitution fehlt in diesem Fall das Potenzial. Die Frage wäre dann eher in die Richtung zu stellen: was wäre, wenn man diese Produkte nicht herstellen würde (im Bsp.: Vollmöbel: stünde das Holz nicht zur Verfügung, müsste man Möbel dann aus anderem Material herstellen, wie Kunststoff, Metall). Das Ergebnis einer solchen Betrachtung entspräche dann einer Analyse des Status quo. Es würde keine Antwort geben auf die Frage, welche Entlastung durch *verstärkte* Kaskadennutzung erzielbar wäre.

Neben der Frage, welche Produkte bzw. Prozesse durch die Kaskadennutzung substituiert werden können (und in Form von Referenzszenarien verglichen werden sollen), sollen gleichfalls folgende Aspekte mitbetrachtet werden:

- ▶ Vergleich zur Direktnutzung von Biomasse als Energieträger
- ▶ Die integrierte Nutzung von Biomasse, z. B. im Rahmen von Bioraffinerien
- ▶ Die Vermeidung und Reduzierung des Bedarfs (Suffizienz)

2.2.3 Analyse des Zeitfaktors bei der Speicherung von C in Produkten gegenüber einer Verbrennung der Biomasse

Holz, welches zu langlebigen Produkten verarbeitet wird, stellt einen signifikanten Kohlenstoffspeicher dar. Die Speicherung bedeutet eine Verzögerung der Kohlenfreisetzung. Die Kaskadennutzung kann eine zusätzliche Verzögerung der Freisetzung zur Folge haben.

Die Berücksichtigung dieser temporären Speicherfunktion in Ökobilanzen ist jedoch keinesfalls trivial. Es bedarf dazu Modellüberlegungen und Festlegungen von Konventionen. Eine solche Konvention kann z.B. in der Diskontierung der in die Zukunft verschobenen Emissionen analog zur wirtschaftlichen Bewertung künftiger Gewinne liegen. Diesem Ansatz liegt die Prämisse zu Grunde, dass die Freisetzung von Klimagasen bezüglich ihrer Auswirkung auf Klimaveränderungen desto unwichtiger, je weiter sie in Zukunft liegen. Die entscheidende Frage ist hierbei, welche Diskontierungsrate für angemessen ansetzt.

Weitere Aspekte die eine Rolle spielen (können) sind:

- ▶ Die zu erwartete Lebensdauer der Produkte
- ▶ Die Rückwirkung der Kaskadennutzung auf den im Wald gespeicherten Kohlenstoff
- ▶ Die Überlegung, ob in der zukünftigen Stoff- und Energiewirtschaft überhaupt noch Holz verbrannt werden wird, oder ob feste Biomasse sogar eine Funktion als dauerhafte Speicher zugewiesen wird.

2.2.4 Sozio-ökonomische Betrachtung der Kaskadennutzung

Die soziale Komponente der Nachhaltigkeit wird mit Hilfe eines Satzes an Kriterien aus verschiedenen für die Fragestellung relevanten Unterkategorien wie Arbeitsplätze, Gesundheit, Sicherheit oder andere analysiert, auch hier für die gesamten Lebenswege der einzelnen Kaskaden (siehe Abschnitt 9.1). Der ökonomische Bereich wird durch eine volks- und eine betriebswirtschaftliche Analyse abgedeckt (siehe Abschnitte 9.2 und 9.3), die einerseits die Wirtschaftlichkeitsaspekte einer Nutzungskaskade gegenüber den jeweiligen Alternativen darstellen, andererseits den volkswirtschaftlichen Nutzen einer Kaskade auf qualitative Weise anhand einer Literaturstudie betrachten.

3 Methode der Ökobilanz

3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Die gesamtökologische Betrachtung erfolgt methodisch in enger Anlehnung an DIN ISO 14040/44. Im einzigen Unterschied zur Norm erfolgt hier keine externe Kritische Prüfung. Die Ergebnisse sollen eine richtungssichere Übersicht über alle als relevant identifizierten Umweltsachverhalte der betrachteten Biomassekaskaden geben. Hierzu werden für die einzelnen Biomasse- bzw. Produktarten Szenarien vollständiger Lebenswege modelliert.

3.1.1 Definition der Fragestellungen und Systembedingungen

In Abschnitt 2.2 wurden bereits die Fragestellungen, um die es im Kern der ökobilanziellen Bewertung im Rahmen dieses Projekts gehen soll, dargelegt. Dabei ging es u.a.

- ▶ darum, welcher **Systemansatz** für welche Art von Kaskade geeignet ist (z.B. Stoffstrom-Ökobilanz bei Holzkaskade, siehe Abschnitt 2.2.1),
- ▶ darum, wie die durch Kaskadennutzung **substituierbaren Alternativprodukte** und -prozesse festgelegt werden sollen (Orientierung am realen Marktgeschehen, siehe Abschnitt 2.2.2).
- ▶ um die Frage der **zeitlichen Dimension** bei langfristiger Speicherung von Kohlenstoff in Produkten gegenüber der zeitnahe Verbrennung (siehe Abschnitt 2.2.3 und 3.2)

Weitere wichtige Systemdefinitionen betreffen folgendes:

▶ **Wie umgehen mit importierter Biomasse?**

Im Projekt soll der Grundsatz gelten, sich wo immer möglich, auf heimische Biomasseproduktion zu beziehen; damit ist auch Kongruenz zu AP 2 des Projekts (*Analyse der Rohstoffbereitstellung*) hergestellt, in welchem der Bezugsraum primär Deutschland ist.

Hintergrund ist dazu der Hauptschwerpunkt des Projekts auf der Kaskadennutzung, nicht auf der Maximierung der Nutzung primärer Biomasse (was z.B. Importe als grundsätzlich erforderlich / wünschenswert machen könnte).

Bei Pfaden, die real auf Importbiomasse beruhen, weil dies der wirtschaftlichen Ausgangslage entspricht (z.B. PLA auf US-Mais-Basis – es wird keine Herstellung in Deutschland mit deutschen Mais oder Zuckerrübe geben, auch wenn es technisch möglich wäre), ist eine Sensitivitätsanalyse zu überlegen, die darstellt, was der Unterschied Import/nicht-Import am Ergebnis ausmachen würde. Bei Pfaden mit definitiv importierten Rohstoffen (z.B. Baumwolle) sollte die Untersuchung ergeben, welcher Einspareffekt mit der Kaskadennutzung möglich ist – es macht wenig Sinn, hier einen Pfad zu betrachten, der zwar eine Kaskade darstellt, aber keinerlei Substitutionswirkung beim ursprünglichen Biomasse-Rohstoff hat.

▶ **Soll der Fokus auf Rohstoffoptimierung oder Nutzungsoptimierung liegen?**

Im Projektteam wurde dazu beschlossen, nicht Rohstoffnutzungsszenarien im Vordergrund stehen (im Sinne: es steht folgendes Biomassepotenzial zur Verfügung, wie lässt sich das optimal Nutzen unter Einbeziehung der Kaskade), sondern **Nutzungsszenarien** mit einer Kaskadenstruktur, welche verglichen werden sollen mit Referenzszenarien ohne Kaskaden;

Der stoffstromtechnische Nutzungsablauf über Kaskaden steht im Kern der Betrachtung.

Die entwickelten Szenarien sollen durch Skalierung auf reale Mengen (Potenzial) die Effekte auf die Ressourcenschonung und die Nachhaltigkeit veranschaulichen.

Bei der Holzkaskade kann durch die Modellierung des Gesamtstoffstroms in Ansätzen auch auf eine mögliche Rohstoffoptimierung abgezielt werden. Bei den anderen auf Agrarbiomasse beruhenden Kaskaden macht eine Stoffstrombilanz dagegen wenig Sinn, da die agrarische Produktion insgesamt zu vielschichtig ist und die stoffliche Nutzung zu wenig Anteil an der Gesamterzeugung hat.

3.1.2 Vorgehen bei der Wirkungsabschätzung

Die Vielzahl der in der Sachbilanz bilanzierten Stoffparameter (z.B. CO₂, NO_x, Erdölverbrauch, toxische Stoffe etc.) werden in der Wirkungsabschätzung auf die wesentlichen negativen Umweltwirkungen aggregiert. Aus den Erfahrungen vergangener und aktueller Arbeiten ist die Liste in Tabelle 1 mit Wirkungskategorien als geeignete Basisauswahl anzusehen. Sie entspricht dem in Ökobilanzen für das Umweltbundesamt gängigen Standard. Wichtig ist, dass alle in relevanter Weise betroffenen Umweltschutzgüter bei der Bewertung berücksichtigt werden.

Tabelle 1: Betrachtete Wirkungskategorien und dazu zugeordnete Sachbilanzgrößen

Wirkungskategorie	Zuordnung der Sachbilanzergebnisse (Beispiele)
Ressourcenbeanspruchung	<i>fossile Energieträger als KEA</i> : Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle <i>Rohstoffinanspruchnahme als KRA</i> : biotisch und abiotisch
Treibhauseffekt	Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄), Lachgas (N ₂ O)
Versauerung	Schwefeldioxid (SO ₂), Stickstoffoxide (NO _x), Ammoniak (NH ₃), Chlorwasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff (HF), Schwefelwasserstoff (H ₂ S)
Eutrophierung	<i>terrestrisch</i> : Stickstoffoxide, Ammoniak <i>aquatisch</i> : N-Verbindungen, P-Verbindungen, CSB
Stratosphärischer Ozonabbau	Lachgas (N ₂ O), HFC-134a, CFC-11
Photo-Smog	NMVOG (gasförmige organische Verbindungen, außer Methan), Ethen, Methan, 1-Propanol
Humantoxizität:	<i>Krebsrisikopotenzial</i> : mit As, Cd, Cr-VI, Ni, Dioxine/Furane, Benzo(a)pyren <i>Feinstaub</i> : mit PM _{2,5} , Sekundärpartikel aus NO _x , NH ₃ , SO ₂ , NMVOG
Naturrauminanspruchnahme	Bewertung der in Anspruch genommenen Fläche nach Hemerobiestufe als Naturfernepotenzial (NFP)

3.1.3 Interpretation der Ergebnisse

Das wesentliche Ergebnis dieses Arbeitspakets ist die Herausstellung der Hauptverursacher von Umweltlasten innerhalb der Wertschöpfungskette. Eine typische Frage an die LCA von biotechnologischen Produkten ist beispielsweise, ob die Bereitstellung der Ausgangsstoffe, der Medien oder der Energie für die Prozesse den größten Anteil an den Umweltlasten hat. Dies gilt für den Labor- wie Industriemaßstab gleichermaßen.

Folgende Erwartungen stehen am Ende der ökobilanziellen Bewertung:

- ▶ Welche Parameter und Komponenten haben den größten Einfluss auf die Umweltlasten innerhalb der Wertschöpfungsketten?
- ▶ Welchen Anteil nimmt dabei die Bereitstellung der Ausgangsstoffe, welchen die Energie oder die Hilfsmittel für die Verarbeitungsprozesse?
- ▶ Sind die Biomassekaskaden den Substitutionsprodukten gegenüber im Vorteil? In welchen Punkten, unter welchen Prämissen, bei welchen Rohstoffen, welchen Produktlinien?
- ▶ Wie hoch sind die Potenziale möglicher Einsparung von Umweltlasten durch Kaskadennutzung

Um diese Fragen zu beantworten bedarf es einer Analyse der signifikanten Parameter. Erfahrungsgemäß stehen am Ende einer Sachbilanz und einer Wirkungsabschätzung häufig gegenläufige uneindeutige Ergebnisse (z. B. Vorteile der einen Option in Punkten A und C, Nachteile in Punkt B). Es bedarf somit einer Auswertung mit Blick auf die „Gewichtigkeit“ der Vor- oder Nachteile. Hierzu wird eine verbal-argumentative Bewertungsweise angesetzt, die vom Umweltbundesamt ursprünglich entwickelt wurde und deren Anwendung transparent einsetzbar ist (UBA 1999). Die zwei hierzu eingesetzten Grundelemente der Bewertung sind im Einklang mit der ISO 14044 (Absatz 4.4.3) lauten **Normierung** und **Rangbildung**. Die Vorgehensweise befindet sich derzeit im UBA in Revision. Ein erster Vorschlag zur Aktualisierung wurde Detzel et al. (2016) erarbeitet. Darüber hinaus wird das Umweltbundesamt dabei über ein laufendes Vorhaben (UBA o.J.)¹ dessen Ergebnisse bereits teilweise in diese Untersuchung eingeflossen sind.

In Tabelle 2 sind Normierungsgrundlagen für die betrachteten Wirkungskategorien zusammengestellt. Es handelt sich dabei um die sogenannten Einwohnerdurchschnittswerte (EDW), die pro-Kopf-Last ausdrücken, wobei die Gesamtemissionen in Deutschland durch die Einwohnerzahl geteilt wird.

Bei der Rangbildung wird die Frage gestellt, ob eine Wirkung eher mehr gravierend oder eher weniger gravierend anzusehen ist. Dazu werden den einzelnen Wirkungskategorien in „sehr große“ bis „geringe“ Bedeutung zugewiesen. Grundlage dazu ist die ökologische Gefahr, die von Experten-, Politiker-, Bevölkerungssicht als besonders bedrohend angesehen werden (z.B. Treibhauseffekt, Freisetzung krebserzeugender Stoffe) eingedenk des Aufwands, den die Gesellschaft noch zu leisten hat, um die Belastung zu senken und die Schutzziele zu erreichen (Bsp.: Rio-Ziel für Treibhauseffekt). In Tabelle 2 (rechte Spalte) sind Rangbildungen dargestellt, die sich im Wesentlichen auf den Stand UBA (1999) stützen. Erkennbar ist, dass die Ressourcen hier bislang noch keine Einstufung erfahren haben. Hier besteht gerade bei der Aktualisierung der UBA-Methode noch Entscheidungsbedarf.

Tabelle 2: Normierungsgrundlage für die betrachteten Wirkungskategorien und Rangbildung

Wirkungskategorie	Einheit jeweils pro Kopf	Einwohnerdurchschnittswert EDW	Quelle	Rangbildung
Ressourcen (KEA fossil+nukl.)	MJ	147.770	AGEB AG Energiebilanzen e.V.: Energieverbrauch in Deutschland	mittel
Ressourcen (KRA bio)	Kg	3.100	Giegrich et al. (2012)	offen
Ressourcen (KRA abiot.)	Kg	11.900	Giegrich et al. (2012)	offen
Frischwasser	m ³	63,1	UBA Daten zur Umwelt	offen
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -Äq.	11.776	Aggregiert durch ifeu auf der Basis der Daten des UBA aus <i>Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen</i>	sehr groß
Versauerung	kg SO ₂ -Äq.	31,5		groß
Eutrophierung, terrestrisch	kg PO ₄ ³⁺ -Äq.	5,03		groß
Stratosphärischer Ozonabbau	g FCKW-Äq.	0,0415		groß
Photo-Smog	kg Ethen-Äq.	6,18		mittel
Feinstaub	kg PM _{2,5} -Äq.	23,95		groß
Krebsrisikopotenzial	kg As-Äq.	0,00863		sehr groß
Flächenverbrauch	m ² *a	4.435		StBA FS 3 R 5.1, (Stand 2011)
bewertet nach Naturferne	m ² *a (NFP)	1.536	bewertet durch ifeu	
Einwohnerzahl		80.523.700	StBA 12.01.2015	

¹ UBA-Projekt-Nr.: 23128: Aktualisierung der UBA-Methodik zur Ökobilanzierung;

3.2 Einbeziehung der zeitlichen Dimension

Im Abschnitt 2.2.3 wurde der Aspekt der zeitlichen Dimension bereits angesprochen. Dies ist bei Holz aufgrund der Langlebigkeit vieler Produkte von Relevanz, da hier signifikante Kohlenstoffspeicher gebildet werden und die Freisetzung von biogenen Kohlenstoff als CO₂ hinauszögern.

Im Detail sind die folgenden Aspekte relevant:

- ▶ die sich in Zukunft verändernden energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen
- ▶ die Bewertung der Kohlenstoffspeicherung an sich
- ▶ die Berücksichtigung des Produktspeichers

Im Kaskadensystem steht am Ende der wiederholten stofflichen Nutzung immer eine energetische Verwertung des Rohstoffs, die über eine Netzeinspeisung den entsprechenden Strommix ersetzt. Je öfter und je länger ein Produkt in einer Kaskade verbleibt, desto mehr verzögert sich die energetische Nutzung. Insbesondere bei langlebigen Holzprodukten (30 Jahre und länger) können sich hierbei lange Zeiträume ergeben. Hierbei stellt sich die Frage, wie der **künftig zu ersetzende Energiemix** aussehen wird. Dies insbesondere vor dem Hintergrund einer angestrebten drastischen Dekarbonisierung des Energiesektors bis 2050 und darüber hinaus. Dies wird dazu führen, dass der Energiemix vollständig aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt wird und die energetische Verwertung der aus der Kaskadennutzung ausscheidenden Biomasse hier keine weiteren Vorteile erzielen wird. In dieser Studie wird der Einfluss des veränderten Strommixes auf die Ergebnisse geprüft werden. Dabei wird sowohl der künftig angestrebte Energiemix zugrunde gelegt als auch ein Marginalansatz geprüft. Bei letzterem werden weiterhin fossile Energieträger ersetzt. Dies erfolgt vor dem Hintergrund zweier Aspekte. Erstens wird auch bei Erreichen des 95% Einsparziels noch ein gewisser Teil der Energie aus fossilen Quellen erzeugt werden, die ersetzt werden können. Zweitens kann argumentiert werden, dass, würde die Biomasse nicht energetisch verwertet werden, eben diese Energiemenge wieder aus fossilen Energieträgern erzeugt werden müsste. Erst wenn die gesamte Energieerzeugung aus 100 % erneuerbaren Energien gedeckt wird, kann es eintreten, dass Biomasseenergie quasi „überschüssig“ wird. In diesem Fall wäre es in der Tat unter Umständen sinnvoller, die Biomasse nicht energetisch zu verwerten sondern ggf. zu sequestrieren.²

Weitere zeitliche Aspekte betreffen den Produkt-, bzw. **Kohlenstoffspeicher**. In vielen Diskussionen wird die sich durch Kaskadennutzung verlängernden Kohlenstoffspeicherung, bzw. verzögerte Emission an sich bewertet. Die Bewertung erfolgt mit Hilfe des sogenannten Diskontsatzes analog zu wirtschaftlichen Bewertung zukünftiger Gewinne (Delucchi 2011). Dabei werden die Treibhausgasemissionen in der Zukunft um eine bestimmte Diskontierungsrate pro Jahr reduziert. Diesem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass Menschen die Auswirkung des Klimawandels, d.h. die Treibhausgasemissionen als je unwichtiger (und damit geringer) bewerten, je weiter sie in der Zukunft liegen. Die Wahl des Diskontierungsfaktors spielt eine entscheidende Rolle beim Grad der Bewertung. Die Auswirkungen auf die Ergebnisse wurden in Gärtner et al. 2013 (S.45) exemplarisch für den Faktor 3 % dargestellt. Da dieser Ansatz sehr von subjektiven Präferenzen abhängt, wird er in diesem Projekt nicht weiter verfolgt.

Neben dieser subjektiven Bewertung hat die **Größe des Produktspeichers** wiederum einen Einfluss auf die Ökobilanz. Der Produktspeicher eines Landes wird durch die Menge von Holzprodukten genährt, die jedes Jahr hinzukommen. Je nach Lebensdauer verbleiben die Produkte über einen bestimm-

² Die zunehmende Diskussion um die Kombination von Biomasse und CCS-Technik in den aktuellen Klimaschutzszenarien (Repenning et al. 2015, Pfluger et al. 2016) würde Maßnahmen wie eine direkte Speicherung von bereits in Holz fest gebundenem C nahelegen.

ten Zeitraum in diesem Speicher und verlassen ihn nach Lebensende wieder (diese ergeben eine bestimmte Abbaurate). Bei der Betrachtung des Produktspeichers über einen gewissen Bilanzzeitraum sind nun zwei Ansätze denkbar: Der erste Ansatz geht von einem kontinuierlichen Zufluss an Holz, bzw. Holzprodukten aus. Da pro Jahr weniger Holz den Speicher verlässt, als neues hineinkommt (aufgrund der längeren Lebenszeiten) wächst der Produktspeicher über den Bilanzzeitraum an. Dieser Ansatz wird von einigen Studien gewählt, die die Klimawirkung von Holz und Holznutzung bilanzieren (Mund et al. 2015; Klein & Schulz 2013; Knauf & Frühwald 2013). Falls davon ausgegangen wird, dass der Produktspeicher tatsächlich kontinuierlich anwächst, hat dies auch eine Netto-Kohlenstoffbindung zur Folge. Allerdings würde dies voraussetzen, dass der Markt eine wachsende Menge an Holzprodukten aufnehmen kann.

Da in diesem Projekt der Fokus auf eine steigende Ressourceneffizienz liegt, wird ein zweiter Ansatz verfolgt. Dabei wird die aktuelle Holzproduktmenge (und damit der Speicher) als konstant angesehen. Da über die Kaskadennutzung mehr Produkte im Umlauf bleiben, wird mit einer zunehmenden Kaskadierung die Menge an Holz verringert, die in den Produktspeicher eintreten muss. Es wird somit bei einer bestehenden Holzproduktmenge die Ressource Holz eingespart.

4 Auswahl der Kaskadenbeispiele

Die Arbeitspakete 1 und 2 haben die bestehenden Konzepte der Kaskadennutzung von Biomasse, deren Umsetzungsgrad sowie die Rohstoffsituation intensiv analysiert. Konkrete Beispiele aus der praktischen Umsetzung haben sich dabei als äußerst rar erwiesen.

Nach eingehender Auswertung der Ergebnisse der ersten Arbeitspakete wurde in einem Zwischenschritt die in Tabelle 3 aufgeführte Liste an potenziell denkbaren Biomassekaskaden erstellt und daraus die Auswahl an Pfaden für die Ökobilanz herausgefiltert.

Tabelle 3 Übersicht der in AP1 und 2 herausgearbeitete Kaskadennutzungen [rote Schrift: für Ökobilanz ausgewählte Kaskaden]

	Name	Kaskadenpfad	Zielprodukte	Kaskaden	Biomasse
1	Holzskade 1	Holz → Holzprodukt → Spanplatte → recycelte Spanplatte → Faserplatte → Energie	Span- und Faserplatten	mehrstufig	Holz
2	Holzskade 2	Mais/Gülle + Holz → Biogas & Gärprodukte → Laminat → Energie	Laminat	einstufig (Sonderfall)	Lignozellulosehaltig (u.a. Gärprodukte)
3	Papierkaskade	Holz → Papier → recyceltes Papier → Pappe → recycelte Pappe → Energie	Papier	mehrstufig	Holz
4	Faserkaskade 1	Holz → Zellulosefasern → Textilien → Textilrecycling → Energie	Textilien	mehrstufig	Holz
5	Faserkaskade 2	Baumwolle → Textilien → Textilrecycling → Energie	Putzlappen, Recyclingfaser	mehrstufig	Baumwolle
6	Faserkaskade 3	Non-Food Milch → Kaseinfasern → Textilien (→ wiederholte Nutzung?) → Energie	Textilien	einstufig (Sonderfall)	Milch
7	Polymerkaskade 1	Mais → PLA → Verpackung → Recycling Folie → Energie	Verpackungsmaterial	mehrstufig	Mais
8	Polymerkaskade 2	Zuckerrohr → BioPET → Flasche → Recycling → Textil → Energie	PET-Flaschen	mehrstufig	Zuckerrohr
9	Polymerkaskade 3	Pflanzenöl → PU → Energie	Polyurethane	einstufig	Ölpflanzen
10	Chemiekaskade 1	Holz → Zellstoff → Nebenprodukt: Tallöl → u.a. Chemikalie → Anwendung	Chemikalien, Adhäsive	einstufig (Sonderfall)	Tallöl (Zellstoffindustrie)
11	Chemiekaskade 2	Schlachtabfälle → Nebenprodukt: Tierische Fette → Chemikalie → Anwendung	Fettsäuren, Glycerin	einstufig (Sonderfall)	Tierische Fette
12	Chemiekaskade 3	Raps → Epichlorhydrin → Epoxidharz → u.a. Windflügel, Anstriche, Klebstoffe → Energie /Recycling?	Harze	einstufig	Ölpflanzen
13	Chemiekaskade 4	Holzbasierter Bioraffinerie → Cellulose → u.a. Construction Materials	Cellulose, Bioethanol, Biochemikalien	Bioraffinerie (im Rahmen der Holzskade)	Holz
14	Graskaskade	Gras → Composite → Recycling	Komposite	Bioraffinerie	Gras

In Tabelle 4 sind die im zweiten Schritt für die Ökobilanz ausgewählten Kaskaden nochmals zusammengestellt und der jeweiligen Umfang bzw. die Herangehensweise wird kurz benannt.

Tabelle 4 Für die Ökobilanz ausgewählte Kaskaden und Beschreibung des jeweiligen Umfangs

Kaskade	Umfang
- Holz	Umfassende Stoffstrombilanz mit 4 Varianten
- Papier	Übersichtsökobilanz, Kaskadenziel: weitere Maximierung des bereits hohen Anteils an Recycling bzw., Kaskadennutzung
- Textil	Übersichtsökobilanz, Kaskadenziel: den Verbrauch des Rohstoffs Baumwolle reduzieren
- Biokunststoffe	Ökobilanzen zu ein- bis mehrstufigen Kaskaden für System mit PLA + PET

Die Überlegung, im Rahmen dieses Projekts auch „Chemikalien-Kaskaden“ als eigenständigen Block zu bewerten, wurde nicht weiter verfolgt aus folgenden Gründen.

- ▶ Die in Tabelle 3 skizzierte Produktion von Bioethanol bzw. darauf aufbauende Biochemikalien wird einerseits im Rahmen der Holzkaskade mit betrachtet – dort zwar im Wesentlichen mit Blick auf die einmalige Nutzung des Ethanol (z.B. direkt als Benzinersatz)
- ▶ Das häufig im Kaskadenkontext verwendete Konzept der Bioraffinerie steht nicht im begrifflichen Einklang mit der Kaskadennutzung, wie sie in diesem Projekt definiert ist. Außerdem liegen bereits verschiedene Ökobilanzen zur Bewertung der Bioraffinerie vor (Rettenmaier et al. 2014, Rettenmaier et al. 2014a)
- ▶ Die Betrachtung von Chemikalien lässt sich sehr schwer in Blickpunkt von Kaskaden-Lebenswegen umsetzen, da hier der konkrete Produktbezug kaum zu definieren ist. In gewisser Hinsicht spiegelt sich eine Chemikalien-Kaskade auch im Thema Biokunststoff-Kaskade wider.

5 Holzkaskaden

5.1 Beschreibung des Modells zur Holzkaskade

5.1.1 Grundlagen des Stoffstrom-Modells

5.1.1.1 Mengengerüst

Ausgangslage für die Modellierung des Holzstoffstroms in Deutschland ist die differenzierte Analyse der Holzrohstoffbilanz Deutschlands von Mantau (2012). In Abbildung 3 stellt Mantau (2014) dar, wie sich der Holzstoffstrom in Europa insgesamt grafisch gestaltet. Aus beiden Vorlagen sowie einer Reihe weiterer Quellen (Döring, Mantau (2012), Albrecht (2008), Destatis, die Ergebnisse von AP 2 dieses Projekts) wird das Stoffstrommodell für die Ökobilanz zusammengestellt. Ein paar wesentliche Rahmendaten zur Herkunft und Verbleib von Holz aus dem Wald sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5 Basisdaten zu Waldholz für das Modell zum Holzstoffstrom (nach Mantau 2012)

in Mio. m ³ / Jahr	Gesamt	Stammholz		sonst. Derbhholz		Waldrestholz + Rinde
		Nadel	Laub	Nadel	Laub	
Waldholz entnommen	73,8	35,1	2,2	21	15,5	9,5
Input Sägerei	37,3	35,1	2,2			
Output Sägerei	36,7					
davon Schnittholz	22,2	20,8	1,45			
davon Sägereistholz	14,5	13,7	0,76			
Input HWI	14,5	6,8 (SRH)		5,6	2,1	
Input Zellstoffind.	10,6	3,8 (SRH)		4,2	2,6	
Input Energieanl.	63,7					
Anlagen >1 MW	22,6	1,1 (SRH)	0,2 (SRH)	3,1		4,6
Anlagen <1 MW	7,2	0,5 (SRH)	0,8 (Stammholz)	1,8		2,7
Privathaushalte	33,9	1,0 (SRH)	1,5 (SRH)	8,1	10,5	3,3

HWI: Holzwerkstoffe; SRH: Sägereistholz

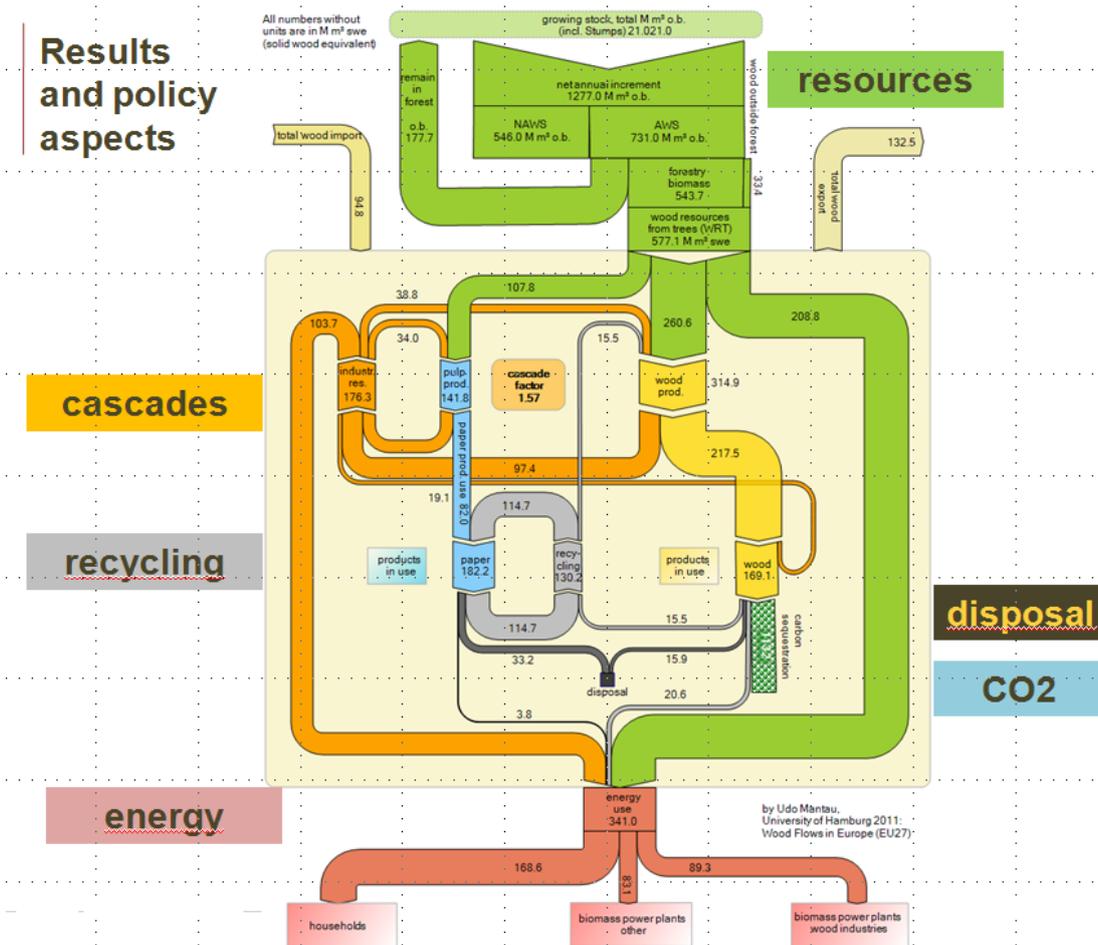
Die Zahlengerüste der weiteren Verarbeitung zu Schnittholzprodukten und Holzwerkstoffe sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Erwartungsgemäß besteht eine Diskrepanz zwischen den Material-Inputdaten in die Segmente zwischen den Quellen Mantau (2012) und Albrecht et al. (2008). Für die vorliegende Ökobilanz stellen diese Unterschiede keine relevante Problematik dar. Hier geht es vielmehr darum, die Mengenströme in den richtigen Korridoren darzustellen. In das Modell wird daher nur die prozentuale Verteilung der Mengenströme in Tabelle 6 übernommen.

Tabelle 6 Basisdaten zum Holzstoffstrom in den Segmenten Schnittholz und Holzwerkstoffe (nach Albrecht et al. 2008)

in Mio. m ³ / Jahr	SUMME	Bauholz	Möbel	Verpackung	Sonstiges
<i>Schnittholz Output Sägerei^{a)}</i>	22,3				
Konvent. Schnittholz	17,3	10,1	1,5	4,6	1,17
Konstruktionsvollholz, Schichtholz	2,6	2,6			
<i>Input zu Holzwerkstoffen^{a)}</i>	14,5				
Spanplatte	8,1	1,6	6,3	0,1	0,11
Faserplatte, OSB	2,5	1,8	0,6	0,02	0,04
Sperrholz	0,6	0,5	0,04		0,03
SUMME	31,0	16,6	8,4	4,7	1,35

a) Wert von Mantau (2012) aus Tabelle 5

Abbildung 3 Holzstoffstrom für Holz in Europa (Mantau 2014)



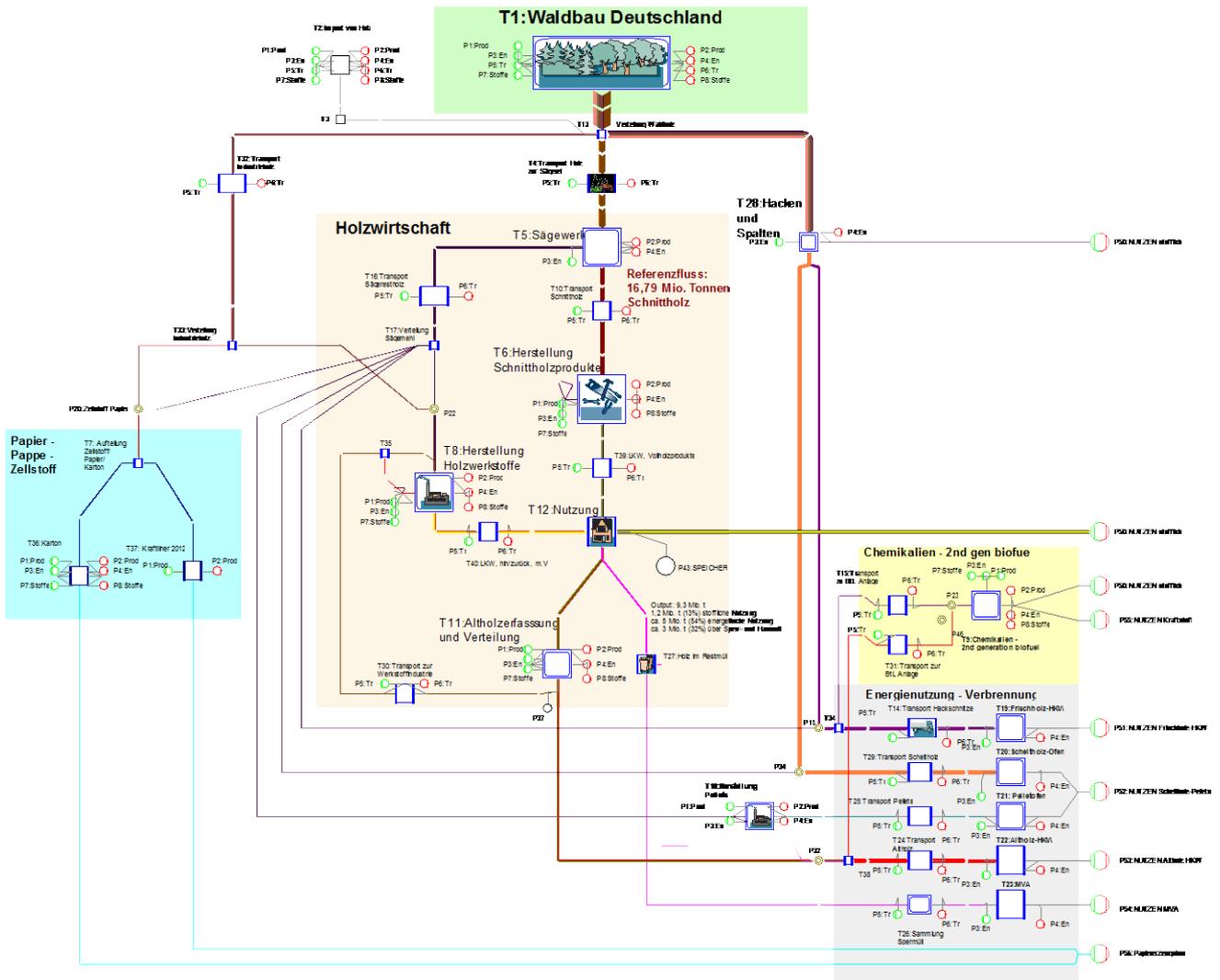
5.1.1.2 Umsetzung in ein Umberto-Stoffstrommodell

Die Mengengerüste aus den genannten Quellen wurden mit Hilfe der Software Umberto in ein Stoffstrommodell für die Ökobilanz umgesetzt (siehe Abbildung 4).

Durch die Kreislaufführung der Stoffströme für die Abbildung der Kaskaden ergibt sich in dem Modell ein Gleichgewichtszustand von Produktion, Nutzung, Verwertung bzw. Entsorgung. Das Modell ist so angelegt, dass eine Jahresbilanz erstellt werden kann, die am Ende jedoch (den Daten von Mantau folgend, siehe z.B. in Abbildung 3 den Stoffstrom „carbon sequestration“) durch die stetige Einlagerung von stofflich genutztem Holz weniger Material am Ende in die Verwertung/Entsorgung übergibt als auf der Inputseite eingesetzt wird.

Im Basisansatz wird dieser Jahresbezug aufgehoben, d.h. am Ende der Nutzung fällt die Gesamtmenge an stofflich genutztem Holz vollständig als Altholz an und wird den Verteilungsmustern folgend vollständig verwertet. Das im Stoffkreislauf kaskadierte Holz verbleibt im Modell jedoch als Speicher.

Abbildung 4 Umsetzung des Holzstoffstrom in ein Umberto-Modell



5.1.1.3 Vorgehensweise zur Sicherstellung der Nutzengleichheit

Für die Ergebnisse der Arbeiten ist der aus der Bilanz der Holzwirtschaft hervorgehende „Nutzenkorb“ an Produkten von entscheidender Bedeutung. Für das Basisszenario ergibt sich im Rahmen dieser ersten Berechnung ist in Tabelle 7 zusammengefasst Summe an Nutzen. Werden die Szenarien variiert (z.B. hin zu höherer Kaskadennutzung), wird sich die Zusammensetzung dieser Nutzen verändern. Das „Mehr“ oder „Weniger“ an erzeugten Produkten muss dann durch jeweilige Ergänzungen von Ökobilanzlasten durch äquivalente Referenzprodukte ausgeglichen werden. Die Gleichheit der jeweiligen Nutzenkörbe ist Voraussetzung für die ökobilanzielle Vergleichbarkeit der Szenarien.

Eine mit dem Umweltbundesamt abgestimmte Grundprämisse der betrachteten Szenarien lautet: die aktuelle Entnahmemenge an Holz aus dem Wald (wie dargestellt im Basisszenario) gilt als Maximum, das durch keine der betrachteten Varianten nicht weiter erhöht werden darf.

Tabelle 7 Output an Nutzen des Gesamtstoffstroms Holzwirtschaft (Basis)

Stoffliche Produkte		
Konstruktionsholz	7.876	kt
Vollholzmöbel	386	kt
Verpackungsholz	2.934	kt
Spanplatten	4.165	kt
MDF-Platten	3.172	kt
OSB-Platten	931	kt
LDF-Platten	472	kt
Zellstoff für Papier	1.390	kt
Pappe, Karton	2.638	kt
Tallöl	51	kt
Rinde (stoffliche Nutzung)	2.662	kt
Energieträger		
Strom	16.835	GWh
- aus Frischholz-HKW	6.585	GWh
- aus Altholz-HKW	8.434	GWh
- aus MVA	1.816	GWh
Nutzwärme	89.502	GWh
- aus Frischholz-HKW	17.193	GWh
- aus Scheitholz + Pelletofen	48.319	GWh
- aus Altholz-HKW	19.555	GWh
- aus MVA	4.253	GWh
- aus Zellstoffindustrie	183	GWh

5.1.2 Betrachtete Optionen (Szenarien)

Ausgehend von der Basisoption werden folgende Grundansätze zur Erhöhung des Kaskadenanteils angewandt:

- A. Maßnahmen zur Erhöhung des in Kaskade geführten Holzstoffstroms, die als „mittelfristig realistisch“ umsetzbar eingeschätzt werden.
- B. Maßnahmen zur vollständigen Umsetzung der Kaskadennutzung, d.h. keine direkte Nutzung von Holz als Energieträger ganz im Sinne des ambitionierten Ansatzes von UBA (2013).

Der **erste Grundansatz** – eine mit realistisch eingeschätzten Maßnahmen erzielbare Erhöhung des Kaskadenanteils – lässt sich grundsätzlich auf zwei verschiedene Wege erreichen:

- 1 Erhöhung der Kaskadenstufen:
Durch eine verstärkte stoffliche Nutzung der erfassten Altholzmengen anstelle der dominierenden energetischen Nutzung
- 2 Erhöhung der absoluten Menge an stofflich genutztem primärem Holzrohstoff

Ersteres lässt sich über zwei Wege erreichen, nämlich die Erhöhung des in Kaskade geführten Stoffstrom durch:

- a. Die Überführung des stofflich geeigneten Altholzpotsential (Altholzklasse I und II) komplett in die stoffliche Nutzung
- b. Durch Vergrößerung des stofflich geeigneten Altholzpotsentials durch bessere Aufbereitung und automatische Sortierung (NIR-Technik).

In Abbildung 5 ist in einem Ausschnitt aus dem Holzstoffstrom-Modell der Ansatzpunkt zu erhöhter Kaskadennutzung markiert. Daraus ergeben sich verschiedene Konsequenzen für den Stoffstrom:

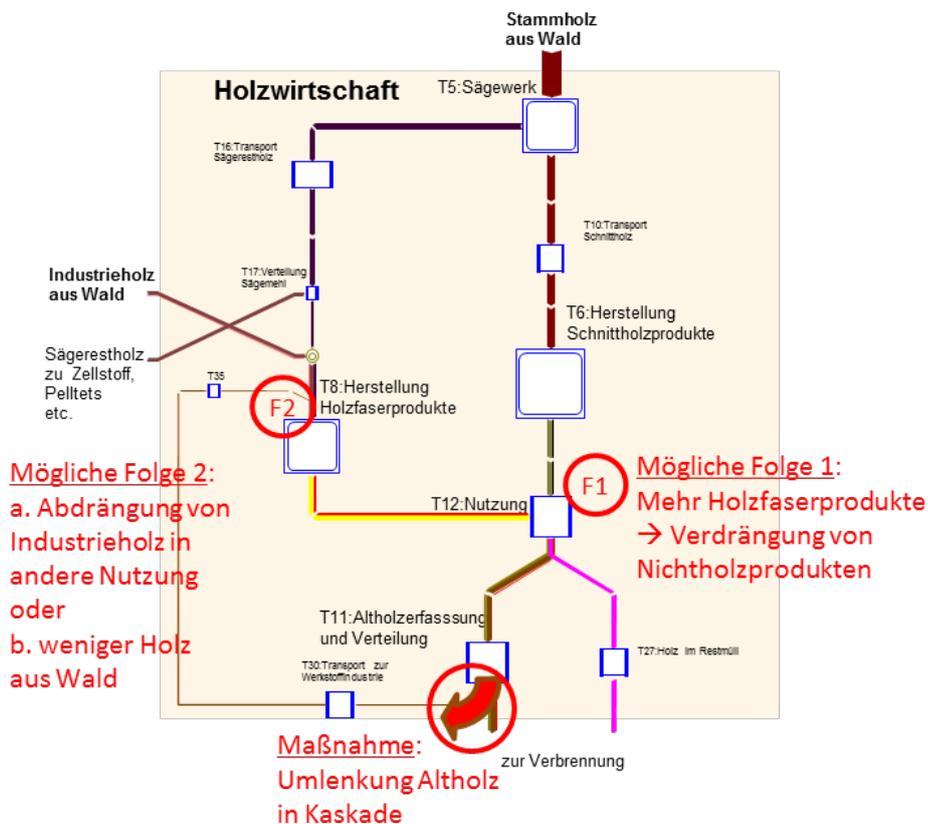
1. Ein Mehr an Produkten aus Holzwerkstoffen am Markt kann andere Nichtholzprodukte verdrängen
2. Bei gleichem Markt würde primärer Holzrohstoff (d.h. in erster Linie Industrieholz)
 - a) für andere Nutzung freigesetzt (z.B. Energienutzung) oder
 - b) oder weniger dem Wald entnommen

Hinter Variante 2a zeigt sich keine sinnvolle Strategie, da hier Stoffströme innerhalb der Holzwirtschaft nur verschoben werden und mehr „sauberes“ Frischholz weg von den stofflichen Produkten zur Verbrennung gelenkt würde, das aufgrund der potenziellen Verunreinigungen „kompliziertere“ Altholz dagegen mehr im Stoffkreislauf gehalten würde.

Für Variante 2b würde es einer Ankopplung mit komplexen Waldbaumodellen bedürfen (z.B. WEHAM³), um die Effekte sachgerecht abbilden zu können. Dies würde den Umfang dieses Projektes übersteigen. Kursorisch soll diese Option jedoch mitgedacht werden.

³ *Wald Entwicklungs- und Holz-Aufkommens Modellierung*; laufendes Verbundforschungsprojekt des Thünen-Instituts mit der Uni Hamburg und der Hochschule für Nachhaltige Entwicklung (Eberswalde) im Rahmen des Waldklimafonds.

Abbildung 5 Ausschnitt aus dem Holzstoffstrom-Modell mit der Ansatzpunkt zu erhöhter Kaskaden-
nutzung



Im Rahmen dieses Projektes wird als **Option 1** folgendes Szenario unter Einbeziehung des gesamten Stoffstroms ökobilanziell bewertet:

→ **Option 1**

Erhöhung der Altholzmenge in die Spanplattenherstellung

Es wird die Rückführung der gesamten Menge an Altholz der Klasse I zur stofflichen Verwertung in die Holzwerkstoffproduktion unterstellt.

Dadurch ist eine Erhöhung des Anteils im Basisszenario von 18,5 % auf maximal 50 % theoretisch möglich (siehe Inputmengen in Tabelle 8). Da die anderen Inputmengen in die Holzwerkstoffproduktion beibehalten werden, erhöht sich das Produktionsvolumen an Spanplatten von ca. 4.200 kt/a (Basis) auf 6.800 kt/a.

Unterstellt wird dabei ferner ein höherer qualitätsorientierter Sortieraufwand (inkl. NIR-Technik).

Tabelle 8 Input an Holzrohmaterial in die Spanplattenfertigung

	Basis		Option 1	
	Jahresvolumen in kt	Anteile in %	Jahresvolumen in kt	Anteile in %
Altholz (Kat. I)	1.034	18,5%	4.553	50,0%
Industrieholz (Laub)	433	7,7%	433	4,8%
Industrieholz (Nadel)	888	15,9%	888	9,7%
Sägerestholz	3.233	57,9%	3.233	35,5%
Summe Holzinput	5.587	100%	9.106	100,0
Spanplatte (Output) ^{a)}	4.165		6.790	

a) Die Verringerung der Masse erfolgt durch Trocknung des Holzinputs bei der Fertigung, wodurch auch der Input von insgesamt 330 kt bzw. 536 kt (Option 1) an verschiedenen Bindemitteln weit überkompensiert wird.

Zusätzlich werden folgende Optionen zur Erhöhung der absoluten Menge an stofflich genutztem primärem Holzrohstoff betrachtet:

➔ **Option 2**

Umlenkung von Energiefrischholz in zusätzliche Holzwerkstoffe

Das in Option 1 durch zusätzliches Altholz-Recycling erreichte Produktionsvolumen in der Spanplattenherstellung von 6.800 kt/a wird hier durch zusätzlichen Input von für die Energienutzung vorgesehenem Frischholz abgebildet.

➔ **Option 3**

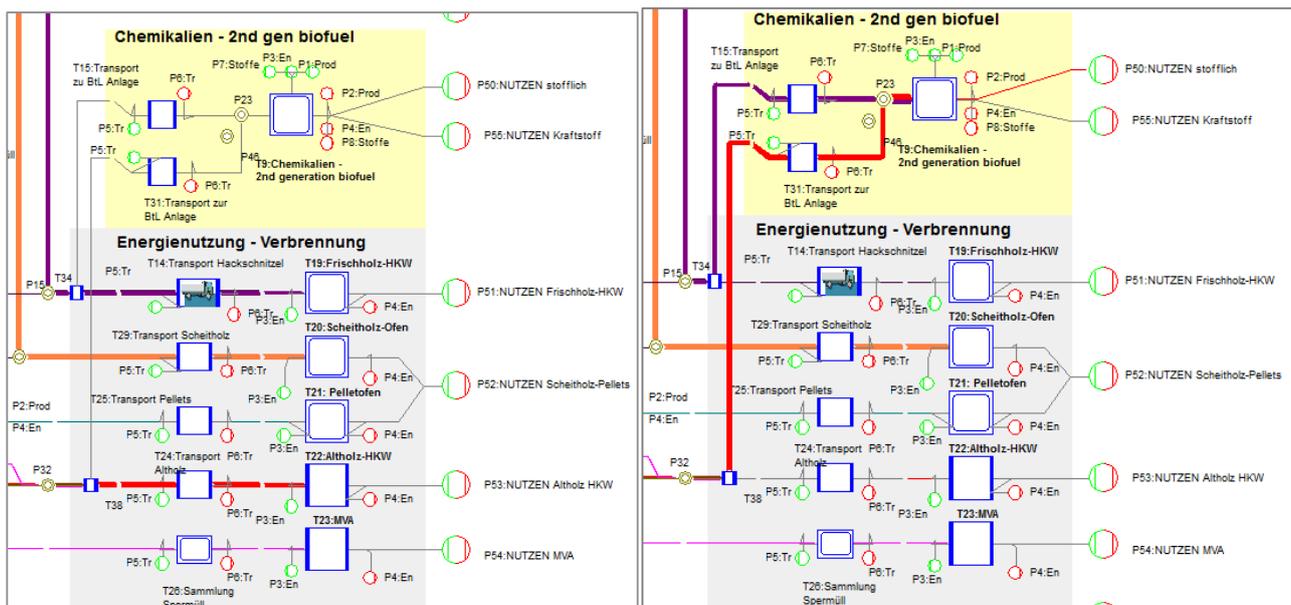
Umlenkung von Energiefrischholz bzw. Altholz in Chemikalienproduktion (BtL).

Neben der „klassischen“ Altholzkaskade sind auch chemisch-technischen Aufarbeitungen verschiedener direkt energetisch verwerteter Fraktionen als Feedstock für Chemikalien oder hochwertige Kraftstoffe denkbar. Mit der politischen Abkehr von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse stehen solche „fortschrittlichen“ Kraftstoffe mehr denn zuvor im Brennpunkt. Sie bieten gleichzeitig aber auch die Grundlage für biobasierte Chemikalien.

Beispielhaft an der Vergasung und Fischer-Tropsch-Synthese werden zwei mögliche Materialpfade dargestellt: die derzeit in die direkte Verbrennung gehenden Holzhackschnitzel und das ebenso verbrannte Altholz der Klassen I (bis auf die direkt stofflich verwertete Menge) bis III.

In Abbildung 6 ist die Umlenkung im Umberto-Modell dargestellt.

Abbildung 6 Ausschnitt aus dem Holzstoffstrom-Modell: links das Basisszenario mit der direkten Verbrennung, rechts die Umlenkung in die Synthese.



➔ **Option 4**

Umlenkung allen Energiefrischholzes in zusätzliche Primäranwendungen für Holz (Bauholz) zur Erhöhung des stofflichen Biomasse-Inputs in den Stoffkreislauf

Diese „radikale“ Option im Sinne des oben genannten Grundansatzes B beinhaltet Maßnahmen zur vollständigen Umsetzung der Kaskadennutzung, d.h. direkt aus dem Wald in die Nutzung gehendes Energieholz in eine stoffliche Nutzung umgelenkt. Damit soll das hypothetische Maximum einer Kaskadennutzung ökobilanziell bewertet werden.

Im Bilanzmodell führt dies zu einer erheblichen Erhöhung des Inputs in die Holzverarbeitung und erfordert einen produktseitigen Absatz des zusätzlich stofflich genutzten Holzes in der Wirtschaft. In dem hier modellierten Ansatz, wird dies wie folgt dargestellt:

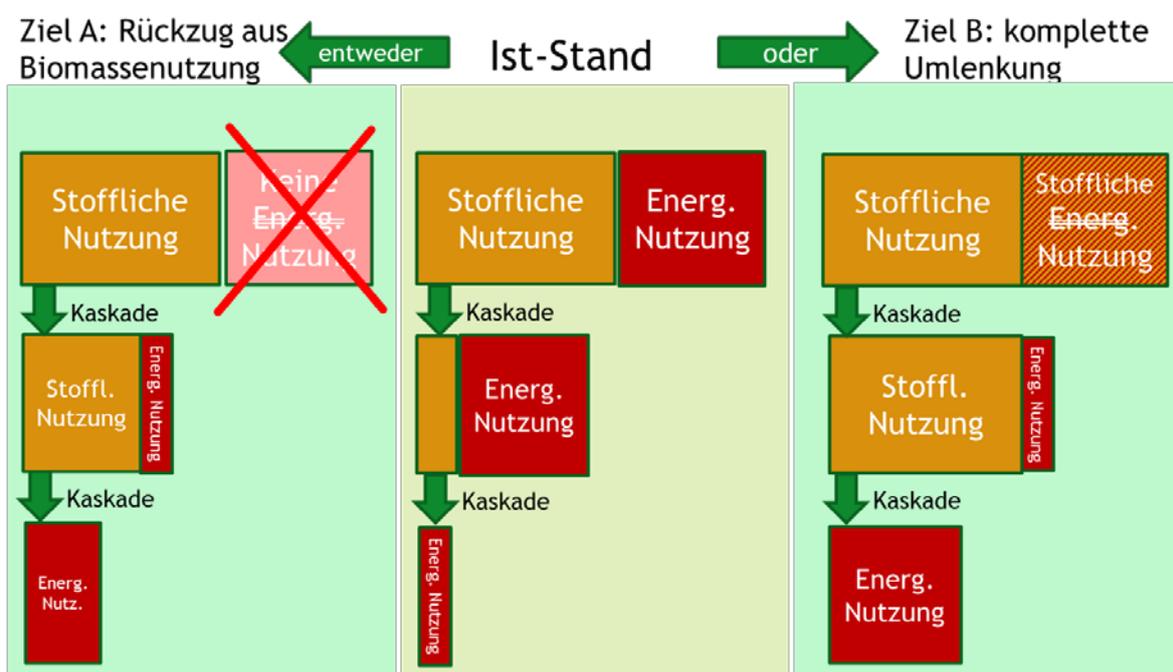
- Derbholz, welches in der Basisoption mit ca. 18 Mio. t (9,4 Mio. t Nadel, 8,7 Mio. t Laub) in die Energienutzung geht, wird in den Bausektor umgelenkt. Das Nadelholz wird dabei als Schnittholz eingesetzt, das Laubholz als Konstruktionsschichtholz.
- Weiterhin in die direkte energetische Nutzung geht ausschließlich das Waldrestholz mit 7,4 Mio. t sowie Anteile der Rinde.
- Durch den deutlich höheren Durchsatz über die Sägereien (40 %mehr) entsteht auch entsprechend mehr Sägerestholz. Während die Erzeugung an Zellstoff und Papier konstant gehalten wird, wird dagegen der Anteil an Holzfaserverprodukten gleichfalls erhöht (um 2,9 Mio. t).
- Außerdem erhöht sich der Anteil an Brennstoff aus Sägerestholz (was teilweise den Wegfall an energetischer Primärholznutzung ausgleicht) und auch die absolute Holzmenge, die in stofflicher Kaskade geführt wird, ohne die prozentualen Anteile der Altholzsortierung hier zu verändern.

Die Motivation zur Modellierung dieses sehr theoretischen Szenarios beruht nicht nur auf dem Versuch, die konkrete Umsetzung der Maxime „erst stoffliche Nutzung, energetische Nutzung nur in Kaskade“ zu bewerten. Vielmehr soll damit auch die Problematik, dass mit dem Umbau des Waldes von überwiegend Nadelholz auf mehr Laubholz (v.a. Buche) eine Stärkung der Holzkaskade „radikale“ Umlenkungsschritte voraussetzt, gewürdigt werden.

Eine andere „radikale“ Option 5 mit der Maxime „energetische Nutzung nur in Kaskade“ würde bedeuten, alles bisher direkt energetisch genutzte Waldholz im Wald zu belassen und nicht zu nutzen. Dies würde einem Szenario „(partielle) Stilllegung“ entsprechen. Für eine Bilanzierung der gesamtökologischen Effekte würde dies jetzt weit über den Rahmen dieses Vorhabens hinausgreifen. Wie weiter oben unter „Variante 2b“ beschrieben, würde dies eine Modellierung des Waldbaus in hochkomplexer Form erfordern. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse soll dieser Ansatz jedoch in Teilaspekten diskutiert werden.

Abbildung 7 zeigt die zwei Maximalszenarien schematisch auf. Das darin dargestellte Ziel B entspricht der betrachteten Option 4. Ziel A entspräche einer Option 5.

Abbildung 7 Maximalszenarien nach zwei unterschiedlichen Zielen der Kaskadennutzung: Ziel A: Rückzug aus der energetischen Biomassenutzung durch vollständige Unterlassung und Ziel B: durch komplette Umlenkung von Primärholz in die stoffliche Nutzung.



In Tabelle 9 sind die Veränderungen der jeweiligen Nutzen aus den drei verschiedenen Optionen gegenüber der Basis zusammengefasst. Die Mengen mit positivem Vorzeichen stellen eine Erhöhung des Nutzens gegenüber der Basis dar und werden mit einer entsprechenden Gutschrift belohnt. Bei den negativen Vorzeichen wird dagegen eine Lastschrift angerechnet.

Tabelle 9 Veränderung der Outputs (Nutzen) des Gesamtstoffstroms gegenüber der Basis

	Basis	Option 1	Option 2	Option 3a+b	Option 4	
Stoffliche Produkte						
Spanplatten	4.165	+2.624	+2.697	<u>+0</u>	+2.947	kt
BtL (Chemiebasis oder Kraftstoff)	<u>+0</u>	<u>+0</u>	<u>+0</u>	+4.249	<u>+0</u>	kt
Konstruktionsholz	7.876	<u>+0</u>	<u>+0</u>	<u>+0</u>	+7.606	kt
Energieträger						
Strom	16.835	-3.046	-2.798	-13.459	+1.204	GWh
- aus Frischholz-HKW	6.585	-1.940	-3.673	-5.968	-4.328	GWh
- aus Altholz-HKW	8.434	-1.346	629	-7.492	+4.571	GWh
- aus MVA	1.816	+239	246	<u>+0</u>	+962	GWh
Nutzwärme	89.502	-7.593	-7.396	-21.206	-34.905	GWh
- aus Frischholz-HKW	17.193	-5.033	-9.430	-15.249	-10.419	GWh
- aus Scheitholz + Pellet-ofen	48.319	<u>+0</u>	<u>+0</u>	<u>+0</u>	-37.336	GWh
- aus Altholz-HKW	19.555	-3.120	+1.458	-17.370	+10.597	GWh
- aus MVA	4.253	+560	+575	<u>+0</u>	+2.251	GWh
- aus BtL-Anlage	<u>+0</u>	<u>+0</u>	<u>+0</u>	+11.413	<u>+0</u>	GWh
- aus Zellstoffindustrie	183	<u>+0</u>	<u>+0</u>	<u>+0</u>	<u>+0</u>	GWh

5.1.3 Prozesse der Gut- und Lastschriften

Spanplatten

Die Optionen 1 und 2 weisen gegenüber dem Basisszenario eine höhere Produktion von Spanplatten⁴ auf. Grundsätzlich bestehen verschiedene Möglichkeiten andere Produkte im Markt damit zu ersetzen. An dieser Stelle werden drei Produktarten einbezogen, die in den folgenden Berechnungen der Gutschriften entsprechend den Anwendungsbereichen von Spanplatten (siehe dazu Tabelle 6) mit folgenden Anteilen eingerechnet werden:

- ▶ 40 % Gipskarton- bzw. Gipsfaserplatten (Innenausbau)
- ▶ 40 % Stahlbleche (Möbelteile, z.B. Regalböden)
- ▶ 20 % Leichtbetonelemente (Innenausbau)

Die Daten Ökobilanzdaten werden hierfür aus Ecoinvent 2.2 übernommen.

Zur Bestimmung der Nutzengleichheit zwischen Spanplattenprodukten und des Substituten wird auf funktionale Äquivalenz gemäß Flächengewicht abgehoben:

Spanplatte: 10 kg /m², Gipskartonplatte 8 kg /m², Stahlblech 12 kg /m², Leichtbetonwand; 80 kg /m²

⁴ Die Spanplatte ist hier lediglich zur Begrenzung der Komplexität des Modells stellvertretend ausgewählt worden. Grundsätzlich bestehen weitere Potenziale zum Einsatz von Altholzfraktionen in MDF, LDF und OSB-Platten

Bauholz

Option 4 führt bei dieser Betrachtung zur zusätzlichen Substitution von „konventionellen“ Baumaterialien wie Baustahl, Beton oder auch anderen Grundstoffen im Bausektor wie PVC oder Aluminium (z.B. für Fensterbau). Nach Gärtner et al. (2013) können funktionell 1 t Konstruktionsschichtholz 2 t Baustahl ersetzen. Damit würden die in Tabelle 9 ausgewiesenen 7,6 Mio. t zusätzlichen Konstruktionsholzes die jährlich verarbeitete Menge an Baustahl in Deutschland von ca. 13 Mio. t übersteigen.⁵ Daher wird hier eine Substitution von jeweils 50 % Baustahl und Beton angesetzt. Der funktionale Äquivalenzfaktor Bauholz zu Beton wird mit 1 t zu 4,5 t angesetzt, was in etwa dem Dichteverhältnis entspricht.

Biomass-to-Liquid (BtL)

Durch Option 3 wird Frischholz der chemischen Aufbereitung zu Kraftstoff zugeführt. Grundsätzlich kann diese Option auch für die Bereitstellung von Feedstock für die chemische Industrie. Zur Reduktion der Komplexität wird an dieser Stelle für das nach Fischer-Tropsch-Synthese erzeugten Produkts Dieselkraftstoff gutgeschrieben.

Strom und Wärme

Die Verlagerung zu mehr stofflicher Nutzung führt teilweise zur Verringerung des Energienutzens. Für diese geringere Strom- und Wärmeerzeugung auf Holzbasis werden als Lastschriften angerechnet aus

- ▶ dem durchschnittlichen deutschen Netzmixes (ifeu-Daten liegen vor für 2012)
- ▶ Erdgasfeuerung.

5.1.4 Weitere Datengrundlagen

Die Prozessdaten zur Verarbeitung der Holzrohstoffe und der Herstellung von Produkten beruhen auf bisherigen Ökobilanzstudien (Gärtner et al. 2013, Rettenmaier et al. 2014), Ecoinvent 2.2 sowie Rüter und Diederichs (2012). Energievorketten entstammen aus der aus der Umberto-Datenbank des ifeu (z.B. für deutschen Strommix, Biomasse-HKW, MVA) oder GEMIS (Pellet- und Scheitholz-Ofen). Bezüglich der Emissionen von Benzo(a)pyren, Dioxine/Furane und Feinstaub aus den Holzfeuerungen werden die Messdaten von Baumbach et al. (2010) herangezogen.

Für die Ökobilanz sind außerdem die Transportwege der jeweiligen Holzströme zu berücksichtigen. Die Daten dazu werden Rüter und Diederichs (2012) entnommen. Zur Vereinfachung werden ausschließlich Lkw-Transporte angesetzt. Die Sachbilanzdaten werden dafür aus der Umberto-Datenbank bzw. TREMOD entnommen.

⁵ Nach: http://www.stahl-online.de/index.php/statistiken/2/#stahlmarkt_d : 31 % der Gesamtstahlproduktion von 42,7 Mio. t zählen zum Baustahl

5.2 Ergebnisse der Ökobilanz zu Holzkaskaden

5.2.1 Wirkungsabschätzung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse auf der Ebene der einzelnen Wirkungskategorien (siehe Tabelle 1) dargestellt. Das Basisszenario bildet die Bilanz für den gesamten Stoffstrom. Hierin werden weder Allokationen, noch Gut- oder Schlechtschriften verrechnet. Die summarischen Ergebnisse auf der Ebene der Wirkungsabschätzung sind in Tabelle 10 zusammengestellt. In der Zeile „System“ findet sich dabei immer das Ergebnis des Gesamtstoffstroms. In den Zeilen „Gutschrift“ und „Lastschrift“ werden die höheren oder geringeren Erträge bei den Nutzen angesetzt. Die Zeile „Gesamt“ enthält die Summen über die jeweiligen drei Zeilen.

Tabelle 10: Ergebnis der Wirkungsabschätzung für die Holzkaskade im Basisszenario und in den Optionen 1 bis 4.

Wirkungskategorie	Einheit		Basis	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Ressourcen (KEA fossil+nukl.)	PJ	System	193	210	211	198	243
		Gutschrift		-86,7	-89,1	-210	-312,3
		Lastschrift		61,8	58,8	212	162
		Gesamt	193	185	180	201	92
Ressourcen (KRA bio.)	kt	System	69.945	69.945	69.945	69.945	69.945
Ressourcen (KRA abiot.)	kt	System	8,37	8,95	8,97	8,67	10,30
		Gutschrift		-20,70	-21,28	-5,27	-84,99
		Lastschrift		2,24	2,11	8,35	3,86
		Gesamt	8,37	-9,51	-10,20	11,75	-70,84
Treibhauseffekt	kt CO ₂ -Äq.	System	13.100	14.000	14.000	13.100	15.730
		Gutschrift		-7.260	-5.570	-15.700	-23.539
		Lastschrift		4.120	3.900	14.500	9.540
		Gesamt	13.100	10.900	12.300	11.900	1.731
Versauerung	kt SO ₂ -Äq.	System	115	116	112	111	110
		Gutschrift		-18,6	-18,37	-21,4	-64,0
		Lastschrift		13,4	12,8	22,5	7,7
		Gesamt	115	111	106	112	54
Eutrophierung, terr.	kt PO ₄ ³⁺ -Äq.	System	12,3	12,4	11,9	10,4	12,9
		Gutschrift		-1,49	-1,53	-1,63	-4,24
		Lastschrift		0,69	0,66	2,48	1,53
		Gesamt	12,3	11,6	11,0	11,2	10,2
Strat. Ozonabbau	kt R11-Äq.	System	0,0371	0,0393	0,0352	0,0297	0,0370
		Gutschrift		-0,0015	-0,0015	-0,0008	-0,0075
		Lastschrift		0,0022	0,0020	0,0085	0,0027
		Gesamt	0,0371	0,0399	0,0357	0,0375	0,0322
Photo-Smog	kt Ethen-Äq.	System	76,2	77,7	77,1	74,9	44,8
		Gutschrift		-4,3	-4,4	-1,59	-9,71
		Lastschrift		0,31	0,30	0,99	1,01
		Gesamt	76,2	73,7	73,0	74,3	36,1
Krebsrisikopotenzial	t As-Äq.	System	1,16	1,31	1,31	1,14	1,50
		Gutschrift		-19,2	-19,8	-0,97	-55,95
		Lastschrift		0,04	0,03	0,16	-0,01
		Gesamt	1,16	-17,91	-18,44	0,33	-54,46

Wirkungskategorie	Einheit		Basis	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Feinstaub	kt PM2.5-Äq.	System	118	120	115	109	115
		Gutschrift		-18,9	-19,4	-18,5	-65,3
		Lastschrift		5,9	5,6	22,2	9,1
		Gesamt	118	107	101	113	58
Naturraum (bewertet)	Mio. ha NFP	System	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31
		Gutschrift		-0,003	-0,027	0,000	-0,069
		Lastschrift		0,005	0,004	0,021	-0,002
		Gesamt	1,31	1,31	1,29	1,33	1,24
Naturraum (unbewertet)	Mio. ha		11,04	11,04	11,04	11,04	11,05

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Wirkungskategorien im Einzelnen diskutiert. Dabei wurden zur Verdeutlichung der Beiträge der einzelnen Kompartimente des Holzstoffstroms bei einzelnen Kategorien (Treibhausgaseffekt und Versauerung) auch differenzierte Einzelprozessanalysen dargestellt.

5.2.1.1 Ressourcenbeanspruchung

Ressourcen werden im Rahmen dieser Studie anhand von drei Indikatoren bewertet:

- ▶ Kumulierter Primärenergieaufwand, nicht erneuerbarer Energieträger (KEA_{fos/nuk})
- ▶ Kumulierter Rohstoffaufwand
 - biogen (KRA_{bio})
 - abiotisch (KRA_{abio})

Abbildung 8 zeigt das Ergebnis für KEA_{fos/nuk} für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4. Die Darstellung liest sich wie folgt:

- ▶ der braune Balkenanteil („System“) zeigt den Primärenergieverbrauch des gesamten Produktionssystem der Holzwirtschaft; da die Optionen 1 bis 4 jeweils zusätzliche Aufwendungen gegenüber der Ausgangssituation mit sich bringen, liegen die Balkenanteile für die Optionen jeweils höher als die Basis.
- ▶ der grüne Balkenanteil („Gutschrift“) gibt die durch die jeweilige Option substituierten Produktionsprozesse wieder (z.B. Gipsplatten und Stahlbleche für zusätzliche Pressspanplatten)
- ▶ der rote Balkenanteil („Lastschrift“) gibt die durch die jeweilige Option zusätzliche Aufwendungen wegen Wegfalls vorheriger Nutzen im Basisszenario wieder (z.B. Strom und erdgasbasierte Wärme wegen reduzierter Energienutzung).
- ▶ das blaue Feld („Summe“) gibt die Summe aus System, Gut- und Lastschrift als Gesamtergebnis wieder.

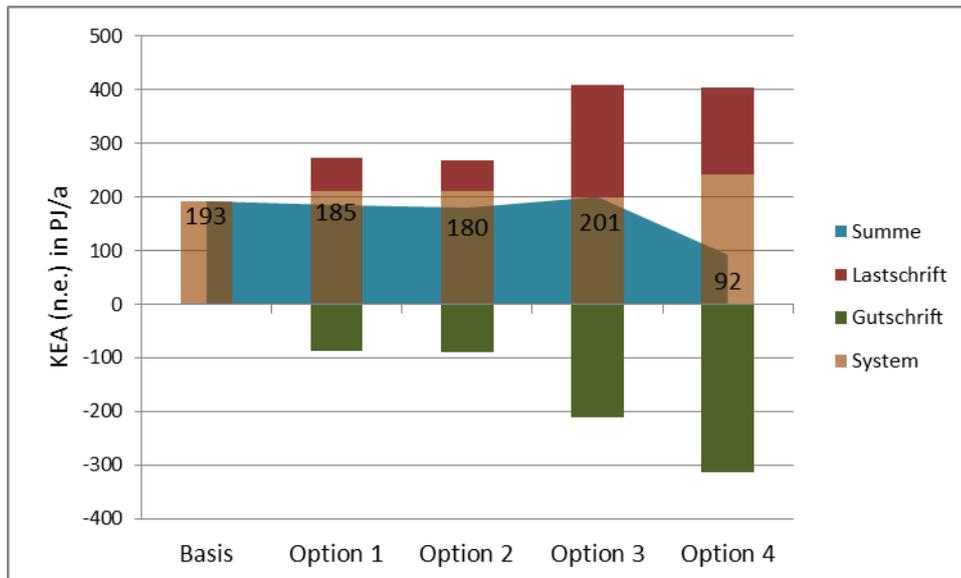
Kumulierter Primärenergieaufwand (KEA)

Im Basisszenario beträgt der Gesamtverbrauch 193 PJ. Durch die Optionen 1 und 2 lässt sich der Verbrauch unter Aufrechnung von Gut- und Lastschriften auf 185 bzw. 180 PJ mindern. Option 3 dagegen liegt mit 201 PJ im Gesamtwert höher im Verbrauch als die Basisoption. Die Nettoprimärenergiebilanz einer Verarbeitung von Holz zu Kraftstoffen der zweiten Generation ist damit nicht günstiger als die direkte Nutzung zur Strom- und Wärmeerzeugung.

Die Option 4 mit der Maximierung der stofflichen Nutzung und damit auch der Erhöhung des in Kaskaden geführten Massenstroms weist einen Gesamtverbrauch von nur 92 PJ auf. Dies beruht auf den

hohen Gutschriften für die ersetzten Baumaterialien Stahl und Beton vor allem aber auch durch die Erhöhung der Altholzmenge, die nicht nur den Rückstrom in die Holzwerkstoffe deutlich erhöht, sondern auch über die höhere absolute Menge energetisch genutzten Altholzes sogar gegenüber der Basisoption mehr Stromerzeugung ermöglicht.

Abbildung 8 Ergebnis zum nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch ($KEA_{\text{fossil+nuklear}}$) für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4



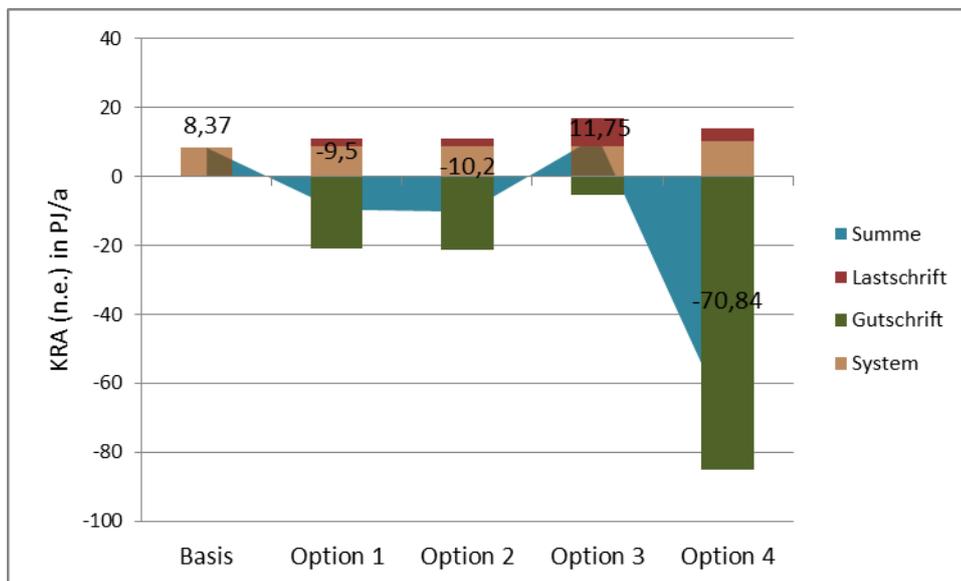
Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)

Bei den *abiotischen Rohstoffen* (KRA_{abiot}) zeigt sich ein vergleichbares Ergebnismuster wie beim $KEA_{\text{fossil+nuklear}}$: die Optionen 1 und 2 weisen geringere Verbräuche auf als das Basisszenario, Option 3 liegt dagegen ungünstiger, während Option 4 erheblich geringeren Gesamtaufwand gegenüber der Basis verursacht. Die Darstellung in Abbildung 9 macht außerdem den vergleichsweise geringeren abiotischen Rohstoffaufwand der Holzwirtschaft deutlich, denn durch die Erhöhung der Kaskaden (Option 2 und 3) und noch deutlicher durch die Erhöhung der stofflichen Nutzung insgesamt (Option 4) werden mehr Rohstoffe eingespart, als die Holzwirtschaft inklusive der Lastschrift verbraucht. Das zeigt sich in den Minusbeträgen in den Summen.

Bei den *biotischen Rohstoffen* (KRA_{bio}) zeigen die Optionen dagegen keinen Unterschied, was daran liegt, dass die Holzentnahme aus dem Wald (70 Mio. t) über alle Varianten gleichgehalten ist. Die Unterschiede treten daher nur über die Lenkung der Materialströme und die Produktgestaltung zu Tage.

Dies würde sich anders darstellen, wenn man anders als in den hier modellierten Szenarien die produzierte Menge an Produkten gleich lassen würde: z.B. in Option 1, statt die 2,6 Mio. t zusätzlichen Holzwerkstoffprodukte zu erzeugen auf die entsprechende Menge an Input zu verzichten. Die Modellierung im Gesamtsystem der Holzwirtschaft wäre dabei nicht trivial, weil sich dabei die Frage stellt, aus welchem der Inputanteile von Sägereistholz, Nadelindustrieholz und Laubindustrieholz (siehe Tabelle 6) dieser Verzicht definiert werden soll. Naheliegender wäre das Belassen von Industrieholz im Wald, was jedoch eine Veränderung der Bewirtschaftungsweise des Waldes (z.B. mit weniger Durchforstung, anderer Zusammensetzung der Erntesortimente u.a.) mit sich führen würde. Eine Modellierung solcher Maßnahmen geht über den Umfang dieses Projektes hinaus. Mit einer sehr vereinfachten Abschätzung kann man jedoch davon ausgehen, dass bei diesem Ansatz 2,5 Mio. t Industrieholz im Wald verbleiben, was ebenfalls vereinfacht einem KRA_{bio} von 2,5 Mio. t entspricht. Mit Option 1 würde somit – bei konstant gehaltener Produktmenge – der KRA_{bio} um knapp 4 % reduziert werden.

Abbildung 9 Ergebnis zum nicht erneuerbaren Rohstoffaufwand ($KRA_{\text{abiotisch}}$) für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4



5.2.1.2 Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential)

Aufgrund der umfangreichen Anzahl an Prozessen in dem Stoffstrommodell wird exemplarisch für die Treibhausgasemissionen in Abbildung 10 eine Einzelprozessanalyse dargestellt. Hierzu werden in der linken Hälfte des Diagramms die Emissionen für das Basisszenario der Holzwirtschaft in Deutschland nach den einzelnen Modulen aufgeschlüsselt. Von der Gesamtsumme von ca. **13 Mio. t CO₂Äq** im Jahr tragen die Zellstoffprodukte (Papier, Pappe) und die Holzwerkstoffe zu 33 % bzw. 26 % die größten Anteile bei. Die Summe aller Verbrennungsprozesse nimmt 12 % ein (dabei handelt es sich ausschließlich um CH₄ und N₂O-Emissionen), die Transporte liegen in der Gesamtsumme bei 16 %.

Nicht in der Darstellung enthalten ist die mögliche temporäre Senkenwirkung der langlebigen Holzprodukte.

Wie sich in den vier Vergleichsoptionen die Ergebnisse verschieben, ist in der rechten Hälfte von Abbildung 10 dargestellt. Die Erhöhung des Anteils an Holzwerkstoffprodukten in den Optionen 1 und 2 (hier Spanplatten durch den zusätzlichen Altholzinput bzw. Umlenkung von Energieholz) führt zu entsprechend höheren Produktionslasten. Option 3 ist in diesem Punkt unverändert, zeigt dagegen eine Erhöhung der Emission durch die Synthese von BtL aus Holz, das nicht mehr der direkten Verbrennung zugeführt wird. Option 4 führt durch den deutlich höheren Durchsatz durch die Sägereien (Verdopplung des dortigen Aufwands) auch über zusätzliche Holzwerkstoffe und insgesamt mehr Transporte zu einer erheblichen Erhöhung der Emission des Gesamtsystems auf 15,7 Mio. t CO₂Äq.

Abbildung 11 zeigt, wie sich die Optionen bei Herstellung von Nutzengleichheit durch Gut- und Lastschriften konsistent im Vergleich darstellen: Alle drei Optionen zeigen eine Verbesserung gegenüber der Basis. Deutlich am besten schneidet dabei Option 4 ab: die Gutschriften übertreffen die Mehremissionen des System plus die Lastschriften, sodass in der Nettosumme gerade noch eine „Restemission“ von 1,7 Mio. t CO₂Äq verbleibt. Das entspricht einer Reduktion gegenüber der Basisoption um über 11 Mio. t. Am zweitbesten schneidet Option 1 (Altholzkaskade) ab, gefolgt von der BtL-Option. Die Einsparungen gegenüber der Basis bewegen sich dabei in einem Bereich von 0,6 bis 1,6 Mio. t CO₂.

Abbildung 10 Ergebnis zu Treibhausgasemissionen (GWP100) für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft in Deutschland im Basisszenario (links) und im Vergleich mit den Optionen 1 bis 4

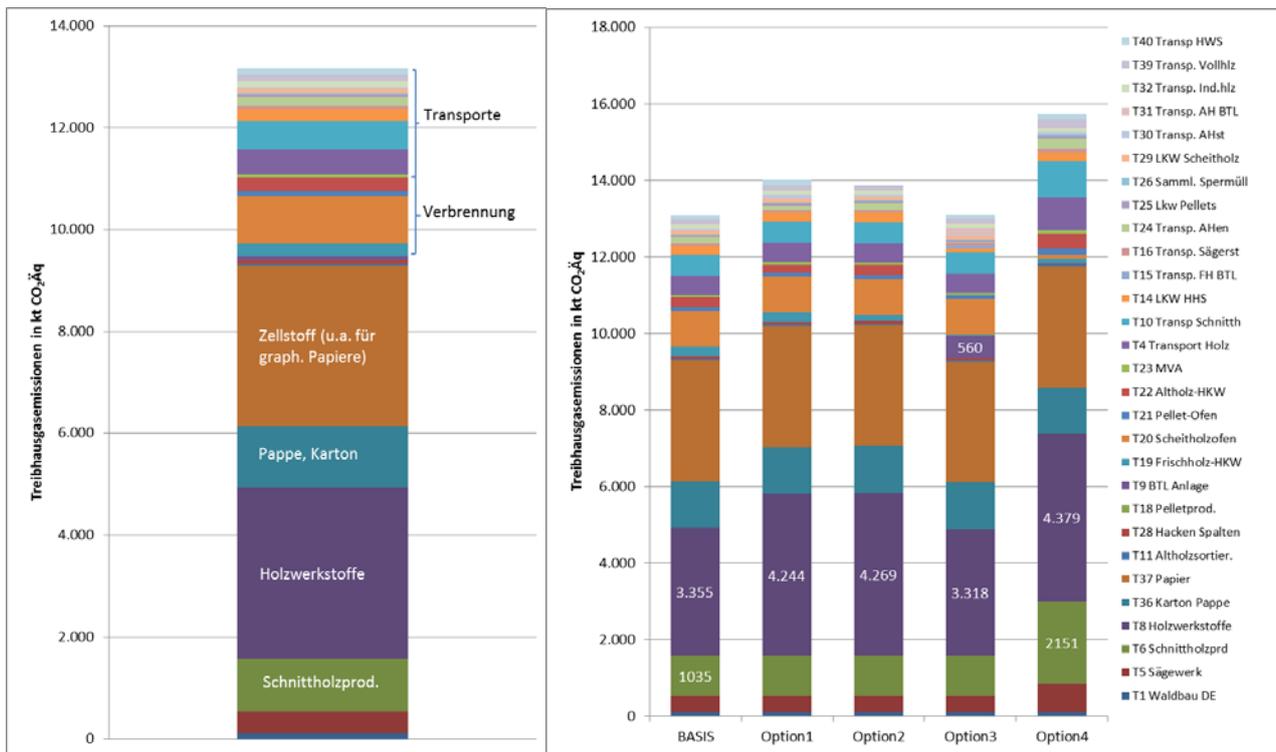
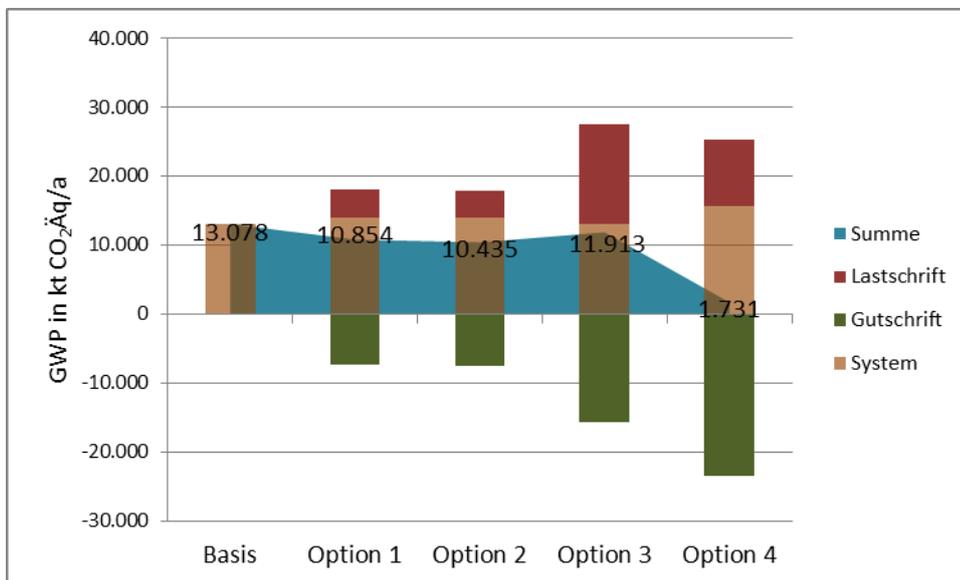


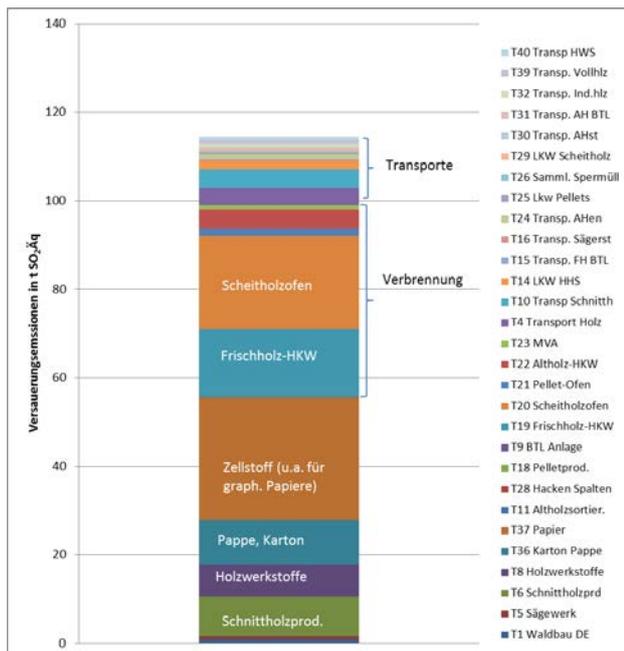
Abbildung 11 Ergebnis zu Treibhausgasemissionen (GWP100) für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4



5.2.1.3 Versauerungspotenzial

Für die Basisoption sei die prozessweise Aufschlüsselung auch für das Versauerungspotenzial (geprägt von SO_2 und NO_x) dargestellt (siehe Abbildung 12). Hier steuern anders als bei den Treibhausgasen die Holzfeuerungen relevante Beiträge zur Gesamtsumme von **115.000 t $\text{CO}_2\text{-Äq}$** im Jahr bei: Scheitholzöfen mit 24 %, Frischholz-HKW mit 13 %. Große Bedeutung hat hier auch die Herstellung der Zellstoffprodukte (33 %).

Abbildung 12 Ergebnis zu Versauerungspotenzial für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft in Deutschland im Basisszenario



In Abbildung 13 ist dargestellt, wie sich die Ergebnisse für die vier Vergleichsoptionen darstellen. Auch hier liegen alle Optionen günstiger als die Basis: Wiederum deutlich am besten die Option 4 mit einer Halbierung der Basissumme (vor allem aufgrund der SO_2 -Gutschriften durch die Stahlsubstitution). Option 1 weist um 9.000, Option 2 um 16.000 t und Option 3 um 2.500 t $\text{SO}_2\text{-Äq}$. weniger gegenüber der Basis auf.

5.2.1.4 Eutrophierungspotenzial

In Abbildung 14 ist das Eutrophierungspotenzial für die Basis und die Vergleichsoptionen dargestellt. Von der Gesamtsumme im Basisszenario von **12.800 t $\text{PO}_4^{3-}\text{-Äq}$** im Jahr ermöglichen die Optionen 1 bis 3 Reduktionen um 700 bis 1.300 t. Option 4 erreicht hier „nur“ eine um 2.100 t verringerte Emission gegenüber der Basis, da die Gutschriften bei NO_x nicht in dem Maße die höheren Systememissionen und Lastschriften überwiegen wie bei anderen Schadstoffen.

Abbildung 13 Ergebnis zum Versauerungspotenzial für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4

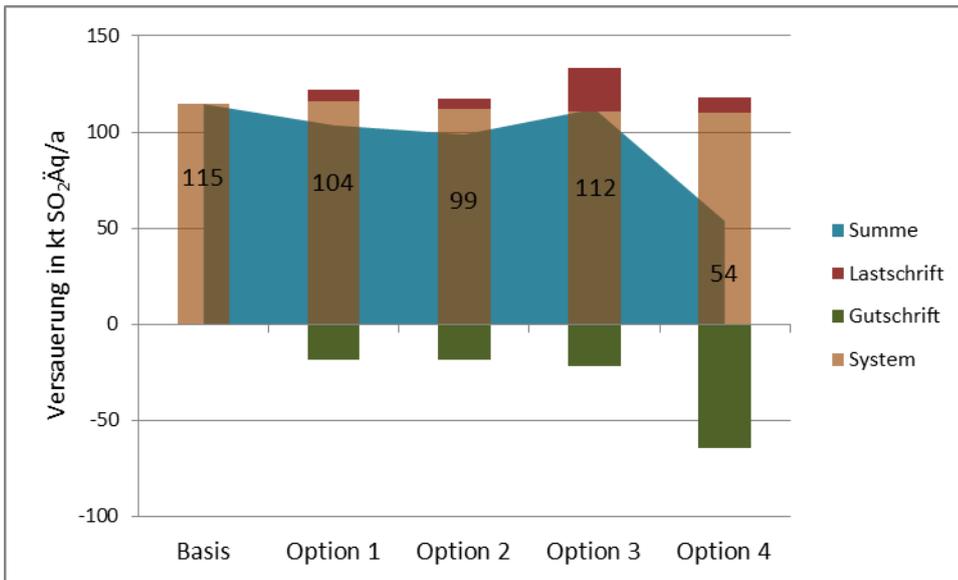
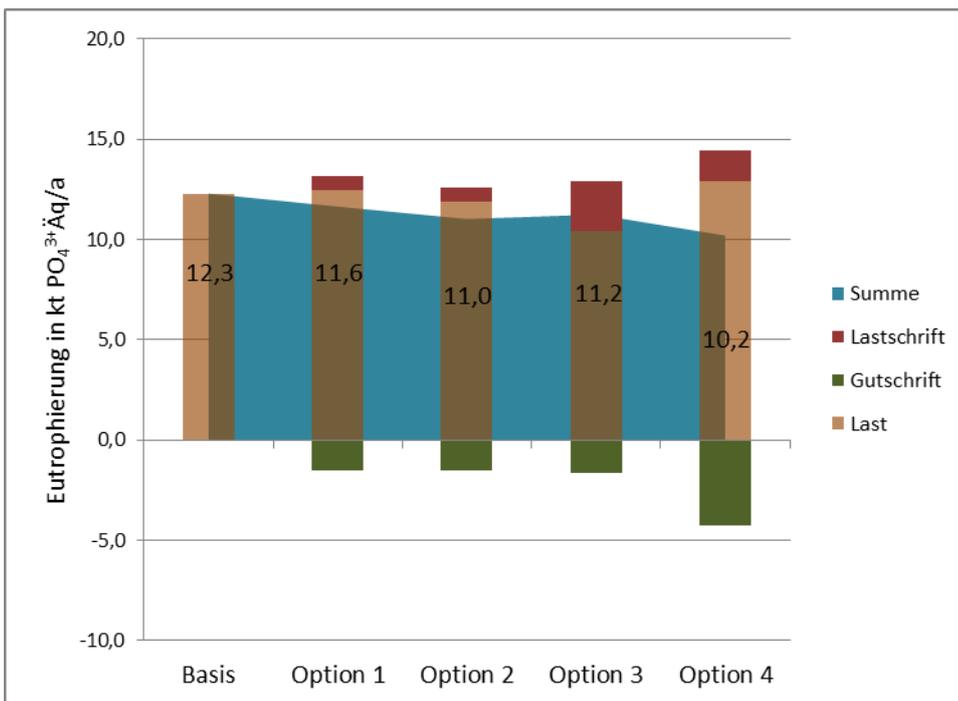


Abbildung 14 Ergebnis zum Eutrophierungspotenzial für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4



5.2.1.5 Stratosphärischer Ozonabbau

Diese Wirkungskategorie ist ausschließlich durch Lachgas (N₂O) geprägt. Das Ergebnis ist hier uneindeutig: Option 1 und 3 liegen ungünstiger als die Basis, Option 2 und 4 weisen dagegen geringere Lasten auf. Die Schwankung begrenzt sich in einem Bereich von minus 8% bis plus 13 %.

5.2.1.6 Photosmog

Beim Photosmog zeigen sich geringe Unterschiede zwischen Basis und den Optionen 1 bis 3. In Option 4 dagegen sind die Emissionen an NMVOC (gasförmige organische Verbindungen ohne Methan) deutlich geringer als in der Basis. Die beruht auf dem Wegfall der Kleinf Feuerung mit Holz, v.a. der Scheitholzfeuerungen.

Abbildung 15 Ergebnis zum stratosphärischen Ozonabbau für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4

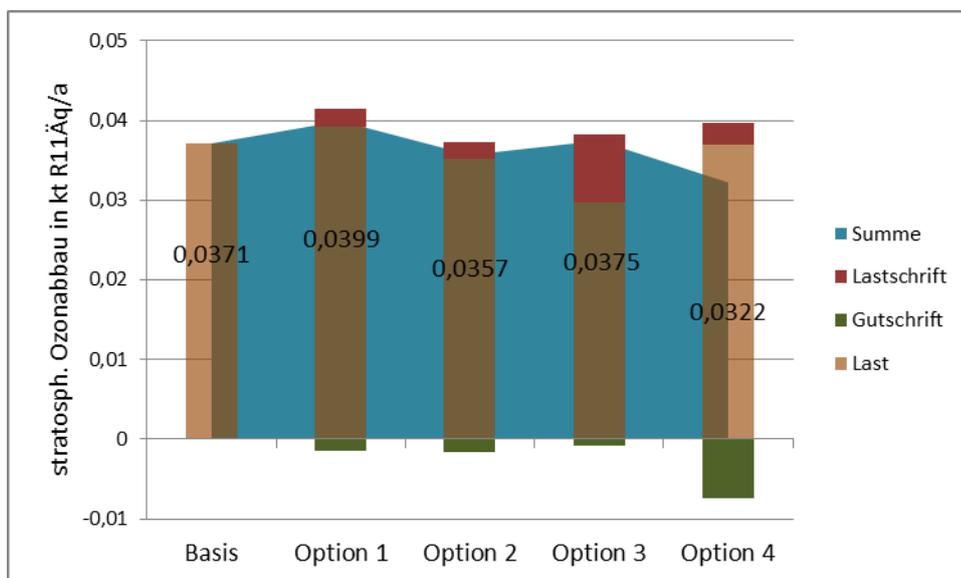
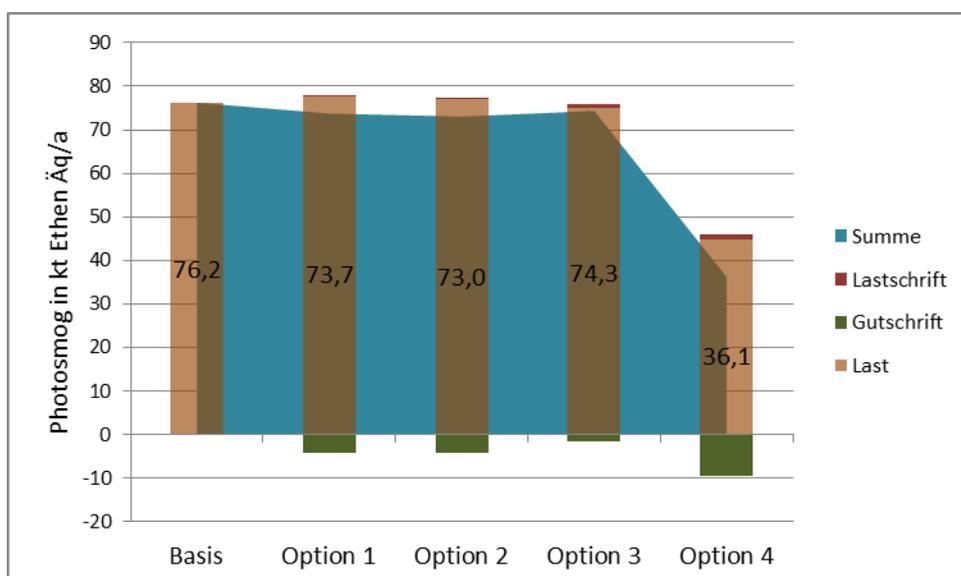


Abbildung 16 Ergebnis zum Photosmog für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4



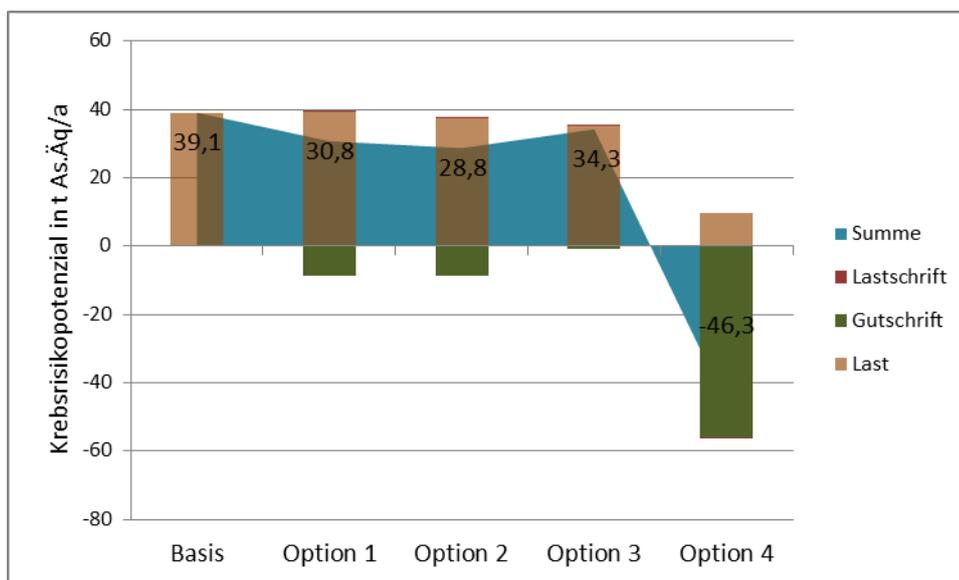
5.2.1.7 Humantoxizität

Krebsrisikopotenzial

Bei diesem Indikator zeigt sich im Prinzip ein ähnliches Muster wie beim Photosmog, wobei die Optionen 1 bis 3 auch bereits deutliche Reduktionen gegenüber der Basis aufweisen, die jedoch eher auf Gutschriften beruhen (Option 1 und 2 für Stahlbleche) als auf Emissionsminderung im System.

In Option 4 dagegen sind auch die Reduktionen im System erheblich, was wiederum auf dem Wegfall der Holzkleinfeuerungen beruht. Hier ist Benzo(a)pyren die relevante Leitsubstanz, deren Beitrag in der Basisoption 80 % an der Gesamtemission ausmacht. Hinzu kommen erhebliche Gutschriften aus der Stahlsubstitution, die dazu führen, dass Option 4, sprich der konsequente Einsatz von Holz als Baustoff gegenüber Stahl zu erheblichen Entlastungen bei der Emission kanzerogener Stoffe (relevant hier v.a. Chrom-VI) führen kann.

Abbildung 17 Ergebnis zum Humantoxizitätsindikator „Krebsrisikopotenzial“ für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basiszenario und die Optionen 1 bis 4



Feinstaub (PM2.5)

Bei Feinstaub ist zu erkennen, dass die Systememissionen gegenüber Gut- und Lastschriften (Ausnahme Gutschrift Option 4) dominieren und eine Erhöhung von Kaskaden (v.a. Option 1 und Option 2) nicht zu Entlastung führen. Abbildung 18 zeigt die einzelnen Emissionsbeiträge aufgeschlüsselt, woraus erkennbar ist: die deutliche Entlastung durch den Wegfall der Holzkleinfeuerungen in Option 4 wird nahezu ausgeglichen durch die die zusätzlichen Transporte und die Emissionen aus der erhöhten Schnittholzproduktion.

In der Gesamtbilanz (siehe Abbildung 19) liegen alle Optionen außer Option 3 dennoch besser als die Basis. In Option 4 wird das Emissions-Gesamtergebnis durch die Gutschrift aus der ersetzten Stahlproduktion nochmals erheblich abgesenkt und beträgt weniger als die Hälfte der Basis.

Abbildung 18 Ergebnis zum Humantoxizitätsindikator „Feinstaub (PM2.5)“ für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft in Deutschland im Basisszenario im Vergleich mit Option 4

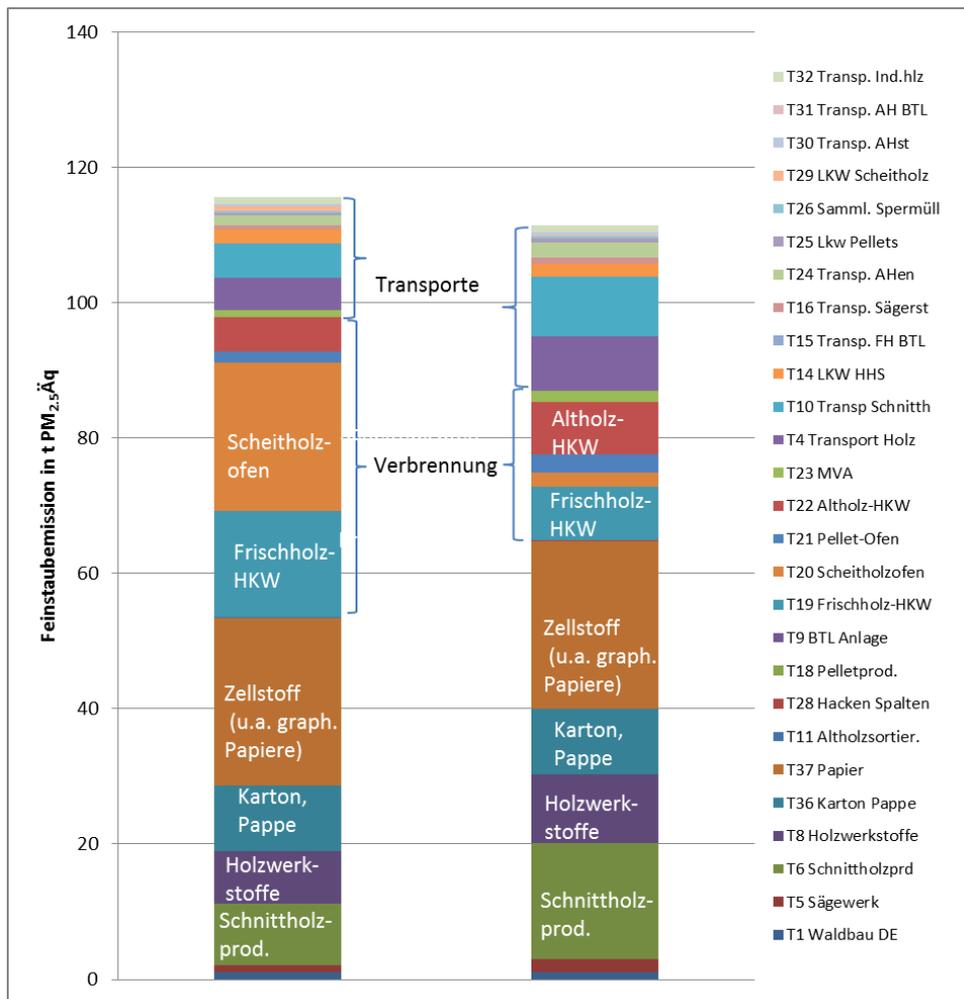
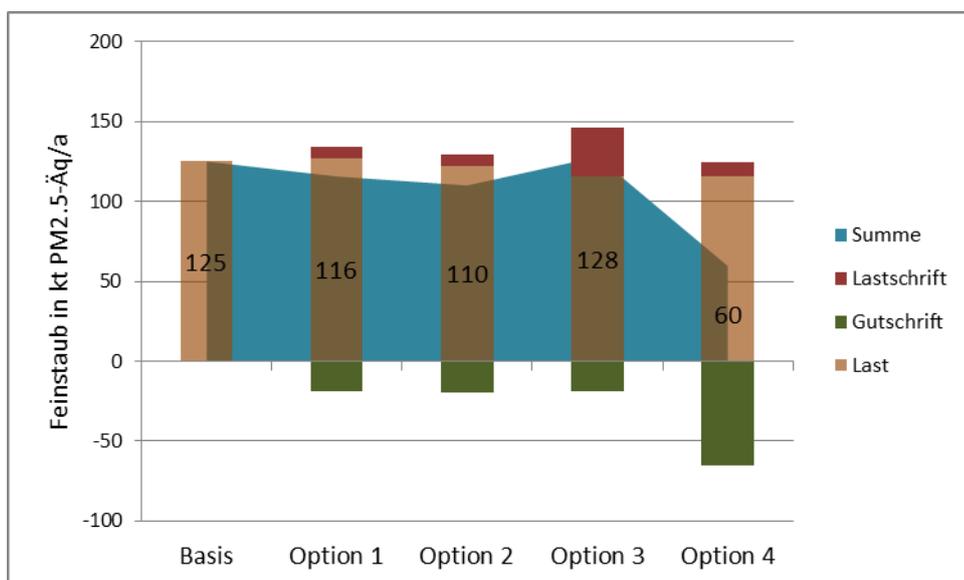


Abbildung 19 Ergebnis zum Humantoxizitätsindikator „Feinstaub (PM2.5)“ für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4



5.2.1.8 Naturrauminanspruchnahme

Die Waldfläche Deutschlands beträgt etwa 11,4 Mio. ha, bzw. 1.140 km² (BMEL 2014). Diese Fläche wird auch im Modell für den Gesamtstoff Holz rechnerisch nachvollzogen. Es ist dabei zu beachten, dass das Modell ausschließlich die genutzte Waldfläche kalkuliert, daher ist es konsistent, wenn die hier errechnete Summe an genutzter Waldfläche bei 11,04 Mio. ha liegt, da nach BMEL (2014) auf ca. 7 % der Waldfläche keine Nutzung erlaubt oder erwartet wird und auf weiteren 5 % die Nutzung nur zu einem Teil zu erwarten ist. In Anbetracht dieser Unwägbarkeiten ist das Ergebnis des Modells als sehr konsistent mit der tatsächlichen Waldbausituation in Deutschland zu werten.

Tabelle 11: Flächeninanspruchnahme – Werte noch an Realflächen anzugleichen.

Hemerobiestufe	Flächencharakter	Fläche unbewertet km ²	Bewertet mit	
			Charakterisierungsfaktor CF	km ² NFP
Fläche Kategorie II	naturnah: Naturnahe Wald, keine Durchforstung	95	0,0313	3,0
Fläche Kategorie III	bedingt naturnah: Standorttypischer Wald mit mäßiger Durchforstung	349	0,0625	21,8
Fläche Kategorie IV	halbnatürlich: Mäßig standorttypischer Wald mit intensiver Durchforstung	469	0,125	58,6
Fläche Kategorie V	bedingt halbnatürlich: Standortfremde Monokulturen, intensive Bewirtschaftung, stoffliche Eingriffe	191	0,25	47,8
Fläche Kategorie VII	<i>nicht-natürlich:</i> <i>Versiegelung, Überbauung, Abbauflächen, Halden, Deponien</i>	0,003	1	0,003
Summe		1.104		131

Wie bereits in Abschnitt 5.2.1.1 zum KRA_{bio} diskutiert, findet in den Optionen 1 bis 4 keine Veränderung mit Blick auf die Waldwirtschaft statt, da die Entnahme an Holz konstant gehalten wird. Nähme man jedoch an, statt der in Option 1 oder 2 durch Kaskadenführung zusätzlich erzeugten Holzwerkstoffe würde in gleicher Höhe Holzwerkstoffe aus Frischholz (Industrieholz) entfallen, würden 2,5 Mio. t Industrieholz im Wald verbleiben. Rein hypothetisch und in grober Vereinfachung der komplexen Waldbauszusammenhänge könnte dies der Stilllegung einer Produktionsfläche von knapp 40 km² (0,4 Mio. ha) entsprechen.

5.2.2 Normierung und Rangbildung

In Tabelle 12 werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung normiert in Einwohnerdurchschnittswerte (EDW). Hierzu wurden die Summenwerte aus Tabelle 10 durch die durchschnittlichen pro-Kopf-Werte aus Tabelle 1 dividiert. Die Zahlen in Tabelle 12 drücken somit aus, welchen Anteil die Holzwirtschaft an der Gesamtlast in Deutschland einnimmt. Der Wert von 1,1 Mio. EDW beim Treibhauseffekt bedeutet angesichts einer Einwohnerzahl von 80,5 Mio. einen Anteil von 1,4 % der gesamten Klimagasemission.

Sehr hohe Werte erzielt die Holzwirtschaft erwartungsgemäß beim biogenen KRA mit 23 Mio. EDW, also etwa 28 % der gesamten Leistung in Deutschland in diesem Indikator. Sehr hoch sind außerdem die Werte durch Sommersmog, was auf die Bedeutung der NMVOC-Emissionen bei der Holzfeuerung schließen lässt.

Tabelle 12: Ergebnis der Ökobilanz normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW

Wirkungskategorie	Basis	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Ressourcenbeanspruchung					
KEA nicht erneuerbar	1.300.000	1.300.000	1.200.000	1.400.000	630.000
KRA bio	23.000.000	23.000.000	23.000.000	23.000.000	23.000.000
KRA abiotisch	700	-800	-860	990	-6.000
Treibhauseffekt	1.100.000	930.000	900.000	1.000.000	150.000
Versauerung	3.600.000	3.300.000	3.100.000	3.600.000	1.700.000
Eutrophierung	2.400.000	2.300.000	2.200.000	2.200.000	2.000.000
Stratosphär. Ozonabbau	890.000	960.000	860.000	900.000	780.000
Photo-Smog	12.000.000	12.000.000	12.000.000	12.000.000	5.800.000
Humantoxizität:					
Krebsrisikopotenzial	4.500.000	3.600.000	3.300.000	4.000.000	-5.400.000
Feinstaub (PM _{2,5})	5.200.000	4.800.000	4.600.000	5.300.000	2.500.000

Abbildung 20 zeigt die normierten Unterschiede der Optionen gegenüber dem Basisszenario. Diese liegen bei Option deutlich am höchsten, vor allem beim Krebsrisikopotenzial (ca. 10 Mio. EDW geringer als Basis), Photo-Smog (6,5 Mio. EDW weniger) und Feinstaub (2,7 Mio. EDW weniger). Insgesamt zeigt sich Option 4 als eine erhebliche Verbesserung der Gesamtumweltlasten.

Abbildung 21 beschränkt sich auf die Optionen 1 bis 3, um auf kleinerer Skalierung die Unterschiede plastischer darzustellen. Darin ist zu erkennen, dass alle Optionen überwiegend klare Vorteile gegenüber der Basis aufweisen. Einzig Option 3 (die „BtL“-Option) ist hier stärker ambivalent als die anderen Optionen mit Nachteilen beim KEA, dem stratosphärischen Ozonabbau und den Feinstaubemissionen. Hier zeichnet sich zumindest kein eindeutiges Ergebnis zu Gunsten der Option ab.

Abbildung 20 Unterschiede der Optionen 1 bis 4 gegenüber der Basis normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – negative Werte bedeutet Vorteil für die Option.

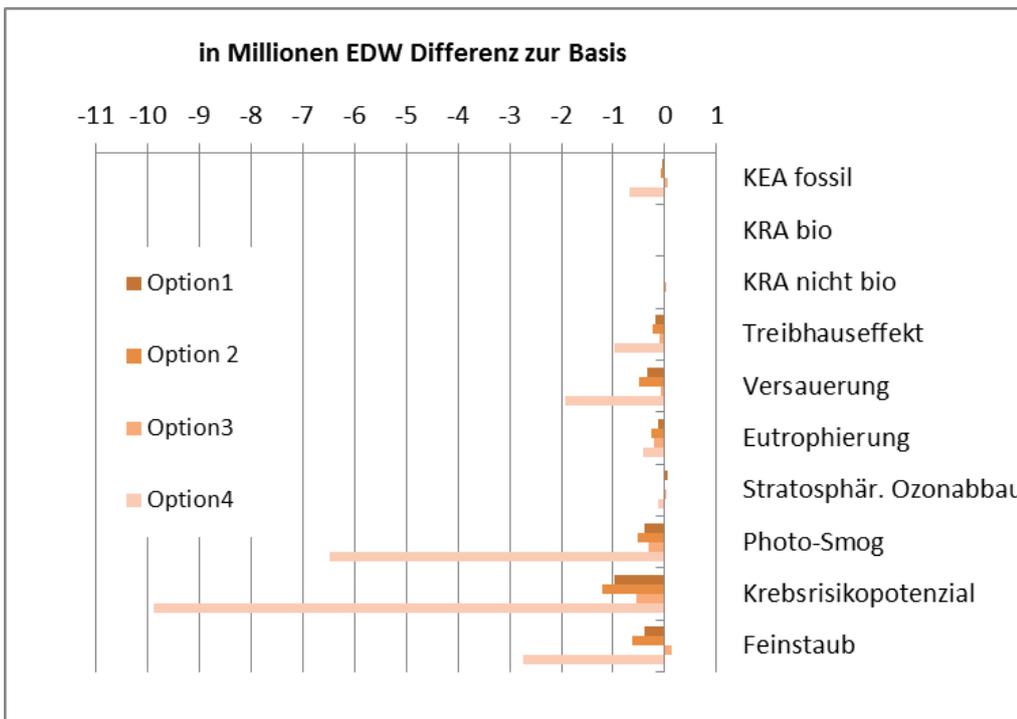
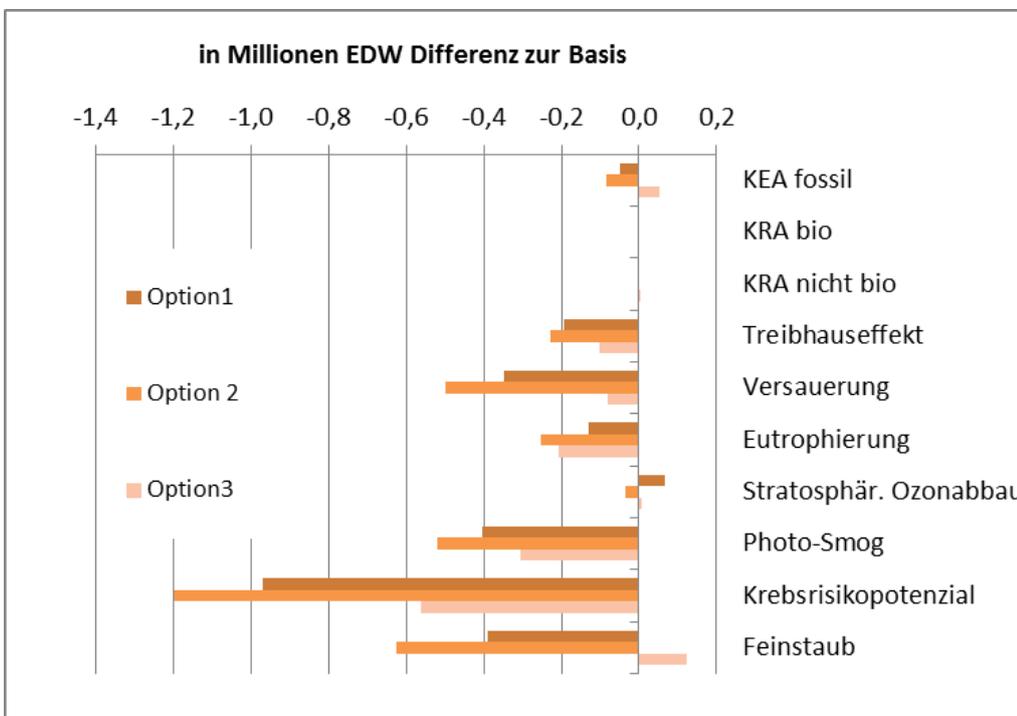


Abbildung 21 Unterschiede der Optionen 1 bis 3 gegenüber der Basis normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – negative Werte bedeutet Vorteil für die Option.



5.2.3 Kaskadenbezogene Bewertung

Im Gesamtergebnis zeigt sich, dass alle Optionen zu ökologischen Verbesserungen gegenüber der Basis führen. Die größten Verbesserungspotenziale weist dabei die Option 4 auf, die vollständige Umlenkung der energetischen Nutzung von Frischholz in eine stoffliche Nutzung, die das Gesamtvolumen der Kaskadennutzung damit in beträchtlicher Weise erhöht. Dieses „Extrem“-Szenario zeigt damit in gewisser Weise das Potenzial auf, welches eine Maximierung der stofflichen Holznutzung beinhalten kann. Eine nur partielle Umsetzung dieses Ansatzes führt somit immerhin noch entsprechende, ggf. erhebliche ökologische Vorteile mit sich.

Option 2 stellt in gewisser Weise eine partielle – und damit eher „realistische“ - Umsetzung von Option 4 dar, die sich auf eine Ausweitung von Holzwerkstoffen auf Basis umgelenkten Energieholzes beschränkt. Auch diese Option ist gegenüber dem Basisszenario in allen Wirkungskategorien im Vorteil.

In der Tendenz liegt Option 2 auch knapp vor Option 3 (Altholz verstärkt in die stoffliche Kaskade umlenken), wobei beide Optionen von der gleichen Steigerung an erzeugten Holzwerkstoffen ausgehen, nur dass in Option 1 diese Steigerung durch Altholz beliefert wird, in Option mit Energieholz.

Option 3 (Energieholz zu BtL) dagegen zeigt insgesamt keinen eindeutigen Gesamtvorteil gegenüber der Basis. Sie drängt sich daher nicht zur ökologischen Verbesserung noch zur Erhöhung der Ressourceneffizienz auf. Sofern es jedoch andere Gründe außerhalb der reinen ökobilanziellen Betrachtung geben sollte (Versorgung mit Kraftstoffen oder Basischemikalien), wäre diese Option nicht gegenüber den gegebenen Nutzungsverhältnissen im Nachteil.

Eine Verbesserung der Umweltbilanz ist jedoch nur mit Maßnahmen, wie sie in den Optionen 1, 2 und 4 dargestellt sind, zu erreichen.

5.3 Fazit

Die Kaskadennutzung von Holz führt insbesondere dann in hohem Maße zu Ressourceneinsparungen, wenn bereits auf der ersten Ebene die stofflich hochwertige Nutzung einen hohen Anteil ausmacht. Dies ermöglicht im ersten Schritt bereits einen Substitutionseffekt auf hohem Niveau mit hohen Einsparungen an Ressourcenverbrauch und Emissionen. Realisierbare Potenziale bieten sich im Bausektor. Ein verstärkter Holzeinsatz dort müsste jedoch mit anspruchsvollen Anforderungen an das Produktdesign einhergehen, was insbesondere die spätere hochwertige Recyclingfähigkeit betrifft.

Insgesamt zeigen sich für das Prinzip einer möglichst mehrfach hintereinander folgenden Nutzung des Holzmassenstroms eher geringe Ressourcenvorteile im Gesamtsystem dar, zumal hier die Produktsegmente keine größeren weiteren Potenziale anbieten. Eine Ausweitung von Holzwerkstoffen zur Verdrängung von Gipskartonplatten weist umweltseitig keinen Nutzen auf. Die Kaskadenstufen auf niedrigeren Wertschöpfungsniveaus zeigen sich daher nur in begrenztem Umfang als ausbauwürdig zum Erzielen zusätzlicher positiver Umwelteffekt.

Dagegen führt eine Verschiebung von derzeit direkt energetisch genutztem Frischholz zu verstärkter stofflicher Nutzung zu deutlichen Vorteilen in allen Wirkungskategorien, zumal in der Summe das Potenzial an energetisch nutzbarem Holz am Ende kaum geringer ausfällt, dafür aber die Nutzung über industrielle Anlagen (HKW) gegenüber dem derzeit großen Anteil für Hauswärme effizienter ausfällt. Nebenbei ergäbe sich dadurch eine erhebliche Reduktionsminderung an humantoxischen Emissionen.

6 Papierkaskaden

Anders als bei Holz, welches zu einem hohen Prozentanteil direkt als aus dem Wald entnommener Rohstoff energetisch genutzt wird, stellt Papier stets immer eine stoffliche Nutzung dar. Gemäß der im Rahmen dieses Projekts formulierten Definition ist Papierproduktion damit vom Prinzip her immer Teil einer Kaskadennutzung. Hier stellt sich vielmehr die Frage, in welchem Ausmaß die Kaskadennutzung durchgeführt werden kann und welcher Umweltnutzen daraus zu ziehen ist.

Der realisierte Umfang der Kaskadennutzung von Papier ist bereits sehr hoch. Nach Angaben des VDP (2016) beläuft sich der Recycling-Anteil im Gesamtproduktionsvolumen Papier-Pappe-Karton auf 74 %. Nicht darin enthalten sind die im Sinne einer Kaskadennutzung weiteren Verwertungspotenziale außerhalb der PPK-Branche, z.B. im Baustoffsektor (Isoliermaterial etc.).

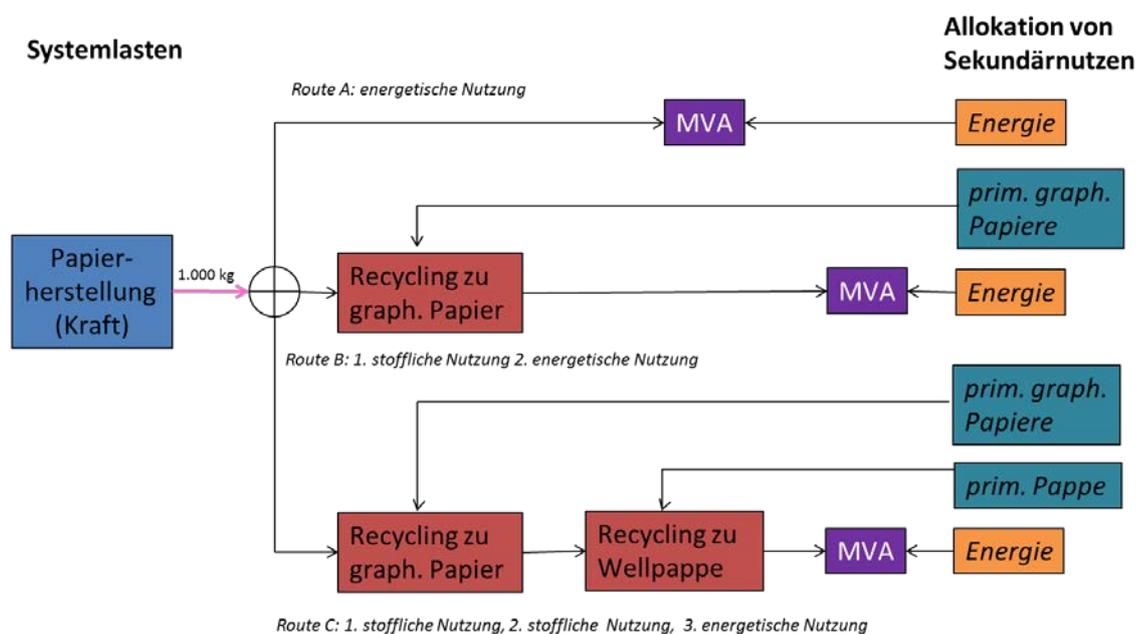
6.1 Beschreibung der Szenarien

6.1.1 Vorgehen bei der Modellierung

Die Möglichkeiten der Papierkaskade werden anhand einer modularen Herangehensweise untersucht. Im Gegensatz zu der in Kapitel 5 beschriebenen Holzkaskade wird bei der Modellierung der Papierkaskade, wie auch bei den nachfolgenden Untersuchungsbeispielen nicht der gesamte Markt des Stoffstroms (hier der Zellstoff- und Papiermarkt) abgebildet. Gerade weil in diesem Sektor die Kaskadennutzung über das etablierte Recycling sehr gut umgesetzt ist, sind weitere Potenziale im Gesamtmarkt hier nur noch begrenzt erschließbar. Daher empfiehlt es sich hier eher anhand von konkreten Kaskadenlinien (einstufig bis mehrstufig) deren jeweilige Umweltbilanz und damit die Vermehrung von Kaskaden an konkreten Beispielen zu bewerten.

Zu diesem Zwecke werden die Systeme modular zusammengesetzt, was eine „baukastenartige“ Kombination von Kaskadenstufen auf effiziente Weise ermöglichen soll. Abbildung 22 zeigt die vorgesehene Vorgehensweise bei der Ökobilanzmodellierung für die Papierkaskade.

Abbildung 22 Modulstruktur für die Ökobilanzmodellierung der Papierkaskaden



Ausgangspunkt ist jeweils die Produktion von Kraftpapier aus Primärfasern. Route A beschreibt eine nachfolgende, ausschließlich energetische Nutzung. Route B ergänzt die Kaskade um eine stoffliche Nutzung in Gestalt von Recyclingpapier. Die Kaskade der Route C ist um eine weitere stoffliche Nutzung in Form von Wellpappe erweitert.

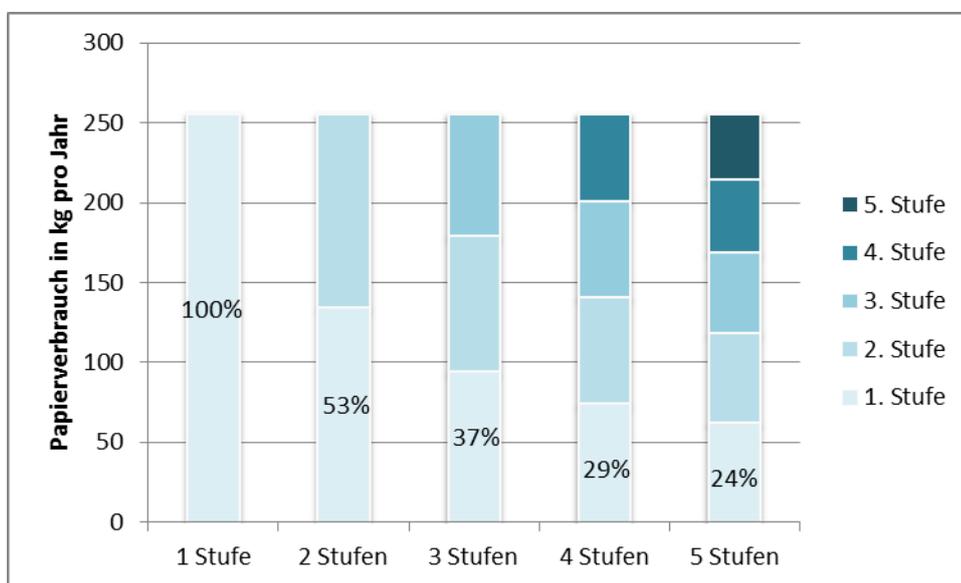
6.1.2 Annahmen und Systemgrenzen

Die folgenden Annahmen liegen der Bilanzierung zugrunde:

- ▶ **Funktionelle Einheit:** Es wird die Herstellung und Weiterverwertung eines Kilogramm Kraftpapier aus Primärfaser untersucht.
- ▶ **Systemgrenzen:** Die Ökobilanz umfasst alle wesentlichen Lebenswegabschnitte „von der Wiege bis zur Bahre“, d.h. von der Herstellung der Faser inklusive Holzanbau und –ernte über die Papierherstellung und Recyclingprozesse bis zur endgültigen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen. Die jeweiligen Nutzungsphasen sind nicht berücksichtigt.
- ▶ **Geographischer Bezug:** die Produktion des Primärpapiers sowie des Recyclingpapiers und der Recyclingpappe erfolgt in Europa. Die thermische Verwertung erfolgt in Deutschland.
- ▶ **Referenzsysteme:** für jede stoffliche Nutzung nach der des Primärpapiers wird die Produktion von Primärpapier gutgeschrieben. Dem Massen- und Qualitätsverlust beim Recyclingprozess wird durch Anwendung eines Substitutionsfaktors von 0,9 Rechnung getragen. Die Energiegewinnung in der Müllverbrennungsanlage wird durch eine Gutschrift deutscher Elektrizität und Wärmeenergie abgebildet.

Wie oben erwähnt, stellen diese Szenarien Konstrukte dar, die die reale komplexe Verflechtung der Altpapierströme nicht abbilden. Setzt man den Substitutionsfaktor von 0,9 über die mehrfachen Stufen hinweg an, so würde die dreifache Kaskade (Option 3) für den Gesamtmix eine Mischung aus 63 % Recycling- und 37 % Frischzellstoffprodukten bedeuten. Mit diesem Ansatz erreicht man die von VDP (2016) berichtete Recyclingquote von 74 % mit fünf Stufen (siehe Abbildung 27)

Abbildung 23 Schematisch abgeleitete Anteile an Frischzellstoff in der Gesamtheit der PPK-Produkte in Abhängigkeit der Anzahl an Recyclingstufen; Annahme: einheitlicher Substitutionsfaktor von 0,9 über alle Stufen; skaliert auf einen pro-Kopf-Verbrauch von 250 kg Papier.



6.2 Ergebnisse der Ökobilanz zu Papierkaskaden

6.2.1 Wirkungsabschätzung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse auf der Ebene der einzelnen Wirkungskategorien (siehe Tabelle 1) dargestellt. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden dann die Wirkungskategorien im Einzelnen diskutiert.

In der Zeile „Systemlast“ von Tabelle 13 sind die Aufwendungen für die Herstellung von Papier, dessen Recycling und Verbrennung zusammengefasst. In der Zeile „Gutschrift“ werden die Gutschriften zusammengefasst, die sich über die stoffliche energetische Verwertung von gesammeltem Altpapier ergeben. Die Zeile „Gesamt“ enthält die Summen über die beiden Zeilen.

Tabelle 13 Ergebnis der Wirkungsabschätzung für die Papierkaskade

Wirkungskategorie	Einheit bezogen auf 1 t Papier (1. Stufe)		Option 1: Direktverbrennung (1 stufige Kaskade)	Option 2: 2stufige Kaskade	Option 3: 3stufige Kaskade
Ressourcen (KEA _{fossil+nukl.})	GJ	Systemlast	24,7	39,1	53,0
		Gutschrift	-12,1	-34,4	-56,6
		Gesamt	12,5	4,8	-3,5
KRA abiotisch	kg	Systemlast	238	777	1467
		Gutschrift	-355	-557	-760
		Gesamt	-117	220	707
KRA biotisch	kg	Systemlast	4.867	4.867	5.840
		Gutschrift	0	-4.380	-8.761
		Gesamt	4.867	487	-2.921
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -Äq.	Systemlast	1.468	2.298	3.159
		Gutschrift	-723	-2.043	-3.362
		Gesamt	745	255	-203
Versauerung	kg SO ₂ -Äq.	Systemlast	8,29	12,5	15,2
		Gutschrift	-1,91	-8,80	-15,7
		Gesamt	6,38	3,67	-0,50
Eutrophierung, terr.	kg PO ₄ ³⁺ -Äq.	Systemlast	5,37	9,09	11,6
		Gutschrift	-0,15	-4,88	-9,62
		Gesamt	5,22	4,20	2,01
Strat. Ozonabbau	g FCKW-Äq.	Systemlast	0,195	0,330	0,425
		Gutschrift	-0,534	-0,701	-0,868
		Gesamt	-0,339	-0,371	-0,443
Photo-Smog	kg Ethen-Äq.	Systemlast	0,84	1,02	1,19
		Gutschrift	-0,71	-1,04	-1,36
		Gesamt	0,13	-0,02	-0,17
Feinstaub	kg PM2.5-Äq.	Systemlast	5,05	6,51	7,55
		Gutschrift	-0,11	-3,99	-7,88
		Gesamt	4,94	2,51	-0,33
Naturraum (bewertet)	m ² *a NFP	Systemlast	549	708	835
		Gutschrift	-0,1	-495	-989
		Gesamt	549	213	-154

6.2.1.1 Ressourcenbeanspruchung

Nicht erneuerbare Energieressourcen (KEA fossil und nuklear)

Wird Papier nach der Nutzung vollständig der energetischen Verwertung zugeführt (Option1), so lässt sich durch Substitution nicht erneuerbarer Energieträger etwa die Hälfte an der für die Produktion eingesetzten Primärenergie „zurückgewinnen“. Es bleibt im Saldo eine Zusatzlast von 12,5 GJ pro Tonne Papier

Bei der zweistufigen Kaskade (Option 2) mit Einsatz des Altpapiers zur Herstellung von graphischem Recyclingpapier und energetischer Verwertung nach zweiter Nutzungsphase ist die Gesamtlast wie auch Gutschrift natürlich höher. Im Saldo verbleiben mit insgesamt 4,8 GJ/t bei 12 % der Gesamtlast.

Die dreiestufige Kaskade (Option 3) führt dann bereits zu einem negativen Saldo von -3,5 GJ/t, d.h. die Summe der Gutschriften ist höher als die Summe der Lasten.

Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)

Mit umgekehrter Rangfolge dagegen zeigt sich das Ergebnis beim abiotischen kumulierten Rohstoffaufwand ($KRA_{abiot.}$): Hier ist der Rohstoffverbrauch größer mit zunehmender Kaskadenführung, da die Herstellung von graphischem Recycling-Papier und Recycling-Pappe einen höheren Verbrauch vor allem an mineralischen Rohstoffen mit sich führt.

Bei KRA_{bio} zeigt wiederum deutlich der Einspareffekt von Biomasse-Rohstoff durch die Kaskade, je häufiger, desto höher.

6.2.1.2 Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential)

Das Bild bei den Treibhausgasemissionen ähnelt erwartungsgemäß dem der nicht erneuerbarer Energieträger: Bei der direkten energetischen Verwertung von Altpapier wird die Emissionslast auf 750 kg CO_2 -Äq/t halbiert durch die Energiegutschrift, bei der doppelten Kaskaden die Nettoemission noch bei 260 kg CO_2 -Äq/t, bei der dreifachen Kaskade liegt der Saldo mit -203 kg CO_2 -Äq/t unter der Nulllinie.

6.2.1.3 Versauerungspotenzial

Bei der Versauerung fällt die Gutschrift der energetischen Nutzung in Relation zur Systemlast der Papierproduktion deutlich geringer aus, die Nettolast wird um knapp ein Viertel auf 6,4 kg SO_2 -Äq./Tonne Papier reduziert. In der zweifachen Kaskade führt dann die zusätzliche Gutschrift für graphisches Papier zu einem Nettowert von 3,7 kg SO_2 -Äq./t. In der dreifachen Kaskade wird dann ein „Nullwert“ (-0,5 kg SO_2 -Äq./t) erreicht.

Abbildung 24 Ergebnisse für die Papierkaskade zu nicht erneuerbaren Ressourcen ($KEA_{\text{fossil+nuklear}}$) (oben), nicht erneuerbarer KRA (Mitte) und erneuerbarer KRA (unten)

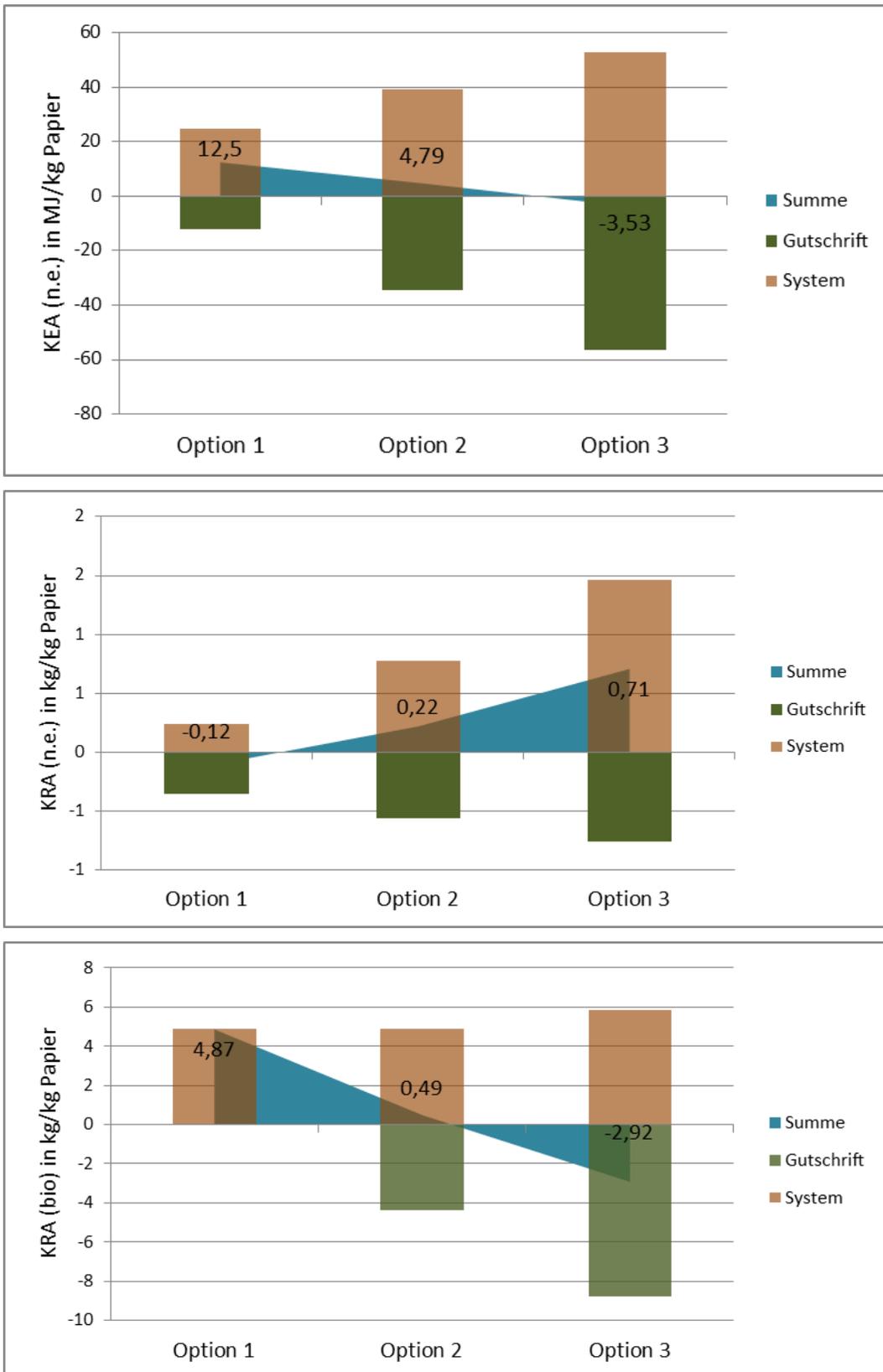
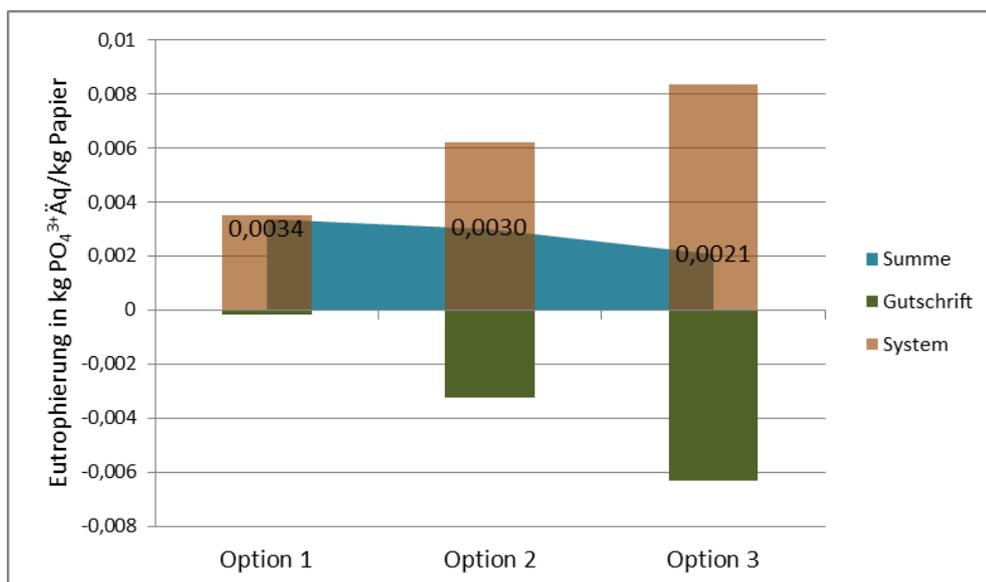
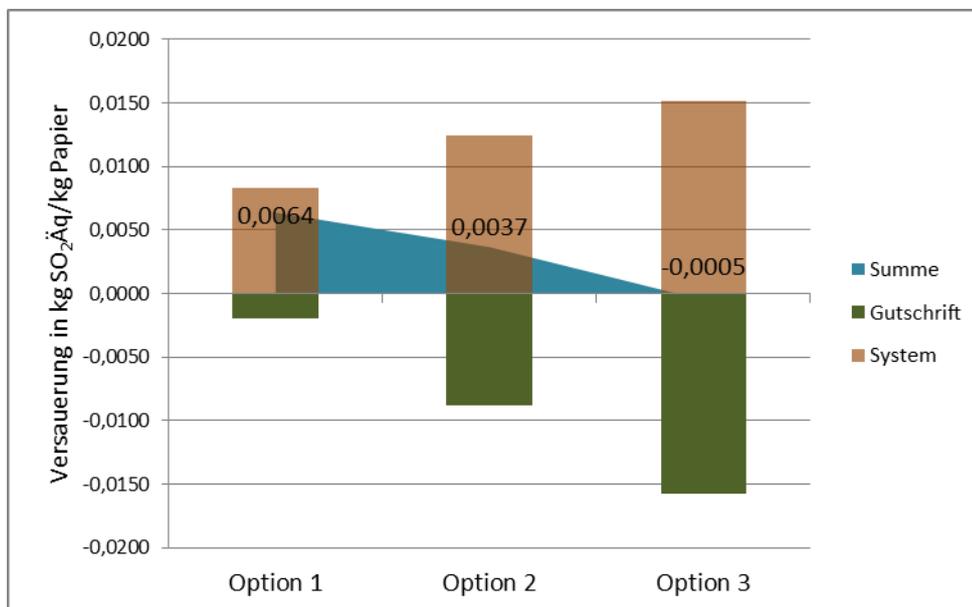
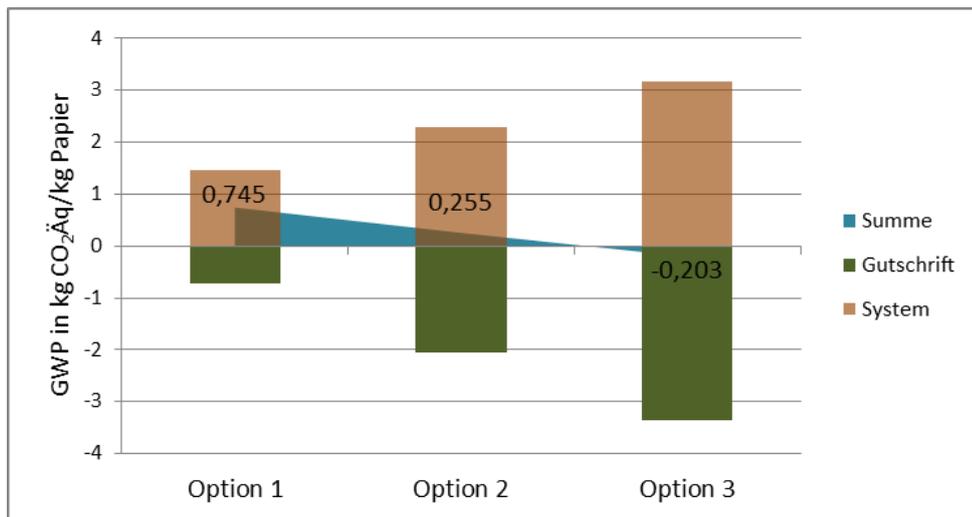


Abbildung 25 Ergebnisse für die Papierkaskade zum Treibhausgasemissionen (oben), Versauerungspotenzial (Mitte) und Eutrophierungspotenzial (unten)



6.2.1.4 Eutrophierungspotenzial

Bei der Eutrophierung zeigt sich noch deutlicher als bei der Versauerung die vergleichsweise geringe Gutschrift durch die energetische Nutzung. Die Nettolast von Option 1 liegt daher mit 3,4 kg PO_4^{3-} -Äq./Tonne Papier nicht nennenswert niedriger als die Systemlast.

Option 2 dagegen weist im Saldo mit 3,0 kg PO_4^{3-} -Äq./t ein etwas besseres Ergebnis auf. Noch besser ist Option 3, die jedoch mit 2,1 kg PO_4^{3-} -Äq./t immer noch eine zusätzliche Nettolast verursacht.

Grund dafür, dass in dieser Wirkungskategorie im Vergleich höhere Lasten anfallen, liegt in der Hauptsache an den hohen Phosphatfrachten der Papierproduktion. Da diese auch beim Recycling-Prozess anfallen, führt die Kaskadennutzung hier nicht zu den starken Entlastungen, wie es bei den meisten anderen Wirkungskategorien zu beobachten ist.

6.2.1.5 Stratosphärischer Ozonabbau

Beim stratosphärischen Ozonabbau führen dagegen alle Optionen zu einer Nettoentlastung: Option 1 zu -0,34 g R11-Äq., Option 2 zu -0,37 g R11-Äq. und Option 3 zu -0,44 g R11-Äq. pro Tonne Papier. Diese Ergebnisse sind geprägt von den vergleichsweise hohen N_2O -Emissionen bei der Verbrennung gegenüber geringeren Emissionen dieses Stoffs bei der Papierproduktion bzw. dem Recycling.

6.2.1.6 Photo-Smog

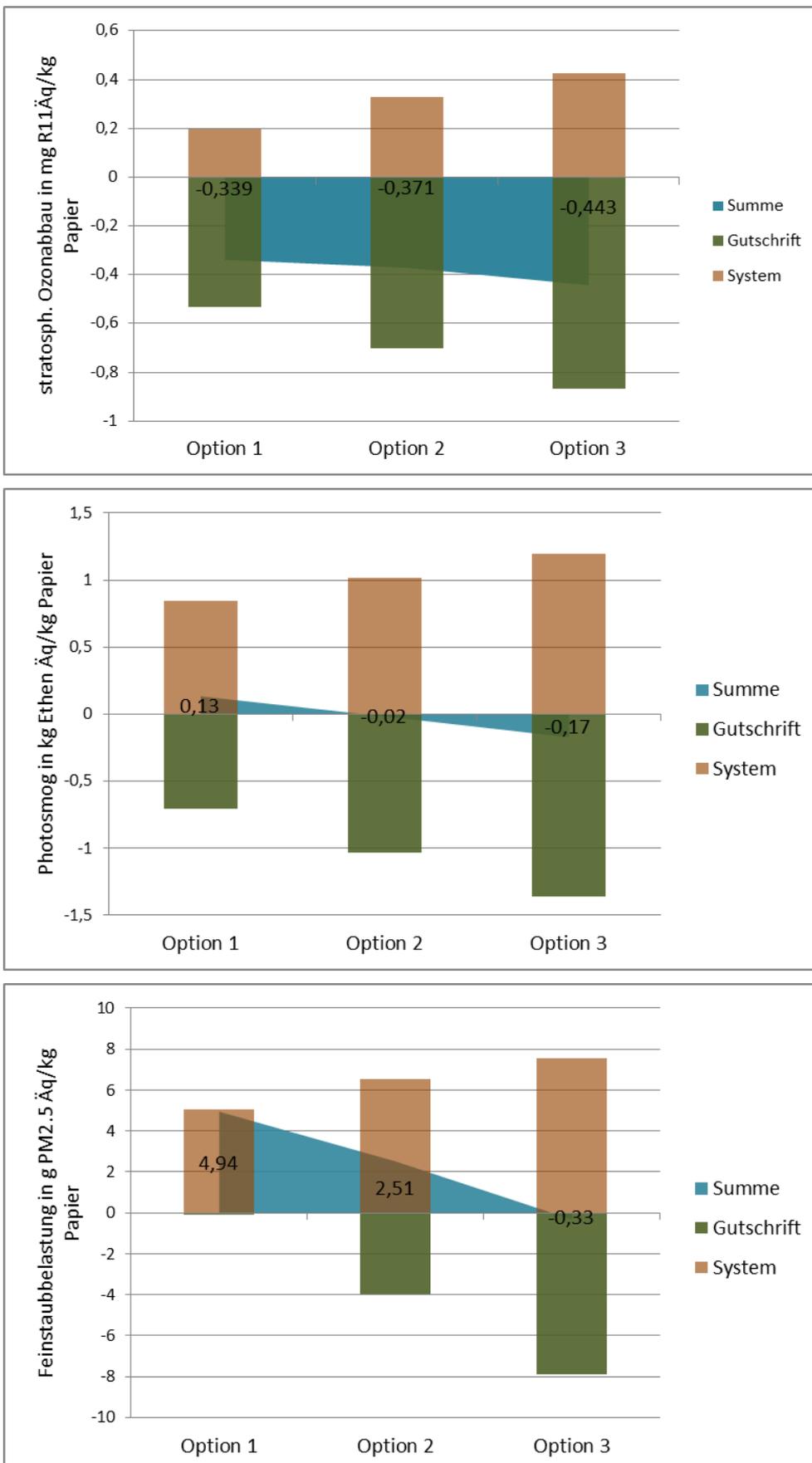
Beim Photo-Smog wiederum gleichen sich Lasten und Gutschriften über alle Optionen in etwa aus. Die Reihenfolge im Ergebnis ist hier jedoch gleich wie in den anderen Kategorien: mit einer (vergleichsweise kleinen) Nettobelastung bei Option 1 von 130 g Ethen-Äq. gegenüber 840 g Ethen-Äq. bei der Last der Verbrennung und Nettoentlastungen von -20 g Ethen-Äq. bei Option 2 und -170 g Ethen-Äq. pro Tonne Papier bei Option 3.

6.2.1.7 Humantoxizität

Bei Feinstaub ist zu erkennen, dass die energetische Nutzung von Papier gegenüber der vorherigen Papierherstellung sehr geringe Gutschriften erbringt: Systemlast Option 1: 5,1 g $\text{PM}_{2.5}$ -Äq. gegenüber Gutschrift Option 1: -0,1 g $\text{PM}_{2.5}$ -Äq. pro Tonne Papier.

Dagegen werden bei Option 2 durch die doppelte Kaskade im Saldo mit 2,5 g $\text{PM}_{2.5}$ -Äq. pro Tonne Papier bereits deutlich weniger Feinstaubemissionen verursacht. In Option 3 heben sich Lasten und Gutschriften schließlich gegenseitig auf. Die verbleibende Nettolast beträgt 0,3 g $\text{PM}_{2.5}$ -Äq. pro Tonne Papier.

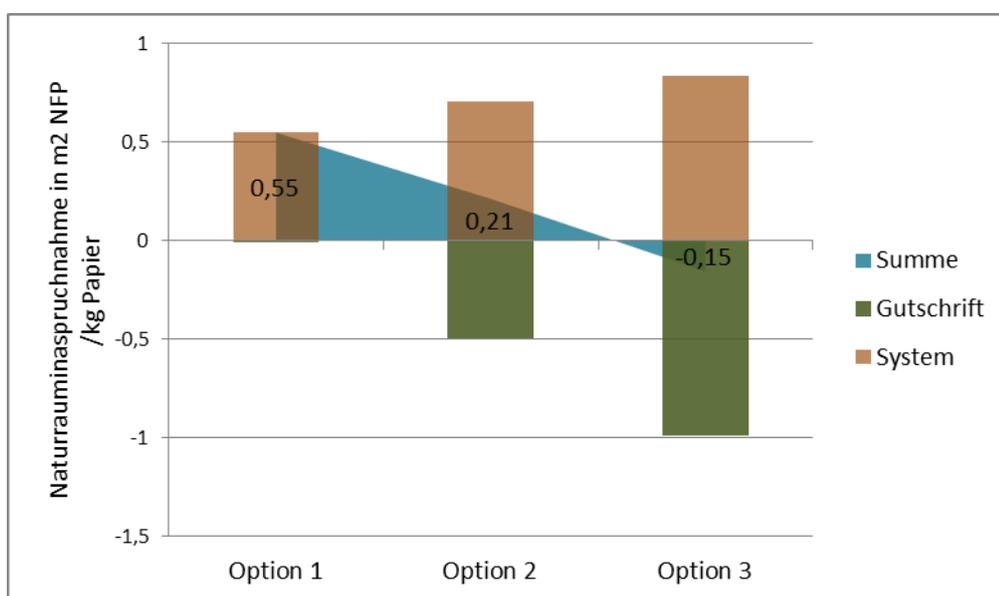
Abbildung 26 Ergebnisse für die Papierkaskade zum stratosphärischen Ozonabbau (oben), Photo-Smog (Mitte) und zur Feinstaubbelastung (unten)



6.2.1.8 Naturrauminanspruchnahme

Der Flächenbedarf an Wald zur Herstellung von 1 Tonne Kraft-Papier beträgt 4,6 m². Alle übrigen Prozesse in den bilanzierten Systemen liegen in der Flächeninanspruchnahme um Größenordnungen niedriger. Dementsprechend werden die Ergebnisse für alle Optionen durch den Anteil an benötigter bzw. eingesparter Fläche an Wald zur Zellstoffproduktion bestimmt. 4,6 m² beträgt damit auch das Ergebnis im unbewerteten Flächenverbrauch für Option 1. Verwendet man die Charakterisierungsfaktoren zur Bewertung der Naturferne der Flächen (siehe Tabelle 11) und unterstellt man hier für die Zellstoffproduktion vereinfacht den gleichen Hemerobiezustand der Waldfläche wie im Kapitel zur Holzkaskade angesetzt⁶, so entspricht 1 m² Wald einem charakterisierten Wirkungswert von 0,119 m² *a NFP. Die bewertete Flächenbilanz ist in Abbildung 27 dargestellt. Bemerkenswert ist dabei, dass sich bereits mit dreifacher Kaskade eine Nettoeinsparung an Fläche ergibt.

Abbildung 27 Ergebnis zur Naturrauminanspruchnahme für die Papierkaskade



6.2.2 Normierung und Rangbildung

In Tabelle 14 werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung normiert in Einwohnerdurchschnittswerte (EDW). Hierzu wurden die Summenwerte aus Tabelle 13 durch die durchschnittlichen pro-Kopf-Werte aus Tabelle 1 dividiert. Im Übrigen wird die Bilanzmenge der vorausgehenden Darstellungen von 1 Tonne Primär-Papier in der ersten Stufe auf die Pro-Kopf-Verbrauchsmenge an Papier in Deutschland umgerechnet. Nach offiziellen Zahlen des Verbands der Papierfabriken für 2015 beläuft sich der Gesamtverbrauch auf 20,5 Mio. Tonnen (VDP 2016), das sind etwa 250 kg pro Kopf und Jahr. Der Frischzellstoff-Anteil in der deutschen Papier-Produktion liegt nach VDP etwa bei 26 %, das sind 65 kg pro Kopf und Jahr.

Für die Auswertung der drei Optionen wird unterstellt, dass die Gesamtmenge von 250 kg jeweils gemäß der jeweiligen Option produziert wird. Die Zahlen in Tabelle 14 drücken somit aus, wie groß der Einfluss des Umfangs an Recycling im Papierbereich auf die persönliche Umweltlast pro Person hat.

⁶ Ein großer Teil des in Deutschlands verarbeiteten Zellstoffs wird importiert. Im Übrigen hat eine Ausrichtung auf Zellstoffproduktion Auswirkungen auf die Art der Waldbewirtschaftung. Somit die Übertragung von der mittleren Situation in Deutschland auf dieses Beispiel eine starke Vereinfachung, die jedoch für eine orientierende Darstellung ausreichend sein wollte.

Ein Wert von 0,018 EDW beim Treibhauseffekt für Option 1 bedeutet somit, dass die Herstellung von Frischzellstoffpapier ohne Recycling sich in der persönlichen Klimabilanz einer Person um 1,8 % niederschlagen würde, während eine dreifache Kaskade (-0,0049 EDW) eine Entlastung von 0,49 % bedeuten würde. Oder besser ausgedrückt: die Frage Kaskade beim Papier oder nicht würde die Gesamtklimabilanz um 2,4 % verbessern bzw. verschlechtern.

Vergleichsweise sehr hohe Werte zeichnen sich bei der Eutrophierung ab - auch im Fall von Option 3. Das beruht auf den bereits erwähnten hohen spezifischen Phosphatfrachten über den Abwasserstrom. Mit großen Beiträgen sind außerdem die Naturrauminanspruchnahme, die Versauerung und der Feinstaub verbunden, jedoch nur im Falle der Optionen 1 und 2. Bei der Naturrauminanspruchnahme zeigt sich bei Option 3 auch die erhebliche Entlastung, die sich durch die mehrfache Kaskadenführen ergibt.

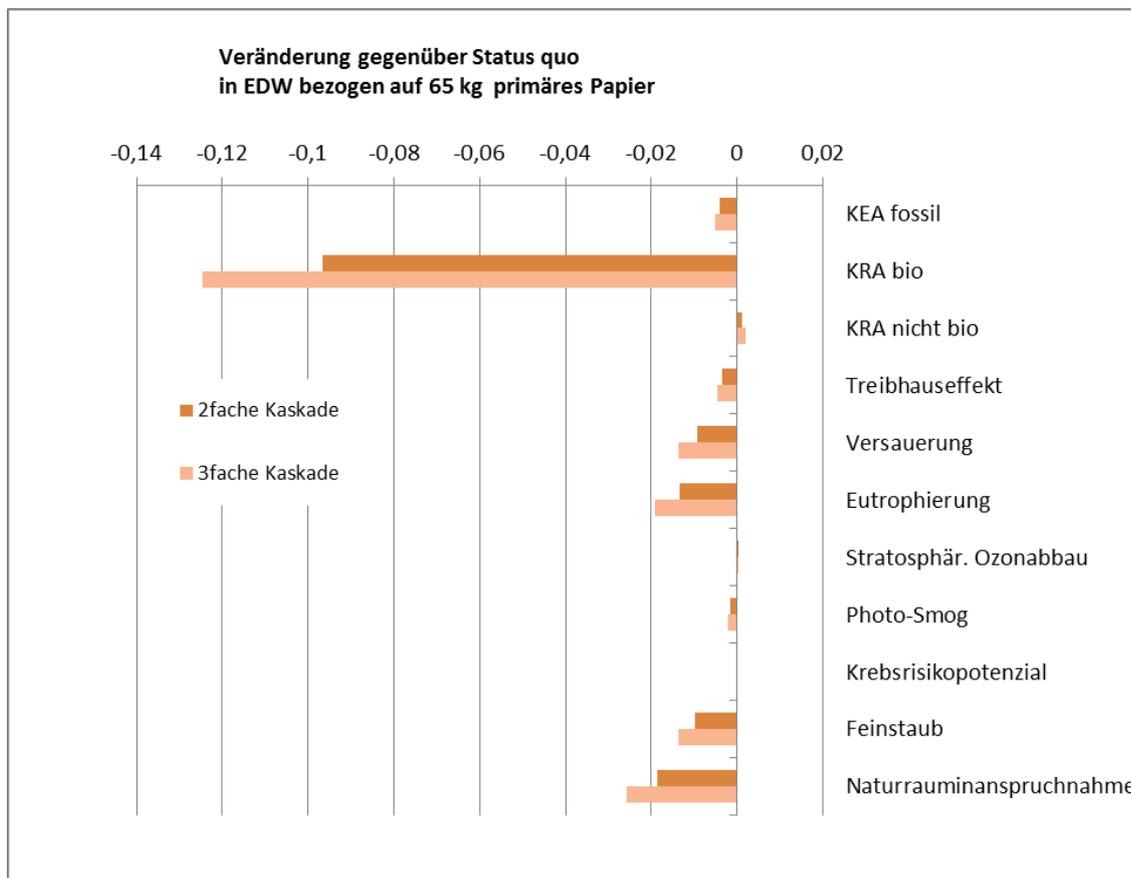
Insgesamt durch diese Auswertung die spezifisch hohe Bedeutung des Papiersektors in der Stoffwirtschaft deutlich.

Tabelle 14: Ergebnis der Ökobilanz für die Papierkaskade normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW und skaliert auf 250 kg grafisches Papier, dem Verbrauch pro Kopf und Jahr.

Wirkungskategorie	Option 1	Option 2	Option 3
Ressourcenbeanspruchung KEA nicht erneuerbar	0,018	0,0023	-0,002
KRA bio	0,39	0,021	-0,087
KRA abiotisch	-0,0025	0,0024	0,0055
Treibhauseffekt	0,016	0,0029	-0,0016
Versauerung	0,051	0,015	-0,0015
Eutrophierung	0,096	0,045	0,022
Stratosphärischer Ozonabbau	-0,002	-0,0012	-0,00098
Photo-Smog	0,0054	-0,00036	-0,0026
Humantoxizität: Feinstaub (PM _{2.5})	0,052	0,014	-0,0013
Flächeninanspruchnahme	0,089	0,018	-0,0093

Die vorangehende „extreme“ Betrachtungsweise (wie hoch wäre der Umwelteffekt, wenn kein Recycling erfolgen würde), wird in **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** auf den Spielraum des Anteils an frisch zugeführten Papierrohstoff bzw. dem nicht recycelten Anteil von 65 kg pro Kopf und Jahr begrenzt. Die Grafik zeigt das Potenzial an ökologischer Veränderung, würde man für diese Menge nochmals die Kaskadenzahl erhöhen. Auch diese Betrachtung unterstellt einen extremen Ansatz, weil aus Qualitätsgründen ein Mindestanteil an Frischzellstoff dem Markt an PPK-Produkten zugeführt werden muss. Das Potenzial ist jedoch bedeutsam, v.a. beim biogenen KRA, der bei einer weiteren Kaskadenschleife die spezifische Gesamtlast bezüglich Biomasseverbrauch um nahezu 10 % reduzieren kann.

Abbildung 28 Veränderung gegenüber dem Status quo durch zusätzliche Kaskadennutzung der nicht recycelten 65 kg primärem Papier pro Kopf; normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – negative Werte bedeutet Entlastung der Umwelt gegenüber Status quo.



6.2.3 Kaskadenbezogene Bewertung

Die Ergebnisse zeigen in deutlicher Weise den ökobilanziellen Vorteil der Kaskadennutzung von Papier, der sich erhöht, je häufiger das Material in Kaskade geführt wird. Damit wird der ökologische Nutzen der bereits im großen Umfang umgesetzten Kaskadennutzung bei Papier nochmals unterstrichen. Bemühungen, die bereits heute erzielten Recyclingquoten noch weiter auszubauen, sind somit unter Umweltgesichtspunkten insgesamt als lohnend zu bewerten.

6.3 Fazit

Bei Papier zeigt sich in besonderer Weise, wie groß die Umweltentlastungen und die Erhöhung der Ressourceneffizienz ausfallen durch die möglichst lange und mehrfache Nutzung des Materials. Die betrachteten Optionen stellen dabei zwar konstruierte Pfade dar, bilden in einer Mischung aus allen drei Optionen jedoch durchaus die reale Situation ab.

Daraus ist Folgendes zu schließen:

- ▶ Die in der Praxis umgesetzte stoffliche Nutzung und Verwertung von Papier und Pappe stellt bereits einen hohen Standard dar, der sich als umgesetzte Ressourceneffizienz etabliert hat.
- ▶ Eine weitere Optimierung dieser bereits heute als erfolgreich zu wertenden Kaskadennutzung kann sich im Rahmen des technisch Möglichen und logistisch Sinnvollen in weiterer Erhöhung der Ressourceneffizienz niederschlagen.
- ▶ Das Beispiel Papier/Pappe macht deutlich, wie idealtypisch diese Produktgruppe für die effiziente Umsetzung des „klassischen“ Kaskadengedankens ist: „so lange, so häufig und so effizient wie mög-“

lich stofflich zu nutzen, ... Nutzungskaskaden durchlaufen, die von höheren Wertschöpfungsniveaus in tiefere Niveaus fließen“.

Der Vorteil in diesem Produktbereich ist allerdings, dass er sich weitgehend in einem zusammengehörigen Sektor bündelt und eine Verwandtschaft der Produkte trotz unterschiedlicher Wertschöpfungsniveaus besteht. Dies ist in vielen anderen Produktbereichen eher nicht gegeben.

7 Textilkaskaden

7.1 Beschreibung der Szenarien zur Textilkaskade

7.1.1 Vorgehen bei der Modellierung

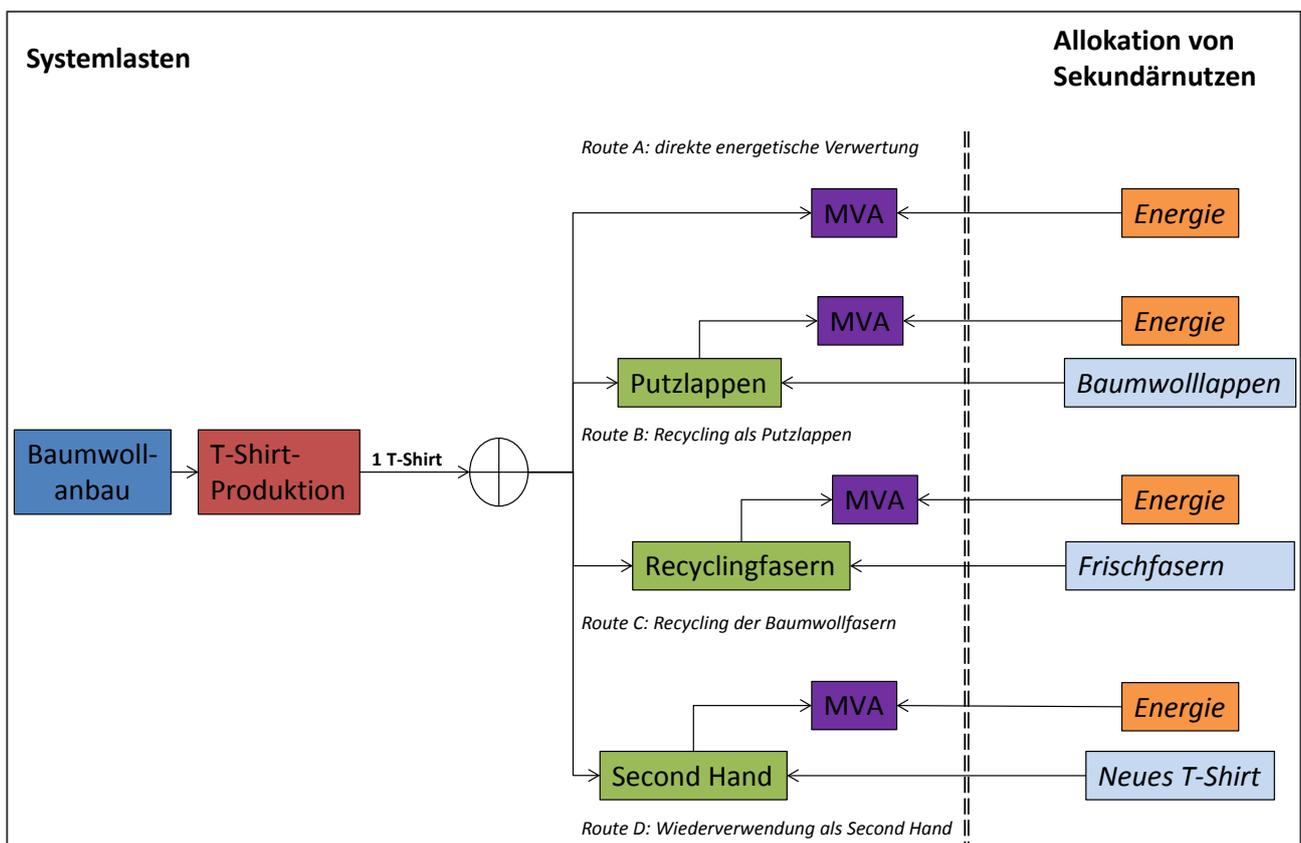
Wie auch in der Papierkaskade werden die Möglichkeiten der Textilkaskade anhand einer modularen Herangehensweise untersucht. Dazu werden die Umweltbilanzen verschiedener Kaskadenlinien am Beispiel eines Baumwoll-T-Shirts überprüft.

Im Mittelpunkt steht die Untersuchung zweier zweistufiger Kaskadennutzungen, die sich an die Nutzung eines T-Shirts anschließen:

1. **Weiterverarbeitung** des gebrauchten T-Shirts zu **Putzlappen**, wie es derzeit für 21 % der Alttextilien praktiziert wird (Korolkow 2015);
2. **Recycling der Baumwollfasern**, woraus erneut Baumwollgarn hergestellt wird; hierbei handelt es sich um eine vergleichsweise neue Entwicklung, die noch keine nennenswerten Marktanteile und wenig Praxiserfahrungen aufweist; da sie jedoch vom Prinzip her das Potenzial aufweist, mehrfache Kaskadennutzung analog zum Faserrecycling bei Papier eröffnet, soll sie hier mit betrachtet werden. Die Belastbarkeit der Datengrundlage ist hier jedoch eingeschränkt.

Diesen beiden Optionen werden die erneute Nutzung des T-Shirts (Second Hand) und die direkte Verbrennung gegenübergestellt. Die Second-Hand-Variante stellt im Sinne des Abfallrechts eine Wiederverwendung und befindet sich damit außerhalb der Kaskaden-Definition in diesem Projekt. Sie wird für dieses Beispiel dennoch mitbetrachtet, weil sie im realen Lebensweg der Bekleidungstextilien mit 54 % Marktanteil eine bedeutende Rolle spielt und daher einen wichtigen Vergleichsmaßstab darstellt. Direkt verbrannt werden derzeit 8 % (Korolkow 2015).

Abbildung 29 Modulstruktur für die Ökobilanzmodellierung der Textilien-Kaskaden



7.1.2 Annahmen und Systemgrenzen

Für die Erstellung der Ökobilanz wurden folgende Annahmen getroffen:

- ▶ Funktionelle Einheit: Es wird die Herstellung und Weiterverwertung eines reinen Baumwoll-T-Shirts (Gewicht: 250 g) untersucht.
- ▶ Systemgrenzen: Die Ökobilanz umfasst alle wesentlichen Lebenswegabschnitte „von der Wiege bis zur Bahre“, d.h. von der Herstellung des T-Shirts aus Baumwolle über dessen Weiterverwendung in einer Kaskade bis hin zur Entsorgung der jeweiligen (End-)Produkte.

Es werden explizit die folgenden Abschnitte betrachtet:

- Anbau der Baumwolle in China
- Verarbeitung zu einem T-Shirt (umfasst die Schritte Garnherstellung, Weben, Veredlung) in China
- Transport der T-Shirts nach Deutschland
- Je nach betrachtetem Szenario
- Recycling als Putzlappen: Sortierung, Weiterverarbeitung zum Industrieputzlappen (entspricht dem Zerteilen der T-Shirts) in Deutschland
 - Recycling der Fasern: Sortierung und Aufbereitung der Fasern in Deutschland, Transport nach China, Garnherstellung in China
 - Second Hand: Sortierung und Wiederverwendung in Deutschland
 - Direkte Verbrennung: Entsorgung in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) in Deutschland
- Entsorgung der anfallenden Ausschüsse sowie der jeweiligen Endprodukte an ihrem Lebensende. Die bei der T-Shirt-Produktion in China anfallenden Reststoffe werden in Deponien entsorgt. Für die in Deutschland stattfindenden Aufbereitungsverfahren wird wie auch für die Entsorgung der Endprodukte von einer energetischen Verwertung der Reststoffe in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) thermisch ausgegangen. Beim Faserrecycling fallen Ausschüsse in Form von Flusen in der Luft an und werden über Filtersysteme herausgefiltert. In Deutschland erfolgt eine Verwertung in der Papierindustrie, in China hingegen ist nicht davon auszugehen, dass die Flusen herausgefiltert werden. In beiden Fällen erfolgt also keine thermische Verwertung.
- ▶ Nicht berücksichtigt werden die jeweiligen Nutzungsphasen.
- ▶ Geographischer Bezug: das Ausgangsprodukt „T-Shirt“ wird in China produziert und als Endprodukt nach Deutschland transportiert. Die Herstellung umfasst den Anbau der Baumwolle sowie die Verarbeitung der Baumwolle hin zu einem fertigen T-Shirt. Alle nachfolgenden Schritte wie Recycling, Weiterverarbeitung und Entsorgung erfolgen in Deutschland. Lediglich die Herstellung von Garn aus den recycelten Fasern erfolgt erneut in China. Für die unterschiedlichen Verarbeitungsstandorte wird jeweils der nationale Strommix zugrunde gelegt.
- ▶ Referenzsysteme: je nach hergestelltem Produkt können unterschiedliche Produkte ersetzt werden. Dies wird in Form von Gutschriften im System berücksichtigt.
 - Putzlappenherstellung: Die aus den T-Shirts hergestellten Putzlappen ersetzen Putzlappen, die aus 100 % neuer Baumwolle hergestellt worden sind. Für letztere wird eine Herstellung in China angesetzt.
 - Faserrecycling: Es werden die im T-Shirt enthaltenen Fasern aufbereitet und zu Garn versponnen. Dieses Garn ersetzt aus Frischbaumwolle hergestelltes Garn (ebenfalls in China hergestellt).
 - Das recycelte T-Shirt in Second Hand-Nutzung ersetzt 0,6 neue T-Shirts (in China produziert).
 - Bei der abschließenden thermischen Verwertung in einer MVA wird der jeweilige Energiemix gegen gerechnet.

7.2 Ergebnisse der Ökobilanz zu Textilkaskaden

7.2.1 Wirkungsabschätzung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse auf der Ebene der einzelnen Wirkungskategorien (siehe Tabelle 1) dargestellt. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden dann die Wirkungskategorien im Einzelnen diskutiert.

In der Zeile „Produktion“ sind die Aufwendungen für Baumwollanbau, T-Shirt-Produktion und Entsorgung aufsummiert. In den Zeilen „Gutschrift Energie“ und „Gutschrift Produkt“ werden die Gutschriften aufgelistet, die sich über die energetische Verwertung des T-Shirts sowie durch die Substitution anderer Produkte (z.B. neu hergestelltes T-Shirt in der Option „2nd Hand“) ergeben. Die Zeile „Gesamt“ enthält die Summen über die jeweiligen drei Zeilen.

Die Auswertung aller Wirkungskategorien zeigt ein weitgehend einheitliches Muster, weswegen eine differenzierte Diskussion jeder einzelnen Kategorie nicht zweckmäßig ist. In Abbildung 30 sind Ressourcen-bezogenen Indikatoren $KEA_{fos/nuk}$, KRA_{bio} und $KRA_{abiotisch}$ sowie Frischwasser zusammengefasst. Letzteres wurde angesichts der Bedeutung von Wasser im Anbau von Baumwolle und der bei der Textilverarbeitung mit in die Betrachtung einbezogen. In Abbildung 31 finden sich Treibhausgasemissionen, Versauerung, terrestrische Eutrophierung und Photo-Smog. Außerdem wird in Abbildung 32 der Flächenverbrauch dargestellt.

In allen Darstellungen zeigt sich folgendes Muster:

- ▶ Die **Direktverbrennung** erbringt im Vergleich zu den hohen Lasten der Herstellung eines T-Shirts nur geringe Gutschriften, somit fällt das Ergebnis für diese Variante durchweg am schlechtesten aus.
- ▶ Als Gegenstück dazu schneidet die nahezu verlustfreie **einfache stoffliche Nutzung als Putzlappen** mit anschließender Verbrennung unter Energienutzung überall am günstigsten ab.
- ▶ Die Variante **Second Hand** ersetzt ein Neu-T-Shirt nur zu 60 %, weswegen die Gutschrift hierfür entsprechend geringer ausfällt. Die Variante bewegt sich somit in etwa in der Mitte zwischen Direktverbrennung und Verwertung zu Putzlappen.
- ▶ Deutlich zurück fällt dagegen die Variante **Faser-Recycling**. Die Faserausbeute und damit die Einsparung am Rohstoff Baumwolle ist hier etwa bei der Hälfte, dazu kommt jedoch der erneute Aufwand zur Herstellung von Faser, Gewebe und T-Shirt.

Diese Variante liegt in den Kategorien, die stark vom Baumwollanbau dominiert sind (KRA_{bio} , Wasser, Fläche) nahe bei der Variante Putzlappen, in Kategorien mit hohem Anteil an prozessbedingten Emissionen (GWP, Versauerung etc.) jedoch nahe bei der Direktverbrennung.

Tabelle 15 Ergebnis der Wirkungsabschätzung für die Textilkaskade

Wirkungskategorie	Einheit		Verbrennung	2 nd Hand	Putzlappen	Faserrecycling
Ressourcen (KEA fossil+nukl.)	MJ	Produktion	36,68	36,72	38,25	37,08
		Gutschrift Energie	-2,43	-2,43	-2,43	-2,19
		Gutschrift Produkt	0	-22,00	-31,96	-6,69
		Gesamt	34,25	12,29	3,86	28,21
Ressourcen (KRA bio)	kg	Produktion	0,426	0,426	0,426	0,426
		Gutschrift Produkt		-0,256	-0,37	-0,207
		Gesamt	0,426	0,170	0,056	0,219
Ressourcen (KRA abiot.)	kg	Produktion	1,755	1,756	1,807	1,767
		Gutschrift Energie	-0,066	-0,066	-0,066	-0,059
		Gutschrift Produkt		-1,05	-1,53	-0,476
		Gesamt	1,69	0,638	0,212	1,232
Frischwasser	l	Produktion	2.493	2.493	2.493	2.493
		Gutschrift Energie	-0,073	-0,073	-0,073	-0,066
		Gutschrift Produkt		-1496	-2168	-1214
		Gesamt	2.493	997	325	1.279
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -Äq.	Produktion	3,28	3,28	3,41	3,31
		Gutschrift Energie	-0,15	-0,15	-0,15	-0,13
		Gutschrift Produkt	0	-1,97	-2,83	-0,77
		Gesamt	3,13	1,17	0,43	2,41
Versauerung	kg SO ₂ -Äq.	Produktion	0,005	0,026	0,027	0,027
		Gutschrift Energie	-0,000312	-0,000312	-0,000312	-0,00281
		Gutschrift Produkt	0	-0,015	-0,023	-0,0097
		Gesamt	0,026	0,01	0,0039	0,0165
Eutrophierung, terr.	kg PO ₄ ³⁺ -Äq.	Produktion	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041
		Gutschrift Energie	-0,0000274	-0,0000274	-0,0000274	-0,0000274
		Gutschrift Produkt	0	-0,00245	-0,00356	-0,00182
		Gesamt	0,0041	0,00165	0,0058	0,00232
Stratosph. Ozonabbau	g FCKW-Äq.	Produktion	0,000183	0,000183	0,000183	0,000183
		Gutschrift Energie	-3,8E-12	-3,8E-12	-3,8E-12	-3,5E-12
		Gutschrift Produkt		-0,000110	-0,000167	-0,000029
		Gesamt	0,00018	0,000073	0,000024	0,000154
Photo-Smog	kg Ethen-Äq.	Produktion	0,00047	0,00047	0,00049	0,00049
		Gutschrift Energie	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000011
		Gutschrift Produkt		-0,00028	-0,00040	-0,00009
		Gesamt	0,000457	0,000177	0,000078	0,000385
Feinstaub	kg PM2.5-Äq.	Produktion	0,00057	0,00057	0,00060	0,00057
		Gutschrift Energie	-0,0000037	-0,0000037	-0,0000037	-0,0000033
		Gutschrift Produkt		-0,000344	-0,000499	-0,000199
		Gesamt	0,000569	0,000266	0,000094	0,000371
Flächenverbrauch	m ²	Produktion	6,35	6,35	6,35	6,35
		Gutschrift Energie				
		Gutschrift Produkt		-3,81	-5,52	-1,68
		Gesamt	6,35	2,54	0,83	4,67

Abbildung 30 Ergebnis zu Ressourcen (links oben: $KEA_{\text{fossil+nuklear}}$, rechts oben: $KRA_{\text{abiotisch}}$, links unten: Wasser, rechts unten KRA_{biotisch}) für die Textilkaskade

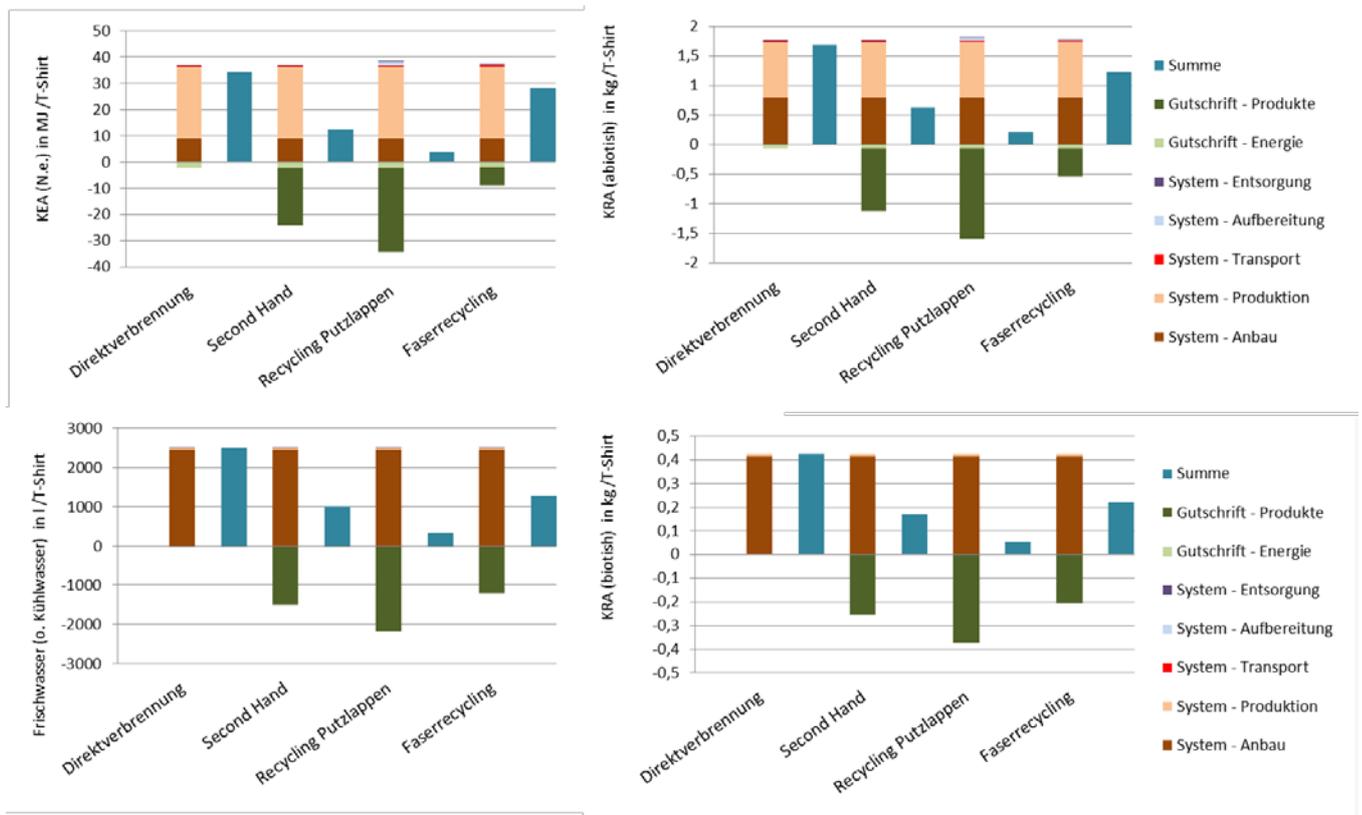


Abbildung 31 Ergebnis zu den Treibhausgasemissionen (links oben), Versauerung (rechts oben), terr. Eutrophierung (links unten) und Photo-Smog (rechts unten) für die Textilkaskade

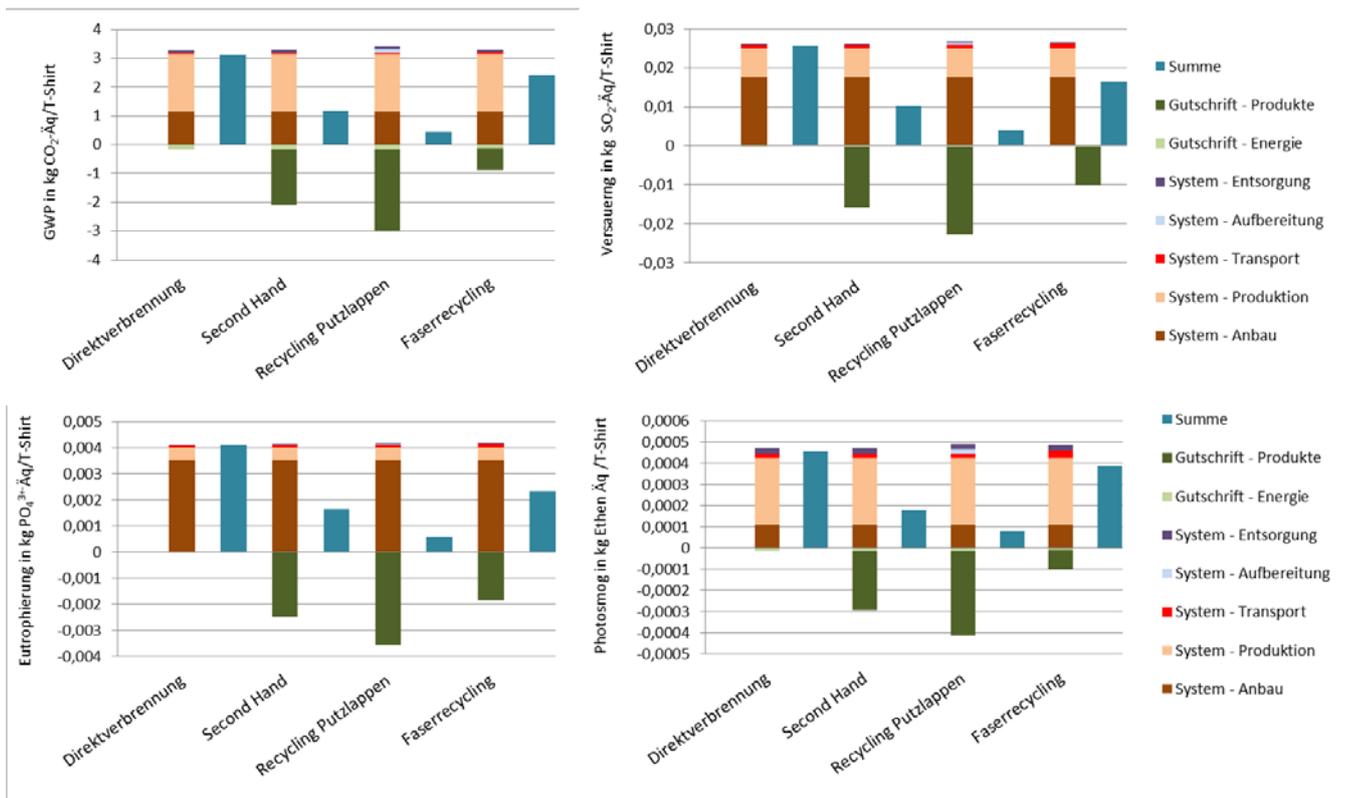
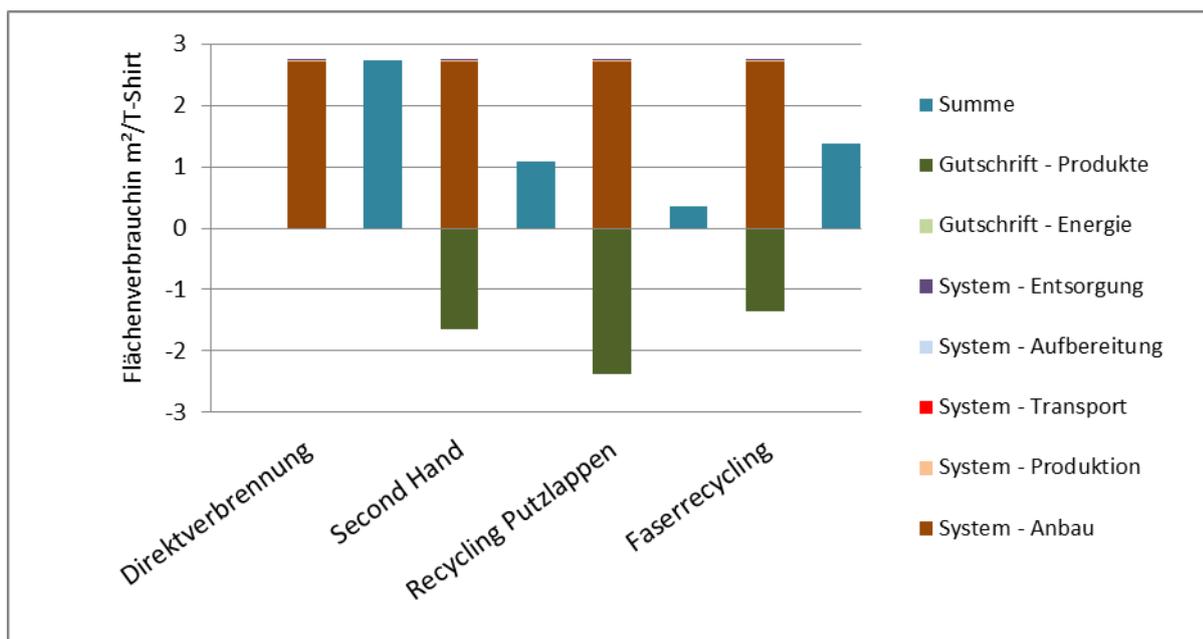


Abbildung 32 Ergebnis zum Flächenverbrauch für die Textilkaskade



7.2.2 Normierung und Rangbildung

In Tabelle 16 werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung normiert in Einwohnerdurchschnittswerte (EDW). Hierzu wurden die Summenwerte aus Tabelle 10 durch die durchschnittlichen jährlichen pro-Kopf-Werte aus Tabelle 15 dividiert. Um einen Bezug zum Jahresverbrauch an Textilien herzustellen, wurde die funktionelle Einheit von 1 T-Shirt auf die durchschnittliche Verbrauchsmenge von 12 kg Bekleidungstextilien pro Kopf (Korolkow 2015) hochgerechnet, das entspräche etwa 80 T-Shirts.

Die Zahlen in Tabelle 16 drücken somit aus, welchen Anteil der Konsum an Bekleidungstextilien an der Gesamtlast einer Person einnimmt. Der Wert von 0,022 EDW beim Treibhauseffekt bedeutet somit, dass der Textilverbrauch einer Person in Deutschland ungefähr 2,2 % ihrer persönlichen Klimagasemission ausmacht, geht man davon aus, dass die Textilien verbrannt werden. Geht man von einer vollständigen stofflichen Verwertung aus, reduziert sich dieser Wert auf etwa 0,3 %.⁷

In einer deutlich höheren Dimension als alle anderen Kategorien bzw. Indikatoren zeigt sich die Ressource Wasser: hier reichen die Werte von 0,4 bis 3,2 EDW. Bei einem durchschnittlichen jährlichen pro-Kopf-Verbrauch in Deutschland von 63,1 m³ (inländische Bilanz, kein virtuelles Wasser), führen bei einem spezifischen Wasserverbrauch von 2,5 m³ Wasser pro T-Shirt aus der Bewässerung im Baumwollanbau bei der Hochrechnung auf 80 T-Shirts zu einem Wert, der beim mehr als dreifachen dieses Inlands-pro-Kopf-Wert liegt. Dies zeigt die besondere Relevanz dieses Produktbereichs für die Ressource Wasser und das Potenzial an Schonung und Erhöhung von Ressourceneffizienz durch Kaskadennutzung.

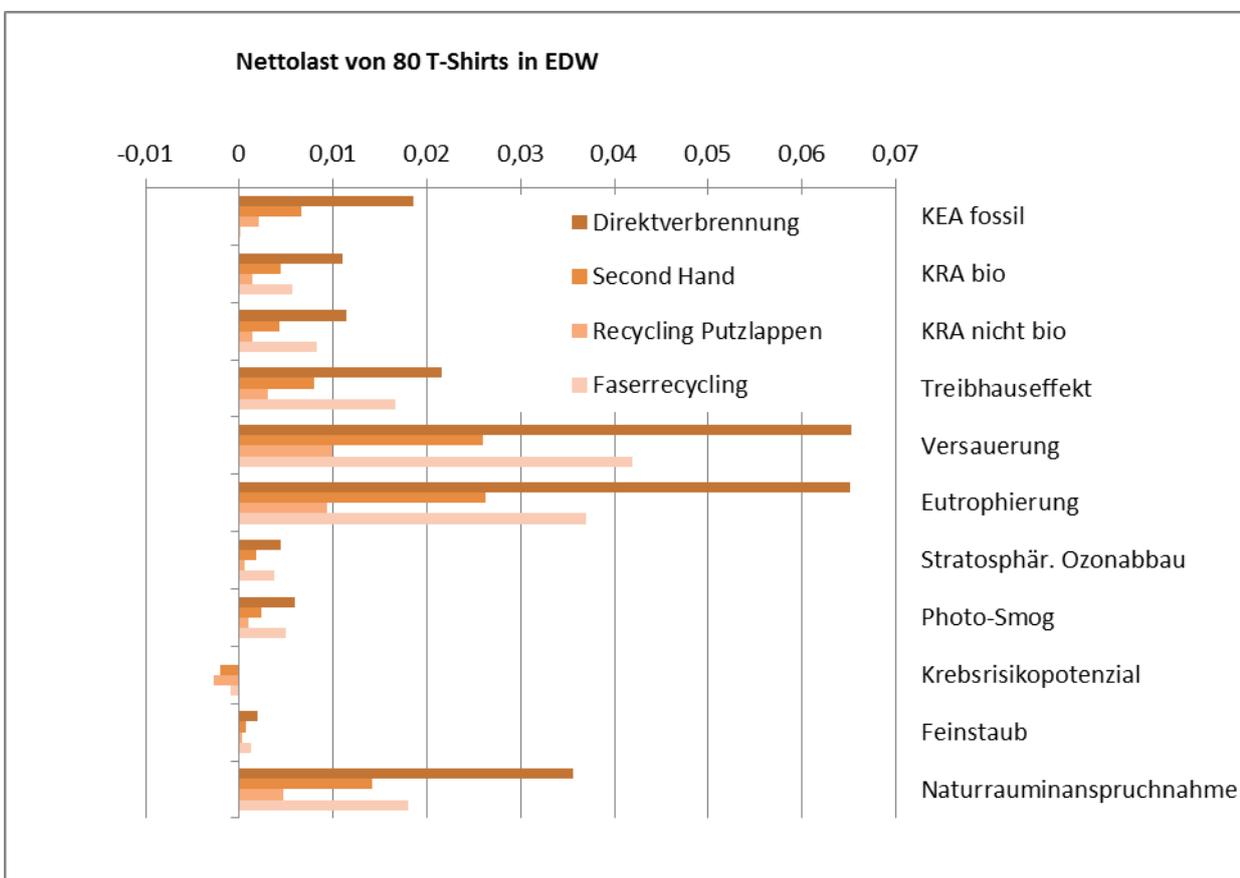
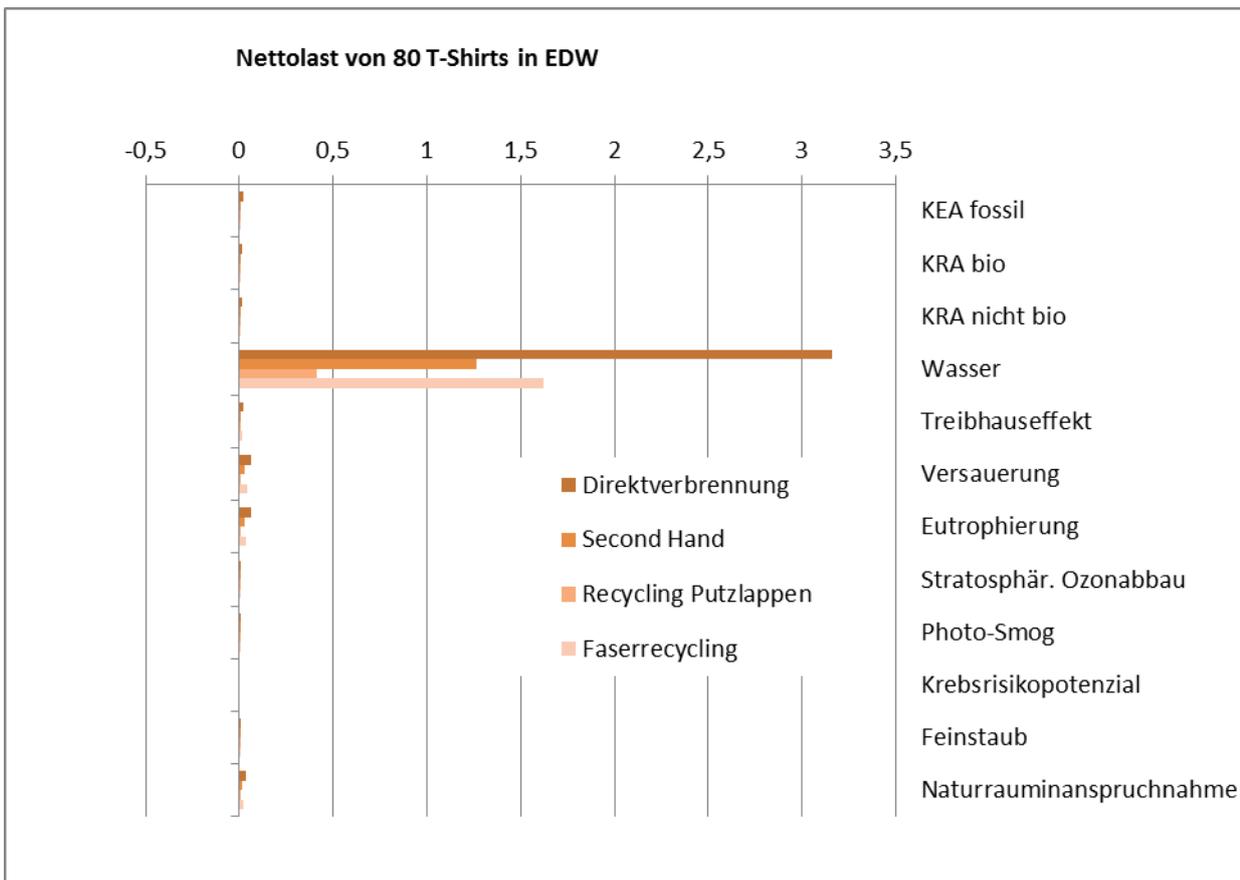
Abbildung 33 zeigt die Werte aus Tabelle 16 nochmals grafisch. Hieraus wird deutlich, dass nach dem deutlich aus der Bewertung herausragenden Wasserverbrauch die Kategorien Versauerung, Eutrophierung und Naturrauminanspruchnahme die größten spezifischen Beiträge leisten.

⁷ Diese Betrachtung ist nur als Orientierung zu verstehen, genaue Konsummuster und persönliche CO₂-Fußabdrücke werden hierdurch nicht errechnet

Tabelle 16: Ergebnis der Ökobilanz für die Textilkaskade normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW, gerechnet für 80 T-Shirts

Wirkungskategorie	Verbrennung	2 nd Hand	Putzlappen	Faser-recycling
Ressourcenbeanspruchung				
KEA nicht erneuerbar	0,019	0,0067	0,0021	0,00012
KRA bio	0,011	0,0044	0,0014	0,0057
KRA abiotisch	0,011	0,0043	0,0014	0,0083
Wasser	3,2	1,3	0,41	1,6
Treibhauseffekt	0,022	0,008	0,003	0,017
Versauerung	0,065	0,026	0,0099	0,042
Eutrophierung	0,065	0,026	0,0093	0,037
Stratosphär. Ozonabbau	0,0044	0,0018	0,00057	0,0037
Photo-Smog	0,0059	0,0023	0,001	0,005
Humantoxizität: Krebsrisikopotenzial	-0,000018	-0,0021	-0,0027	-0,00094
Feinstaub (PM _{2.5})	0,0019	0,00075	0,00032	0,0012
Naturrauminanspruchnahme	0,036	0,014	0,0046	0,018

Abbildung 33 Nettoergebnisse der Optionen der Textilkaskade normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – unten ohne den Ressourcenindikator Frischwasser.



7.2.3 Kaskadenbezogene Bewertung

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Vorteil der stofflichen vor der energetischen Nutzung. Dies beruht auf den hohen Aufwendungen zur Herstellung eines Textilprodukts.

Außerdem zeigt sich bei diesem Beispiel ganz deutlich: je höher der Anteil an in Kaskade geführten Material, desto besser das Ergebnis, desto höher die Ressourceneffizienz, die sich in allen Ökobilanzkategorien zeigt, vor allem aber bei Frischwasserbedarf und der Naturrauminanspruchnahme.

Schwieriger zu bewerten sind hier jedoch Mehrfachkaskaden. Die Variante mit einstufiger Nutzung (Putzlappen) bietet aufgrund der effektiven Materialnutzung in einem Schritt für eine zweite Kaskadenstufe kaum mehr Potenzial – gebrauchte Sekundärputzlappen sind im Grunde nur noch für die Verbrennung geeignet. Das innovative Verfahren des Faserrecyclings könnte vom Prinzip her eine Mehrfachkaskaden in Analogie zum Papierrecycling ermöglichen, doch ist auf der Basis der hier angesetzten Daten die Quote der Faserrückgewinnung zu gering, um auch bei Mehrfachkaskade (mit jedem Schritt halbiert sich der ursprünglich eingesetzten Menge) das gute Ergebnis der Einfachkaskade (Putzlappen) zu erreichen. Ließe sich die Rückgewinnungsquote durch weitere Verfahrensentwicklungen deutlich steigern, könnte sich diese Option durchaus erfolgversprechend darstellen.

Die „klassische“ Second-Hand-Option zeichnet sich als klar bessere Variante gegenüber der Direktverbrennung aus. Sie birgt außerdem ebenfalls das Potenzial für mehrfache Kaskaden, wobei dieses aufgrund der abnehmenden Qualität über die verlängerte Gebrauchsphase begrenzt sein dürfte.

7.3 Fazit

Bei den Textilien zeigt sich in besonderer Weise, wie groß die Umweltentlastungen und die Erhöhung der Ressourceneffizienz ausfallen durch die möglichst lange und mehrfache Nutzung des Materials. Die beispielhaften Varianten sind dabei nicht als die einzigen Optionen zu sehen. Im Vordergrund stehen sollte dabei, dass

- ▶ bereits erreichte Standards der stofflichen Nutzung und Verwertung nicht verdrängt werden sollten, so lange nicht noch effizientere Verfahren umsetzbar sind.
- ▶ Alttextilien insgesamt möglichst vollständig erfasst und gesammelt werden und dann einer zielgerecht nach Qualitäten durchaus nach unterschiedlichen Vorgehensweise in eine stoffliche Nutzung überführt werden.
- ▶ weitere alternative Nutzungsweisen neben der zwar effizienten aber nur einstufige Kaskade über Putzlappen entwickelt und marktfähig gemacht werden.

Das Faserrecycling ist derzeit noch nicht ausreichend entwickelt, um ein exzellentes Ökobilanzergebnis zu erzielen. Hier ist jedoch noch Entwicklungspotenzial zu vermuten, welches angesichts der Möglichkeit von Mehrfachkaskaden ausgelotet werden sollte.

8 Kaskade zu Biokunststoffen

8.1 Beschreibung der Szenarien zur Kaskade von Biokunststoffen

Im Gegensatz zu der in Kapitel 5 untersuchten Holzkaskade orientieren sich die Szenarien zur Kaskade von Biokunststoffen nicht an einem realen Mengenstrom. Zu gering sind die derzeitigen Mengen eingesetzter Biopolymere im Vergleich zu den konkurrierenden fossil basierten Produkte und zu ungenau die verfügbaren Daten über installierte Produktionskapazitäten, abgesetzte Marktvolumina und eingeschlagene Recyclingströme. Auch bestehen in der Praxis derzeit noch Hürden bzgl. des werkstofflichen Recyclings von PLA, so dass dieses Material oftmals nur in der Mischkunststofffraktion (MKS) Anwendung findet.

Von daher wird im Rahmen dieses Unterkapitels der Versuch einer modellhaften Annäherung an das Thema Kaskade von Biokunststoffen unternommen. Anders als bei den in AP 2 (*Analyse der Rohstoffbereitstellung*) und AP 3 (*Erfolgsfaktoren und Hemmnisse*) untersuchten Fällen von Kaskaden für Biopolymere steht hier die Frage im Vordergrund, welches die umweltverträglichste Nutzung einer definierten Menge biogener Rohstoffe ist. Exemplarisch wird hierzu als Ausgangsmenge **eine Tonne Zuckerrohr aus brasilianischer Produktion** herangezogen. Untersucht wird die Nutzung des Zuckerrohrs als:

1. Bioethanol in Fahrzeugen,
2. Rohstoff für einen „eigenständigen“ Biokunststoff (Polylactide, PLA)
3. Rohstoff für einen sogenannten Drop-In-Kunststoff, welcher sich in die Materialströme fossiler Kunststoffe einbringen lässt (in diesem Fall Bio-Polyethylen, BioPE).

Aspekte der direkten und indirekten Landnutzungsänderung sowie die Teller-Tank Debatte bleiben im Rahmen der Ökobilanzierung (wie auch bereits beim Beispiel der Textilkaskade) ausgeklammert. Hierzu wären nicht nur Erweiterungen von Systemraum sondern auch der Gesamtmethodik erforderlich⁸, die den Untersuchungsumfang dieser Übersichtsökobilanzen bei weitem sprengen würden. Bei der Untersuchung wird insbesondere der Faktor der Kaskadenfähigkeit der untersuchten stofflichen Anwendungen des Agrarproduktes Zuckerrohr in den Vordergrund gestellt.

Untersucht wird im Fall der stofflichen Nutzung eine einstufige Kaskade (stoffliche Nutzung mit anschließender energetischer Verwertung) und eine zweistufige Kaskade (stoffliche Nutzung, Recycling zu einem Sekundärprodukt mit anschließender stofflicher Verwertung).

8.1.1 Vorgehen bei der Modellierung

Zur Bilanzierung der Umweltauswirkungen der Kaskadennutzung von Biokunststoffen wurde ein Modellierungsansatz gewählt, der neben dem vollständigen Lebenszyklus der untersuchten Produkte auch substituierte Äquivalenz-Materialien in den Bilanzraum integriert. Im Falle von Bioethanol wird somit auch die Vermeidung von fossil basiertem Benzin als Systemleistung gewürdigt, primäres PLA ersetzt PS und BioPE selbstverständlich fossil basiertes PE.

⁸ Zur Abschätzung von ILUC-Effekten werden in der Regel makroökonomische Gleichgewichtsmodelle (Gesamtmodelle wie GTAP, MAGNET, MIRAGE, oder Teilmodelle wie FAPRI, GLOBIOM, FASOM, CAPRI, IMPACT, AGLINK-COSIMO)

Abbildung 34 Übersicht über das Bilanzierungsmodell

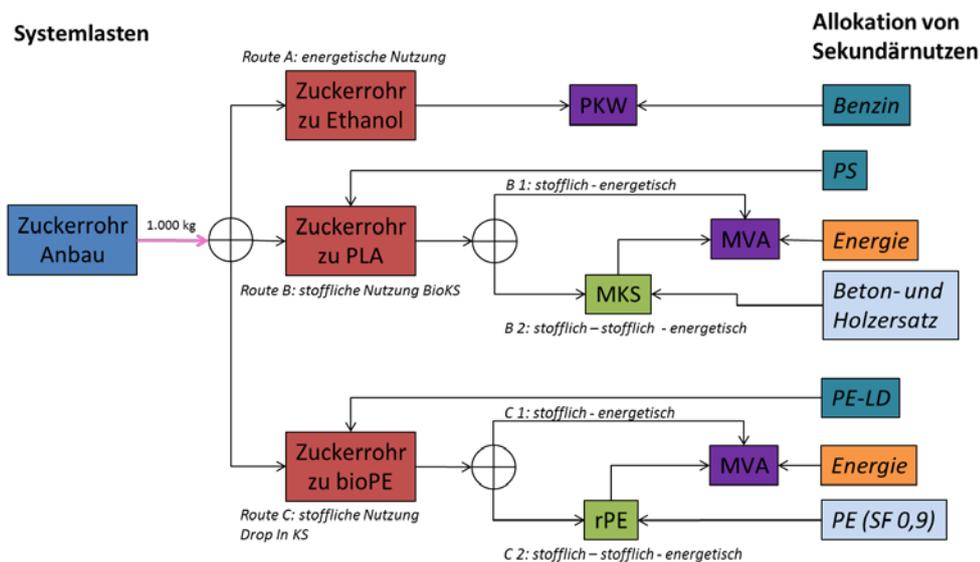


Abbildung 34 zeigt eine schematische Übersicht über den Modellierungsansatz. Ausgangspunkt ist die Produktion von 1.000 kg Zuckerrohr zur weiteren Verwendung. In der Bilanzierung wird ein Modell genutzt, das auf brasilianischen Daten aufbaut. Auch die weiteren Konversionsschritte (rot dargestellt) zum Ethanol, PLA und Bio PE werden als in Brasilien stattfindend bilanziert. Die Verwendung der Produkte findet unter deutschen Rahmenbedingungen statt. Ethanol ersetzt wie erwähnt Benzin. Die energetische Nutzung ist in der Abbildung immer lila dargestellt, das substituierte Äquivalenzprodukt in petrol. Energetische Gutschriften sind orange und stoffliche Gutschriften, wie sie erst in der zweiten, mehrstufigen stofflichen Nutzung vergeben werden sind hellblau dargestellt. In der Summe ergeben sich somit 5 verschiedene Routen die einzeln bilanziert und ergebnisseitig dargestellt sowie ausgewertet werden.

Auch wenn die Inputmenge in alle drei untersuchten Routen gleich ist (1.000 kg Zuckerrohr), unterscheidet sich – aufgrund der Unterschiede in der Konversion – die Menge an Material zur weiteren Verwendung. So beträgt der Stofffluss an Ethanol im System 72 kg, an PLA im System 58 kg und an BioPE nur 41 kg. Dieser Stofffluss skaliert natürlich auch alle anderen Systemlasten und -gutschriften und insbesondere die Menge an substituierten Äquivalenzprodukten. In Tabelle 17 sind die jeweiligen Äquivalenzprodukte für Substitution und Gutschrift aufgeführt. Da PLA wie bereits erwähnt derzeit nicht großmaßstäblich als eigene Fraktion werkstofflich recycelt wird, ist für die mehrstufige stoffliche Nutzungskaskade die Verarbeitung mit der MKS-Fraktion vorgesehen, das Zielprodukt sind Kunststoffpalisaden. Somit erzielt das Produkt eine Gutschrift für den Ersatz von Holz oder Beton.

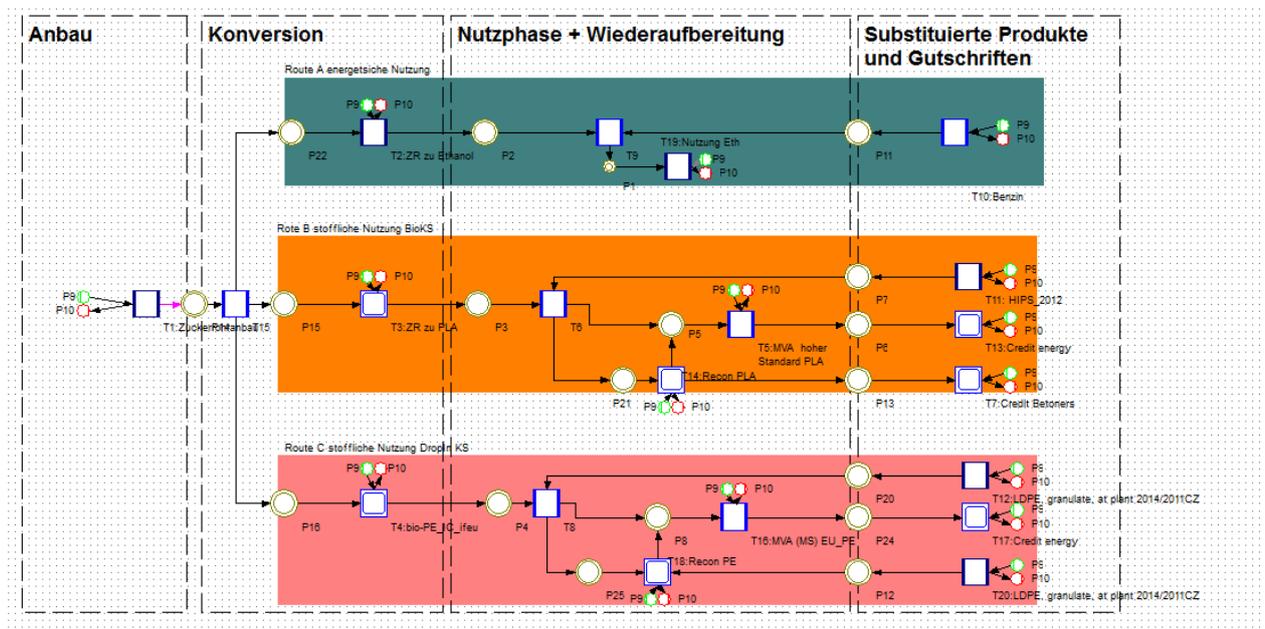
Tabelle 17 Übersicht über die Substitutionspaare in der Bilanzierung

Produkt	Äquivalenzprodukt
Ethanol	Benzin
Polylactid (PLA)	Polystyrol (PS)
MKS aus PLA	Beton und Holzersatz (im Verhältnis 30 zu 70 bei 4 % Aufbereitungsverlust) Substitutionsfaktor MKS zu Holzpalisaden: 1.875 Substitutionsfaktor MKS zu Zementpalisaden: 2.6
Polyethylen (PE) aus Zuckerrohr	Fossiles Polyethylen
Rezykliertes Polyethylen (rPE)	Fossiles Polyethylen (3,1 % Aufbereitungsverluste) Substitutionsfaktor rPE zu PE: 0,9
Energie aus MVA	Netzstrom (11 % des Energieoutputs der MVA) Heizwärme (30 % des Energieoutputs der MVA)

Bei der werkstofflichen Aufbereitung (im Modellbild grün dargestellt) entstehen Aufbereitungsabfälle, die aufgrund ihrer technischen Beschaffenheit oder aus wirtschaftlichen Gründen nicht wieder stofflich verwendet werden können. Für diese Aufbereitungsverluste ist daher eine direkte energetische Nutzung vorgesehen. Das PE-Regranulat wird vor der Gutschrift mit einem Substitutionsfaktor belegt, welcher der technisch bedingten verminderten Einsatzfähigkeit des Materials (Stichwort: Polymerkettenverkürzung) Rechnung trägt. Der Allokationsfaktor wurde als AF 100 festgelegt. Als thermische Verwertung ist grundsätzlich die MVA mit Strom- und Wärmeauskopplung bilanziert. In der Realität wird sicherlich auch die Mitverbrennung in Zementwerken oder EBS-Kraftwerken eine Rolle spielen – sofern es sich um Verpackungsprodukte handelt. Da eine solche Vorfestlegung an dieser Stelle jedoch nicht getroffen werden soll wurde die MVA als Basisfall, passend für alle potenziellen Anwendungsgebiete stofflich genutzter Biomasse definiert.

Durch diesen Modellierungsansatz ergeben sich für einige der untersuchten Umweltwirkungskategorien negative Gesamtergebnisse. Dieser Befund bedarf einer gewissen Vorsicht bei der Interpretation

Abbildung 35 Umsetzung in ein Umberto-Modell



8.2 Ergebnisse der Ökobilanz zur Kaskade von Biokunststoffen

8.2.1 Wirkungsabschätzung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse auf der Ebene der einzelnen Wirkungskategorien (siehe Tabelle 1) dargestellt.

Den Referenzfall bildet die Bilanz für die energetische Nutzung als Ethanol. Die summarischen Ergebnisse auf der Ebene der Wirkungsabschätzung sind in Tabelle 18 zusammengestellt. In der Zeile „System“ findet sich dabei immer das Ergebnis der Bilanzierung der Zuckerrohrproduktion, der Konversion, ggf. der stofflichen Aufbereitung und der energetischen Nutzung EU. In die Zeilen „Gutschrift“ und „Substitution“ werden die Ergebnisse der Bilanzierung des erzielten Zusatznutzens eingetragen. Die Zeile „Gesamt“ enthält die Summen über die jeweiligen drei Zeilen.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Wirkungskategorien im Einzelnen diskutiert.

Tabelle 18: Ergebnis der Wirkungsabschätzung für die Kaskade von Biokunststoffen.

Wirkungskategorie	Einheit		energetische Nutzung	stofflich PLA + energetische Nutzung	stofflich PLA + Recycling + energetische Nutzung	stofflich BioPE + energetische Nutzung	stofflich BioPE + Recycling + energetische Nutzung
Ressourcen (KEA fossil+nukl.)	GJ	System	0,31	0,94	1,46	1,49	1,53
		Gutschrift	0,00	-0,69	-0,80	-1,07	-3,81
		Substitution	-3,79	-4,50	-4,50	-3,14	-3,14
		Gesamt	-3,47	-4,24	-3,83	-2,72	-5,43
Ressourcen (KRA bio.)	g	System	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
Ressourcen (KRA abiot.)	kg	System	48,61	70,47	98,08	76,28	78,18
		Gutschrift	0,00	-26,94	-76,78	-42,00	-105,61
		Substitution	-94,65	-75,04	-75,04	-72,94	-72,94
		Gesamt	-46,04	-31,51	-53,74	-38,66	-100,37
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -Äq.	System	40,18	80,77	119,88	117,57	120,26
		Gutschrift	0,00	-47,80	-61,21	-76,65	-143,46
		Substitution	-53,09	-142,79	-142,79	-76,60	-76,60
		Gesamt	-12,92	-109,82	-84,11	-35,69	-99,80
Versauerung	kg SO ₂ -Äq.	System	1,65	1,52	1,60	1,78	1,78
		Gutschrift	0,00	-0,09	-0,13	-0,15	-0,30
		Substitution	-0,28	-0,33	-0,33	-0,18	-0,18
		Gesamt	1,37	1,10	1,15	1,45	1,30
Eutrophierung, terr.	kg PO ₄ ³⁺ -Äq.	System	0,23	0,21	0,21	0,24	0,24
		Gutschrift	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,03
		Substitution	-0,02	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02
		Gesamt	0,22	0,17	0,18	0,21	0,19
Strat. Ozonabbau	g R11-Äq.	System	1,14	1,12	1,15	1,90	1,90
		Gutschrift	0,00	-0,03	-0,04	-0,06	-0,08
		Substitution	-0,02	-0,04	-0,04	-0,03	-0,03
		Gesamt	1,12	1,05	1,07	1,81	1,79
Photo-Smog	g Ethen-Äq.	System	193,05	14,06	15,74	50,50	50,61
		Gutschrift	0,00	-3,83	-5,08	-6,22	-93,04
		Substitution	-196,25	-40,14	-40,14	-99,56	-99,56
		Gesamt	-3,20	-29,91	-29,48	-55,28	-141,98
Krebsrisikopotenzial	mg As-Äq.	System	17,16	5,37	6,12	6,73	6,79
		Gutschrift	0,00	-1,26	-1,48	-1,92	-9,72
		Substitution	0,00	-17,44	-17,44	-8,94	-8,94
		Gesamt	17,16	-13,33	-12,80	-4,13	-11,87
Feinstaub	kg PM2.5-Äq.	System	1,55	1,45	1,52	1,70	1,71
		Gutschrift	0,00	-0,08	-0,13	-0,13	-0,28
		Substitution	-0,22	-0,28	-0,28	-0,17	-0,17
		Gesamt	1,32	1,08	1,11	1,40	1,25
Naturraum (bewertet)	m ² NFP	System	0,01	0,42	1,42	0,40	0,47
		Gutschrift	0,00	-0,46	-57,23	-0,97	-1,55
		Substitution	0,00	0,00	0,00	-0,66	-0,66
		Gesamt	0,01	-0,04	-55,81	-1,23	-1,74
Naturraum (unbewertet)	m ²		0,00	0,00	-5,06	-0,17	-0,26

8.2.1.1 Ressourcenbeanspruchung

Ressourcen werden im Rahmen dieser Studie anhand von drei Indikatoren bewertet:

- ▶ Kumulierter Primärenergieaufwand, nicht erneuerbarer Energieträger ($KEA_{fos/nuk}$)
- ▶ Kumulierter Rohstoffaufwand
 - biogen (KRA_{bio})
 - abiotisch (KRA_{abio})

zeigt das Ergebnis für $KEA_{fos/nuk}$ für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung. Die Darstellung dieser und der folgenden Ergebnisgrafiken liest sich wie folgt:

- ▶ der braune Balkenanteil („System“) zeigt die Summe der Systemlasten an. Entsprechend der Mehrgliedrigkeit der Wertschöpfungsketten liegen die Balkenanteile für die langen Nutzungskaskaden jeweils höher als die der rein energetischen Nutzung.
- ▶ der gelbe Balkenanteil („Substitution“) gibt die vermiedenen Umweltlasten durch den Einsatz des biobasierten Produkts wieder. Die Höhe der Balken ist abhängig vom Umweltprofil des Äquivalenzproduktes und des Stoffflusses im System.
- ▶ der grüne Balkenanteil („Gutschrift“) gibt die durch den Einsatz der Sekundärprodukte eingesparten Umweltlasten oder Nutzung der Verbrennungsenergie eingesparten Energieträger wieder.
- ▶ das blaue Feld („Summe“) gibt die Summe aus System, Substitution und Gutschrift als Gesamtergebnis wieder.

Kumulierter Primärenergieaufwand (KEA)

Die Gesamtergebnisse sind für alle untersuchten Routen negativ, da die Summe der durch Substitution und Gutschrift vermiedenen Umweltlasten die Systemlasten deutlich übersteigt. Die Substitution ist im Falle der PLA Szenarien aufgrund der Substitution von fossilem PS am größten. Auffällig ist, dass die zweite stoffliche Nutzungsphase im Fall von PLA keinen positiven Umwelteffekt hat, da der Zugewinn an Gutschriften die erhöhten Systemlasten nicht ausgleichen kann. Ganz anders im Falle der BioPE-Routen: ist die einstufige stoffliche Nutzung noch der rein energetischen Nutzung unterlegen, birgt die zweite stoffliche Nutzungsphase, verbunden mit dem (nach der Substitution) erneuten Ersatz von fossilem PE ein enormes Umweltpotenzial.

Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)

Ein im Prinzip dem KEA nicht erneuerbar ähnliches Bild, jedoch zeigen sich im Falle des abiotischen KRA die stofflichen Nutzungen gegenüber der rein energetischen Nutzung nur dann positiv, wenn es zu einer zweiten stofflichen Nutzungsphase kommt. Wiederum zeigt sich die Route BioPE aufgrund der Höherwertigkeit der zweiten stofflichen Nutzungsphase dem PLA System überlegen.

Abbildung 36 Ergebnis zum nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch ($KEA_{\text{fossil+nuklear}}$) für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung; FU: funktionale Einheit = 1 Tonne Zuckerrohr als Rohstoffbasis

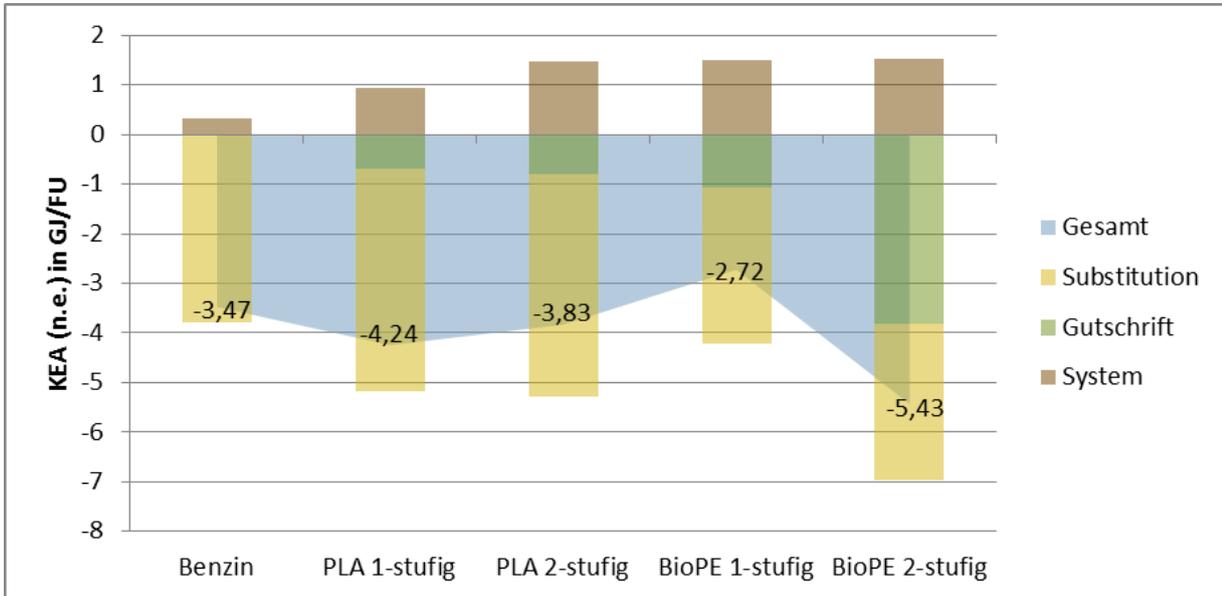
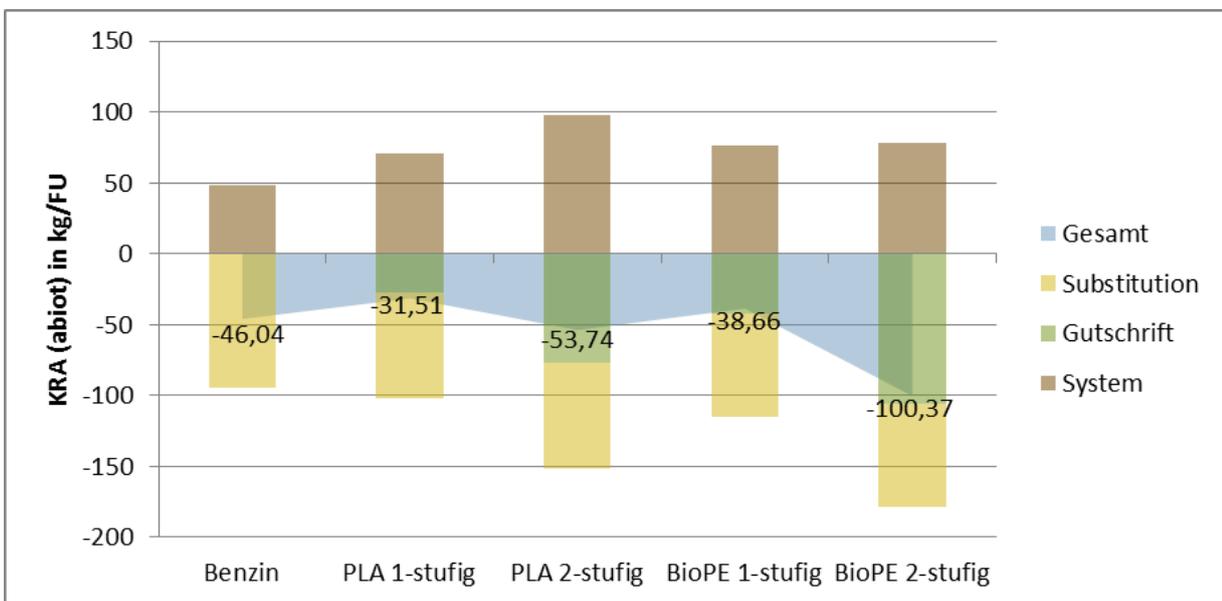


Abbildung 37 Ergebnis zum nicht erneuerbaren Rohstoffaufwand ($KRA_{\text{abiotisch}}$) für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung; FU: funktionale Einheit = 1 Tonne Zuckerrohr als Rohstoffbasis

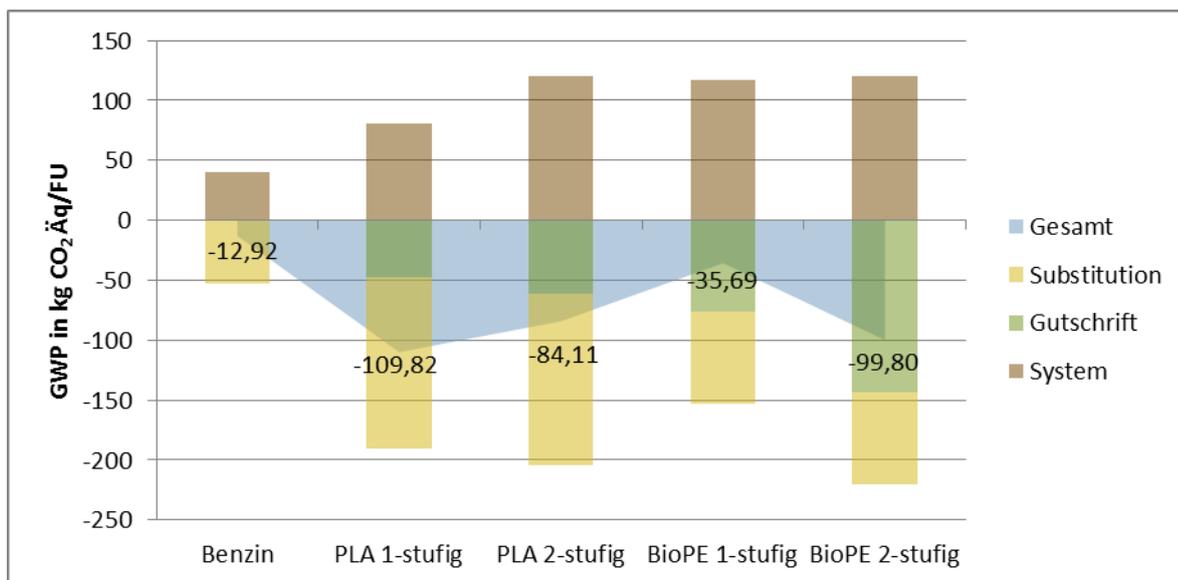


8.2.1.2 Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential)

Die Betrachtung der Ergebnisse für die Wirkungskategorie Klimawandel zeigt die umweltseitige Überlegenheit der stofflichen Nutzung gegenüber der rein energetischen. Der Vergleich der stofflichen Nutzungskaskaden untereinander weicht jedoch deutlich von dem Bild ab, welches die Ressourcenbewertung bislang gezeigt hat. Die einstufige stoffliche Nutzung als PLA ist aus Klimagesichtspunkten unter den Randbedingungen der durchgeführten Modellierung die beste Option.

Dies liegt nicht zuletzt auch an den hohen Umweltlasten der fossilen PS-Produktion, die im Falle der PLA Szenarien vermieden werden können. Sicherlich spielt an dieser Stelle auch die gegenüber dem BioPE höhere Materialausbeute aus dem Agrarprodukt (Zuckerrohr) eine ergebnisentscheidende Rolle. Insofern sind die Ergebnisse auch vor dem Hintergrund der funktionellen Einheit (Produkte aus 1.000 kg Zuckerrohr) zu interpretieren. Die zweite Stufe der stofflichen Nutzungskaskade reicht dem PLA-System auch im Falle des Klimawandels nicht zum Vorteil, da die Lasten der Wiederaufbereitung die Höhe der erzielbaren Gutschrift übertreffen. Die BioPE-Systeme zeigen das gewohnte Bild der annähernden Verdopplung der Gutschriften durch die zweite Stufe der stofflichen Kaskade. Dennoch liegt das Nettoergebnis gut 10 % hinter dem der besten PLA Route.

Abbildung 38 Ergebnis zu Treibhausgasemissionen (GWP100) für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung



8.2.1.3 Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial und Stratosphärischer Ozonabbau

Die drei Wirkungskategorien Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial und Stratosphärischer Ozonabbau können ohne weiteres gemeinsam diskutiert werden, da ihre Ergebnisse in weiten Teilen von den gleichen Lebenswegabschnitten (nämlich Anbau der Biomasse und Konversion der Biomasse) bestimmt werden und die durch Substitution und Gutschrift vermiedenen Umweltlasten am Gesamtergebnis nur eine nahezu untergeordnete Rolle spielen. Das gegenüber den fossilen Pendanten nachteilige Abschneiden von biobasierten Produkten in diesen drei Wirkungskategorien ist durch eine Vielzahl andere Studien schon identifiziert worden, so dass in der Literatur bisweilen schon von einem prototypischen Befund gesprochen wird. Die hohen Beiträge zu den Umweltlasten entstammen den Agrarprozessen und werden überwiegend durch den bei der Düngung in die Luft freigesetzten Ammoniak hervorgerufen. Im Falle des Zuckerrohrs und seiner verschiedenen, hier untersuchten Konversionsrouten kommen noch die Feuerungsprozesse der Zuckerrohraufbereitung dazu (insbesondere die

Verbrennung der Bagasse). Daher zeigen auch die Produkte, die im Verarbeitungsprozess eher am Ende der Kette liegen (PE) auch höhere Systemlasten als die Ethanol- und PLA-Pfade.

Abbildung 39 Ergebnis zum Versauerungspotenzial für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung

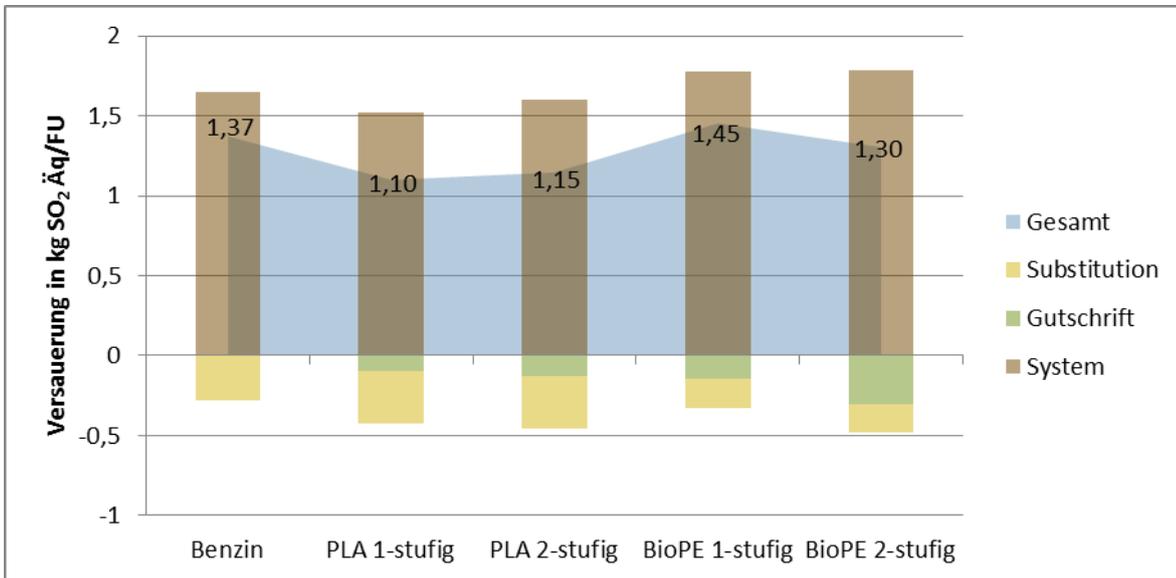


Abbildung 40 Ergebnis zum Eutrophierungspotenzial für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung

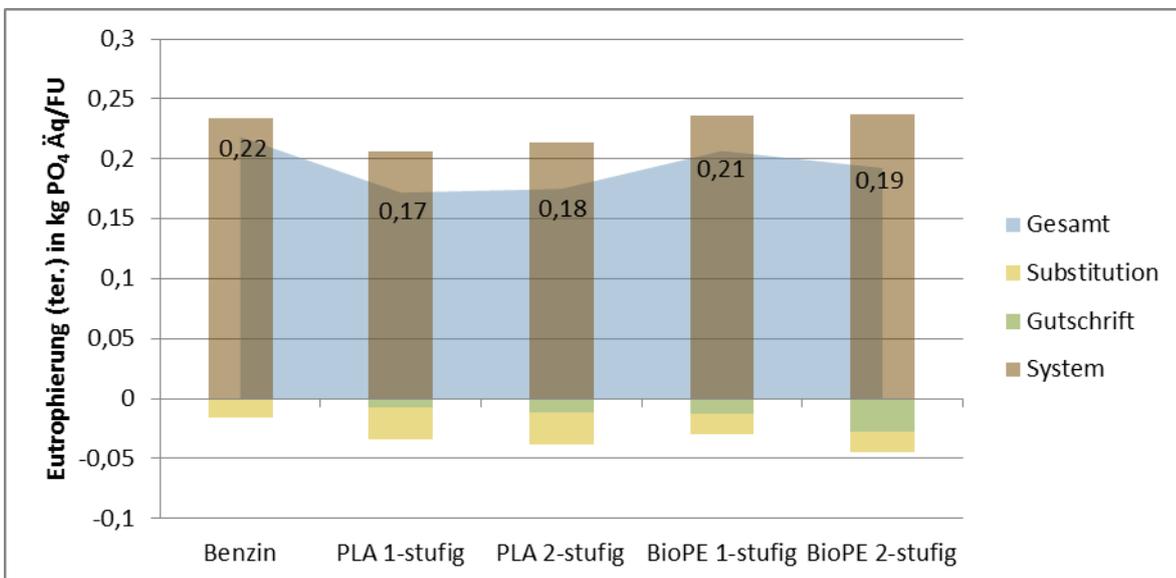
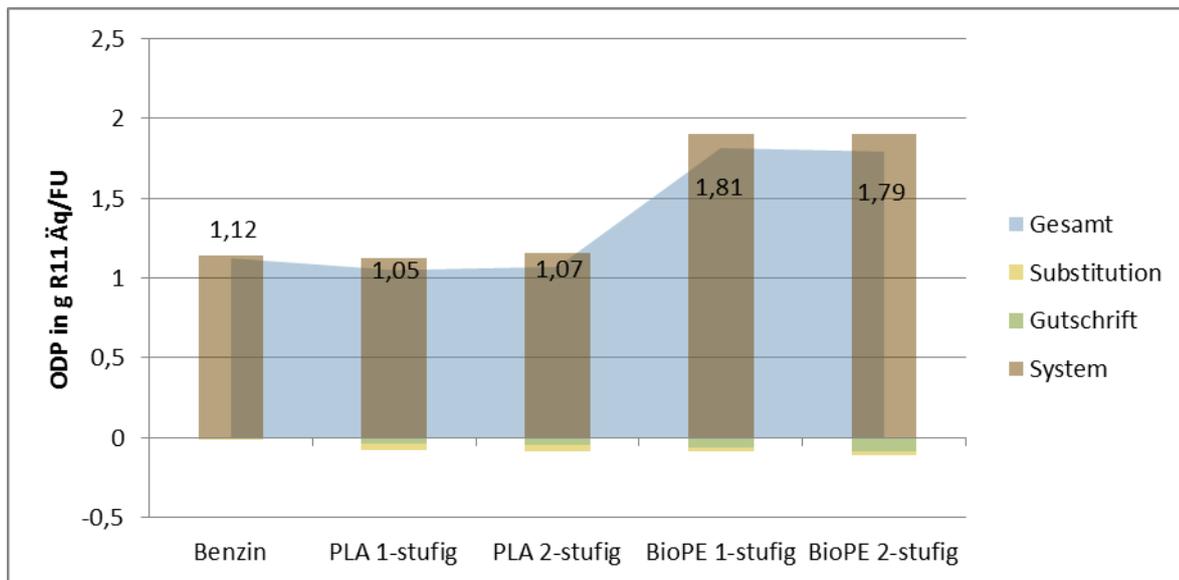


Abbildung 41 Ergebnis zum stratosphärischen Ozonabbau für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung

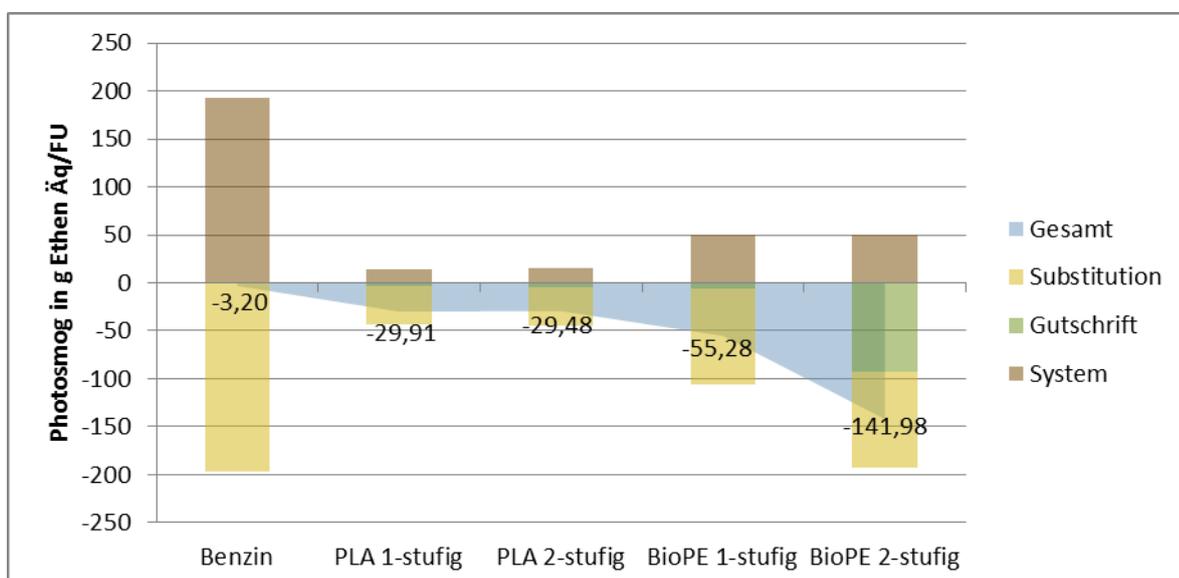


Generell lässt sich ein Umweltvorteil gegenüber der rein energetischen Verwertung in diesen drei Wirkungskategorien nur für die PLA-Routen zweifelsfrei feststellen. Bei den BioPE-Routen können die Gutschriften im Falle der zweistufigen stofflichen Nutzung zu einem gegenüber der Kraftstoffnutzung leicht vorteilhaften Ergebnis führen (Ausnahme stratosphärischer Ozonabbau, ODP).

8.2.1.4 Photosmog

Die Ergebnisse für das Umweltproblemfeld bodennaher Ozonbildung zeigen ein komplett anderes Bild als die drei zuvor diskutierten Wirkungskategorien. Bei der energetischen Nutzung dominieren die Systemlasten, resultierend aus der Verbrennung des Ethanols im PKW. Allein die Anrechnung der durch Substitution von Benzin vermiedenen Umweltlasten führt in der Summe zu einem negativen Gesamtergebnis.

Abbildung 42 Ergebnis zum Photosmog für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung



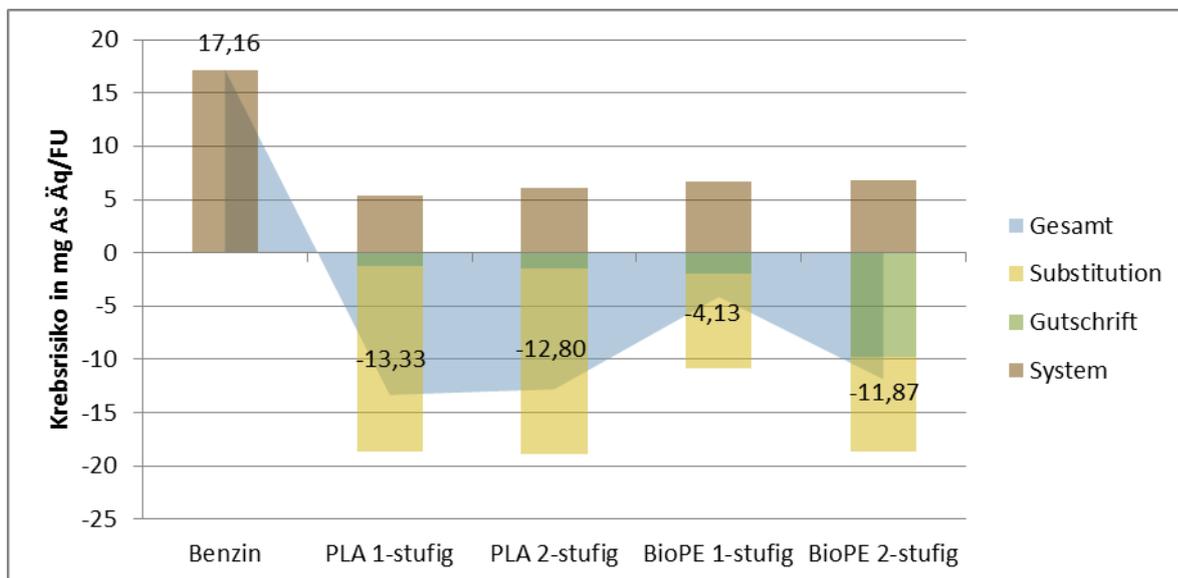
Die Szenarien der stofflichen Nutzung zeigen deutlich geringere Systemlasten aufgrund der anderen Verbrennungsprozesse und Ableitbedingungen der Abgase. Hinsichtlich der Substitution zeigt sich, dass das Umweltprofil fossilem PE einen deutlich höheren Ethen-Äq. Emissionswert hat als PS. Dem entsprechend fallen auch die Gesamtergebnisse aus, was insbesondere im Szenario der doppelten stofflichen Nutzung von BioPE deutlich wird.

8.2.1.5 Humantoxizität

Krebsrisikopotenzial

Die Auswertung der Wirkungskategorie Krebsrisikopotenzial angegeben als As-Äq. zeigt auf den ersten Blick eine datenseitige Unzulänglichkeit im Modell. Der für die Benzinvorkette verwendete Datensatz beinhaltet keine Daten zu den für diese Wirkungskategorie relevanten Sachbilanzgrößen. Somit kann die Substitution von Umweltlasten im Falle der energetischen Nutzung nicht sachgerecht dargestellt werden.

Abbildung 43 Ergebnis zum Humantoxizitätsindikator „Krebsrisikopotenzial“ für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung

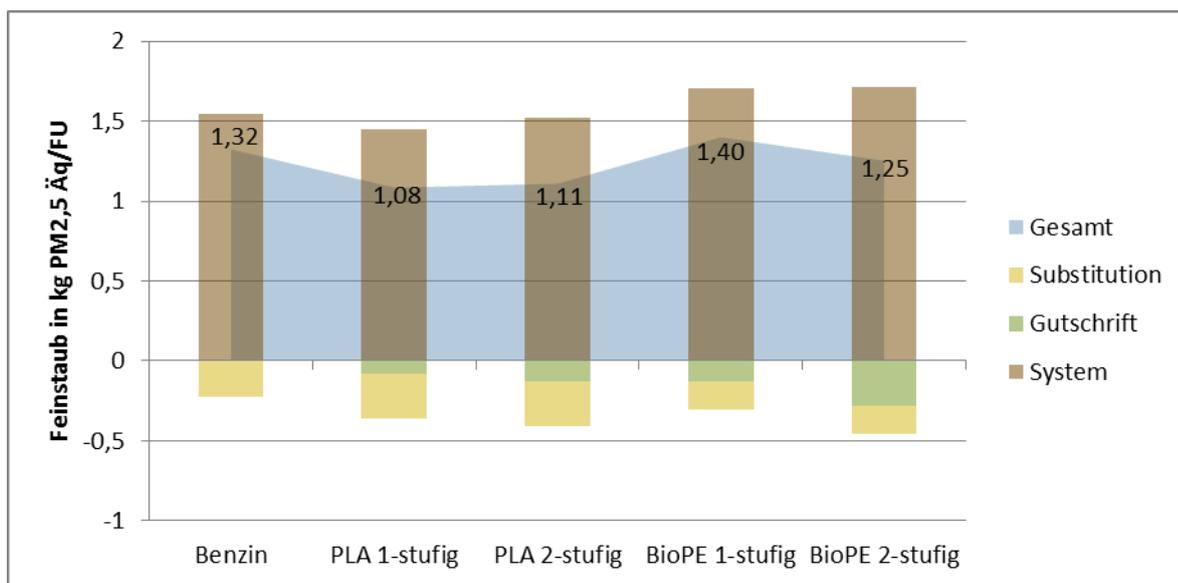


Dennoch lassen sich aus den Ergebnissen interessante Rückschlüsse ableiten. So fallen die Systemlasten im Falle der stofflichen Nutzung deutlich geringer aus. Die Höhe der Substitution bestimmt wiederum das Ergebnis. Aufgrund der hohen Umweltlasten von PS, die in der Bilanzierung durch PLA substituiert werden, führen zu einem positiven Abschneiden der PLA-Kaskaden gegenüber anderen Nutzungen. Wie an anderer Stelle gesehen, zeigt die stofflich-energetische Route Vorteile gegenüber der langkettigen Kaskade

Feinstaub (PM2.5)

Der Wirkungsindikator Feinstaub (PM_{2,5}) zeigt hinsichtlich der grundsätzlichen Ergebnisausrichtung kein allzu neues Bild. Ähnlich wie im Falle der Versauerung sind die PLA-Routen der rein energetischen Nutzung des Zuckerrohrs als Kraftstoff überlegen, im Falle der BioPE-Route bedarf es der zweistufigen stofflichen Nutzung um Vorteile gegenüber der energetischen Nutzung zu erlangen. Der Grund dafür liegt weniger in den substituierten oder durch Gutschrift vermiedenen Umweltlasten sondern in den Daten aus dem Lebenswegabschnitt der Konversion. Die Verbrennung der Bagasse bei der Zuckerrohrkonversion erfolgt ohne sonderlich effiziente Feinstaubminimierung. Von daher tragen die Produkte die im Verarbeitungsprozess eher am Ende der Kette liegen (PE) auch höhere Systemlasten.

Abbildung 44 Ergebnis zum Humantoxizitätsindikator „Feinstaub (PM2.5)“ für die untersuchten Kaskaden von Biokunststoffen im Vergleich zur rein energetischen Nutzung



8.2.1.6 Naturrauminanspruchnahme

Die Ergebnisse der Wirkungskategorie Naturrauminanspruchnahme werden dominiert von der Gutschrift im System der zweistufigen PLA-Kaskade. Die Höhe der Gutschrift resultiert aus der Annahme, dass mit der Kunststoffpalisade, die ja das Sekundärprodukt der Wiederaufbereitung von PLA ist, Beton und Holzpalisaden ersetzt werden. Somit erzielt das System eine – wenn auch geringe – Holzgutschrift. Diese jedoch zeigt bei der bewerteten Naturrauminanspruchnahme bilanzdominierende Ergebnisse. Die weiteren Ergebnisse unterscheiden sich nur in Nuancen und werden größtenteils von dem Einsatz biogener Energieträger im substituierten oder gutgeschriebenen Material/ Energie bestimmt. Durch die Setzung der funktionellen Einheit auf „Produkte aus 1.000 kg Zuckerrohr“ steht der Indikator Flächeninanspruchnahme auch nicht als Indikator für die Konversionseffizienz von der Fläche zum fertigen Produkt zur Verfügung.

8.2.2 Normierung und Rangbildung

In Tabelle 19 werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung normiert in Einwohnerdurchschnittswerte (EDW). Hierzu wurden die Summenwerte aus Tabelle 18 durch die durchschnittlichen pro-Kopf-Werte aus Tabelle 1 dividiert. Die Bezugsmenge ausgehend vom Anbau von 1.000 t Zuckerrohr wird dabei beibehalten: Sie korrespondiert wie in Abschnitt 8.1 beschrieben mit einer Biokunststoffmenge im Bereich von 50 kg. Der Pro-Kopf-Verbrauchsmenge an Kunststoffen in Deutschland liegt nach Zahlen von PlasticsEurope bei 120 kg im Jahr, der Verpackungsbereich nimmt davon etwa 40 kg ein (Consultic 2014). In etwa korrespondiert das Mengenbeispiel daher mit dem Verbrauch an Verpackungskunststoff eines Bundesbürgers.

Stellt man alle fünf betrachteten Optionen in normierter Weise gegenüber (siehe Abbildung 45, oben), ist erkennbar, dass die Wirkungskategorien Versauerung, Eutrophierung, stratosphärischer Ozon (ODP) und Feinstaub gegenüber den Referenzsystemen im Bereich um die 0,04 EDW (das entspricht 4 % an der individuellen Emissionslast eines Einwohners) zu Nettolasten führen. Ursache ist die nmi-den agrarischen Prozessen verbundene Last von Anbaubiomasse als Rohstoff (→ Stickstoffemissionen aus der Düngenanwendung), unabhängig davon, wie die Biomasse genutzt wird. Im Gegensatz dazu führen alle Optionen bei den Ressourcen, bei Klimaschutz und beim Sommer-Smog zu Nettoeinsparung.

Wichtiger ist aber die Betrachtung der Unterschiede zwischen den Optionen, insbesondere im Vergleich zur Option „Benzin“ der direkten Nutzung der Biomasse als Energieträger (siehe Abbildung 45, unten). Daraus ist ersichtlich, dass in den meisten Kategorien die Kaskaden-Optionen fast durchgehend im Vorteil sind. Die Vorteile liegen überwiegend im von 0,005 bis 0,001 EDW. Die PLA-Optionen sind praktisch durchgehend im Vorteil und die zweistufige Kaskade liegt gleichfalls immer vor der einstufigen. Somit ist hier das Ergebnis eindeutig. Bei den Bio PE-Optionen fallen die Nachteile beim KEA (0,005 EDW bei 1-stufig), Versauerung und Feinstaub (0,003 EDW bei 1-stufig) und insbesondere bei ODP (1- und 2-stufig mit 0,015 EDW) an.

Tabelle 19: Kondensation der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Kaskade von Biokunststoffen.

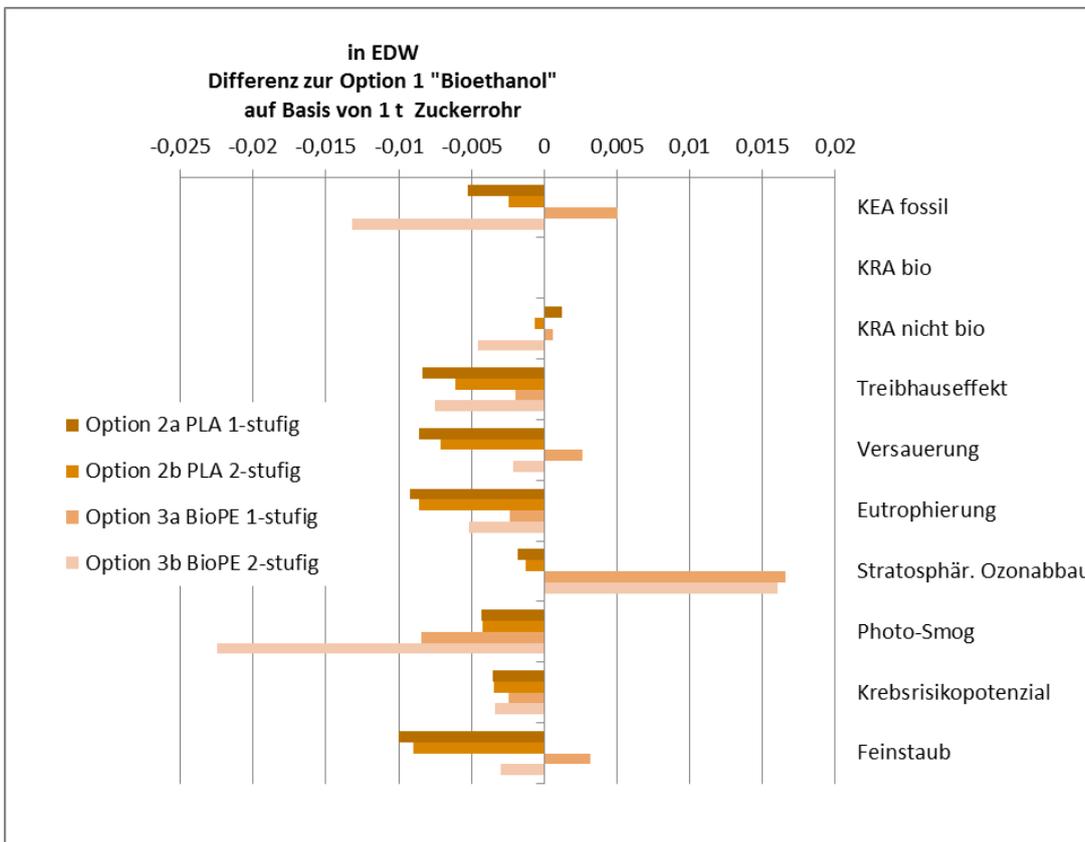
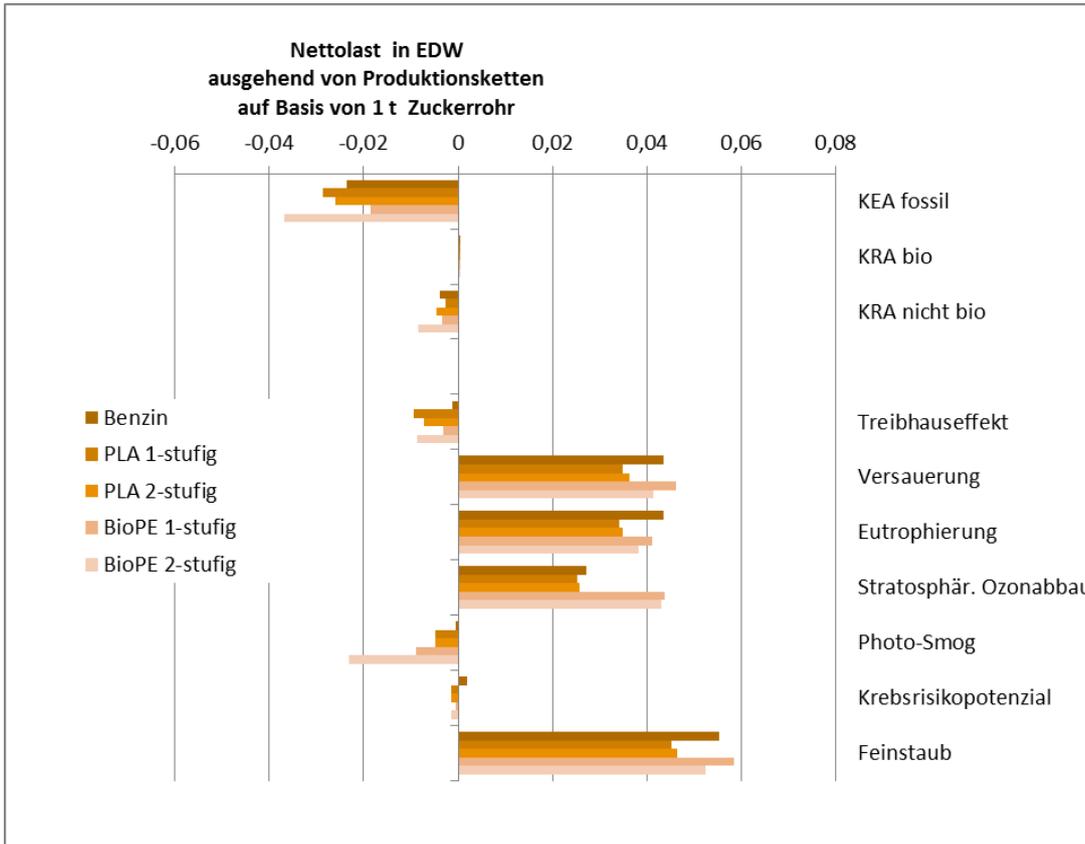
Wirkungskategorie	energetische Nutzung	stofflich PLA + energetische Nutzung	stofflich PLA + Recycling + energetische Nutzung	stofflich BioPE + energetische Nutzung	stofflich BioPE + Recycling + energetische Nutzung
Ressourcenbeanspruchung KEA nicht erneuerbar	-0,024	-0,029	-0,026	-0,018	-0,037
KRA bio	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
KRA abiotisch	-0,0039	-0,0026	-0,0045	-0,0032	-0,0084
Treibhauseffekt (GWP)	-0,0011	-0,0095	-0,0072	-0,0031	-0,0086
Versauerung	0,043	0,035	0,036	0,046	0,041
Eutrophierung	0,043	0,034	0,035	0,041	0,038
Strat. Ozonabbau (ODP)	0,027	0,025	0,026	0,044	0,043
Photo-Smog (POCP)	-0,00052	-0,0048	-0,0048	-0,0089	-0,023
Humantoxizität: Krebsrisikopotenzial	0,00013	0,00012	0,00012	0,00021	0,00021
Feinstaub (PM _{2.5})	0,055	0,045	0,046	0,058	0,052

Anders als bei den vorangehenden Kaskadenbeispielen ist hier die Ergebnislage - zumindest was BioPE betrifft – nicht so eindeutig. Die Normierung allein reicht hier somit nicht aus. Die Rangbildung für die ökologische Bedeutung der Wirkungskategorien kommt hier ins Spiel.

Der deutlichste Nachteil liegt beim stratosphärischen Ozonabbau und wiegt für die beiden BioPE-Optionen mit 0,015 EDW gegenüber der Biokraftstoffnutzung) vergleichsweise schwer. Nun wird dieser Wirkungskategorie seit UBA (1999) zwar eine „hohe ökologische Gefährdung“ jedoch eine weitgehende Erfüllung des Schutzziels („Distance to Target“) zu Grunde legt. Damit wäre diese Kategorie mit einer insgesamt mittleren ökologischen Priorität zu bewerten.

Da nun zumindest bei der zweistufigen BioPE-Kaskade so gut wie alle anderen Kategorien positiv ausfallen (beim Photo-Smog mit einer ähnlich priorisierten Kategorie in etwa einem gleichen Wert an EDW), ist für diese Variante insgesamt ein Vorteil gegenüber der direkten Nutzung als Energieträger deutlich zu erkennen. Bei der einstufigen BioPE-Kaskade sieht es deutlich anders aus: hier stehen vier vorteilige (GWP, Eutrophierung, Krebsrisikopotenzial, Photo-Smog) fünf nachteiligen Kategorien (KEA, KRA, Versauerung, ODP und Feinstaub) gegenüber. In Abwägung der Rangbildung nach ökologischen Prioritäten und der normierten Unterschiede ist die einstufige BioPE-Kaskade als gleichrangig mit der rein energetischen Nutzung zu bewerten ist.

Abbildung 45 Nettoergebnisse der Optionen der Biokunststoff-Kaskade normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW (oben) und Differenz der Kaskaden-Optionen gegenüber der Option „Benzin“ (unten).



8.2.3 Kaskadenbezogene Bewertung

Die Gesamtschau der Ergebnisse der ökobilanziellen Abschätzung der Kaskaden von Biokunststoffen lässt unter Berücksichtigung der hier begründet getroffenen Annahmen und Festlegungen die folgenden Schlussfolgerungen zu:

- ▶ Die stoffliche Nutzung von Biomasse ist der rein energetischen Nutzung bspw. als Kraftstoff in allen untersuchten Umweltproblemfeldern überlegen und von daher zu favorisieren.
- ▶ Der umweltseitige Effekt der Kaskadennutzung hängt nicht unmittelbar mit der Anzahl der Nutzenzyklen zusammen sondern wird auch im starken Maße vom substituierten Produkt beeinflusst. Wird, wie im vorliegenden Falle der PLA-Routen ein Produkt mit hohen Umweltlasten (PS) substituiert, kann auch eine einstufige Kaskade (stoffliche Nutzung mit anschließender Verbrennung) Vorteile gegenüber einer hochwertigen zweistufigen Kaskade haben. Es hängt dann in der Bewertung vom Vergleich der fossilen Äquivalenzprodukte ab.
- ▶ Innerhalb einer stofflichen Nutzungsrouten ist eine mehrstufige stoffliche Nutzungskaskade nur dann mit positiven Umwelteffekten verbunden, wenn hochwertige Sekundärprodukte hergestellt werden können wie im Falle des Drop-In-Kunststoffs BioPE. Wenn die Aufbereitungslasten die erzielbaren Gutschriften übersteigen wie im Falle des PLA sollte einer kurzkettingen Kaskade der Vorzug gegeben werden.

Zugegebenermaßen ist insbesondere der dritte Punkt in der Praxis schwer zu bestimmen.

8.3 Fazit

Aufgrund der noch geringen Anteile an Biokunststoffen im Kunststoffsektor ist das Thema Kaskadennutzung hier noch sehr unausgereift und weitgehend vom etablierten Stand des Recyclings bei konventionellen Kunststoffen abhängig. Das bedeutet jedoch auch, dass analog zu den überwiegend positiven Ökobilanzergebnissen des generellen Kunststoffrecyclings auch vergleichbar gute Werte für die Biokunststoffe zu erwarten sind.

Gerade wegen der noch geringen Marktanteile betrachten die vorangehenden Ökobilanzen vorerst die Substitution von fossilen Kunststoffen, nicht die Substitution von primärem durch kaskadierten Biokunststoff. Setzen sich die Biokunststoffe jedoch langfristig durch, wäre die Vergleichsbasis anzupassen, und dann ließe sich auch die Ressourceneffizienz bezüglich Biomasse und Fläche errechnen. Das Zahlenmaterial liegt durch die vorliegende Arbeit im Grunde vor.

9 Ergebnisse der sozio-ökonomischen Betrachtung

9.1 Soziale Aspekte der Kaskadennutzung

Anders als bei der Ökobilanz ist die Vorgehensweise für eine soziale Nachhaltigkeitsanalyse (S-LCA, social life cycle assessment) noch nicht standardisiert. Auf dieses Defizit machen viele Experten bereits seit Jahren aufmerksam. Zwar liegen verschiedene Methodenvorschläge, doch wurden diese bisher erst in Einzelstudien erprobt.

In diesem Abschnitt wird eine übersichtsartige Analyse ausgewählter sozialer Kriterien erstellt, die dazu dienen soll, für die im Rahmen der Ökobilanz in Kapitel 5 bis 8 ausgewählten Nutzungskaskaden und ihre Alternativprodukte und -prozesse ein grobes qualitatives Schema der sozialen Aspekte zu erstellen.

9.1.1 Methodische Ansätze und Auswahl von Kriterien

Die von der Life Cycle Initiative der UNEP/SETAC (2009) veröffentlichten *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products* haben erste Standards für derartige Analysen erstellt. Der Vorzug dieses Ansatzes ist, dass er sehr eng an dem Muster der Ökobilanz nach ISO 14040/14044 entwickelt wurde. Im Unterschied zu umweltbezogenen Ökobilanzen bedarf es bei der Definition von Bewertungskategorie nicht nur die Ebene der Wirkungen (Impact category), sondern auch der Stakeholder (siehe in Tabelle 20).

Tabelle 20: Kategorien im Rahmen des S-LCA-Ansatzes der UNEP/SETAC (2009)

Stakeholder categories	Subcategories	Impact categories
“worker”	Freedom of Association and Collective Bargaining Child Labour Fair Salary Working Hours Forced Labour Equal opportunities/Discrimination Health and Safety Social Benefits/Social Security	Working conditions
“consumer”	Consumer Privacy Transparency End of life responsibility Health & Safety Feedback Mechanism	Health and Safety
“local community”	Access to material resources Access to immaterial resources Delocalization and Migration Cultural Heritage Safe & healthy living conditions Respect of indigenous rights Community engagement Local employment Secure living conditions	Cultural heritage Governance
“society”	Public commitments to sustainability issues Contribution to economic development Prevention & mitigation of armed conflicts Technology development Corruption	Human rights
Value chain actors	Fair competition Promoting social responsibility Supplier relationships Respect of intellectual property rights	socio-economic repercussion

Keller et al. (2015) haben unter dem Begriff Integrated life cycle sustainability assessment (ILCSA) ebenfalls eine Methodik entwickelt, die soziale Wirkungen in Form einer Lebensweganalyse bewertet und zusammen mit ökonomischen Kenngrößen gleich in eine umweltbezogene Ökobilanz einbezieht. Die Methode wurde im Rahmen verschiedener EU Projekte zur Bewertung von Bioraffinerien eingesetzt. Die zur Bewertung sozialer Effekte eingesetzten Kriterien sind dabei:

- ▶ Feedstock Produktion: liegen Fördersysteme, Anreize vor?
liegen Barrieren/Hemmnisse vor?
- ▶ Sind die Stakeholder identifiziert? Produzenten (Anbau), Weiterverarbeiter, Handel
- ▶ Einfluss auf ländliche Entwicklung? Straßenbau, Wassererschließung
- ▶ Arbeitsbedingungen (ILO)
- ▶ Konkurrenz um Reststoffe

Bei der Anwendung solcher Methoden wird in der Regel rasch deutlich, wie viel schwieriger soziale Effekte durch einen bestimmten Produktionsweg „kalkulierbar“ sind, verglichen mit den dagegen recht klaren Umwelteffekten, die sich aus den Material- und Energieströmen erschließen. Eine solche Anwendung ist umso schwieriger, wenn es sich nicht um konkrete Projekte eingebettet in ein definiertes soziales und politisches Umfeld handelt, sondern abstrakte Szenarien zu bewerten sind.

Eine Schlüsselfunktion für eine Bewertung sozialer Effekte stellt in jedem Falle die Stakeholder-Analyse dar. Stakeholder stellen in der LCA-Begriffsebene im Grunde die „Endpunkte“ dar, die von Wirkungen betroffen sein können. Zu den Stakeholdern wären aber auch die „Treiber“ zu zählen, die die Effekte durch ihr wirtschaftliches Handeln erst auslösen.

In den folgenden Abschnitten soll daher für die betrachteten Biomassekaskaden eine Beschreibung wesentlicher Stakeholder das Potenzial möglicher sozialer Effekte beschrieben werden.

9.1.2 Erkenntnisse mit Blick auf die Holzkaskaden

9.1.2.1 Räumliche Dimension

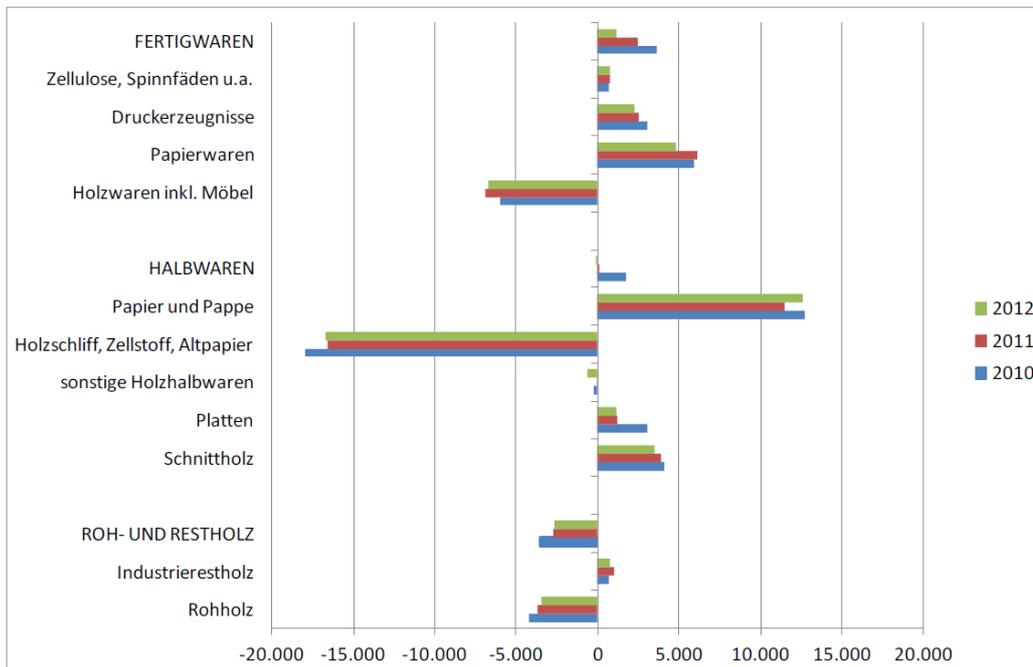
Die in Kapitel 5 untersuchten Holzkaskaden konzentrieren sich auf den inländischen Wirtschaftsraum. Es finden jedoch auch Importe statt. Nach Seintsch und Weimar (2013) importiert Deutschland netto zwischen 3 und 4 Mio. m³ Rohholz im Jahr – das entspricht einem Anteil von etwas unter 5 %. Dabei handelt es sich überwiegend um (sägefähiges) Nadelstammholz.⁹ Die wichtigsten Herkunftsländer sind dabei Polen die Tschechische Republik und Lettland.

Bei Zellstoff und Papierprodukten sehen die Verhältnisse deutlich anders aus: hier werden mehr Rohstoffmengen importiert (Nettoimport 17 Mio. m³, inkl. Altpapier) als aus inländischen Quellen (ca. 11 Mio. m³ nach Mantau (2012)) eingesetzt. Dafür weist Deutschland wiederum in gleichem Umfang Exportüberschüsse bei Papier und Papiererzeugnisse auf. Importüberschüsse liegen auch bei Möbeln vor: 7 Mio. m³ beträgt hier der Netto-Importsaldo bei einem Marktvolumen von rund 10 Mio. m³ Holzmöbel in Deutschland (nach Auswertungen DeStatis).

Der Kreis der Stakeholder reicht somit über Deutschland hinaus, wobei im Bereich der Roh- oder Halbstoffe hauptsächlich europäische Länder betroffen sind.

⁹ Importiertes Energieholz liegt wie Tropenholz jeweils in einem Bereich unter 0,2 Mio m³

Abbildung 46: Außenhandelssaldo der Bundesrepublik Deutschland mit Holz und Produkten auf der Basis Holz nach Warengruppen der Jahre 2010 bis 2012 in 1.000 m³ (Quelle: Seintsch und Weimar 2013)



Die soziale Schlüsselfrage der Nord-Süd-Gerechtigkeit ist von diesem Komplex somit eher nur am Rande betroffen. Ein effizienterer Umgang mit dem Rohstoff Holz durch verstärkte Kaskadenführung erfordert keine zusätzlichen Einfuhren dieses Rohstoffs. Im Bereich von Fertigerzeugnissen können in bestimmten Nischenmärkten sich jedoch Marktpotenziale verschieben. Bei einer Verdrängung von (inländischem) Energieholz ist zu beachten, dass der Markt sich dann stärker auf Import verlegen könnte.

Deutlich stärkere grenzübergreifende Effekte kann die Substitutionswirkung für verdrängte Produkte mit sich führen, wie z.B. bei Verdrängung von Metallprodukten (v.a. Baustahl).

9.1.2.2 Stakeholderkreis

Unternehmen in der Wertschöpfungskette

So komplex wie die Stoffstromflüsse, so vielschichtig und zahlreich sind die Stakeholder-Verhältnisse im Holzsektor. Der Deutsche Forstwirtschaftsrat e.V. (DFWR) errechnet, dass im Cluster Forst und Holz 1,1 Mio. Personen in Deutschland beschäftigt sind.¹⁰ Darin enthalten sind jedoch auch die Sektoren der Papierwirtschaft und des Verlage- und Druckereigewerbes, die zusammen in etwa die Hälfte der Beschäftigten ausmachen.

Im eigentlichen „Holzsektor“ liegen die großen Arbeitsplatzanteile nach einer Analyse des Thünen-Instituts für die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF):¹¹

- ▶ im Holzbau (Schreiner, Zimmerer, Ingenieurholzbau und Parkettleger),
- ▶ in der Möbelherstellung und
- ▶ in der Holz bearbeitenden Industrie (Sägewerke, Holzwerkstoffindustrie).

¹⁰ <http://www.forstwirtschaft-in-deutschland.de/forstwirtschaft/forstwirtschaft-in-deutschland/>

¹¹ <http://www.lwf.bayern.de/forsttechnik-holz/betriebswirtschaft/050299/index.php>

Kleinere Beschäftigungsanteile liegen dagegen im Holzhandel und der Forstwirtschaft.

Für Holzbau, Möbelherstellung und Holzwerkstoffindustrie bieten die Optionen verstärkter Kaskadennutzung gerade weitere Märkte und damit Beschäftigungsmöglichkeiten. Die volkswirtschaftlichen Aspekte werden im Abschnitt 9.2 nochmals genauer beleuchtet.

Waldbesitzer

Diese Gruppe wäre betroffen, wenn die Ausrichtung der Holzwirtschaft in Richtung mehr Kaskadennutzung Rückwirkungen auf die Nutzung der Wälder haben sollte. Dies wäre jedoch nur der Fall, wenn durch Kaskadennutzung insgesamt der Holzbedarf verringert würde. Ob dieser Effekt eintritt, ist jedoch fraglich. Er wäre im Übrigen eher unter betriebswirtschaftlichen Aspekten zu werten als unter sozialen. Soziale Aspekte wären ggf. für den Kreis der privaten Klein- und Kleinstwaldeigentümer zu erwägen. Diese machen etwa die Hälfte der Privatwaldfläche ein, die insgesamt wiederum ebenfalls die Hälfte der Gesamtwaldfläche umfasst, sprich: etwa 25 % der Waldfläche befindet sich in Privatbetrieben mit weniger als 20 Hektar (BMEL 2014). Gerade in diesen Betrieben findet eine weniger intensive Nutzung statt als in den übrigen Größenklassen. Sie sind somit auch von möglichen Veränderungen im Bereich der Holzwirtschaft in Richtung mehr Kaskadennutzung eher weniger betroffen als die intensiver genutzten privaten Großbetriebe.

Haushalte mit Holz zur Wärmeversorgung

Die Bedeutung von Energieholz zur Wärmeversorgung hat in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Viele Haushalte haben von Heizöl oder Erdgas auf Pelletfeuerungen umgestellt. Nach Zahlen der FNR¹² nutzten mehr als jeder vierte deutsche Haushalt Scheitholz, Holzpellets oder Hackschnitzel zum Heizen. In Deutschland gibt es etwa 14 Millionen Einzelraumfeuerstätten, überwiegend Kaminöfen und Kachelöfen in welchen vorwiegend Scheitholz eingesetzt wird. Dies kann in verschiedener Weise motiviert sein, z.B.:

- ▶ Erwartung eines kostengünstigen Brennstoffs
- ▶ Nachwachsender Brennstoff mit überwiegend gutem Umweltimage
- ▶ Behaglichkeit und Lebensstil
- ▶ Fortführung einer insbesondere im ländlichen waldnahen Raum naheliegenden Tradition, oftmals auch verbunden mit der sogenannten Selbstwerbung¹³.

Auch hier ist eine Betroffenheit nur gegeben, wenn Maßnahmen zur Förderung der Kaskadennutzung die diese Nutzungsweise einschränken würden.

Tourismus und Erholung

Der Wald hat für die Bevölkerung in Deutschland eine wichtige Rolle für die physische und psychische Regeneration und wird für Erholung, Freizeit und Sport intensiv genutzt. Etwa zwei Drittel der Bevölkerung besucht den Wald mindestens einmal pro Jahr (BMEL 2011).

Ein Einfluss auf diesen Sektor durch eine verstärkte Kaskadennutzung wäre auch hier nur denkbar, wenn sie durch einen veränderten Bedarf an der Ressource Holz die Form der Waldwirtschaft verändern würde. Wie in Abschnitt 5.2.1.8 überschlüssig beschrieben, könnten ein gewisser Flächenanteil

¹² <http://www.fnr.de/nachwachsende-rohstoffe/bioenergie/heizen-mit-holz/>

¹³ Das sind Privatpersonen, die eigenhändig und auf eigene Rechnung Brennholz aus einem Wald entnehmen auf der Grundlage eines Vertrags oder per Absprache mit dem Waldbesitzer bzw. dem zuständigen Förster.

aus der Nutzung genommen werden, was dort die Waldstruktur verändern würde. Nach UBA (2016) ist jedoch das Ziel der Nationalen Biodiversitätsstrategie von 5 % aus der Nutzung genommener Waldfläche bisher nicht erreicht, sodass aus dieser Sicht Stilllegungen noch erforderlich sind. Im Übrigen ist davon auszugehen, dass durch den im Prozess befindlichen Umbau des Waldes zu mehr Laubholzarten unter Rückdrängung der Fichte der Charakter des Waldes sich in deutlicherem Umfang gerade in der landschaftlichen Wirkung verändern wird.

9.1.2.3 Zusammenfassung

Soziale Aspekte der Holzkaskade sortieren sich hauptsächlich in die beiden Kernbereiche des Waldes und der Wertschöpfungskette. Die sozialen Funktionen des Waldes werden nach Bundschuh, Schramm (2009) von der Erholungsfunktion dominiert, für die auch steigende Bedeutung auch in der Zukunft angenommen wird. Daneben werden die Bildungs- und (in geringerem Maße) Versorgungsfunktion genannt sowie die Rolle des Waldes als Arbeitsplatz. Verstärkte Kaskadennutzung wird hierauf eher kaum relevante Einflüsse haben.

Die Wertschöpfungsketten von Holzprodukten sind überaus komplex. Verstärkte Kaskadennutzung kann hier zu weiterer Vielfalt führen, was positiv für die Bereitstellung von Arbeitsplätzen zu werten ist. Im Übrigen können sich Angebote an hochwertigen Produkten aus Stoffkreisläufen mit positivem Umweltimage auch positiv auf soziale Verbrauchereinstellungen auswirken und die Wahrnehmung von nachhaltigen Produkten und Produktionsprinzipien schärfen.

9.1.3 Erkenntnisse mit Blick auf die Papierkaskaden

9.1.3.1 Räumliche Dimension

Wie bereits bei der Holzkaskade ausgeführt ist der Markt von Zellstoff und Papierprodukten in großem Maß von Importen und Exporten geprägt. Ein Großteil der Zellstoffimporte stammt aus skandinavischen Ländern.

Eine Verstärkung von Kaskadenführung auch bei Papier würde die Notwendigkeit von Importen eher reduzieren (ggf. könnte das Volumen an Altpapierimport ansteigen).

9.1.3.2 Stakeholderkreis

Unternehmen in der Wertschöpfungskette

Auf die Bedeutung des Arbeitsmarkts der Sektoren der Papierwirtschaft und des Verlage- und Druckereigewerbes mit ca. 600.000 Arbeitsplätzen in Deutschland wurde bereits hingewiesen.

Wie im vorangehenden Abschnitt erwähnt, würde eine Steigerung der Kaskadenführung durch die Verschiebung von importierten Rohstoffen und Primärpapier (vorrangig aus Schweden und Finnland) stärker zu binnenwirtschaftlich gehandhabten Sekundärstoffs Altpapier eher Arbeitsplätze im Inland schaffen oder sichern.

Verbraucher

Papier ist ein Massengut des Alltags. Auch wenn der Verbrauch an graphischen Papieren etwas rückläufig ist (was den elektronischen Medien zugeschrieben wird), so nimmt der Verbrauch an Verpackung deutlich zu (was dem Zuwachs des Versandhandels über das Internet zugeschrieben wird).

Für Verbraucher sind die Sicherstellung der hohen Qualität sowie die Schadstofffreiheit der Erzeugnisse entscheidende Faktoren. In beiden Punkten ist die Papierproduktion in Deutschland bzw. Europa so weit entwickelt, dass hier keine Problematik entstehen sollte.

Bei der Abfalltrennung hat separate Papiersammlung eine lange Tradition und ist verankert im Verbraucherverhalten. Hier ist eine hohe Akzeptanz vorhanden, was generell vorbildhaft für das Denken in Stoffkreisläufen und Kaskadennutzung wirken kann.

9.1.3.3 Zusammenfassung

Soziale Aspekte der Papierkaskade liegen vorrangig im Bereich von Arbeitsplatzsicherung im Wirtschaftssektor sowie in der Wechselwirkung mit den Verbrauchern. Steigerung der Kaskadennutzung kann in beiden Bereiche positive Effekte bewirken. Die Produktqualität muss jedoch gesichert bleiben. Angesichts der hochentwickelten Standards sind hier Risiken eher als gering einzuschätzen.

9.1.4 Erkenntnisse mit Blick auf die Textilkaskaden

9.1.4.1 Räumliche Dimension

Der Textilsektor ist in besonderem Maße von globaler Bedeutung. Baumwolle, als die weltweit wichtigste biobasierte Textilfaser ist eines der bedeutendsten agrarischen Welthandelsgüter und steht bezüglich der sozialen Aspekte in den Anbauländern häufig in starkem Fokus.

Mit etwa 35 Mio. Hektar werden mehr als 2,5 % der weltweit potenziell bebaubaren Landfläche für die Baumwollproduktion verwendet mit wachsendem Ausbau. Die Hälfte davon liegt in Indien und China. Weitere Großproduzenten sind die USA, Pakistan, Brasilien und Usbekistan.

Auch bei den Textilien sind Herstellung und Märkte hochgradig globalisiert: nach Zahlen des BMWi¹⁴ werden in Deutschland in 2015 für knapp 11 Mrd. € Textilien produziert und für 39 Mrd. € importiert. Die Hälfte des Imports stammt aus Asien, v.a. China und Bangladesch. Da hierdurch vor allem die eher billigeren Segmente abgedeckt werden, ist der massenbezogene Anteil noch deutlich größer anzusetzen.

9.1.4.2 Stakeholderkreis

Der betroffene Stakeholder-Kreis ist insofern in besonderem Maße in den Produzentenländern zu sehen, aus welchen Deutschland Baumwolle und Baumwolltextilien importiert. Die Dimension und die stetig wachsende Produktion von Baumwolle machen dabei deutlich, dass in den betroffenen Entwicklungsländern Flächenkonkurrenzen zur Nahrungsmittelerzeugung vorprogrammiert sind, wo sie nicht schon heute bestehen. Die in vielen Ländern üblichen staatlichen Subventionen für Baumwollanbau (auch in China und Indien) fördern dabei die Risiken von Verdrängungen.

Ethnische Konflikte

Die bedeutendste Anbauregion in China ist die konfliktreiche Autonome Uighurische Region Xinjiang. Eine der zentralen Ursachen der ethnischen Auseinandersetzungen dort liegt in den Verteilungskämpfen um Land und Wasser. Die Staatsfarmen für Baumwolle spielen dabei eine bedeutende Rolle (Ferenschild 2013).

Arbeitende im Baumwollanbau

Nach Ferenschild (2013) sind weltweit 27 Mio. Menschen im Baumwollanbau tätig, 99 % davon in Entwicklungsländern. Es handelt sich somit um jeweils bedeutende Erwerbszweige in den Ländern.

¹⁴ <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Wirtschaft/branchenfokus,did=196538.html>

Die Arbeitsbedingungen sind dabei vielfach als problematisch zu bezeichnen, die Bezahlung entsprechend gering, die Gesundheitsrisiken groß (v.a. auch durch den Pestizideinsatz). Gerade in China aber auch in Afrika arbeiten vornehmlich Frauen als Pflückerinnen, was teilweise zum Niedrighalten der Lohnkosten ausgenutzt wird, andererseits Frauen eine Einkommensquelle eröffnet.

Betroffene Bevölkerung in Anbaugebieten.

Die starke Ausdehnung des Baumwollanbaus in vielen Gebieten Chinas und Indiens führt gerade im bewässerten Anbau zu einem Absinken des Grundwasserspiegels, zu Vegetationsverlusten und in der Folge zu Bodenerosion bis Desertifikation. Das Beispiel Xinjiang zeigt sogar grenzübergreifende Folgen durch die Flusswasserentnahmen bedroht damit den Wasserhaushalt in mehreren Staaten der Region Zentralasien (Ferenschild 2013).

TextilarbeiterInnen

Die Arbeitsverhältnisse in diesem Sektor sind durch katastrophale Ereignisse insbesondere aus Bangladesch - einem der größten Produktionsländer der Welt - bekannt. Drei Viertel des Exportvolumens des Landes sind Textilprodukte. Die Zahl der Beschäftigten in der Textilindustrie dieses Landes wird auf zwei bis drei Millionen geschätzt. Auch hier dominieren Frauen mit geringen Löhnen und prekären Arbeitsbedingungen. Doch bietet gerade dieser Sektor den Frauen oft die einzige Möglichkeit, überhaupt Geld zu verdienen und ihre Familien zu versorgen. ¹⁵

Unternehmen in der Wertschöpfungskette im Inland

In Deutschland ist die Textil- und Bekleidungsindustrie auf ein Minimum geschmolzen. Der Importanteil liegt bei 90%. Die Bekleidungsindustrie hat hier allenfalls noch die kostenintensive Planung, die Designsparte und die Verwaltung im Inland, die arbeitsintensive Fertigung dagegen ist nahezu komplett ausgelagert.

Karitative Dienste bzw. davon Begünstigte

Ein großer Anteil Alttextilien wird über karitative Dienste (oder auch kommerzielle Händler) gesammelt. Auch ein größerer Anteil der über Altkleidercontainer erfassten Mengen gelangen schließlich in der Vermarktung oder Abgabe in ärmeren Ländern bzw. an Bedürftige. Dieses System ist seit langem etabliert und arbeitet sehr effizient und auch ökologisch sinnvoll (siehe Ergebnisse aus Kapitel 7). Dennoch ist das Prinzip nicht konfliktfrei: da die Kleider sehr lange werden, d.h. ein Wechsel nicht in demselben Tempo wie die Nachlieferungen erfolgt, ist z.T. die Ausbildung regelrechter „Rückstaus“ zu beobachten. Mehrere afrikanische Staaten haben im Übrigen einen Importstopp für gebrauchte Kleidung verhängt (Schmidt 2010).

Verbraucher

Der Kleidungskonsum ist in Deutschland bzw. Europa von einem immer größer werdenden Angebot bei immer weiter sinkenden Preisen gekennzeichnet. Der Verbrauch hat sich in wenigen Jahren verdoppelt (Schmidt 2010). Dabei ist das Verbraucherverhalten ist von vielen Faktoren beeinflusst, die häufig den Zielsetzungen für ein ökologisch wie sozial verträgliches Produkt entgegenstehen. Allein der hohe Umsatz verbunden mit schneller Entledigung konterkariert das Attribut von Langlebigkeit.

¹⁵ <http://bangladesch.org/bangladesch/wirtschaft-und-armut/textilindustrie/textilarbeiterinnen-in-bangladesch.html>

Für eine verstärkte Umsetzung von Kaskaden im Textilbereich wird vermutlich die große Breite der Verbraucher weniger erreichbar sein. Andererseits eignet sich gerade der Textilsektor für innovative Nischen, die auf ausgefallene Trends und Zeitgeistentwicklungen ansprechen.

9.1.4.3 Zusammenfassung

Die sozialen Schwerpunkte im Textilsektor liegen klar in den Produktionsländern von Baumwolle und Textilien in Ländern wie China, Indien, Bangladesch. Diese Industriezweige stellen für die Länder auf der einen Seite wirtschaftliche Chancen dar und somit auch Einkommensquellen gerade für ärmere Bevölkerungsschichten. Doch folgen die Arbeitsverhältnisse vielfach kaum menschenwürdigen Standards.

Ob nun mit einer verstärkten Kaskadennutzung von Textilien und einer damit verbundenen Verminderung des Materialverbrauchs eine positive Wirkung gegenüber diesen sozialen Missständen oder gar das Gegenteil erreicht wird, wird auch durch intensive sozio-ökonomische Analysen nur schwer zu ergründen sein. Dazu ist die Sachlage zu komplex und der Markteffekt einer Kaskadennutzung mit Sicherheit zu marginal.

Doch kann ein deutliches Bekenntnis zum effizienten Umgang mit der problembeladenen Ressource Baumwolle anstelle eines bedenkenlosen Zuwachses an Verbrauch hier nicht unwesentliche Signale setzen. Eine insgesamt höhere Wertschätzung des Rohstoffs und seiner Produkte angesichts der schwerwiegenden Folgen der Herstellungskette sollte jedenfalls positive Wirkung ermöglichen.

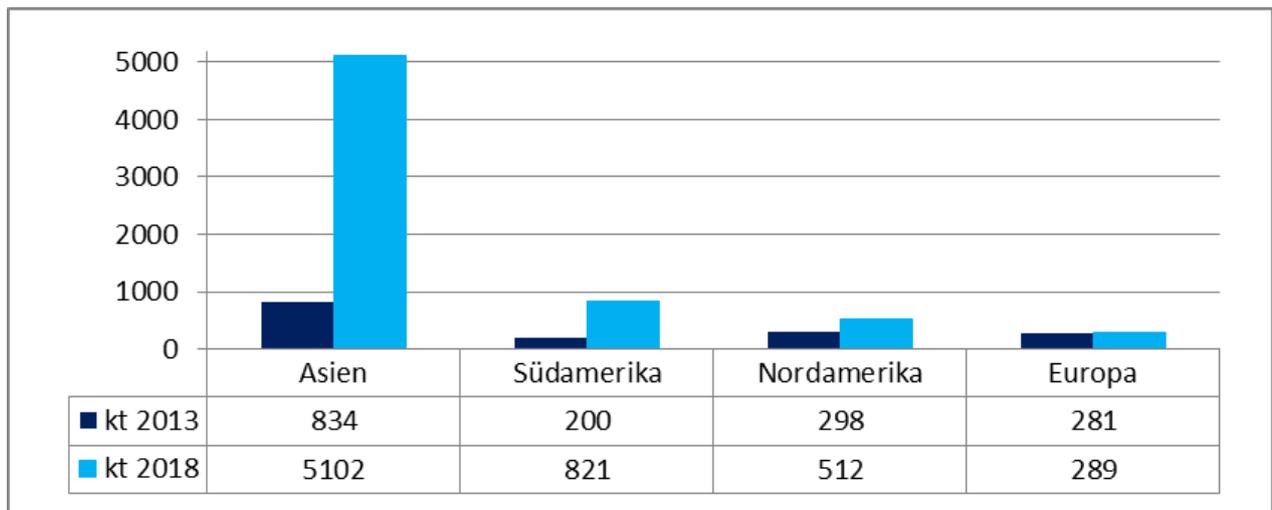
9.1.5 Erkenntnisse mit Blick auf die Biokunststoffkaskaden

9.1.5.1 Räumliche Dimension

Auch der Kunststoffsektor - und damit der Bereich der Biokunststoffe - ist in weitem Umfang globalisiert. Massenkunststoffe werden auf dem Weltmarkt gehandelt. Deutschland stellt dabei einen großen Produzenten und Nettoexporteur mit einer Produktion von ca. 20 Mio. t im Jahr, einem Export von 12,2 Mio. t und einem Import von 85 Mio. t (Consultic 2014).

Beim Biokunststoffen ist die Lage anders: Waren bis vor kurzem die globalen Produktionskapazitäten noch nahezu gleichmäßig über die vier Regionen Europa, Nordamerika, Südamerika und Asien/Ozeanien verteilt (Detzel et al. 2012), so findet gemäß der aktuellen Zahlen bei EuBP (2014) der weitere Ausbau der Kapazitäten vor allem in Asien und Südamerika statt. Dort werden bis 2018 Kapazitäten von ca. 6 Mio. t erwartet, während Europa ohne nennenswerte Zuwächse bei 0,29 Mio. t. Bei der Rohstoffherkunft handelt es sich dabei fast durchgehend um Zuckerrohr, das über Ethanol zu BioPE, BioPET und PLA verarbeitet wird.

Abbildung 47 Produktionskapazitäten von Biokunststoffen nach Weltregionen 2013 und 2018; Quelle: Daten (EuBP 2014), Grafik ifeu



Damit richtet die Frage möglicher sozialer Effekte durch Biokunststoffe bzw. deren Kaskadenführung vornehmlich auf die Betroffenen in den Produzentenländern. Die diesbezüglichen Problemlagen sind umfassend in vielen Studien zum Thema Nachhaltigkeit von Anbaubiomasse (v.a. aus der Biokraftstoffdebatte) diskutiert.

9.1.5.2 Stakeholderkreis

Betroffene Bevölkerung in Anbaugebieten

Wesentliche Stakeholder sind somit die von Landumwidmungen (Thema Vertreibung) betroffenen Menschen, von Arbeitsverhältnissen auf Großplantagen, von Umweltfolgen auf die lokale Bevölkerung (Pestizide, Wasserverknappung) ggf. betroffene Kreise.

Die Rolle der Kaskadennutzung in Bezug auf die sozialen Aspekte ist hier in gleicher Weise zu bewerten wie für Baumwolle (s.o.).

Unternehmen in der Wertschöpfungskette

Angesichts des weltweiten Wachstumsmarkts für Kunststoffe und des von der Strategie der Bioökonomie in Europa und den USA angetriebenen Marktes für Biokunststoffe zur Ablösung der fossil-basierten Polymere ist das Potenzial dieses Produktionsbereichs nicht zu unterschätzen. Für die Unternehmen bedeutet das erhebliche ökonomische Chancen, wodurch sich auch neue Beschäftigungsmöglichkeiten ergeben.

Doch angesichts der bekannten Konflikte durch Anbaubiomasse im großen Maßstab ist die Verantwortung der Produzenten hervorzuheben: neben der zwingenden Sicherstellung von Nachhaltigkeitsstandards der Lieferkette ist gerade der effiziente Umgang mit der Ressource Biomasse geboten, sprich aktives Voranbringen von Recyclingfähigkeit der biobasierten Kunststoffherzeugnisse und Ausrichtung der Technik auf den Einsatz von Reststoffbiomasse.

Verbraucher

Da die meisten Biokunststoffe stoffgleich mit ihren fossilen Pendanten sind oder äußerlich kaum von üblichen Materialien zu unterscheiden, sind die Verbraucher kaum von Umstellungen betroffen. Letztlich bleibt es eine Frage, ob Kostenerhöhungen damit verbunden werden, die an die Konsumenten

weitergegeben werden. Hier sind die Marktzusammenhänge jedoch sehr komplex um eine Richtungsaussage treffen zu können.

9.1.5.3 Zusammenfassung

Ähnlich wie beim Textilsektor liegt die Frage sozialer Aspekte auch hier eindeutig in den Anbauländern für die Rohstoffe. Derzeit liegt der Produktionsschwerpunkt hier klar auf Zuckerrohr. Bei aller Wichtigkeit für die Länder die landwirtschaftliche Produktion für die nationale oder regionale Wertschöpfung nutzen zu können, so zwingend ist hier die Wahrung von Landrechten und sozialen Standards.

Die Kaskadennutzung des Materials kann hier zunächst nur einen kleinen Beitrag zur Entlastung leisten, steht hier aber wie bei der Baumwolle für das Paradigma eines effizienten Umgangs mit konfliktträchtigem Ressourcen- und Flächenkonsum.

9.2 Ökonomische Aspekte der Kaskadennutzung

Zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Kaskadennutzung werden im Folgenden volkswirtschaftliche Effekte diskutiert. Volkswirtschaftliche Effekte werden zumeist auf nationaler Ebene beschrieben werden. Das Betrachtungssystem der nachfolgenden Betrachtung ist die Veränderung der Wertschöpfung im System „Deutschland“. Die Wertschöpfung beschreibt dabei den Wert der wirtschaftlichen Leistungen der Wirtschaftseinheiten innerhalb einer bestimmten Periode abzüglich der von außen bezogenen Vorleistungen.

Oft wird in der Literatur auch „regionale Wertschöpfung“ analysiert, um genauere Effekte für einzelne Regionen darzustellen (vgl. z.B. Hirschl et al. 2010). Ein generelles Problem bei der Erstellung solcher Modelle zur Abschätzung regionaler Wertschöpfungseffekte ist die stark eingeschränkte Datenverfügbarkeit. Um beispielsweise mögliche Vorleistungsketten berücksichtigen zu können, werden unter anderem umfassende Input- Output-Tabellen für das gewünschte Untersuchungsgebiet benötigt. Eine solche Tabelle liegt aggregiert lediglich für das gesamte Bundesgebiet vor. Zwar gibt es zum Teil kleinräumigere Abschätzungen auf Länderebene, allerdings weisen diese bereits deutlich größere Ungenauigkeiten auf.

Zielsetzung der ökonomischen Betrachtung ist zunächst die Beantwortung der Frage an die gesamtökonomischen Auswirkungen der verstärkten Nutzung von Biomasse in Kaskaden.

9.2.1 Vorgehensweise

Im Rahmen des Projektes waren keine grundlegende eigene Erhebung von statistischen Daten und anschließende eigene Berechnungen vorgesehen. Vielmehr sollten die wichtigsten bisherigen Projekte und Veröffentlichungen untersucht werden auf Aussagen von Erkenntnissen zum Thema volkswirtschaftliche Aspekte der Kaskadennutzung. In Projektdatenbanken wie der TIB, der FNR Projektdatenbank oder anderen wurden zunächst bundesweite Projekte zum Thema Kaskadennutzung recherchiert und dann auf Fragestellungen zum Thema Makroökonomie hin untersucht.

Anschließend wurde in internationalen Journals untersucht, in wie fern das Thema Kaskadennutzung Teil der Publikationen ist und welche Beiträge diese Veröffentlichungen zur obigen Darstellung liefern können. Bei dieser Untersuchung ist v.a. das Portal ELSEVIER zu nennen.

Aus diesen Ergebnissen heraus wurden die wesentlichen Untersuchungen tiefergehend auf folgende Fragen hin untersucht:

- ▶ Was ist Untersuchungsgegenstand? Werden gezielte Kaskaden und ihre Auswirkungen in Deutschland untersucht oder wird allgemein die energetische Nutzung mit der stofflichen Nutzung verglichen?
- ▶ liefert die Literatur Ergebnisse hinsichtlich Wertschöpfungseffekten auf eine ganze Kette der Kaskadennutzung oder aber nur auf ein Produkt (wie z.B. Holzfaserdämmstoffe)?
- ▶ Wurden Szenarien gebildet, um verschiedene Effekte zu vergleichen? Oder wurde ein Ist-Vergleich der letzten Jahre durchgeführt?

Mit diesen Fragen sollte die Arbeit auf die Kaskadendefinition des Projektes eingehen und dabei untersuchen, in wie fern Wertschöpfungseffekte von Kaskaden untersucht sind.

9.2.2 Ergebnisse

Eine erste ganzheitliche Betrachtung der Kaskadennutzung und damit einhergehend auch das Adressieren volkswirtschaftlicher Fragestellungen finden sich in Arnold et al. (2010). Dabei werden für zwei Stoffgruppen und deren Kaskaden zwar Arbeitsplatzeffekte – als Teil einer volkswirtschaftlichen Bewertung - diskutiert, jedoch nicht auf Basis nationalstatistischer Daten analysiert, sondern nur „schlaglichtartig bewertet“ (Arnold et al. (2010), S. 123). Es wird lediglich auf andere Studien verwiesen und

z.B. für den Bereich der Papierindustrie einen Faktor von sechs gegenüber der direkten energetischen Nutzung angegeben (Pöry (2006), zitiert in Arnold et al (2010), 114).

Die aktuellste und umfassendste Veröffentlichung zu volkswirtschaftlichen Aspekten einer Kaskadennutzung ist in der Langfassung des Projektes „Ökologische Innovationspolitik – mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse“ (nova et al. 2014) dargestellt. Die Methodik und die Ermittlung volkswirtschaftlicher Indikatoren der stofflichen Nutzung von Biomasse im Vergleich zur energetischen Nutzung waren dabei Teil der Untersuchungen. Verschiedene Studien werden zudem in einer Literaturanalyse verglichen. Im Fokus stehen dabei „Wertschöpfung“ und „Beschäftigung“ als volkswirtschaftliche Messgrößen. Methodisch wird die Input-Output Analyse als Instrument der Bewertung der einzelnen Nutzungspfade verwendet und anhand der Ergebnisse die Pfade miteinander verglichen. Untersuchungsgegenstand waren (i) Holzfaserdämmstoff vs. Steinwolle und (ii) Polystyrol vs. Polylactid.

Im Hinblick auf die Einordnung der gesamten Prozesskette ist es wichtig, volkswirtschaftlich relevante Kenngrößen aller Stufen der Wertschöpfungskette zu recherchieren. Zu beachten ist weiterhin, dass länderübergreifende volkswirtschaftliche Effekte (z.B. Beschäftigung, Einkommen) in die Input/ Output Analyse nicht einfließen. Die Studie kommt jedoch zum Schluss, dass die Ergebnisse auf Grund der Versuchsanordnung volkswirtschaftlichen Effekte nicht zuverlässig abbilden können (nova et al. 2014, S. 65).

Die vTI- Veröffentlichung mit dem Titel „Volkswirtschaftliche Bedeutung der biobasierten Wirtschaft in Deutschland“ (Efken et al. 2012) ist eine wichtige Quelle für Informationen zu Volkswirtschaftlichen Gesamtschätzungen im Bereich der Bioökonomie. Das Projekt zeigt eindrucksvoll die Komplexität der biobasierten Wirtschaft. So können alleine dem „Textilgewerbe“ 17 verschiedene Wirtschaftsklassen (Viersteller) zugeordnet werden. Für alle Bereiche der Bioökonomie werden die Strukturparameter Wertschöpfung, Beschäftigte, Umsatz und Zahl der Unternehmen erarbeitet (Efken et al. S. 6 ff). Zum Thema Kaskadennutzung – und damit die Auswirkungen von Veränderungen eines Stoffstromes in den verschiedenen Wirtschaftsklassen - wird in der Veröffentlichung jedoch nur folgende Aussage getroffen: „Allgemein ist bekannt, dass die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe im Vergleich zur energetischen Nutzung meist eine höhere Wertschöpfung und Beschäftigung pro Tonne Biomasse bietet, da sie eine größere Verarbeitungstiefe erreicht und die Möglichkeit der Kaskadennutzung besitzt (FNR, 2010).“ (Efken et al. S. 36)

In dem Projekt „Ökologische Innovationspolitik“ und dessen Veröffentlichung werden Substitutionspaare gebildet, um einen Vergleich der biobasierten Erzeugung und der herkömmlichen Erzeugung zu erreichen (z.B. Holzfaser- versus Steinwollendämmstoff; BioPET versus PET auf Erdölbasis). Somit werden nicht Wirtschaftsbranchen untersucht sondern einzelne Produkte. Die inländische Wertschöpfung saldiert sich in Millionen Euro in dem Substitutionspaar Holzfaserdämmstoffe und Steinwolle. Nach diesen Aussagen ist der volkswirtschaftliche Gesamteffekt der Holzfaserdämmstoffe positiv zu bewerten. Daneben wird in dem Projekt eine Einschätzung gegeben auf die Effekte bzgl. der direkten energetischen und stofflichen Nutzung. Basis der Zusammenstellungen sind auch Ergebnisse aus dem Projekt „Förderinstrumente für die stoffliche Nutzung Nachwachsender Rohstoffe“ von Carus et al. (2010) sowie Pöry (2006). Alle Daten sind – vor dem Hintergrund der angewendeten Methoden und der betrachteten Zeiträume – mit Vorsicht zu interpretieren.

Eine Möglichkeit zur Darstellung dieser Effekte könnten die vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (z.B. Landwirtschaft und Forstwirtschaft) sein. Hierbei wäre jedoch keine strikte Detailbranchenabtrennung möglich, es könnten lediglich auf übergeordneten Ebenen Einschätzungen getroffen werden, die in Teilen sehr grob sind. Die Darstellungen des Projektes „Ökologische Innovationspolitik“ enthalten Daten aus anderen Studien, die sich dem Thema „Wertschöpfung“ und „Beschäftigung“ bei der stofflichen und energetischen Holznutzung widmen (Carus et al. (2010) sowie Pöry (2006)). Diese Analyse beschränkt sich auf direkte Bruttoeffekte hin-

sichtlich Wertschöpfung und Beschäftigung. Die gefundene höhere Brutto-Wertschöpfung und Brutto-beschäftigung bei den stofflichen Verwertungspfaden resultiert nach Aussage der Autoren primär aus den erheblich längeren Wertschöpfungsketten (kaskadierte Nutzung) gegenüber der energetischen Nutzungen. Da die Vorleistungsverflechtungen in die Berechnung mit einfließen, haben die kaskadierten Nutzungen einen deutlichen Vorteil gegenüber kurzen, nicht-kaskadierten Nutzungspfaden.

Aus der Zusammenschau resultiert eine vergleichende Einschätzung, anhand der von „einer Bandbreite des Faktors der direkten Beschäftigungswirkung der stofflichen Nutzung gegenüber der energetischen Nutzung im Bereich 5 bis 10 liegt und von einem entsprechenden Faktor der direkten Bruttowertschöpfung im Bereich von 4 bis 9 ausgegangen werden“ (nova et al. 2014, S. 207).

Der Untersuchungsgegenstand der meisten Studien war jedoch Holz. Dabei wurde oftmals die direkte energetische Nutzung mit der direkten stofflichen Nutzung verglichen (z.B. Schwarzbauer und Stern (2010) oder Wern et al. (2014)). Wern et al (2014) erarbeitet mit regionalökonomischen Clusteranalysen die Entwicklung der stofflichen Industrie in einer vorgegebenen Region während des Holzenergiebooms 2002 – 2010. Direkte Auswirkungen sind für die untersuchte Region dabei nicht zu erkennen. Vielmehr spielen in einer regionalen Betrachtung Besonderheiten wie das Ansiedeln oder das Wegfallen einzelner Unternehmen eine Rolle.

Ein Problem ist bei der Betrachtung von Holz die Nicht-Erfassung von Arbeitsplätzen im Kleinunternehmerbereich, da diese nicht in Statistiken geführt werden und somit nicht in Studien ausgewertet werden können (Wern et al. 2014). In der energetischen Nutzung von Holz ergibt sich jedoch eine Vielzahl von Kleinstunternehmer, den sogenannten Selbstwerbern. Im Bereich der größeren stofflichen und energetischen Nutzer mit mehr als 12 Mitarbeiter ist die Datenlage kein Problem. Insgesamt wird in der Literatur jedoch darauf abgehoben, dass die Holzkaskadennutzung positive Arbeitsplatzeffekte hat. So schlussfolgern schon Frühwald et al. (2010): „Aus sozioökonomischer Sicht ist die Förderung der stofflichen Nutzung des Holzes von vorrangigem Interesse, da an diese ein entsprechend großes Arbeitsplatzangebot geknüpft ist.“ Eine eingehende Berechnung der Netto - Arbeitsplatzeffekte ist jedoch nicht dargelegt.

9.2.3 Bewertung

Anhand der oben dargestellten Beispiele wurden aktuelle Arbeiten im Kontext der volkswirtschaftlichen Bedeutung einer Kaskadennutzung diskutiert. Alle Studien halten positive Eigenschaften der Kaskadennutzung bzgl. volkswirtschaftlicher Zusammenhänge fest. Keine der gefundenen Studien behandelt die volkswirtschaftlichen Effekte jedoch systematisch für die Kaskadennutzung. Volkswirtschaftliche Effekte der Kaskadennutzung im Rahmen der Bioökonomie wurden bisher noch nicht umfassend untersucht. Auf eine Quantifizierung von Effekten, die in anderen Studien festgestellt wurden, wird im Fazit aus diesem Grund verzichtet.

Aus Sicht der klassischen Wertschöpfungsdefinition macht die positive Bewertung der Kaskadennutzung jedoch Sinn, da eine Verlängerung von Wertschöpfungsketten ohne weiteren Rohstoffbedarf entweder eine Verringerung von Importen oder aber eine effektivere Nutzung des Bodens bzw. anderer endogener Ressourcen bedeutet. Somit werden bei gleichem Nutzen Vorleistungen von außen vermieden.

In einer empirischen Betrachtung von Kaskaden zum Beleg dieser Theorie müsste die Auswirkung einer verstärkten kaskadierten Nutzung auf allen Wirtschaftsklassen auf Basis von den im Projekt erarbeiteten Stoffströmen untersucht werden. Für den Sektor Holz gibt es hierzu sehr genaue Holzflussmodelle, die Mengen zuordnen und bewerten. Auf Basis dessen werden z.B. wie im vorliegenden Bericht Treibhausgasemissionen bilanziert. Ein Beispiel hierfür sind die Arbeiten von Mantau (2015). Auf Basis dieser Arbeiten könnten für verschiedene Wirtschaftsklassen Verschiebungseffekte einer Kaskadennutzung und deren volkswirtschaftlichen Auswirkungen berechnet werden. Methodisch

könnte hier z.B. an die für Dämmstoffe und Kunststoffe angewendeten Berechnungen aus nova et al. 2014 angeknüpft werden.

9.3 Betriebswirtschaftliche Aspekte

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden in den Arbeitspaketen zu bestehenden Konzepten der Kaskadennutzung (AP 1) und zu Erfolgsfaktoren und Hemmnissen (AP 3) verschiedene Firmen u.a. danach befragt, wie sich die Kaskadennutzung von der wirtschaftlichen Seite darstellt. Das Bild dazu ist so vielschichtig wie die Unternehmen und ihre Wirtschaftsgrundlagen verschieden sind.

9.3.1 Betriebswirtschaftliche Hemmnisfaktoren

Grundsätzlich lassen sich aus den Befragungen im Zusammenschau mit den breiteren Umfragen (siehe dazu in Anlagenbericht AP 3: *Erfolgs- und Hemmnisanalyse verschiedener Konzepte der Kaskadennutzung von Biomasse*) die Aspekte zusammenfassen, die aus betriebswirtschaftlicher Sicht als Risikofaktoren erachtet werden und die in vielen Fällen dazu führen, dass die unternehmerische Entscheidung zu Gunsten einer Kaskadennutzung eher unterbleibt.

Fehlende Kooperation zwischen den Akteuren in der Wertschöpfungskette

Kaskadennutzung ist ein systemisches Prinzip. Es umfasst nicht nur die Akteure einer Wertschöpfungskette sondern verbindet außerdem verschiedene Wertschöpfungsketten. Das einzelne Unternehmen in der Kette ist von der Upstream-Seite her an kostengünstigen Einsatzmaterialien und auf der Downstream-Seite an Produktakzeptanz durch den unmittelbaren Abnehmer interessiert. Weiter reicht der Horizont eines primär um seine Wettbewerbsfähigkeit besorgten Unternehmens nicht.

Das bedeutet, dass sich Kaskadennutzungen auf der Basis rein betriebswirtschaftlicher Überlegungen kaum bzw. nur in sehr seltenen Fällen von selbst etablieren. Die erfolgt im Grunde nur wenn sich die Nutzung eines zu kaskadierenden Ausgangsstoffs in den eigenen Produktionsprozess „rechnet“. Der Gesamtwirtschaftszusammenhang wäre aus der einzelnen Unternehmenssicht ein „strategisches Wagnis“.

Unsicherheiten bei der Rohstoffbereitstellung

In der Regel sind primäre Rohstoffe in ausreichendem Maße verfügbar, auch wenn die Preise dafür gelegentlich schwanken. Ein Rohstoff, der aus einer Kaskadennutzung zu beziehen ist, ist vom Wohl und Wehe der vorausgehenden Wertschöpfungskette abhängig, im Zweifel von einem oder wegen Lieferanten. Dazu kommt, dass Sekundärstoffe angebotsseitig vom Prinzip her knapper sind als primäre Rohstoffe. Im Zweifel sind sie zu niedrigeren Preisen zu bekommen, doch stehen dem in vielen Fällen Kosten durch den Aufbereitungsaufwand wegen der zumeist schwierigeren Qualität kaskadierten Materials entgegen.

Preisschwankungen für Biomasse

Dieser Aspekt kann auch positive für die Kaskadennutzung sein, wenn Preise für kaskadierte Material insgesamt stabiler sind. Umgekehrt können längere Phasen niedriger Rohstoffpreise für eine Investition in ein Kaskadensystem ein relevantes Risiko darstellen.

Fehlender Zugang zu Rest- und Abfallstoffen

Die Entsorgung von Abfall- und Reststoffen unterliegt vergleichsweise strengen Regelungen für die Branche. Zugang ist hier nicht ohne weiteres möglich. Die etablierten Marktakteure mit etablierten Verwertungs- und Beseitigungswegen bieten wenig Angriffsflächen für Wettbewerber.

9.3.2 Faktoren mit potenziell positiven Effekten

Wie bereits schon oben angeführt stellt der Aspekt der Rohstoffpreise bzw. der einer steigenden Rohstoffpreisentwicklung einen möglichen relevanten Faktor dar für den Erfolg eines unternehmerischen Wirtschaftsansatzes für eine Kaskadennutzung.

Die Trends über die letzten 10 Jahre am Weltmarkt zeigen bei den meisten Rohstoffpreisen eher Rückgänge oder Stagnation wie Abbildung 48 zeigt. Eine Ausnahme ist bei Holz zu erkennen. Dass der steigende Ressourcenverbrauch durch Verknappung sich früher oder später wieder in einem Preisanstieg niederschlagen wird, ist durchaus zu erwarten.

Abbildung 48 Preisentwicklungen an den Rohstoffmärkten für Holz, Ethanol, Baumwolle und Erdöl



Quelle: <http://www.boerse-online.de/rohstoffe/>

Neben der Rohstoffsicherheit spielt bei wachsendem Verbrauch auf die Rohstoffqualität, was Qualitätsunterschiede zu kaskadiertem Material verringern kann.

Weitere Aspekte bilden Preisentwicklungen bei Hilfs- und Betriebsstoffe und selbstverständlich auch für Energiepreise, sowie Infrastruktur etc.. Allgemeine Kostenanstiege können dazu führen, dass die strukturellen Nachteile von Kaskaden (siehe vorausgehender Abschnitt) an relativer Bedeutung verlieren.

10 Zusammenfassende Gesamtbewertung

Zur Kaskadennutzung von Biomasse liegen bereits verschiedene Ökobilanzen vor, daher wurden hier solche Kaskadenwege ausgesucht, die zusätzliche neue Erkenntnisse erwarten lassen. Untersucht wurden dabei folgende Kaskadensysteme:

- ▶ **Holz:** im Rahmen einer umfassenden Stoffstrombilanz für den gesamten Holzsektor wurden verschiedene Kaskadenszenarien modelliert, wie beispielsweise die teilweise oder vollständige Umlenkung von Altholz zu mehr stofflicher Nutzung in Holzwerkstoffen oder als Grundstoff für Syntheseprozesse (als Basis für Chemikalien oder „fortschrittliche“ Biokraftstoffe)
- ▶ **Papier:** ausgehend von einer verbrauchsüblichen Menge an Frischzellstoffpapier wird im Rahmen einer Übersichtsökobilanz der Effekt zusätzlicher Kaskadennutzung gegenüber direkter Energienutzung von Altpapier (= einstufige Kaskade) bewertet.
- ▶ **Textilien:** ausgehend von einer verbrauchsüblichen Menge an Baumwolltextilien werden im Rahmen einer Übersichtsökobilanz verschiedene Optionen der Nutzung von Alttextilien bewertet; Ziel: Reduktion des Verbrauchs des Rohstoffs Baumwolle.
- ▶ **Biokunststoffe:** ausgehend von einer bestimmten Anbaufläche für Biomasse werden Ökobilanzen zu ein- bis mehrstufigen Kaskaden für Produktsysteme aus Polylactid (PLA) und biobasiertem Polyethylenterephthalat (PET) im Vergleich zur Nutzung der Anbaubiomasse als Biokraftstoff (Ethanol) bewertet.

Die Ergebnisse sind insgesamt recht eindeutig: **Sinnvolle Kaskadenwege stellen sich beinahe immer als vorteilhaft gegenüber einfachen Nutzungen dar.** Die Vorteile sind in vielen Fällen zwar nicht besonders groß, aber dafür konstant, wie die zusammenfassende Darstellung über alle betrachteten Beispiele in Abbildung 49 zeigt.

Ein Grund für die oft knappen Vorteile liegt u.a. darin, dass die Ökobilanzmethodik mit dem Prinzip der Nutzengleichheit sehr stark erweiterte Systeme berechnet, die im Ergebnis häufig zu relativ geringen Unterschieden führen. Außerdem ist zu beachten, dass die Substitution fossiler Rohstoffe bzw. von Energieträgern durch die energetische Nutzung von Biomasse in den Systemen einen erheblichen Anteil an Emission bzw. Einsparung einnimmt, unabhängig davon ob diese Nutzung direkt oder erst nach einer Kaskade erfolgt. Die genaue Definition der Systeme ist in vielfacher Hinsicht entscheidend für die Gestaltung der Ergebnisse.

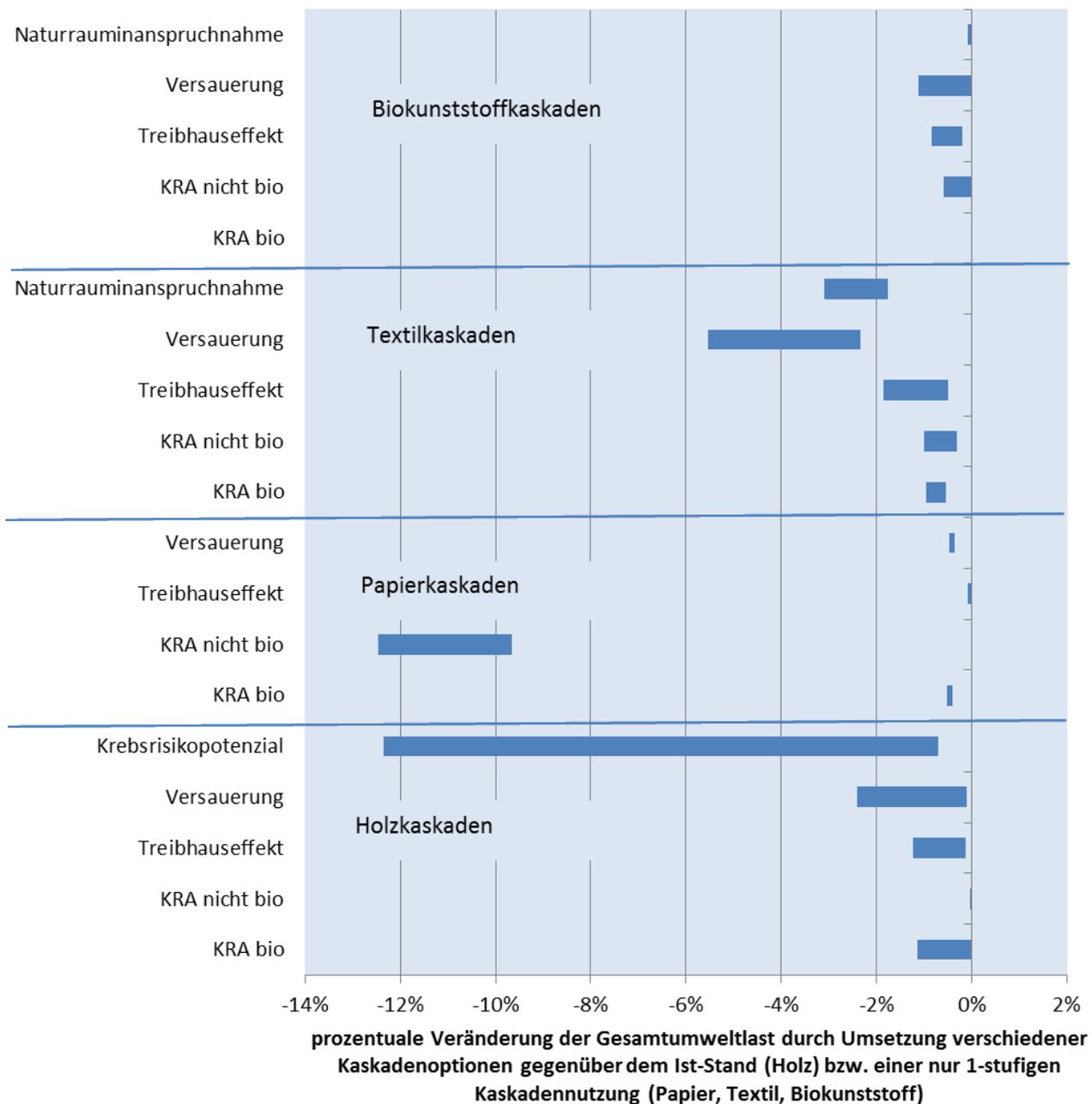
Holzskaskaden

Es wurde eine umfassende Stoffstrombilanz für den gesamten Holzsektor modelliert und der Status quo mit vier verschiedenen Varianten zur Erhöhung der Kaskadennutzung verglichen:

- ▶ Teilweise Umlenkung von Altholz zu mehr stofflicher Nutzung in Holzwerkstoffen (Spanplatte)
- ▶ Teilweise Umlenkung von Energieholz aus dem Wald zu stofflicher Nutzung in Holzwerkstoffen (Spanplatte)
- ▶ Teilweise Umlenkung von Energieholz aus dem Wald als Input in chemische Syntheseprozesse (als Basis für Chemikalien oder „fortschrittliche“ Biokraftstoffe)
- ▶ Vollständige Umlenkung von Energieholz aus dem Wald zu stofflicher Nutzung (v.a. im Bausektor) und damit Erhöhung der Kaskadennutzung im Holzsektor insgesamt

Nicht variiert wurde dagegen die Entnahme von Holz aus dem Wald. Die relative Einsparung an primärer Biomasse durch die Kaskadennutzung wurde in der Ökobilanz durch absolut höhere Substitutionen von fossilen oder mineralischen Rohstoffen gegengerechnet. Daher zeigen die Varianten im Ergebnis keine Einsparung bei Flächeninanspruchnahme und oder Entnahme biogener Rohstoffe.

Abbildung 49: Übersicht über die Ökobilanzergebnisse dargestellt als Bandbreite der verschiedenen Kaskadenoptionen im Vergleich zur Ist-Situation (Holz) bzw. zur nur einfachen Kaskade (Papier, Textil, Kunststoff); die Prozentwerte geben die Veränderung der Gesamtumweltlast für den Durchschnitt in Deutschland an, bei vollständiger Umsetzung der Kaskaden.



Die Kaskadennutzung von Holz führt insbesondere dann in hohem Maße zu Ressourceneinsparungen, wenn bereits auf der ersten Ebene die stofflich hochwertige Nutzung einen hohen Anteil ausmacht. Dies ermöglicht im ersten Schritt bereits einen Substitutionseffekt auf hohem Niveau mit hohen Einsparungen an Ressourcenverbrauch und Emissionen. Realisierbare Potenziale bieten sich im Bausektor. Ein verstärkter Holzeinsatz dort müsste jedoch mit anspruchsvollen Anforderungen an das Produktdesign einhergehen, was insbesondere die spätere hochwertige Recyclingfähigkeit betrifft.

Insgesamt zeigen sich für das Prinzip einer möglichst mehrfach hintereinander folgenden Nutzung des Holzmassenstroms eher geringe Ressourcenvorteile im Gesamtsystem, zumal hier die Produktseg-

mente keine größeren weiteren Potenziale anbieten. Eine Ausweitung von Holzwerkstoffen zur Verdrängung von Gipskartonplatten weist umweltseitig keinen Nutzen auf. Die Kaskadenstufen auf niedrigeren Wertschöpfungsniveaus zeigen sich daher nur in begrenztem Umfang als ausbauwürdig zum Erzielen zusätzlicher positiver Umwelteffekte.

Dagegen führt eine Verschiebung von derzeit direkt energetisch genutztem Frischholz zu verstärkter stofflicher Nutzung zu deutlichen Vorteilen in allen Wirkungskategorien, zumal in der Summe das Potenzial an energetisch nutzbarem Holz am Ende kaum geringer ausfällt, dafür aber die Nutzung über industrielle Anlagen (HKW) gegenüber dem derzeit großen Anteil für Hauswärme effizienter ausfällt. Nebenbei ergäbe sich dadurch eine erhebliche Reduktionsminderung an humantoxischen Emissionen.

Papierkaskaden

Hier wurde nicht der gesamte Papiermarkt abgebildet, sondern drei definierte Fälle im Rahmen einer Übersichtsökobilanz, jeweils ausgehend von der primären Produktion von Frischzellstoffpapier verglichen mit

- ▶ einer direkten energetischen Nutzung von Altpapier
- ▶ einer vor der energetischen Nutzung eingeschobenen Kaskadenstufe als Recycling zu graphischen Papieren
- ▶ einer weiteren vor der energetischen Nutzung eingeschobenen Kaskadenstufe als Recycling zu Pappe.

Diese Beispiele zeigen in besonderer Weise, wie groß die Umweltentlastungen und die Erhöhung der Ressourceneffizienz ausfallen können durch die möglichst lange und mehrfache Nutzung des Materials. Die betrachteten Optionen stellen dabei zwar konstruierte Pfade dar, bilden in einer Mischung aus allen drei Optionen jedoch durchaus die reale Situation ab. Daraus ist zunächst zu schließen, dass die in der Praxis umgesetzte stoffliche Nutzung und Verwertung von Papier und Pappe bereits einen hohen Standard darstellt. Eine weitere Optimierung dieser bereits heute als erfolgreich zu wertenden Kaskadennutzung kann sich im Rahmen des technisch Möglichen und logistisch Sinnvollen in weiterer Erhöhung der Ressourceneffizienz niederschlagen.

Andererseits macht das Beispiel Papier/Pappe deutlich, wie idealtypisch diese Produktgruppe für die effiziente Umsetzung des „klassischen“ Kaskadengedankens ist, nämlich „so lange, so häufig und so effizient wie möglich stofflich zu nutzen, ... Nutzungskaskaden durchlaufen, die von höheren Wertschöpfungsniveaus in tiefere Niveaus fließen“. Der Vorteil in diesem Produktbereich ist, dass er sich weitgehend in einem zusammengehörigen Sektor bündelt und eine Verwandtschaft der Produkte trotz unterschiedlicher Wertschöpfungsniveaus besteht. Dies ist in vielen anderen Produktbereichen eher nicht gegeben.

Textilienkaskaden

Auch wurde eine Übersichtsökobilanz erstellt und verschiedene Optionen der Nutzung von Alttextilien bewertet (auf Basis der verbrauchsüblichen Menge an Baumwolltextilien). Ziel dieser Optionen soll die Reduktion des Verbrauchs des als ökologisch kritisch bewerteten Rohstoffs Baumwolle sein. Aus diesem Grunde wurden keine Varianten zur Nutzung von Alttextilien in Sektoren, in welchen keine Neutextilien ersetzt werden, betrachtet (z.B. Dämmstoffe, diese ersetzen mineralische Dämmstoffe aber nicht Baumwollprodukte). Untersucht wurden:

- ▶ die direkte energetische Verwertung von Alttextilien
- ▶ die Wiederverwendung als Second-Kleidung (nicht als Kaskadennutzung im Sinne der Projekt-Definition, sondern als eine der wichtigsten gebräuchlichen Optionen) und die energetische Verwertung nach der Nutzung

- ▶ das Recycling zu (industriellen) Putzlappen und energetischer Verwertung nach der Nutzung
- ▶ das Auflösen der Textilien zu Fasern und die Herstellung von Garn aus Recyclingfasern (mit energetischer Verwertung nach Nutzung der Neuprodukte)

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Vorteil der stofflichen vor der energetischen Nutzung, was auf den hohen Aufwendungen zur Herstellung eines Textilprodukts beruht. Außerdem zeigt sich bei diesem Beispiel ganz deutlich: je höher der Anteil an in Kaskade geführten Materials, desto besser das Ergebnis, desto höher die Ressourceneffizienz, die sich in allen Ökobilanzkategorien zeigt, vor allem aber bei Frischwasserbedarf und der Naturrauminanspruchnahme.

Das innovative Verfahren des Faserrecyclings könnte vom Prinzip her Mehrfachkaskaden in Analogie zum Papierrecycling ermöglichen, doch ist auf der Basis der hier angesetzten Daten die Quote der Faserückgewinnung zu gering, um auch bei Mehrfachkaskade (mit jedem Schritt halbiert sich der ursprünglich eingesetzten Menge) das gute Ergebnis der Einfachkaskade (Putzlappen) zu erreichen. Ließe sich die Rückgewinnungsquote durch weitere Verfahrensentwicklungen deutlich steigern, könnte sich diese Option durchaus erfolgversprechend darstellen.

Bei den Textilien zeigt sich in besonderer Weise, wie groß die Umweltentlastungen und die Erhöhung der Ressourceneffizienz ausfallen durch die möglichst lange und mehrfache Nutzung des Materials. Die gezeigten Varianten sind dabei nicht als die einzigen Optionen zu sehen. Im Vordergrund stehen sollte dabei, dass bereits erreichte Standards der stofflichen Nutzung und Verwertung nicht verdrängt werden sollten, so lange nicht noch effizientere Verfahren umsetzbar sind. Alttextilien sollten insgesamt möglichst vollständig erfasst und gesammelt werden und dann einer zielgerecht nach Qualitäten durchaus nach unterschiedlichen Vorgehensweise in eine stoffliche Nutzung überführt werden.

Biokunststoffkaskaden

Da hier der Ausgangsrohstoff aus agrarischer Produktion stammt, wurden die untersuchten Varianten auf der Basis einer definierten Anbaufläche für Biomasse bzw. einer einheitlichen Menge an primärer Biomasse modelliert. Hierzu wurden jeweils 1 Tonne Zuckerrohr zu Grunde gelegt. Die untersuchten Vergleichsoptionen waren:

- ▶ Erzeugung von Bioethanol und direkte Nutzung als Energieträger (Benzin-Substitut)
- ▶ Die Erzeugung von Polylactid (PLA) und eines Verpackungsproduktes daraus zur Substitution eines analogen Produkt aus Polystyrol (PS) sowie anschließender energetischer Nutzung
- ▶ Die gleiche Variante ergänzt um eine Recyclingstufe für das PLA-Produkt
- ▶ Die Erzeugung von biobasiertem Polyethylen (BioPE) und eines Verpackungsproduktes daraus zur Substitution eines analogen Produkt aus fossilem PE sowie anschließender energetischer Nutzung
- ▶ Die gleiche Variante ergänzt um eine Recyclingstufe für das BioPE-Produkt

Somit findet durch diese Kaskadenvarianten (ähnlich wie bei den Holzkaskaden) keine Reduktion der Biomasseproduktion statt. Eine solche würde voraussetzen, dass durch das Recycling die Herstellung frischen Biokunststoffs vermieden würde. Angesichts der Marktmengen und der politischen Ziele der Bioökonomie steht bis auf weiteres die Substitution der fossilen Systeme im Vordergrund.

Wegen der noch geringen Anteile an Biokunststoffen im Kunststoffsektor ist das Thema Kaskadennutzung hier noch sehr unausgereift und weitgehend vom etablierten Stand des Recyclings bei konventionellen Kunststoffen abhängig. Das bedeutet jedoch auch, dass analog zu den überwiegend positiven Ökobilanzergebnissen des generellen Kunststoffrecyclings auch vergleichbar gute Werte für die Biokunststoffe zu erwarten sind. Die Gesamtschau der Ergebnisse der ökobilanziellen Abschätzung der Kaskaden von Biokunststoffen lässt unter Berücksichtigung der hier begründet getroffenen Annahmen und Festlegungen folgende Schlüsse zu:

- ▶ Die stoffliche Nutzung von Biomasse ist der rein energetischen Nutzung (bspw. als Kraftstoff) in allen untersuchten Umweltproblembereichen überlegen und von daher zu favorisieren.
- ▶ Der umweltseitige Effekt der Kaskadennutzung hängt nicht unmittelbar mit der Anzahl der Nutzzyklen zusammen sondern wird auch im starken Maße vom substituierten Produkt beeinflusst.
- ▶ Innerhalb einer stofflichen Nutzungsrouten ist eine mehrstufige stoffliche Nutzungskaskade nur dann mit positiven Umwelteffekten verbunden, wenn hochwertige Sekundärprodukte hergestellt werden können wie im Falle des Drop-In-Kunststoffs BioPE.

Sozioökonomische Betrachtung

Ergänzend zu den Ökobilanzen wurde eine übersichtsartige Analyse ausgewählter sozialer Kriterien und wirtschaftlicher Aspekte erstellt.

Die **sozialen Aspekte** der betrachteten Nutzungskaskaden wurden anhand eines qualitativen Rasters nach folgenden Aspekten bewertet:

- ▶ Räumliche Dimension: steht die Kaskade im Zusammenhang mit Nord-Süd-Aspekten (Import von Biomasserohstoffen aus Entwicklungsländern) oder beschränkt sich der Produktionsraum auf Deutschland oder Europa?
- ▶ Welche Stakeholder sind konkret betroffen? z.B. : Unternehmen in der Wertschöpfungskette, Beschäftigte, Konsumenten.

Bei der **Holzskaskade** ist der Systemraum im Wesentlichen auf das Inland begrenzt, Nord-Süd-Aspekte stehen somit weniger im Vordergrund. Vielmehr stellen sich der Wald mit seinen diversen sozialen Funktionen (v.a. Erholung und Bildungsfunktion) und die Wertschöpfungskette als die wesentlichen sozialen Funktionsbereiche dar. Für den Wald ist in dieser Hinsicht durch eine verstärkte Kaskadennutzung kein Einfluss zu erwarten. Die Wertschöpfungsketten von Holzprodukten sind dagegen überaus komplex. Verstärkte Kaskadennutzung kann hier zu weiterer Vielfalt führen, was positiv für die Bereitstellung von Arbeitsplätzen zu werten ist. Im Übrigen können sich Angebote an hochwertigen Produkten aus Stoffkreisläufen mit positivem Umweltimage auch positiv auf soziale Verbrauchereinstellungen auswirken und die Wahrnehmung von nachhaltigen Produkten und Produktionsprinzipien schärfen.

Die **Papierkaskade** ist über den Rohstoff mit dem Holzsektor direkt verbunden. Soziale Aspekte liegen vorrangig im Bereich von Arbeitsplatzsicherung und in der Wechselwirkung mit den Verbrauchern, für die Produktqualität gesichert bleiben muss.

Ganz andere Randbedingungen liegen bei der **Textilkaskade** vor. Hier liegen die sozialen Schwerpunkte klar in den Produktionsländern von Baumwolle und Textilien (China, Indien, Bangladesch). Die Textilindustrie stellt für diese Länder auf der einen Seite wirtschaftliche Chancen dar und somit auch Einkommensquellen gerade für ärmere Bevölkerungsschichten. Doch folgen die Arbeitsverhältnisse vielfach kaum menschenwürdigen Standards. Sehr schwer zu bewerten ist, ob mit verstärkter Kaskadennutzung von Textilien mit der damit verbundenen Verminderung des Materialverbrauchs eine positive Wirkung gegenüber diesen sozialen Missständen zu erreichen ist. Geboten ist jedem Fall jedoch ein deutliches Bekenntnis zum effizienten Umgang mit der konfliktbeladenen Ressource Baumwolle. Eine insgesamt höhere Wertschätzung des Rohstoffs und seiner Produkte angesichts der schwerwiegenden Folgen der Herstellungskette sollte jedenfalls positive Wirkung ermöglichen.

Auch bei der Kaskadennutzung von **Biokunststoffen** konzentrieren sich die sozialen Aspekte auf den Biomasserohstoff bzw. dessen Erzeugung in den Anbauländern. Derzeit liegt der Produktionsschwerpunkt für Biopolymere auf Zuckerrohr. Bei aller Wichtigkeit für die Erzeugerländer die landwirtschaftliche Produktion für die nationale oder regionale Wertschöpfung nutzen zu können, so zwingend ist hier die Wahrung von Landrechten und sozialen Standards. Das Wachstum des so jungen wie dynamischen Markts für Biokunststoffe wird den bestehenden Trend zur Ausdehnung der Anbauflächen ver-

stärken. Es ist daher fundamental, dass die Kaskadennutzung des Materials von Beginn an in das Konzept dieser Produktgruppe eingebunden wird – auch wenn sie nur einen kleinen Beitrag zur Entlastung des Ressourcen- und Flächenkonsums leisten kann.

Die **volkswirtschaftliche Bedeutung** der Kaskadennutzung ist Thema mehrerer Studien, die hier ausgewertet wurden. Insgesamt kommen alle Arbeiten zu positiven Wertungen, jedoch behandelt keine davon die volkswirtschaftlichen Effekte systematisch für die Kaskadennutzung. Volkswirtschaftliche Effekte der Kaskadennutzung im Rahmen der Bioökonomie wurden bisher noch nicht umfassend untersucht.

Aus Sicht der klassischen Wertschöpfungsdefinition ist die positive Bewertung der Kaskadennutzung jedoch plausibel, da eine Verlängerung von Wertschöpfungsketten ohne weiteren Rohstoffbedarf entweder eine Verringerung von Importen oder aber eine effektivere Nutzung des Bodens bzw. anderer endogener Ressourcen bedeutet. Somit werden bei gleichem Nutzen Vorleistungen von außen vermieden.

In einer empirischen Betrachtung von Kaskaden zum Beleg dieser Theorie müsste die Auswirkung einer verstärkten kaskadierten Nutzung auf alle betroffenen Wirtschaftsklassen¹⁶ auf Basis von den im Projekt erarbeiteten Stoffströmen untersucht werden. Für den Sektor Holz gibt es hierzu sehr genaue Holzflussmodelle, die Mengen zuordnen und bewerten. Auf Basis dessen werden z.B. wie im vorliegenden Bericht Treibhausgasemissionen bilanziert. Ein Beispiel hierfür sind die Arbeiten von Mantau (2015). Auf Basis dieser Arbeiten könnten für verschiedene Wirtschaftsklassen Verschiebungseffekte einer Kaskadennutzung und deren volkswirtschaftlichen Auswirkungen berechnet werden. Methodisch könnte hier z.B. an die für Dämmstoffe und Kunststoffe angewendeten Berechnungen aus nova et al. (2014) angeknüpft werden.

Die **betriebswirtschaftlichen Aspekte** der Kaskadennutzung sind so vielschichtig wie die Möglichkeiten der Kaskadennutzung selbst. Durch Befragung zahlreicher Unternehmen wurden folgende Faktoren als besonders kritisch für die Wirtschaftlichkeit von Kaskadennutzung genannt:

- ▶ Fehlende Kooperation zwischen den Akteuren in der Wertschöpfungskette
- ▶ Unsicherheiten bei der Rohstoffbereitstellung
- ▶ Preisschwankungen für Biomasse
- ▶ Fehlender Zugang zu Rest- und Abfallstoffen.

Von steigenden Rohstoffpreisen können dagegen Investitionen in Verfahren mit Kaskadennutzung Vorteile ziehen.

Schlussfolgerung

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass Kaskadennutzung in der Mehrzahl der Fälle Vorteile in nahezu allen Umweltaspekten bringt. Eine Generalisierung ist insofern nicht möglich, da Einzelfälle durchaus gegenläufige Ergebnisse zeigen.

Weitaus entscheidender für die Ergebnisse ist vielmehr die Frage, was substituiert wird, weniger die reine Anzahl an durchlaufenen Kaskaden.

Im Wesentlichen sind zwei Faktoren für den Erfolg der Kaskaden relevant:

- ▶ Hohe Qualität der stofflich substituierten Produkte

¹⁶ Wirtschaftsklassen beschreiben nach der europäischen Statistik-Nomenklatur NACE einen; im Sektor „Forstwirtschaft“ bildet z.B. der „Holzeinschlag“ eine Wirtschaftsklasse, im Sektor Verarbeitendes Gewerbe z.B. „Säge-, Hobel- und Holz- imprägnierwerke“ oder „Herstellung von Küchenmöbeln“

- ▶ Sicherstellung geringer Stoffverluste über die Kaskade, sodass die Energienutzung am Ende noch in hohem und effizientem Umfang möglich ist.

Weniger maßgeblich im Gesamtbild der Ökobilanz sind zumeist zusätzliche logistische (zusätzliche Transportwege) und prozessuale Aufwendungen (Aufbereitungsaufwand zur Qualitätssicherung). Diese stellen zumeist eher ein ökonomisches Hemmnis dar, bleiben in der Ökobilanz jedoch in der Regel unauffällig.

11 Quellenverzeichnis

Albrecht, S.; Rüter, S.; Welling, J.; Knauf, M.; Mantau, U.; Braune, A.; Baitz, M.; Weimar, H.; Sörgel, S.; Kreissig, J.; Deimling, J.; Hellwig, S. (2008): Ökologische Potenziale durch Holznutzung gezielt fördern. Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie Nr. 2008/5.

Arnold, K.; Bienge, K.; von Geibler, J.; Ritthoff, M.; Targiel, T.; Zeiss, C.; Meinel, U.; Kristof, K. & S. Bringezu (2009): Klimaschutz und optimierter Ausbau erneuerbarer Energien durch Kaskadennutzung von Biomasse - Potenziale, Entwicklungen und Chancen einer integrierten Strategie zur stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse. Wuppertal Institut, Wuppertal.

Baumbach, G., M. Struschka, W. Juschka, M. Carrasco, K. B. Ang, L. Hu, W. Bächlin, C. Sörgel: Modellrechnungen zu den Immissionsbelastungen bei einer verstärkten Verfeuerung von Biomasse in Feuerungsanlagen der 1.BImSchV; Dessau-Roßlau, Juni 2010
http://www.umweltbundesamt.de/uba-infomedien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3787

BMEL (2014): Der Wald in Deutschland - Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur; Hg: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin 2014
http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Bundeswaldinventur3.pdf?__blob=publicationFile.

BMEL (2011): Waldstrategie 2020 - Nachhaltige Waldbewirtschaftung – eine gesellschaftliche Chance und Herausforderung; Hg: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin 2011
http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Waldstrategie2020.pdf?__blob=publicationFile.

Bundschuh, A., Schramm, E. (2009): Soziale Funktionen und soziale Nutzung des Waldes; Knowledge Flow Paper No. 4 des Forschungszentrum Biodiversität und Klima BiKF, Dezember 2009;
www.bik-f.de/files/publications/kfp_4_waldsozial.pdf

Carus, Michael et al. (2010): Studie zur Entwicklung von Förderinstrumenten für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland. Volumen, Struktur, Substitutionspotenziale, Konkurrenzsituation und Besonderheiten der stofflichen Nutzung sowie eine Entwicklung von Förderinstrumenten, Langfassung, November 2010, Hürth.

Consultic (2014): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2013 – im Auftrag von Plastics Europe 2014;; <http://www.plasticseurope.de/kunststoffindustrie/marktdaten.aspx>

Dahmen, K., Ferenschild, S. (2013): Flächenkonkurrenz – das Beispiel Baumwolle; Hg.: SÜDWIND e.V. 2013;
http://www.suedwind-institut.de/fileadmin/fuerSuedwind/Publikationen/2013/2013-11_Flaechenkonkurrenz_-_das_Beispiel_Baumwolle.pdf.

Dammer, L.; Bowyer, C.; Breitmayer, E.; Eder, A.; Nanni, S.; Allen, B. Carus, M. & R. Essel (2016): Mapping study on cascading use of wood products. Word Wide Fund for Nature (WWF), Switzerland.

Detzel, A., Kauertz, B., Grahl, G., Heinisch, J.: Prüfung und Aktualisierung der Ökobilanzen für Getränkeverpackungen; Studie im Auftrag des UBA; Texte | 19/2016
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/pruefung-aktualisierung-der-oekobilanzen-fuer>

Detzel, A.; Kauertz, B.; Derreza-Greeven, C.. (2012): Untersuchung der Umweltwirkungen von Verpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen. In: Texte des Umweltbundesamtes 52/2012. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt. (Forschungskennzahl 37 10 95 314, UBA-FB 001643)

Döring, P.; Mantau, U.: Standorte der Holzwirtschaft - Sägeindustrie - Einschnitt und Sägenebenprodukte 2010. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft. Arbeitsbereich: Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft. Hamburg, 2012

Efken J., Banse M., Rothe A., Dieter M., Dirksmeyer W., Ebeling M., Fluck K., Hansen H., Kreins P., Seintsch B., Schweinle J., Strohm K., Weimar H. (2012): Volkswirtschaftliche Bedeutung der biobasierten Wirtschaft in Deutschland. Arbeitsberichte aus der vTI-Agrarökonomie 07/2012, Braunschweig

European Bioplastics e.V. (EuBP) (2013): EuBP market data. Documentation of survey methodology. Online: http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2013/publications/EuBP_market%20data_method_web_2012_BM.pdf, abgerufen am 30.04.2015

Ferenschild, S. (2013): Von weißem Gold und goldenem Öl - Flächennutzungskonflikte und Migration an den Beispielen Baumwolle und Palmöl; Hg.: Südwind e.V. Siegburg, 2013
http://www.suedwind-institut.de/fileadmin/fuerSuedwind/Publikationen/2013/2013-03_Von_weissem_Gold_und_goldenem_Oel.pdf.

FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2015): Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe;
<https://mediathek.fnr.de/grafiken/pressegrafiken/anbauflache-fur-nachwachsende-rohstoffe.html>

Frühwald, F, Diederichs, S.; Morgan, M.R. (2010): Verwendungspotentiale heben durch Kaskadennutzung am Beispiel Holz. Band 4 (2010) S. 37-50, TK Verlag - Fachverlag für Kreislaufwirtschaft, Hamburg

Gärtner, S., Hienz, G., Keller, H, Müller-Lindenlauf, M.(2013): Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz; Umweltauswirkungen Stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich; Studie gefördert durch BMU Förderkennzeichen 03KB016C. Heidelberg.
https://www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/IFEU%202013_Umweltbewertung%20Holzkaskadennutzung.pdf; aufgerufen am 29.06.2015

Giegrich, J., Liebich, A., Lauwigi, C., Reinhardt, J. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion; im Auftrag des Umweltbundesamtes; Texte 01/2012.
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf>.

Hirschl, B.; Aretz, A.; Prahl, A.; Böther, T-; Heinbach, K.; Pick, D.; Funcke, S. (2010): Kommunale Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien. Schriftenreihe des IÖW 196/10.

Keller H, Rettenmaier N, Reinhardt, G.A. Integrated life cycle sustainability assessment – A practical approach applied to biorefineries. Appl Energy (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.095>

Korolkow, J. (2015): Konsum, Bedarf und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland; Studie im Auftrag des bvse-Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V.; 2015;
http://bvse.de/pdf/oefentlich/Alttextil/150914_Textilstudie_2015.pdf

Kretschmer W, Capaccioli S, Chiamonti D, De Bari I, Frattini A, Giovannini A, et al. Integrated sustainability assessment of BIOLYFE second generation bioethanol, Institut für Umweltstudien (IUS), Heidelberg, Germany; 2013.
www.biolyfe.eu/images/stories/downloads/BIOLYFE-Integrated_sustainability_assessment.pdf

Mantau, U. (2012): Holzrohstoffbilanz Deutschland Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung von 1987 bis 2015; Hamburg, 2012, 65 S.

Mantau, U. (2014): Cascades in wood flows and their political implications; Vortrag auf dem Workshop "Cascading use of biomass – from theory to practice; Brüssel 1.4.2014 Präsentationen herunterladbar von: <http://biomassekaskaden.de/info/downloads/>

Mantau, U. (2015): Wood flow analysis: Quantification of resource potentials, cascades and carbon effects. biomass and bioenergy 79 (2015), p. 28-38

Müller-Lindenlauf M, Cornelius C, Gärtner S, Reinhardt G, Schorb A, Rettenmaier N, et al. Integrated sustainability assessment of SUPRABIO biorefineries, IFEU – Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg, Heidelberg, Germany; 2014. [www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/IFEU_ & Brunel_2014_IntegratedsustainabilityassessmentofSUPRABIObiorefineries_2014-10-31.pdf](http://www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/IFEU_&Brunel_2014_IntegratedsustainabilityassessmentofSUPRABIObiorefineries_2014-10-31.pdf)

nova, ifeu, Finanzwissenschaftliches Forschungsinstitut an der Universität zu Köln, Öko-Institut (2014): Ökologische Innovationspolitik – mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse. Herausgeber UBA, Texte 01/2014

nova-Institut (2016): Main findings of case studies - Biorefineries. In: Vis M., U. Mantau, B. Allen (Eds.) (2016) Study on the optimised cascading use of wood. No 394/PP/ENT/RCH/14/7689. Final report. Brussels 2016. 337 pages

Pfluger, B., Fleiter, T., Kranzl, L., Hartner, M., Schade, W., Hennecke, A., Fehrenbach, H., Brischke, L., Tersteegen, B., Sensfuß, F., Steinbach, J.: . Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands um 95 % bis 2050 - Grundsätzliche Überlegungen zu Optionen und Hemmnissen; Studie von Fraunhofer ISI – Consentec – IFEU Institut – TU Wien – M-Five; im Auftrag des BMWi, 2016

Pöyry (2006): Value added and employment in PPI and energy alternative. Studie im Auftrag der Confederation of European Paper Industries, Pöyry Forest Industry Consulting

Reinhardt G, Jensen PR, Reves JB, Barski P, Dabrowski S, Gärtner SO, et al. Sustainable and integrated production of liquid biofuels, green chemicals and bioenergy from glycerol in biorefineries: Integrated assessment, IFEU – Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg, Heidelberg, Germany; 2012. www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/GlyfineryD78-Integrated-Assessment-Report-final.pdf .

Reinhardt G, Keller H, Amaducci S, Basavaraj G, Braconnier S, Buschmann R, et al. Report on integrated sustainability assessment of the SWEETFUEL project, IFEU – Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg, Heidelberg, Germany; 2014. www.sweetfuel-project.eu/index.php/projets_en/content/download/13314/79204/file/D6-6.pdf .

Repening J. et al. (2015): Klimaschutzszenario 2050, 2. Endbericht, Studie des Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; 2015 <http://www.oeko.de/oekodoc/2441/2015-598-de.pdf>.

Rettenmaier N, Harter R, Himmler H, Keller H, Kretschmer W, Müller-Lindenlauf M (2015): Integrated sustainability assessment of the BIOCORE biorefinery concept, IFEU – Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg, Heidelberg, Germany; 2014. www.biocore-europe.org/file/BIOCORE_D7_6_Integratedassessment_2014-03-31.pdf .

Rettenmaier, N, Detzel, A., Keller, H., Kauertz, B., Gärtner, G., Reinhardt, J.: Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse; Anlage: Lebenszyklusanalyse für ausgewählte bio-basierte Produkte Langfassung des AP 4-Berichts; im Auftrag des Umweltbundesamt; FKZ 3710 93 109; Heidelberg <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-innovationspolitik-mehr> ; aufgerufen am 29.06.2015

Rettenmaier, N., et al. (2014a): SUPRA-BIO - Sustainable products from economic processing of biomass in highly integrated biorefineries; in Kooperation mit University of Oxford (UOXF.DF) (UK), und anderen Partnern; supported by the European Commission, 2014; <http://www.suprabio.eu/>

Rüter, S.; Diederichs, S. (2012): Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie Nr. 2012/1, Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Hamburg

Schmidt, E. (2010): Nachhaltigkeit und Globalisierung am Beispiel Textilien – Themenmodule zur Verbraucherbildung; Hg: Verbraucherzentrale Bundesverband e.V. (vzbv), 2010

Schwarzbauer, P.; Stern, T. (2010): Energy vs. material: Economic impacts of a "wood-for-energy scenario" on the forest-based sector in Austria — A simulation approach. *Forest Policy and Economics* 12 (2010) 31–38

Seintsch, B., Weimar, H. (2013): Holzbilanzen 2010 bis 2012 für die Bundesrepublik Deutschland; Thünen Working Paper 9; Hamburg, September 2013
http://literatur.ti.bund.de/digbib_extern/dn052410.pdf.

UBA (2012): Glossar zum Ressourcenschutz; Umweltbundesamt; Dessau-Roßlau; Stand 17.1.2012
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf>.

UBA (2013): Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2013

UBA (2015): Auswertung der Consultic-Studie: "Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland",
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehelter-abfallarten/kunststoffabfaelle>

UBA (2016): Umweltschutz, Wald und nachhaltige Holznutzung in Deutschland; Hintergrund // April 2016 Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2016;
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/umweltschutz_wald_und_nachhaltige_holznutzung_in_deutschland_web.pdf.

UBA (o.J.) Projekt für die Aktualisierung der UBA-Methodik zur Ökobilanzierung (UBA-Projekt-Nr.: 23128); laufendes Projekt durchgeführt durch ifeu/Integrail/Öko-Institut

VDP – Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (2016): Papier 2016 – ein Leistungsbericht; Annual Report des Verbands Deutscher Papierfabriken; 2016

VDP – Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (2016a): Papier Kompass. VDP, Bonn 2016

vTI- „Volkswirtschaftliche Bedeutung der biobasierten Wirtschaft in Deutschland“ (vTI Institut für Marktanalyse und Agrarhandelspolitik: Arbeitsberichte aus der vTI Agrarökonomie, Braunschweig 2012)

Wern B, Kay S, Vogler C, Baur F, Gärtner S, Hienz G, et al. (2014) Regionale Konzepte zum Ausbau der Bioenergieerzeugung aus Holz – nachhaltige und energieeffiziente Strategieentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Holzkaskadennutzung: Endbericht. IZES gGmbH / IFEU / Wald-Zentrum NRW, Saarbrücken, Heidelberg, Münster

