

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3713 44 100
UBA-FB-00

BIOMASSEKASKADEN

Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse

– von der Theorie zur Praxis

von

Horst Fehrenbach¹, Susanne Köppen¹, Elke Breitmayer², Roland Essel², Frank Baur³,
Sonja Kay³, Bernhard Wern³, Katrin Bienge⁴, Justus von Geibler⁴, Benedikt Kauertz¹,
Andreas Detzel¹, Frank Wellenreuther, Michael Carus².

¹ ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH, Heidelberg,

² nova-Institut GmbH, Hürth

³ IZES – Institut für Zukunftssysteme gGmbH, Saarbrücken

⁴ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Februar 2017



Kurzbeschreibung

Die Kaskadennutzung von Biomasse wird in zahlreichen umweltpolitischen Strategien und Programmen als wichtiges Element zur Steigerung der Ressourceneffizienz genannt. Der Begriff Kaskadennutzung ist jedoch unklar definiert. Die im Projekt entwickelte *Definition* ermöglicht eine klare Abgrenzung zwischen den verschiedenen Kaskadenbegriffen. Im ersten Schritt des Forschungsprojekts, der Analyse existierender Konzepte der Kaskadennutzung wurde deutlich, dass in der Praxis die Anzahl erfolgreicher Kaskadenbeispiele überschaubar ist. Herausgearbeitet wurden als relevante Felder der Kaskadennutzung der *Holzsektor*, der *Papiersektor*, der *Textilsektor* und der *Kunststoffsektor* mit Blick auf die Entwicklungen in Richtung *biobasierter Kunststoffe*.

Nach einer Analyse des agrarischen und forstlichen *Rohstoffpotenzials* als Ausgangspunkt der Kaskade wurden umfassende *Ökobilanzen* zu verschiedenen Kaskadenoptionen jeweils in den oben genannten vier Sektoren durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten deutliche Umweltvorteile für die Mehrzahl der untersuchten Kaskadenoptionen gegenüber dem Referenzfall ohne oder mit nur einer Kaskadenstufe. Es bedarf jedoch der Einzelfallbetrachtung. In Fortführung der Erkenntnisse aus den komplexen Ökobilanzen wurde daher ein *Bewertungskonzept* entwickelt und vorgeschlagen, das der Einschätzung möglicher Kaskadenansätze zwar auf breiterer Ebene, jedoch auch mit geringerer Detaillierungstiefe dienen soll. Es liefert Anwendern eine erste Orientierung darüber, ob eine Kaskade aus Nachhaltigkeitssicht als sinnvoll bzw. erfolversprechend einzustufen wäre.

Bei der Entwicklung der *Eckpunkte einer Strategie zur Förderung der Kaskadennutzung von Biomasse* wurde im Projekt deutlich, dass Kaskadennutzung nicht als eigenständige Politikstrategie etabliert werden sollte, sondern sie vielmehr als „Prinzip“ zur Unterstützung übergreifender Politikziele und Strategien einzubinden ist. Es wird daher ein Mix oder vielmehr ein Zusammenwirken von Strategien zum nachhaltigen Umgang mit Ressourcen benötigt.

Abstract

Cascading use of biomass is identified as a significant element to increase resource efficiency in numerous environmental strategies and political programs. However, the technical term of “cascading use” has been defined rather vaguely. The *definition* developed in the course of this project clarifies the distinctions between the technical terms in use and also describes the overlaps and relations between policy areas. The existing theoretical and practical concepts of cascading use are collected and evaluated in the first step of the research project. It results that the practical realization of cascading use is still quite moderate according to examples. Models for relevant areas such as the wood-, paper-, textile industry and the plastic industry with respect to bio-plastic consumption were developed.

A comprehensive *life cycle assessment* of distinct cascade-options in the case of above-mentioned areas was performed after the analysis of *raw material potential* in agriculture and forestry as the take-off for the cascades. The multiple cascades showed environmental advantages in the case of using many options of cascading-use in contrast to the reference case without or only with one cascade-stage. However, each individual case requires investigation. A method for the *evaluation* of cascading use in early phase was developed based on the experiences of the comprehensive life cycle assessment which allows estimating impacts of cascading use options extensively even in possession of only few details. It can provide first indication whether a particular cascading use appears as an environmentally sound and promising option.

It became obvious during the development of key elements that cascading use of biomass should be carried out as a principle for support of the comprehensive *goals of politics and strategies* rather than used for an individual policy strategy. Therefore, a mixture or a network of strategies is needed to achieve sustainability in resource usage.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	11
1 Hintergrund und Zielsetzung	13
2 Konzepte und Praxisbeispiele der Kaskadennutzung	15
2.1 Aufgabenstellung und Ziel	15
2.2 Vorgehensweise.....	15
2.3 Übersicht über die untersuchten Konzepte.....	16
2.3.1 Funktionale Beschreibung von Nutzungskaskaden.....	17
2.3.2 Kaskadennutzung zur Erreichung politischer Ziele	21
2.3.2.1 Ziel: Verringerung negativer Umwelteffekte	22
2.3.2.2 Ziel: Steigerung der Wertschöpfung	22
2.3.2.3 Ziel: Rohstoffsicherung, Ressourceneffizienz, Innovation	23
2.4 Stand der Praxis und Potenziale für die Kaskadennutzung von Biomasse	24
2.5 Quantifizierungsansätze zur Kaskadennutzung	25
2.5.1 Kaskadenfaktor nach Mantau	25
2.5.2 Kaskadenfaktor nach Indufor	26
2.5.3 Biomass Utilisation Factor (BUF).....	26
2.6 Vorschlag zur Definition von Kaskadennutzung	27
2.6.1 Projektdefinition zu ein- und mehrstufiger Kaskadennutzung	27
2.6.2 Abgrenzung und Zusammenhang der Kaskadennutzung mit den Basisbegriffen der Kreislaufwirtschaft	28
2.7 Fazit.....	30
3 Analyse der Rohstoffbereitstellung	32
3.1 Aufgabenstellung und Ziel	32
3.2 Vorgehensweise.....	32
3.3 Untersuchte Biomassekaskaden.....	32
3.3.1 Relevante Märkte.....	33
3.3.2 Aktuelle Entwicklungen an den relevanten Märkte.....	34
3.4 Biomassepotenzial	36
3.4.1 Primäre Biomassebereitstellung in Deutschland	36
3.4.2 Biomassebereitstellung durch Kaskadennutzung	41
3.4.3 Zusammenfassung der Potenziale	45
3.5 Nutzungskonkurrenzen.....	47

3.6	Fazit.....	49
4	Hemmnisse und Erfolgsfaktoren für Kaskadennutzung	50
4.1	Aufgabenstellung und Ziel	50
4.2	Vorgehensweise.....	50
4.3	Kaskadenübergreifende Erfolgsfaktoren und Hemmnisse	51
4.3.1	Ergebnisse der Workshops.....	51
4.3.2	Handlungsfelder zur Überwindung der Hemmnisse	52
4.3.2.1	Sammlung und Verwertung	52
4.3.2.2	Politische Rahmenbedingungen	53
4.3.2.3	Vernetzung von Akteuren	53
4.3.2.4	Innovationsförderung, Start-ups, Produktdesign	53
4.4	Kaskadenspezifische Erfolgsfaktoren und Hemmnisse.....	53
4.4.1	Kaskadennutzung im Holzsektor	54
4.4.2	Kaskadennutzung im Papiersektor.....	55
4.4.3	Kaskadennutzung im Bereich von Naturfasern.....	55
4.4.4	Kaskadennutzung im Bereich Biokunststoffe.....	57
4.5	Fazit.....	58
5	Ökologische Bewertung der Kaskadennutzung	61
5.1	Aufgabenstellung und Ziel	61
5.2	Vorgehensweise.....	61
5.2.1	Auswahl der zu untersuchenden Kaskadenbeispiele	61
5.2.2	Systemgrenzen	61
5.2.3	Vorgehensweise bei der Bestimmung der substituierten Alternativprodukte bzw. -prozesse	63
5.2.4	Vorgehen bei der Wirkungsabschätzung und der Bewertung	63
5.3	Holzkaskaden	64
5.3.1	Datengrundlagen für das Holz-Stoffstrommodell.....	64
5.3.2	Bewertete Optionen einer Erhöhung der Kaskadennutzung im Holzsektor.....	65
5.3.3	Ergebnisse der Ökobilanz der Holzkaskaden	67
5.3.4	Fazit zur Holzkaskade	71
5.4	Papierkaskaden.....	71
5.4.1	Bewertete Optionen der Papierkaskade	72
5.4.2	Ergebnisse der Ökobilanz der Papierkaskaden	72
5.4.3	Fazit zur Papierkaskade	74
5.5	Textilkaskaden	74
5.5.1	Bewertete Optionen der Textilkaskade	74

5.5.2	Ökobilanzergebnisse der Textilkaskade	75
5.5.3	Fazit zur Textilkaskade	76
5.6	Biokunststoffkaskaden.....	77
5.6.1	Bewertete Optionen der Biokunststoffkaskaden.....	77
5.6.2	Ökobilanzergebnisse der Biokunststoffkaskaden	78
5.6.3	Fazit zu Biokunststoffkaskaden	79
5.7	Sozioökonomische Aspekte	80
5.7.1	Soziale Aspekte	80
5.7.2	Volkswirtschaftliche Aspekte	81
5.7.3	Betriebswirtschaftliche Aspekte	81
5.8	Fazit zur ökologischen Bewertung	82
6	Kaskadennutzung im Rahmen eines Gesamtkonzepts der Biomassenutzung	83
6.1	Aufgabenstellung und Ziel	83
6.2	Entwicklung eines methodischen Konzepts.....	83
6.2.1	Politische Rahmenbedingungen und Herausforderungen.....	84
6.2.2	Anforderungen an ein methodisches Konzept.....	86
6.2.3	Untersuchte Ansätze	88
6.2.4	Schlussfolgerungen für die Wahl eines angepassten Ansatzes.....	90
6.3	Das Bewertungskonzept	92
6.3.1	Ökologische Indikatoren	92
6.3.2	Sozioökonomische Indikatoren	93
6.4	Anwendung auf die Kaskadenbeispiele	95
6.4.1	Bewertung der Holzkaskaden	95
6.4.2	Bewertung der Papierkaskaden	97
6.4.3	Bewertung der Textilkaskaden.....	99
6.4.4	Bewertung der Biokunststoffkaskaden	101
6.5	Fazit.....	102
7	Eckpunkte einer Strategie zur Implementierung der Kaskadennutzung von Biomasse.....	104
7.1	Bezug bestehender Politikstrategien auf die Kaskadennutzung	104
7.2	Verortung der Kaskadennutzung in den drei „Kernstrategien“	106
7.3	Rolle der Kaskadennutzung in der Ressourcenpolitik	108
7.4	Anknüpfungspunkte der Kaskadennutzung an bestehende Strategien	109
7.5	Strategische Eckpunkte zur Verstärkung der Kaskadennutzung	110
8	Zusammenfassung	115
9	Quellenverzeichnis.....	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Struktur der Arbeitspakete des Projekts und Zuständigkeit der Partner	14
Abbildung 2	Einordnung und Bewertung verschiedener Kaskadenkonzepte (Auswahl, eigene Darstellung)	17
Abbildung 3	Das Prinzip der Kaskadennutzung mit Berücksichtigung der Wiederverwendung und des Re-/Upcyclings (Arnold et al. 2009)	18
Abbildung 4	Illustration der Kaskadennutzung innerhalb der Kreislaufwirtschaft (Ellen MacArthur Foundation 2013)	20
Abbildung 5	Schematische Darstellung der Kaskadennutzung nach Sirkin und ten Houten (1994)	21
Abbildung 6	Stoffstrommodell und Kalkulationsmethode des Biomass Utilisation Factor (BUF) für den Holzsektor in Europa nach nova (2015)	26
Abbildung 7	Graphische Umsetzung der Projektdefinition zur Kaskadennutzung von Biomasse (Quelle: nova-Institut 2014)	28
Abbildung 8:	Überschneidung der Hierarchieebenen der Kreislaufwirtschaft nach Verzahnung der Abfallrichtlinie (2008/98/EG) mit dem Prinzip der Kaskadennutzung (eigene Darstellung)	29
Abbildung 9:	Ackerlandnutzung in Deutschland bis 2050 bei gleichbleibendem Flächenbedarf für den Nahrungs-/Futtermittelanbau (grau: Nahrungs-/Futtermittel, grün: stoffliche Nutzung, rot: energetische Nutzung)	38
Abbildung 10:	Ackerlandnutzung in Deutschland bis 2050 bei sinkendem Flächenbedarf für den Nahrungsmittelanbau (grau: Nahrungs-/Futtermittel, grün: stoffliche Nutzung, rot: energetische Nutzung, gelb: freiwerdende Fläche)	39
Abbildung 11:	Holzbereitstellung und -Nutzung in Deutschland bis 2050 (grün: Waldholz stoffliche Nutzung, rot: energetische Nutzung, lila: Holzprodukt Papier) (BMELV, 2013) (VDP, 2014b) (BMELV, 2011b) (BMELV, 2011a) (Mantau, Weimar, & Kloock, 2012)	40
Abbildung 12:	Idealisiertes Stoffstrommodell des deutschen Altholzmarktes im Kaskaden-optimierten Szenario; eigene Darstellung, Datenquellen: (Mantau, Weimar, & Kloock, 2012) (UBA, 2007)	43
Abbildung 13:	Stoffströme auf dem Kaskaden-optimierter Textilmarkt (eigene Darstellung, bvse 2008)	45
Abbildung 14	Rohstoffquellen für eine nachhaltige Biomassenutzung	46
Abbildung 15	Kaskadenprodukt zwischen den Konkurrenzen des Rohstoff- und Absatzmarktes	48
Abbildung 16	Methodisches Vorgehen im Arbeitspaket 3	50
Abbildung 17:	Übersicht der Mittelwerte aller Hemmnisse auf einer Skala von 1 (kein Hemmnis) bis 5 (starkes Hemmnis) (Quelle: Eigene Darstellung)	52

Abbildung 18	Vorgehen bei „klassischer“ Produkt-Ökobilanz für eine Nutzungskaskade	62
Abbildung 19	Vorgehen bei der Stoffstrom-Bilanz für Kaskaden	62
Abbildung 20	Umsetzung des Holzstoffstrom in ein Umberto-Modell	65
Abbildung 21	Ergebnis zu Treibhausemissionen (GWP100) für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft in Deutschland im Basisszenario (links) und im Vergleich mit den Optionen 1 bis 4	68
Abbildung 22	Ergebnis zu Treibhausemissionen (GWP100) für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4	69
Abbildung 23	Unterschiede der Optionen 1 bis 4 gegenüber der Basis normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – negative Werte bedeutet Vorteil für die Option.....	70
Abbildung 24	Unterschiede der Optionen 1 bis 3 gegenüber der Basis normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – negative Werte bedeutet Vorteil für die Option.....	71
Abbildung 25	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; 0,1 EDW ist gleichbedeutend mit 10 % spezifischer Last	73
Abbildung 26	Nettoergebnisse der Optionen der Textilkaskade normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – unten ohne den Ressourcenindikator Frischwasser.	76
Abbildung 27	Nettoergebnisse der Optionen der Biokunststoff-Kaskade normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW (oben) und Differenz der Kaskaden-Optionen mit der Option „Benzin“ (unten).	79
Abbildung 28	Überblick über globale Regelwerke der Bioökonomie (eigene Darstellung)	85
Abbildung 29	Multikriterielle Entscheidungsunterstützung.....	88
Abbildung 30	Paarweiser Vergleich zur Optimierung von Biomasse- und Kaskadennutzung.....	89
Abbildung 31	Schematische Vergleich der gegenläufigen Ziele zum Umgang mit dem Effizienzgewinn durch Kaskadennutzung am Bsp. Holz	107
Abbildung 32:	Verzahnung der Kern-Sphären der Bioökonomie und der Kreislaufwirtschaft über das Prinzip der Kaskadennutzung	110
Abbildung 33:	Verschneidung der betroffenen Ebenen von Handlungsfeldern und Akteurskreisen und für die strategischen Eckpunkte zur Verstärkung der Kaskadennutzung	111

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Einordnung und Bewertung verschiedener Kaskadenkonzepte (Auswahl, eigene Darstellung)	17
Tabelle 2:	Ausgewählte und bewerteten Kaskaden, deren Produktionseinheiten(inkl. Kapazitäten) und Rohstoffeinsatz	42
Tabelle 3:	Anbauprodukte auf den potenziell frei werdenden Ackerflächen	46
Tabelle 4:	Normierungsgrundlage für die betrachteten Wirkungskategorien und Rangbildung	64
Tabelle 5	Basisdaten zu Waldholz für das Holz-Stoffstrommodell (Zusammenstellung ifeu, nach Mantau 2012).....	64
Tabelle 6	Einstufungsanleitung für die einzelnen ökologischen Indikatoren in die Wertklassen +2 bis -2.....	93
Tabelle 7	Einstufungsanleitung für die einzelnen sozioökonomischen Indikatoren in die Wertklassen +2 bis -2	94
Tabelle 8	Bewertungskonzept angewandt auf die Ergebnisse der untersuchten Holzkaskaden; siehe dazu Erklärungen im Text.....	96
Tabelle 9	Bewertungskonzept angewandt auf die Ergebnisse der untersuchten Papierkaskaden; siehe dazu Erklärungen im Text	98
Tabelle 10	Bewertungskonzept angewandt auf die Ergebnisse der untersuchten Textilkaskaden; siehe dazu Erklärungen im Text.....	100
Tabelle 11	Bewertungskonzept angewandt auf die Ergebnisse der untersuchten Biokunststoffkaskaden; siehe dazu Erklärungen im Text	102
Tabelle 12:	Übersicht einer Auswahl von relevanten Strategie- und Positionspapieren mit Bezug zur Kaskadennutzung.....	105
Tabelle 13:	Eckpunkte zur Implementierung und Stärkung von Biomassekaskaden.....	112

Abkürzungsverzeichnis

BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGA	Biogasanlage
bioPE	biobasiertes Polyethen
bioPET	biobasiertes Polyethylenterephthalat
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BtL	Biomass to liquid
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BUF	Biomass Utilization Factor (Biomassenutzungsfaktor)
CH₄	Methan
CO₂Äq	Kohlendioxid-Äquivalente
DG	Directorate General (Generaldirektion der EU-Kommission)
EDW	Einwohnerdurchschnittswert
EEG	Erneuerbare Energie-Gesetz
FQD	Fuel quality directive (Kraftstoffqualitäts-Richtlinie, 2009/30/EG)
GWP	Global Warming Potential
HHS	Holzhackschnitzel
HKW	Heizkraftwerk
ILUC	indirect land-use change (indirekte Landnutzungsänderung)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Standard Organisation
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
KUP	Kurzumtriebsplantage
KW	Kraftwerk
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LNG	Liquified natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
LUC	Land use change (Landnutzungsänderung)
MJ	Mega-Joule
N₂O	Distickstoffmonoxid, Lachgas
NawaRo	nachwachsende Rohstoffe
NMVO	Gasförmige organische Verbindungen außer Methan

NO_x	Stickstoffoxide (NO, NO ₂)
PE	Polyethen, Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PLA	Polylaktid
PM10	Particulate matter mit aerodynamischem Durchmesser <10 µm (Feinstaub)
ProgRess	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
RED	Renewable Energy Directive (Richtlinie 2009/28/EG)
THG	Treibhausgas
TS	Trockensubstanz

1 Hintergrund und Zielsetzung

Ein verantwortungsbewusster Umgang mit den nur begrenzt verfügbaren natürlichen Ressourcen scheint längst ein Gemeinplatz zu sein. Aber wie sieht das in der Praxis aus? Trotz Verbesserungen bei der Rohstoffproduktivität in den letzten Jahren steht der tatsächliche direkte wie indirekte Zugriff auf Rohstoffe bereits heute im Widerspruch zu den Grenzen der Tragfähigkeit des Planeten (Steffen et al. 2015).

Biomasse ist (bislang) der einzige regenerative Rohstoff, was ihn für die Erreichung verschiedener politischer Ziele begehrt macht, insbesondere für den Klimaschutz mit der Energiewende und dem damit verbundenen Bedarf an erneuerbaren Energieträgern oder die noch vergleichsweise junge Bioökonomie. Für die Erzeugung von Biomasse wird Land benötigt, und Land unterliegt selbst der Knappheit. Daher sind Lösungsansätze geboten, welche die Effizienz der Biomassenutzung erhöhen, und damit auch die mit der Biomasseproduktion und Nutzung verbundenen negativen Umweltfolgen und Nachhaltigkeitskonflikte verringern.

Das Prinzip der Kaskadennutzung wird bereits seit einigen Jahren als ein möglicher Lösungsansatz genannt. Demnach sollte *Biomasse so lange, so häufig und so effizient wie möglich zunächst stofflich genutzt und erst am Ende des Produktlebenszyklus energetisch verwertet werden* (UBA 2012). Von diesem Anspruch ist die Realität derzeit noch deutlich entfernt, wie die Zahlen von Mantau (2012) zur Nutzung von Holz in Deutschland zeigen. Etwa ein Viertel dessen, was dem Wald entnommen wird, wird direkt als Energieholz verbrannt, und weitere 20 % des Holzes gehen als Sägenebenprodukte ebenfalls ohne weitere stoffliche Nutzung in Feuerungen. Bei den agrarischen nachwachsenden Rohstoffen ist der Anteil der Energiepflanzen noch weitaus größer: nur etwa 11 % gehen in die stofflich industrielle Nutzung, nahezu 90 % werden zu Biogas und Biokraftstoffen verarbeitet (FNR 2015).

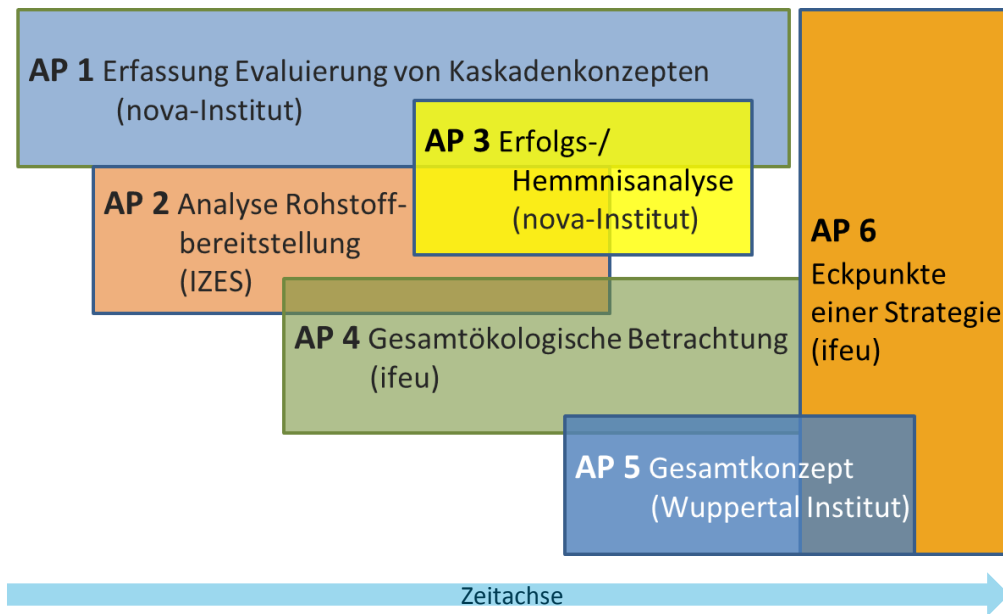
Das Potenzial von Biomassekaskaden ist bisher nicht ansatzweise ausgeschöpft, da die Kaskadennutzung bislang nur in wenigen Sektoren überhaupt praktiziert wird. Holz ist dabei der einzige Biomasserohstoff, für den bisher eine nennenswerte Kaskadennutzung umgesetzt ist, wobei dies in besonderem Maße für den Sektor Papier und Zellstoff gilt.

Angesichts dieser Ausgangslage soll das Forschungsprojekt **Biomassekaskaden**

- ▶ die existierenden Konzepte von Biomassekaskaden, deren Stand der Umsetzung sowie die Gründe für den Erfolg oder das Scheitern von Ansätzen und Konzepten darstellen,
- ▶ die Rohstoffpotenziale für die verschiedenen Konzepte der Kaskadennutzung von Biomasse zusammenfassen,
- ▶ die ökologischen Wirkungen von Biomassekaskaden und mögliche Schwachstellen bewerten,
- ▶ ein Gesamtkonzept zur Bewertung von Kaskaden für eine erfolgreiche Umsetzung entwickeln,
- ▶ die Eckpunkte einer Strategie, die zur Umsetzung dieses Gesamtkonzepts erforderlich ist, aufzeigen.

Die genannten Aufgabenstellungen haben das Konsortium von ifeu (Projektleitung), nova-Institut, IZES und Wuppertal Institut im Auftrag des Umweltbundesamts im Zeitraum von Juli 2013 bis Oktober 2016 bearbeitet. Abbildung 1 zeigt die einzelnen Arbeitspakete (AP) und deren jeweilige Bearbeiter (Partner-Institute).

Abbildung 1: Struktur der Arbeitspakete des Projekts und Zuständigkeit der Partner



Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse des Projekts in der Abfolge der Arbeitspakete (AP 1 bis AP 6) zusammen. Für die Arbeitspakete 1 bis 5 liegen darüber hinaus jeweils eigenständige, umfassende Berichte vor, die als Anlagen zu diesem Endbericht zur Verfügung stehen:

AP 1: „Erfassung und Evaluierung bestehender Konzepte der Kaskadennutzung von Biomasse“ (Essel, Breitmayer, Carus), zusammengefasst in Kapitel 2

AP 2: „Analyse der Rohstoffbereitstellung für die verschiedenen Konzepte der Kaskadennutzung von Biomasse“ (Kay, Bauer), zusammengefasst in Kapitel 3

AP 3: „Erfolgs- und Hemmnisanalyse verschiedener Konzepte der Kaskadennutzung von Biomasse“ (Breitmayer, Essel, Kay, Baur, Detzel, Fehrenbach, de Beus, Carus), zusammengefasst in Kapitel 4

AP 4: „Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung“ (Fehrenbach, Köppen, Detzel, Kauertz, Wellenreuther), zusammengefasst in Kapitel 5

AP 5: „Kaskadennutzung im Rahmen eines Gesamtkonzepts der Biomassenutzung“ (Bienge, Geibler, Fehrenbach), zusammengefasst in Kapitel 6

Die Ergebnisse von A 6 („Eckpunkte einer Strategie zur Implementierung der Kaskadennutzung von Biomasse“) finden sich in Kapitel 7.

Zum vorliegenden Forschungsbericht liegt auch eine separate Kurzfassung des Berichts vor, welche die wichtigsten Ergebnisse kapitelweise zusammenfasst.

2 Konzepte und Praxisbeispiele der Kaskadennutzung

2.1 Aufgabenstellung und Ziel

Unter Kaskadennutzung wird laut Umweltbundesamt (2012) eine Strategie verstanden, um „Rohstoffe oder daraus hergestellte Produkte in zeitlich aufeinanderfolgenden Schritten so lange, so häufig und so effizient wie möglich stofflich zu nutzen und erst am Ende des Produktlebenszyklus energetisch zu verwerten“. Der Kaskadennutzung von Biomasse kommt daher eine strategische Schlüsselstellung zu, um eine nachhaltige Nutzung von Biomasse zu stärken und zur Versorgungssicherheit, zur Einsparung fossiler Ressourcen, zum Klima- und Umweltschutz und zur Stärkung ländlicher Räume beizutragen.

Die Kaskadennutzung hat bereits in zahlreichen umweltpolitischen Strategiepapieren Vorrang gegenüber der energetischen Direktnutzung von Biomasse. Dennoch existieren derzeit nur sehr wenige Nutzungskaskaden in der Praxis. Hier setzt das Projekt „Mehr Ressourceneffizienz durch die stoffliche Biomassenutzung in Kaskaden – von der Theorie zur Praxis“ an. Das Ziel des Projekts ist es, die Bundesregierung und insbesondere das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) mit wissenschaftlichen Grundlagen, Maßnahmen und Instrumenten zur Umsetzung der Kaskadennutzung zu unterstützen, um das Potenzial der Kaskadennutzung mit einer gezielten Strategie erschließen zu können.

Das erste Arbeitspaket (AP 1) bildet den wissenschaftlichen Grundstein des Projekts. Das Ziel ist es einerseits, im Rahmen einer Literaturanalyse relevante Publikationen zum Thema Kaskadennutzung zu recherchieren, darin enthaltene Definitionen des Begriffs Kaskadennutzung hinsichtlich ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu analysieren und dadurch zum allgemeinen Verständnis der Bedeutung von Nutzungskaskaden beizutragen. Weiterhin sollen in einem breiten Screening auf Basis von Literaturrecherchen und Experteninterviews Praxiskonzepte identifiziert werden, die im weiteren Projektverlauf in der Tiefe analysiert werden.

2.2 Vorgehensweise

In AP 1 wurden verschiedene methodische Herangehensweisen miteinander verknüpft. Die Identifizierung und Evaluierung unterschiedlicher Kaskadennutzungskonzepte wurde auf Basis einer Desktop-Recherche durchgeführt. Zum einen wurde eine umfassende Literaturanalyse in wissenschaftlichen und öffentlich zugänglichen Medien genutzt, um eine Vielzahl von Konzepten der Kaskadennutzung zu erfassen. Zum anderen wurde eine gezielte Expertenkonsultationen auf Basis von Leitfadenterviews per Telefon und E-Mail durchgeführt, um Erfahrungswissen aus der Wirtschaft und weiteren gesellschaftlichen Bereichen zu erhalten.

Der Entwicklungsstand und die Erfolgsaussichten unterschiedlicher Kaskadennutzungskonzepte wurden anhand von Experteninterviews und Firmenbesichtigungen bewertet, um die theoretischen Möglichkeiten der Konzepte mit den praktischen Erfahrungen bei deren Umsetzung abzugleichen. Gemäß des Projektanspruches einer intensiven Partizipation wurden die Ergebnisse mit einem breiten Spektrum von Wissenschaftlern und Entscheidungsträgern aus der Wirtschaft, Politik und anderen gesellschaftlichen Bereichen auf zwei Workshops diskutiert und validiert. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die eingesetzten Methoden und damit verknüpften Projektziele.

Für die Literaturanalyse wurde in wissenschaftlichen Datenbanken und Fachzeitschriften (u.a. Science direct, ISI Web of Knowledge, Scopus) recherchiert sowie graue Literatur in Form von Tagungsbeiträgen, Positionspapieren und Präsentationen mit Hilfe von Online-Suchmaschinen (z.B. Google Scholar) erfasst. Die Suchstrategie bezog sich auf Einzelbegriffe und Kombinationen aus Titel-, Kurzfassung-, Stichwort- und Autoren-Abfragen (u.a. biomass cascade, cascading, recycling, conversion, utilization of biomass waste). Außerdem wurde die Recherche durch Ergebnisse aus laufenden und abgeschlossenen Vorarbeiten der Projektpartner ergänzt. Der Entwicklungsstand und die Erfolgsaussichten unterschiedlicher Kaskadennutzungskonzepte wurden anhand von Experteninterviews und Firmenbesich-

tigungen bewertet, um die theoretischen Möglichkeiten der Konzepte mit den praktischen Erfahrungen bei deren Umsetzung abzugleichen. Gemäß des Projektanspruches einer intensiven Partizipation wurden die Ergebnisse mit einem breiten Spektrum von Wissenschaftlern und Entscheidungsträgern aus der Wirtschaft, Politik und anderen gesellschaftlichen Bereichen auf zwei Workshops diskutiert und validiert.

Um die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der zugrundeliegenden Definitionen und Konzepte der Kaskadennutzung zu untersuchen, wurde eine Multikriterien-Analyse durchgeführt. Dazu wurden zahlreiche charakteristische Kriterien gesammelt und alle Definitionen in einer Matrix ausgewertet.

In einer gezielt angelegten Kampagne von Expertenkonsultationen wurden die Ergebnisse der Literaturanalyse überprüft und mit den Erkenntnissen von Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft, Politik sowie weiteren gesellschaftlichen Bereichen verglichen. Hierzu wurden Experteninterviews und Firmenbesichtigungen durchgeführt, mit deren Hilfe der Entwicklungsstand und die Erfolgsaussichten verschiedener Biomassekaskaden ausgewertet wurden. So wurden die theoretischen Möglichkeiten der Konzepte mit den praktischen Erfahrungen bei deren Umsetzung abgeglichen. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die eingesetzten Methoden und damit verknüpften Projektziele.

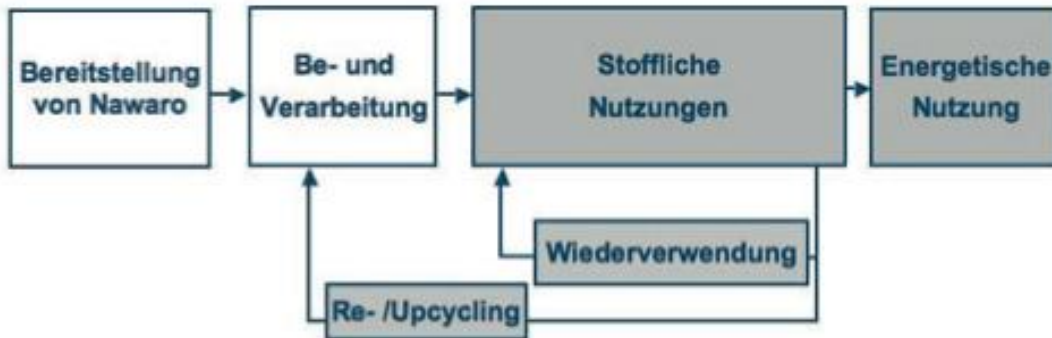
In einem dritten Arbeitsschritt wurden zwei Workshops mit dem Ziel durchgeführt, ein fundiertes Wissen zum aktuellen Stand der Biomassekaskadennutzung in Wissenschaft und Praxis zusammenzutragen, auszuwerten und als Basis für die weiteren Arbeiten im Projekt bereitzustellen. Der erste Workshop diente dazu, die Rechercheergebnisse zu den in Deutschland bestehenden und sich in Entwicklung befindlichen Konzepten der stofflichen Kaskadennutzung von Biomassen vorzustellen und mit führenden Wirtschaftsakteuren hinsichtlich ihrer Verifizierung zu diskutieren. Der zweite Workshop diente dazu, die Rechercheergebnisse zu den im europäischen und außereuropäischen Ausland entwickelten Konzepten der Kaskadennutzung, deren Realisierung und zukünftige Entwicklungen darzustellen und mit wesentlichen Akteuren aus Wirtschaft und Wissenschaft zu diskutieren.

2.3 Übersicht über die untersuchten Konzepte

In der Literatur finden sich zahlreiche Definitionen für den Begriff der Kaskadennutzung. Bereits in den 1990er Jahren wurden Theorie und Konzept umfangreich in nationaler und internationaler Literatur beschrieben und erste Praxisbeispiele analysiert. Ab dem 21. Jahrhundert steigt die Anzahl an Publikationen zum Thema Kaskadennutzung rapide an. Für den vorliegenden Bericht wurden mehr als 30 Literaturquellen recherchiert und anhand einer Multi-Kriterien-Analyse ausgewertet.

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht der evaluierten Konzepte und deren Zuordnung zu spezifischen Themen der Kaskadennutzung. Daraus wird deutlich, dass die untersuchten Konzepte der Kaskadennutzung sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede hinsichtlich spezifischer Eigenschaften der Kaskadennutzung aufweisen. Die Tabelle ist weder von der Anzahl der untersuchten Literaturquellen noch von der Anzahl spezifischer Eigenschaften der Kaskadenkonzepte umfänglich beschrieben und dient vielmehr als beispielhafte Darstellung der Analysestrategie. Eine detaillierte Beschreibung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede unterschiedlicher Kaskadenkonzepte ist in den nächsten Kapiteln zu finden. Dabei wird zunächst auf die funktionale Beschreibung von Nutzungskaskaden eingegangen, bevor unterschiedliche Zieldimensionen der Kaskadennutzung vorgestellt und Quantifizierungsansätze wie auch Fallbeispiele aufgezeigt werden.

Abbildung 3 Das Prinzip der Kaskadennutzung mit Berücksichtigung der Wiederverwendung und des Re-/Upcyclings (Arnold et al. 2009)



Die recycling-orientierten Definitionen entsprechen somit auch vom Prinzip her der eingangs beschriebenen Definition des UBA (2012). Sie liefern jedoch keine genaueren Beschreibungen darüber, wie viele Sequenzen eine Kaskade darstellen und welche Nutzungsformen darin durchlaufen werden. Eine detailliertere Definition liefert dagegen BMELV (2008), wonach Kaskadennutzung von Biomasse auf zwei Wegen erfolgen kann (BMELV 2008, S. 1):

- ▶ „Biomasse wird erst stofflich, ggf. über mehrere Nutzungsetappen oder Produkte, verwendet und am Ende des Produktzyklus energetisch verwertet.“
- ▶ Biomasse wird erst stofflich, ggf. über mehrere Nutzungsetappen oder Produkte, verwendet und nachfolgend werkstofflich verwertet. Nach einem oder mehreren Verwertungszyklen kann dann eine energetische Nutzung oder – bei biologisch abbaubaren Produkten – ggf. eine Kompostierung erfolgen.“

In dieser Definition kommt der Kern der Kaskadennutzung zum Vorschein. Eine Kaskadennutzung von Biomasse ist nur dann möglich, wenn zunächst eine stoffliche Nutzung vor eine andersartige Nutzung geschaltet wird. Bei der stofflichen Nutzung dient die Biomasse als Rohstoff für die Produktion von Gütern jeglicher Art, sowie der direkten Verwendung in Produkten. Sie wird damit von der energetischen Nutzung abgegrenzt, bei der die Biomasse allein der Nutzung als Energieträger dient (Carus et al. 2010).

Andere Definitionen verbleiben hinsichtlich der Reihenfolge bestimmter Nutzungsarten bei vagen Formulierungen, wie es zum Beispiel beim Nationalen Biomasseaktionsplan für Deutschland der Fall ist. Darin steht beschrieben, dass „nach Möglichkeit eine energetische Verwendung erst am Ende stofflicher Nutzungskaskaden anzustreben“ ist (BMELV 2010). Ob eine direkte energetische Nutzung, beispielsweise von Pellets aus Frischholz, unter den Begriff Kaskade fällt, ist damit nicht eindeutig bestimmt.

Viele Definitionen betrachten bereits eine einfache stoffliche Nutzung als Kaskade. Dies ist nicht unbedingt falsch, verwässert jedoch den Begriff, da in diesem Verständnis die stoffliche Nutzung mit dem Kaskadenbegriff gleichgesetzt wird. Fast alle Konzepte zielen daher auf eine mehrfache stoffliche Nutzung, schließen dabei jedoch die einfache stoffliche Nutzung mit ein. Ausnahmen sind ifeu (2013), Keegan et al (2012) sowie einige frühe Definitionen wie Sirkin, ten Houten (1994), Fraanje (1997) und Frühwald (2010), die eine einfache stoffliche Nutzung unter dem Begriff Kaskade ausschließen und eine mehrfache stoffliche Nutzung von Biomasse fordern.

Deutlich von den voraus genannten Ansätzen grenzt sich die im Bereich der Bioabfallentsorgung etablierte Sichtweise ab, die unter Kaskadennutzung eine stofflichen Nutzung des Gärkomposts NACH der energetischen Nutzung – sprich der Biogaserzeugung und -nutzung – erfolgt (BMUB 2015).¹

Kaskade als optimierte Co-Produkt-Nutzung bzw. optimierte Abfallnutzung

Die zweite Denkrichtung versteht Kaskade als eine Art optimierte Koppelproduktnutzung (u.a. Bos-Browsers 2012) oder optimierte Abfallnutzung (z.B. Blue Economy 2015, Ellen McArthur 2015). Folgende Formulierungen finden sich dazu:

- ▶ *“In general, it makes sense to use a cascading approach to wastes and residues, prioritizing re-use or recycling and acknowledging that the value of this material is more than simply its energy content”* (Malins et al. 2014).
- ▶ *“Cascading is the use of biomass co-products as feedstocks to create another new product”* (Morris 2015)
- ▶ *“What people call ‘cascading in function’ is actually co-production, which can be achieved by using bio-refinery. Co-production is the production of different functional streams (e.g. protein, oil and an energy carrier) from one biomass stream, maximising total functional use”* (Odegard et al. 2012).

Fast alle untersuchten Definitionen der Kaskadennutzung von Biomasse stellen allgemein die Nutzung von Biomasse in den Vordergrund ohne weiter zu differenzieren, um welche Art und Beschaffenheit von Biomasse es sich handelt. Jede Art von Biomasse kann daher ein potenzieller Start für eine Kaskadennutzung sein. Zumindest zwei gegensätzliche Ausnahmen dieser Regel sind in der Literatur beschrieben. Arnold et al. (2009) schließen die Co-Produktion von der Kaskadennutzung aus wohingegen Morris (2013) die Kaskadennutzung als eine optimierte Co-Produktnutzung beschreibt.

Eine klare Abgrenzung zwischen der Kaskadennutzung und den Begriffen der Co-Produktion und Koppelnutzung liefert auch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV 2008, S. 2): In Abgrenzung zur Kaskadennutzung ist Koppelnutzung *„die parallele Erzeugung von Produkten und/oder Energie aus Biomasse. Hierzu gehören die gleichzeitige Verwertung von bei der Verarbeitung von Biomasse anfallenden Nebenprodukten sowie die Erzeugung von Prozessenergie aus den Prozessabfällen bei der Konversion von Biomasse zu Produkten. Auch das umfassendere und weiterentwickelte Konzept der Bioraffinerie, das ein integratives Gesamtkonzept zur möglichst vollständigen Ausnutzung der Biomasse ist, fällt darunter“*.

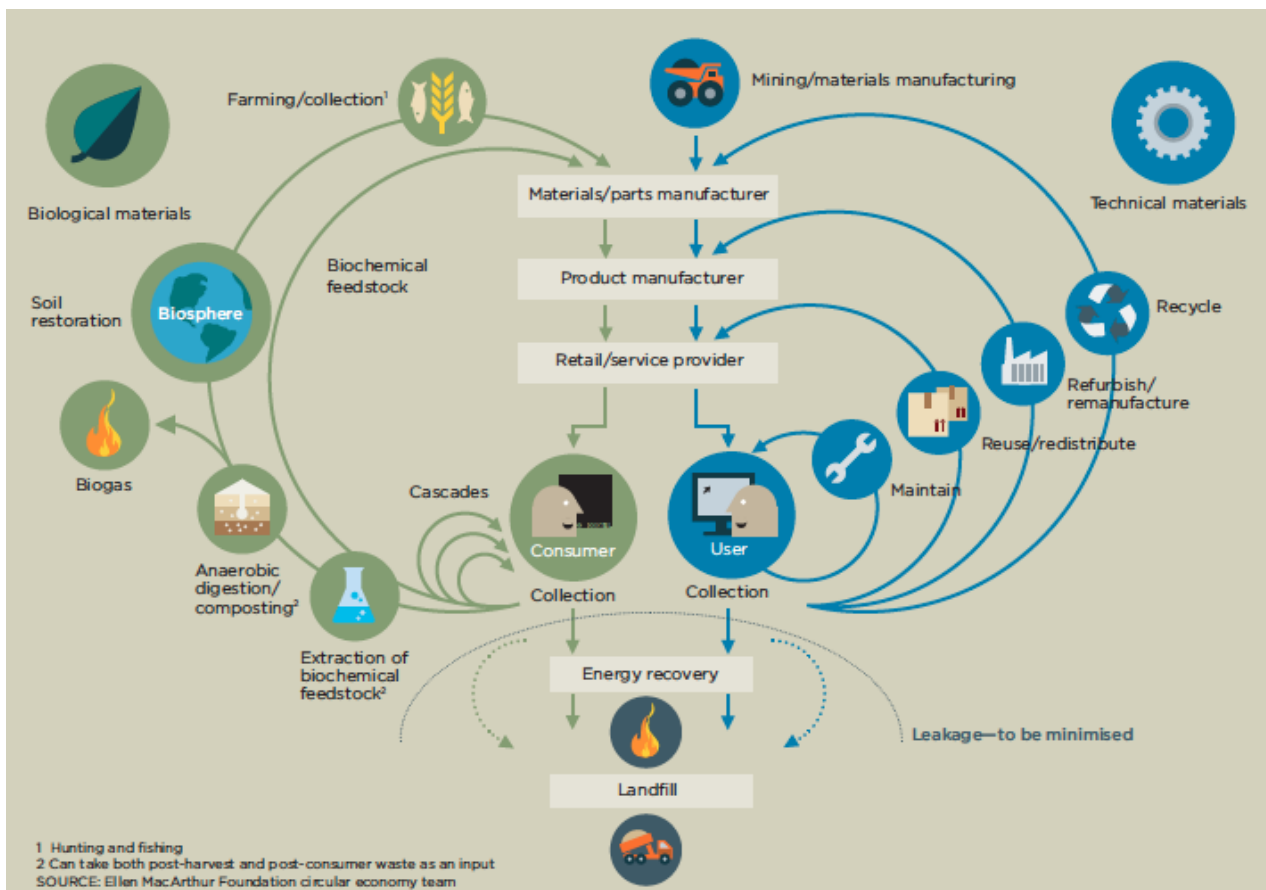
Im Gegensatz dazu werden Bioraffinerien im Rahmen der „Roadmap Bioraffinerien“ (Bundesregierung 2012) in das Konzept der Kaskadennutzung eingebettet und die Relevanz integrierter Konzepte für eine optimale und nachhaltige Rohstoffbereitstellung betont. Kaskadennutzung steht dabei für das „Prinzip stofflicher vor energetischer Verwendung“ (Bundesregierung 2012, S. 98) und dient der Effizienzsteigerung beim Einsatz von Biomasse. *„Im Vergleich von stofflicher mit direkter energetischer Nutzung biogener Rohstoffe liegen wesentliche Unterschiede darin, dass bei der stofflichen Nutzung durch Recycling und Kaskadennutzung eine Verlängerung der Wertschöpfungskette möglich ist, an deren Ende eine energetische Verwertung stehen kann“* (Bundesregierung 2012, S. 61).

Bei den meisten Biomassekaskaden steht am Ende des Produktlebensweges eben diese energetische Verwertung. Eine prominente Ausnahme dafür ist das „cradle-to-cradle“-Konzept von Braungart & McDonough (2013), das als Ziel eine vollkommene Kreislaufwirtschaft verfolgt. Diesem Ansatz liegt die Vision zugrunde, dass ausschließlich Stoffkreisläufe als Zyklen realisiert werden, in denen Abfall nicht mehr vorkommt und jedem Stoff eine Nutzung zukommt. In diesem als auch anderen Konzepten der Kaskadennutzung spielt die Deponierung von Abfällen somit keine Rolle.

¹ Siehe auch: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/entsorgung/bioabfallbehandlung#textpart-1>

Auch die Ellen MacArthur Foundation (2013) betten die Kaskadennutzung von Biomasse in ein Gesamtkonzept der Kreislaufwirtschaft („Circular Economy“) schematisch ein. Die Stiftung entwickelte dabei eine sehr technische Definition: „Kaskadennutzung von Materialien und Komponenten meint: Stoffe und Komponenten zu verschiedenen Nutzungen am Ende ihres Lebenszyklus zusammenführen und die gespeicherte Energie und Material kohärent extrahieren. Entlang der Kaskade nimmt die Materialordnung ab, bzw. die Entropie nimmt zu“. Die Studie beschreibt Kaskade zudem als Wertschöpfungsketten- und Industrie-übergreifenden Prozess. Die folgende Abbildung stellt die Kaskadennutzung als Teil der Kreislaufwirtschaft dar (Abbildung 4).

Abbildung 4 Illustration der Kaskadennutzung innerhalb der Kreislaufwirtschaft (Ellen MacArthur Foundation 2013)



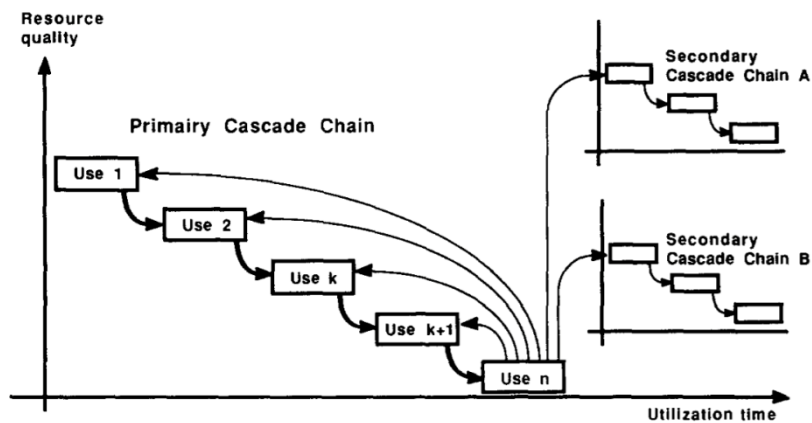
Kaskade als allgemein optimierte Biomassenutzung

Die dritte Denkrichtung versteht Kaskade als allgemein optimierte Biomassenutzung. Eine der ältesten Darstellungen von Kaskade der Autoren Sirkin und ten Houten haben eben jenes Verständnis bereits umfassend konzeptionell ausgearbeitet. Ihre Publikation „The cascade chain – A theory and tool for achieving resource sustainability with applications for product design“ ist bis heute die universellste und detaillierteste wissenschaftliche Beschreibung des Konzepts, auch wenn die Idee dazu sehr viel älter ist. Die Autoren verglichen in ihrer Studie von 1994 das Konzept der Kaskadennutzung mit dem kaskadenförmigen Verlauf von Gewässern über verschiedene Stufen von Stromschnellen und Plateaus aus beruhigten Strömungsbereichen. Sie definierten die Kaskadennutzung als Methode zur Optimierung der Nutzung von Ressourcen durch einen sequenziellen Wiedergebrauch der verbleibenden Ressourcenqualität zuvor genutzter Rohstoffe und Substanzen.

Zur Einordnung der Kaskadennutzung in einen ressourcenökonomischen Kontext dient den Autoren Sirkin und ten Houten (1994) ein komplexes, vierdimensionales Modell. In diesem Modell repräsentieren die X-, Y-, und Z-Achsen die Dimensionen Nutzungsdauer, Ressourcenqualität und Verbrauchs-

menge. Die vierte Dimension, die Wiederverwertbarkeit, stellt die Verbindung der erstgenannten drei Dimensionen dar. Entlang der Nutzungskaskade von Rohstoffen in verschiedenen Anwendungen gibt es demnach eine Vielzahl von möglichen Verknüpfungen zwischen unterschiedlichen stofflichen Nutzungsformen. Dabei werden primäre und sekundäre Kaskaden unterschieden, wie Abbildung 5 zeigt.

Abbildung 5 Schematische Darstellung der Kaskadennutzung nach Sirkin und ten Houten (1994)



Das theoretische Konzept von Sirkin und ten Houten (1994) ist universell für alle Rohstoffe anwendbar und kann sämtliche Nutzungspfade dieser Rohstoffe beschreiben. Allerdings wurde es von den Autoren selbst nicht anhand von praktischen Beispielen überprüft und nie in einen praxisrelevanten Kontext gesetzt. Ein Grund dafür liegt in der Komplexität des Modells. Eine vereinfachte Darstellung von Fraanje (1997), d.h. die Reduktion auf die Dimensionen Zeit und Qualität, wurde daher wesentlich stärker innerhalb der wissenschaftlichen Literatur adaptiert.

Fraanje griff das Konzept für die nachwachsenden Rohstoffe Holz (Fraanje 1997a) sowie Hanf und Schilf (Fraanje 1997b) auf und beschreibt Kaskadennutzung darin als eine Funktion aus Rohstoffqualität (Q) und Gebrauchszeit (T) in verschiedenen Anwendungen der stofflichen Nutzung. Demnach sinkt die Rohstoffqualität in Form von Funktionseigenschaften (Energieinhalt, chemische Zusammensetzung, Organisationsstruktur, etc.) mit jeder neuen stofflichen Anwendung. Die Lebenszeit des für das erste Produkt in der Kaskade aufgewandten Rohstoffs verlängert sich dabei über die Nutzungsphasen der jeweiligen Anwendungen und kann ein Vielfaches der konventionellen Nutzung betragen. Nach Fraanje (1997a) werden drei Prinzipien bei der Kaskadennutzung erneuerbarer Ressourcen unterschieden:

- ▶ Sachgerechte Nutzung (hohe Qualität Q).
- ▶ Verlängerung der Produktlebenszeit (ΔT)
- ▶ Erhalt der Qualität (Minimierung von ΔQ).

2.3.2 Kaskadennutzung zur Erreichung politischer Ziele

In zahlreichen Publikationen wird die Kaskadennutzung als Strategie zur Erreichung unterschiedlicher politischer Ziele beschrieben. In der EU Forststrategie „Eine neue EU-Waldstrategie: für Wälder und den forstbasierten Sektor“ (European Commission 2013) heißt es beispielsweise: „(...) dem kaskadierenden Grundsatz zufolge wird Holz zu folgenden Zwecken in absteigender Reihenfolge verwendet: Erzeugnisse auf Holzbasis, Verlängerung von deren Nutzungsdauer, Wiederverwendung, Recycling, Bioenergie und Entsorgung“. Diese Definition orientiert sich damit eng an der Abfallhierarchie der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 (engl. *Waste Framework Directive*). Forstressourcen sollen demnach auf eine Art und Weise nutzbar gemacht werden, die Umweltwirkungen minimiert, hochwertige Produkte priorisiert, Arbeitsplätze schafft und die Kohlenstoffbilanz positiv beeinflusst. Die Definition ist beispielgebend für eine Reihe von Definitionen, die entweder ökologische, ökonomische, gesellschaftliche oder mehrere Dimensionen gleichzeitig adressiert. Im Folgenden werden Beispiele für die unterschiedlichen Dimensionen beschrieben.

2.3.2.1 Ziel: Verringerung negativer Umwelteffekte

Zahlreiche Veröffentlichungen verbinden mit der Kaskadennutzung von Biomasse ökologische Vorteile gegenüber dem traditionellen Wirtschaften. Das „Staff Working Document Accompanying the document Communication on Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe“ (European Commission 2012) beschreibt das Kaskadenprinzip folgendermaßen: „*The principle of cascading use is based on single or multiple material uses followed by energy use through burning at the end of life of the material including taking into account the greenhouse gas emissions (GHG) mitigation potential*“. Dies schließt die Nutzung von Neben- und Abfallprodukten als Rohmaterial für neue Prozesse mit ein. Das Papier stellt zudem die herausragende Bedeutung von Bioraffinerien für ein bio-basiertes Wirtschaftssystem dar. Kaskadennutzung soll dabei auf regionaler, nationaler sowie europäischer Ebene ermöglicht werden, um ökologische Vorteile zu erzielen.

Ökologische Vorteile können durch den Erhalt des Kohlenstoffspeichers bzw. eine Verminderung der Treibhausgasemissionen aufgrund der längeren Nutzungsphase entstehen (u.a. Frühwald et al 2010; Sathre und Gustavson 2006; Wern 2012; Gärtner et al 2013). Über Rückkopplungen in die Forstwirtschaft können zusätzlich CO₂-Emissionen eingespart werden (Sathre und Gustavson 2006). Mit Blick auf die Ökobilanz kommen mehrere Autoren zu dem Schluss, dass generalisierte Annahmen nicht getroffen werden können (u.a. Werner 2009, Gärtner et al 2013). Gärtner et al. (2013) kommen dabei zu folgenden Schlüssen:

- ▶ Holzprodukte dienen als Kohlenstoffspeicher solange sie stofflich genutzt werden. Dadurch werden Treibhausgasemissionen aus der Holzverbrennung verzögert, die bei energetischer Nutzung unmittelbar in die Atmosphäre freigesetzt werden. Bei über lange Perioden wachsenden Biomassen wie Holz ist die zeitliche Dynamik ihrer Verbrennung relevant: wenn die Umtriebszeit kürzer ist als die Zeit, in welcher der Holzbrennstoff seine direkte Freisetzung an CO₂ durch Einsparung fossiler Brennstoffe wettgemacht hat (engl. *payback time of carbon debt*), steigt der Gehalt an CO₂ in der Atmosphäre in der Nettobilanz an. Je nach Bewertungsmethode führen die gegenläufigen Effekte verzögerter energetischer Verwertung und Kohlenstoffspeicherung zu gleich bleibenden bis verringerten Auswirkungen auf das Klima.
- ▶ Grundsätzlich sind aus Umweltsicht höherwertige stoffliche Nutzungen einer direkten energetischen Nutzung vorzuziehen.
- ▶ Umweltauswirkungen einer Holznutzung sind in den meisten Fällen umso niedriger, je mehr Stufen einer möglichst hochwertigen stofflichen Nutzung aufeinander folgen, bevor das Holz energetisch genutzt wird.

Andererseits führt die Kaskadennutzung von Holz dazu, dass dessen energetische Verwertung um Jahrzehnte verzögert wird. Während sich heute die Chance bietet, fossile Brennstoffe zu ersetzen, werden Brennstoffe aus Holzprodukten in der Zukunft mit anderen erneuerbaren Energiequellen konkurrieren. Die Netto-Einspareffekte an Treibhausgasemissionen werden damit geringer ausfallen. Ob diese Erkenntnisse auch für andere stoffliche Kaskadennutzungen von Biomasse gelten, wird im aktuellen Projekt in einem anderen Arbeitspaket betrachtet.

2.3.2.2 Ziel: Steigerung der Wertschöpfung

Die Steigerung der Wertschöpfung ist eine politische Forderung, die sich in zahlreichen Politikpapieren der Kaskadennutzung wiederfindet. Eine Sonderstellung nimmt dabei das Konzept der Wertepyramide (engl. *Value Pyramid*) ein. Das Konzept basiert auf einem von Bruton (2009) entwickelten groben Klassifizierungsschema von Bioraffinerien. Produktkombinationen ordnet er dabei zweidimensional den Achsen Marktvolumen und Marktwert zu und beschreibt eine hierarchische Ordnung möglicher biobasierter Produktionspfade einer Bioraffinerie.

Das Konzept der „Value Pyramid“ wurde u.a. von der Europäischen Kommission (2013) aufgegriffen und unter dem Begriff „Smart or Cascading Principle Use of Biomass“ modifiziert. Die modifizierte Wertepyramide trägt den Prinzipien zur Priorisierung der Nutzung von Lebensmitteln und der Priorisierung der stofflichen vor der energetischen Nutzung von Biomasse Rechnung. Auf der anderen Seite

lässt das Konzept den Leser in Hinsicht auf die Kaskadennutzung oder Ressourceneffizienz mit vielen offenen Fragen zurück, denn Hochwertigkeit der Produkte allein leistet noch keinen Beitrag zu mehr Ressourceneffizienz oder gesamtwirtschaftlicher Wertschöpfung.

Eine abnehmende Wertigkeit in der Abfolge von Nutzungskaskaden wird in zahlreichen weiteren Veröffentlichungen beschrieben. Das BMELV (2008) stellt dazu unter anderem fest: *„Kaskadennutzung beschreibt die Strategie, Rohstoffe oder daraus hergestellte Produkte so lange wie möglich im Wirtschaftssystem zu nutzen. Dabei werden Nutzungskaskaden durchlaufen, die vom hohen Wertschöpfungsniveau schrittweise in tiefere Niveaus münden. Bei einer Kaskadennutzung wird die Wertschöpfung insgesamt erhöht und die Umweltwirkung weiter verbessert“*.

2.3.2.3 Ziel: Rohstoffsicherung, Ressourceneffizienz, Innovation

In den vergangenen Jahren wurde die Kaskadennutzung von Biomasse zunehmend als ein Baustein in einem Gesamtrohstoffkonzept angesehen. Die Kaskadennutzung ist dabei ein strategisch wichtiges Instrument für die Transformation eines auf fossilen Ressourcen basierenden Wirtschaftssystems hin zur Bioökonomie. Kaskadennutzung ist damit eine Strategie, um die steigende Nachfrage biogener Ressourcen zu befriedigen, Rohstoffunabhängigkeit zu forcieren, sowie die Nutzungskonkurrenz zwischen Flächen und Biomasse für Nahrungs- und Futtermittel sowie der stofflichen und energetischen Nutzung zu entschärfen.

Die Politikstrategie Bioökonomie (BMELV 2013) baut auf der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung auf. Damit unterstützt die Bundesregierung den Wandel zu einer rohstoffeffizienten Wirtschaft, die nicht auf fossilen, sondern auf nachwachsenden Ressourcen basiert. Die Politikstrategie Bioökonomie ist eng verzahnt mit der 2010 beschlossenen Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030 – Unser Weg zu einer biobasierten Wirtschaft, die die Grundlagen für Innovationen in der Bioökonomie durch Forschung und Entwicklung legt. In ihr heißt es *„Wo möglich und sinnvoll, ist die Kaskaden- und Koppelnutzung von Biomasse zu realisieren. Nutzungskaskaden und intelligente Verknüpfung von Wertschöpfungs- bzw. Prozessketten können die Ressourceneffizienz verbessern, mögliche Konkurrenzen der Nutzungswege entschärfen und Innovationspotenziale erschließen“* (BMELV 2013, S. 21).

Laut Nationaler Forschungsstrategie (BMBF 2010) gilt es *„neue Verfahren zu entwickeln und miteinander zu verknüpfen (Kaskaden- und Koppelnutzung zum Thema Bioraffinerie), um den begrenzt verfügbaren Rohstoff Biomasse effizient und nachhaltig zu verwerten, ohne dass die Nahrungsmittelversorgung eingeschränkt wird“* (BMBF 2010, S. 36).

Im Fortschrittsbericht zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung aus dem Jahr 2008 wird die Kaskadennutzung für biogene Rohstoffe als ein Handlungsfeld zur Sicherung der Verfügbarkeit biogener Rohstoffe beschrieben. Explizit werden die Beispiele der Holz- und Papierkaskade genannt, sowie biobasierte Kunststoffe.

Rohstoffsicherheit, Kostensenkung sowie die Senkung der materialbezogenen Rucksäcke stehen auch im Vordergrund des deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess) (BMU 2015). Von der Kaskadennutzung wird eine effizientere Nutzung der jeweiligen Ressourcen erwartet. ProgRess fordert, die Erfassung des Beitrages der Kaskadennutzung zur Kreislaufwirtschaft indikatorengestützt sichtbar zu machen. Die Bundesregierung prüft daher, ob *„der Anteil des rezyklierten Materials am gesamtwirtschaftlichen Materialeinsatz ein geeigneter Indikator wäre, um das Aufkommen an Sekundärrohstoffen in ein erkennbares Verhältnis zum Rohstoffbedarf insgesamt zu setzen“* (BMU 2015, S. 40). Es wird angestrebt, branchenspezifische Lösungen zu finden (siehe hierzu auch Kapitel 7).

2.4 Stand der Praxis und Potenziale für die Kaskadennutzung von Biomasse

Holz

Für Holz, dem größten Biomassestoffstrom, liegen die bedeutendsten Potenziale für die Kaskadennutzung in der Rückgewinnung von Baumaterial. Um die Kaskadennutzung hier zu ermöglichen, müssen die Perspektiven auf die gesamte Wertschöpfungskette erweitert und Rückkopplungen innerhalb der Kette erfasst werden. Grundlage ist eine stärkere Vernetzung verschiedener Akteure sowie das Bewusstsein, dass Entscheidungen am Anfang der Kette über die Verwertungsmöglichkeit am Ende entscheiden. Bereits in der Design- und Bauphase sollte die Rückgewinnungsmöglichkeit des Holzes berücksichtigt werden, um das Potential der Kaskadennutzung voll auszuschöpfen (Goverse 2001). Höglmeier et al. (2015) schätzen das Substitutionspotential der Kaskadennutzung auf 3 – 14 % der jährlichen Primärversorgung.

Papier

Das Recycling von Papier ist eine Kaskadennutzung von Biomasse, da Papier aus Naturfasern hergestellt wird. In Deutschland wurden im Jahr 2013 etwa 22,3 Millionen Tonnen Papier, Pappe und Karton produziert. Ein Sammel- und Recyclingsystem für Altpapier ist in Deutschland seit Jahrzehnten in Betrieb. Aktuell werden ca. 16,2 Millionen Tonnen Altpapier neben dem Einsatz von Zell- und Holzstoff für die Produktion von Papier, Karton und Pappe genutzt (VDP 2015). Der Anteil des Altpapiers liegt bei ca. 73 %. Nach Aussage des ERPC (2014) können schätzungsweise 19 % des Papiers nicht wiederverwertet werden, da sie als Bücher, Fotografien oder Dokumente langfristig aufbewahrt oder direkt bei der Verwendung aufgebraucht werden (z.B. Toilettenpapier, Taschentücher). Die Kaskadennutzung im Bereich des Papiers ist damit bereits als sehr effizient einzustufen.

Biobasierte Kunststoffe

Zahlreiche Kunststoffe können aus Biomasse hergestellt und auch recycelt werden. Dazu zählen unter anderem bio-PE, bio-PET und PLA. Heutzutage werden allerdings nur die beiden bio-basierten Kunststoffe bio-PE und bio-PET in großem Maßstab recycelt, da sie mit identischen chemischen Eigenschaften wie ihre konventionellen Gegenstücke PE und PET im Abfallmanagement behandelt werden. Weltweit standen dafür im Jahr 2014 Produktionskapazitäten von etwa 200.000 Tonnen bio-PE und 600.000 Tonnen bio-PET zur Verfügung (Aeschelmann & Carus 2015).

Die Kaskadennutzung von Naturfasern ist auch im Bereich der Textilien realisiert. Deutschland ist nach China und Italien der drittgrößte Exporteur von Textilien (Germany Trade & Invest 2014). Mit einem Umsatz von 28 Mrd. Euro innerhalb Deutschlands ist die Textilbranche dabei der zweitgrößte Konsumgütermarkt. Insgesamt wurden im Jahr 2010 Baumwoll-Textilien in der Größenordnung von 1,1 Mio. Tonnen nach Deutschland aus China, Indien und anderen Ländern importiert (DESTATIS, 2014). Zudem wurden 2008 in Deutschland auf etwa 892 ha Hanf und auf 425 ha Flachs angebaut.

Textilien

Aufgrund des großen Marktvolumens von Textilien sind auch Alttextilien umfangreich am Markt verfügbar. Nach der Studie „Textilrecycling in Deutschland“ im Auftrag des bvse – Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. und des FTR – Fachverband Textil-Recycling e.V. (2008) fielen im Jahr 2007 ca. 1,13 Mio. t Alttextilien an. Das Sammelaufkommen lag danach bei 750.000 t. 43 % der Alttextilien wurden als Second-Hand-Kleidung, 16 % als Putzlappen und 21 % als Sekundärrohstoffe verwendet. 10 % gingen in die thermische Verwertung, und 10 % mussten entsorgt werden.

Eine differenzierte Betrachtung zum Anteil nachwachsender Rohstoffe in diesem Sektor liegt bislang noch nicht vor. Geht man davon aus, dass etwa 40 % der Faserproduktion für die Textilindustrie aus Baumwolle besteht, handelt es sich bei dem Stoffstrom von 300.000 Tonnen Baumwolle um eine mengenmäßig bedeutende und bisher vernachlässigte Form der Kaskadennutzung von Biomasse.

Sonstiges

Weitere Beispiele der Kaskadennutzung sind unter anderem für Kork (Corticeira Amorim 2011) und Obstkerne (Wimmer et al. 2003) dokumentiert. Als Zukunftsoptionen für die Kaskadennutzung von Biomasse nennen Odegard et al (2012) unter anderem die Ethanolgewinnung aus Stroh sowie die Herstellung von Chemikalien auf Ethanolbasis, Chemikalien aus Tierfetten, Grasbasierte Bioraffinerien und das Recycling von Biokunststoffen.

Die „Blue Economy“ ist eine Sammlung von mehr als 107 Innovationen. Dabei geht es nicht nur um eine konzeptionelle Vorstellung, sondern um die konkrete unternehmerische Umsetzung der Ideen. Ideen sind beispielsweise der Einsatz von Stroh in der Bauindustrie, der Einsatz von Chili (Capsaicin) in der Schädlingsbekämpfung sowie in Kosmetika oder die Nutzung von Abfällen der Kaffeeproduktion als Substrat für die Pilzzucht (Blueeconomy 2015). Die meisten der vorgestellten Innovationen sind jedoch Nischenprodukte. Sie spiegeln eine intelligente Nutzung biogener Rohstoffe wider und stehen damit am Anfang einer potentiellen Kaskade; ob die Umsetzung der Ideen jedoch im mengenmäßig relevanten Maßstab erfolgt, bleibt fraglich.

2.5 Quantifizierungsansätze zur Kaskadennutzung

Um beurteilen zu können, ob durch die Umsetzung der Kaskadennutzung von Biomasse bestimmte Ziele erreicht werden können, sind Ansätze zu deren Quantifizierung erforderlich. Die Fachliteratur zeigt eine Reihe von Modellen, die Marktmechanismen mit dem Stoffstromgerüst der Biomassenutzungen in Verbindung bringen. Der Großteil der analysierten Studien beschreibt die Kaskadennutzung jedoch nur qualitativ, und Ansätze zur quantitativen Analyse sucht man fast vergeblich.

2.5.1 Kaskadenfaktor nach Mantau

Aus dem Holzsektor stammt der erste Quantifizierungsansatz. Mantau (2012) definiert in der Studie „Wood flows in Europe (EU 27)“ Kaskade als „multiple use of the wood resources from trees by using residues, recycling (utilization in production) resources or recovered (collected after consumption) resources“. Zur Quantifizierung führt Mantau den sogenannten Kaskadenfaktor (engl. *cascade factor*) ein, der das Verhältnis der gesamten Holzressourcen (Frischholz, Altholz, Restholz) zum Anteil des Frischholzes beschreibt. Für den gesamten Markt an Holzprodukten in Europa hat Mantau (2012) einen Kaskadenfaktor von 1,57 ermittelt. Das bedeutet, die primäre Ressource Frischholz wurde mehr als anderthalbmal genutzt.

Der Kaskadenfaktor ist maßgeblich abhängig von drei Einflussfaktoren: Der Nutzung von Sägenebenprodukten (energetisch und stofflich), der Nutzung von Recyclingmaterial (energetisch und stofflich) sowie der Nutzung von Frischholz-Ressourcen als Rohstoffbasis.

Die Stärke des Kaskadenfaktors liegt darin begründet, dass sich direkte energetische Nutzung negativ auf den Faktor auswirkt, während eine multiple Nutzung von Altmaterialien den Kaskadenfaktor erhöht. Auf den durch statistische Daten ausreichend beschriebenen Holzmarkt ist er gut anwendbar. Es ist jedoch fraglich, ob der Kaskadenfaktor geeignet ist, Biomasseströme jenseits des Holzsektors sowie für komplexe Systeme, in denen Stofftransfers zwischen unterschiedlichen Sektoren erfolgen, adäquat abzubilden.

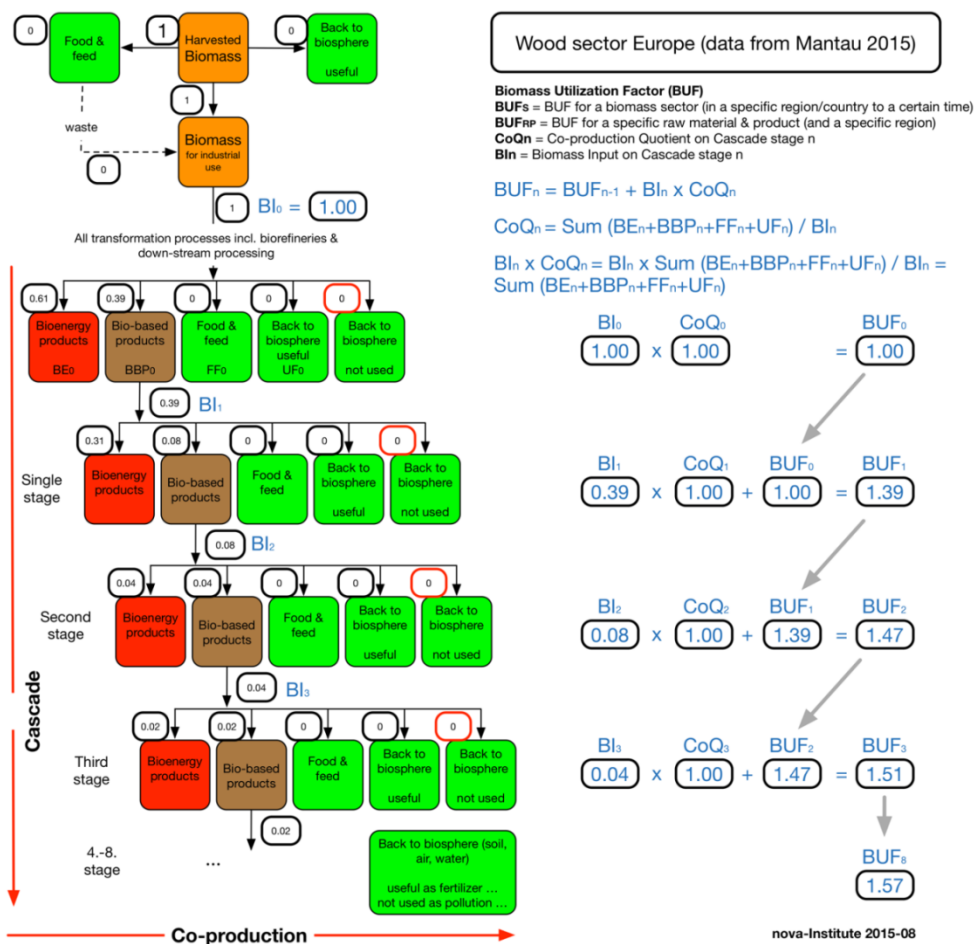
2.5.2 Kaskadenfaktor nach Indufor

Die finnische Forstinstitution Indufor (2013) definiert Kaskadennutzung als „principle, where products with higher value added are produced first and energy at a later stage of the production chain“. Indufor greift den Kaskadenfaktor in einer Studie auf und entwickelt diesen weiter zu einem Gesamtkaskadenfaktor (engl. *total cascade factor*) und einen Teilkaskadenfaktor (engl. *simple cascade factor*). Der grundlegende Unterschied beider Faktoren liegt in der Einbeziehung von Restholz als Rohstoff in den Faktor. Der Gesamtkaskadenfaktor entspricht dem von Mantau eingeführten Kaskadenfaktor, während der Teilkaskadenfaktor jedoch Forstabfälle nicht als Frischholzressource zählt. Durch diese Neubewertung von Restholz verkleinert sich der Nenner, wodurch sich der Faktor bei gleichbleibender Nutzung der Ressourcen insgesamt erhöht. Für die Anwendung des Indufor-Ansatzes hat das zwei wesentliche Nachteile: Die Zunahme der Nutzung von Forstabfällen wirkt sich positiv auf den Teilkaskadenfaktor aus, und energetische Nutzung von Frischholz wird zur Kaskade gezählt, was in direktem Widerspruch zu den Definitionen der Kaskadennutzung von Biomasse steht.

2.5.3 Biomass Utilisation Factor (BUF)

Neben diesen beiden Quantifizierungsansätzen, die methodisch auf einer Quotientenbildung von statistischen Daten der Holzindustrie beruhen, hat das nova-Institut (2015) einen weiteren Ansatz entwickelt, den Biomasseverwendungsfaktor (engl. *Biomass Utilisation Factor*, BUF). In diesem Ansatz wird der Stoffstrom jeglicher Art von Biomasse über den gesamten Lebensweg von der Ernte, über die Nutzung in unterschiedlichen Anwendungen (Lebens- und Futtermittel, stofflich, energetisch) und zahlreiche Kaskadenstufen bis hin zum Lebensende der biobasierten Produkte betrachtet.

Abbildung 6 Stoffstrommodell und Kalkulationsmethode des Biomass Utilisation Factor (BUF) für den Holzsektor in Europa nach nova (2015)



Der BUF quantifiziert damit nicht nur die Kaskadennutzung von Biomasse, sondern integriert darüber hinaus die Produktionseffizienz der jeweiligen Kaskadenstufe. Die unterschiedlichen Anwendungen von Biomasse werden gleichrangig behandelt, wobei nur die stoffliche Nutzung zu weiteren Kaskadenstufen führen kann.

2.6 Vorschlag zur Definition von Kaskadennutzung

2.6.1 Projektdefinition zu ein- und mehrstufiger Kaskadennutzung

Die umfassenden Literaturrecherchen, Expertenconsultationen und die Durchführung von zwei Workshops im Projekt haben deutlich gemacht, dass ein einheitliches Verständnis für den Begriff der Kaskadennutzung weder in der Forschung noch in der Wirtschaft noch in der Politik existiert und eine praktische Umsetzung des Kaskadenprinzips viele Fragen aufwirft. Dies wird auch in zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen und Politikpapieren bemängelt (u.a. Olsson et al. 2016, CEPF et al. 2015, AEBIOM et al. 2013).

Grund dafür sind einerseits eine Vielzahl von Definitionen, die Kaskadennutzung als Strategie verstehen und deshalb keine Anhaltspunkte für die konkrete Auslegung des Begriffs im Praxisfall geben. Zum anderen sind viele der Definitionen akademischer Natur und lassen sich durch einen hohen Grad an Komplexität nur schwer in die realen Biomassenutzungen übersetzen.

Daher wurde im Rahmen des AP1 dieses Forschungsprojekts eine funktionelle Definition entwickelt, die für eine Bewertung unterschiedlicher praxisrelevanter Biomassenutzungen implementierbar ist. Zudem soll diese Definition praktische Handlungsempfehlungen geben und auf politische Strategien anwendbar sein, welche die Kaskadennutzung in einem Gesamtkonzept der Biomassenutzung einbinden.

Die entwickelte Projektdefinition wurde als Grundlage für alle weiteren Arbeiten im Forschungsprojekt Biomassekaskaden herangezogen.²

Projektdefinition

Eine **Kaskadennutzung von Biomasse** liegt vor, wenn ein biogener Rohstoff zu einem biobasierten Endprodukt verarbeitet und dieses Endprodukt mindestens ein weiteres Mal stofflich oder energetisch genutzt wird. Man spricht von einer **einstufigen Kaskadennutzung** von Biomasse, wenn ein biogener Rohstoff zu einem biobasierten Endprodukt verarbeitet wird und dieses Endprodukt mindestens ein weiteres Mal energetisch genutzt wird.

Man spricht von einer **mehrstufigen Kaskadennutzung** von Biomasse, wenn ein biogener Rohstoff zu einem biobasierten Endprodukt verarbeitet wird und dieses Endprodukt mindestens ein weiteres Mal stofflich genutzt wird. Erst nach der stofflichen Mehrfachnutzung kann eine energetische Nutzung folgen.

Mit der Projektdefinition wird zum ersten Mal eine Unterscheidung zwischen einstufigen und mehrstufigen Kaskadensystemen vorgelegt. Die mehrstufige kaskadenförmige Nutzung wurde bisher nur bei einer sehr kleinen Zahl von Biomasseträgern erreicht bzw. kann nur mit einer begrenzten Anzahl von Wertschöpfungsketten erreicht werden. Die Einbeziehung der einstufigen Kaskadensysteme in die Definition erweitert den Betrachtungsraum erheblich und setzt den ersten notwendigen Schritt zur Steigerung der Kaskadennutzung insgesamt.

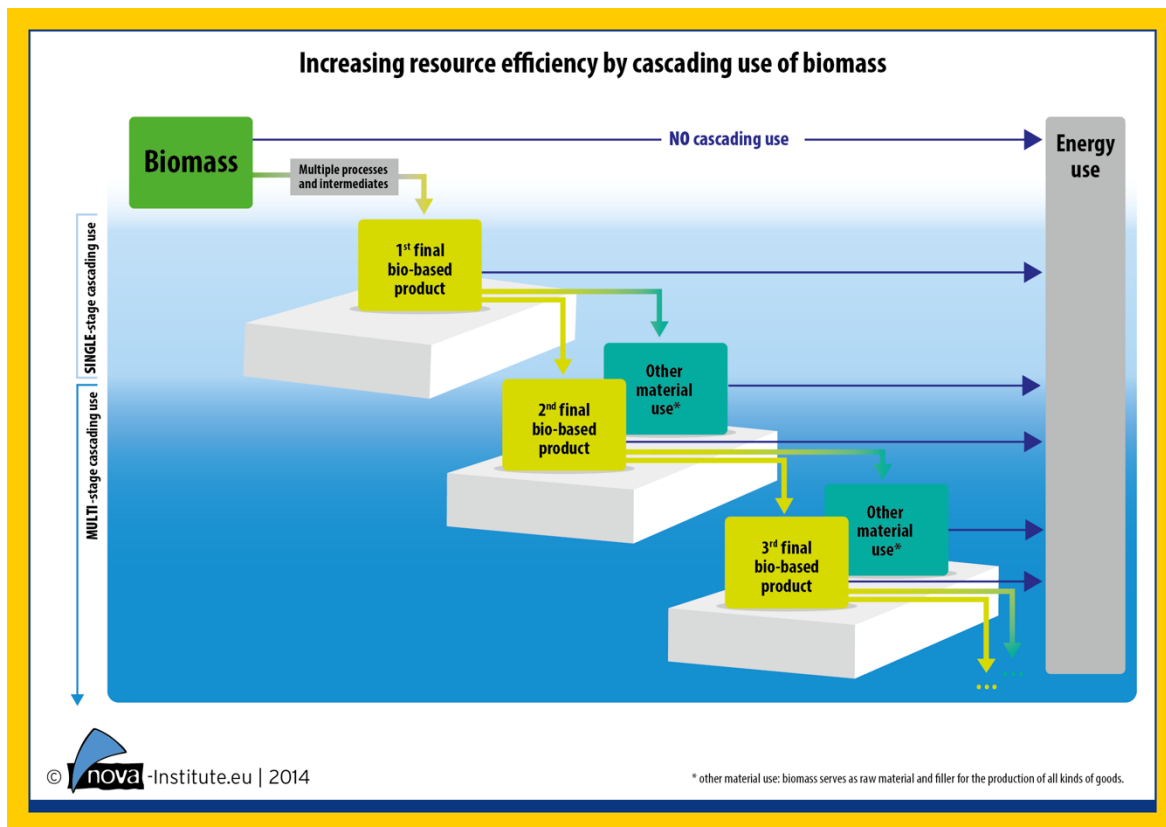
Versteht man das kaskadenförmige Prinzip als Strategie zur Steigerung der Ressourceneffizienz, kann sowohl eine einstufige als auch eine mehrstufige Kaskadennutzung ein übergeordnetes Effizienzziel unterstützen. Daher bringen neue Arten der stofflichen Nutzung von Biomasse – auch wenn sie nicht

² Eine umfassende Beschreibung wurde im Rahmen eines Diskussionspapiers „Defining cascading use of biomass“ auf der Homepage des Projekts veröffentlicht (www.biomassekaskaden.de/info/downloads) und ist im Anhang abgebildet.

von Anfang an mehrstufig sind – das Potenzial zur Steigerung der Kaskadennutzung mit sich. Abbildung 7 veranschaulicht die Ebenen von einstufiger und mehrstufiger Kaskadennutzung von Biomasse.

Anhand der oben genannten Definition wird deutlich, dass für die Kaskadennutzung sämtliche biogenen Rohstoffe gleich behandelt werden, unabhängig davon, ob es sich um Haupt-, Neben- oder Zwischenprodukte aus der land- oder forstwirtschaftlichen Primärproduktion handelt, oder um irgendeinen biogenen Rohstoff aus der Lebens-, Futtermittel- oder sonstigen Industrie handelt. Die einzige Prämisse ist die stoffliche Nutzung, ohne die eine Kaskadennutzung von Biomasse nicht möglich ist.

Abbildung 7 Graphische Umsetzung der Projektdefinition zur Kaskadennutzung von Biomasse (Quelle: nova-Institut 2014)



2.6.2 Abgrenzung und Zusammenhang der Kaskadennutzung mit den Basisbegriffen der Kreislaufwirtschaft

Bereits in Abschnitt 2.3.1 wurde beschrieben, dass die Auffassungen des Prinzips der Kaskadennutzung und der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft (Recycling etc.) fließend ineinander übergehen. Versteht man die Kaskadennutzung gemäß der vorausgehend beschriebenen Projektdefinition, welche einen Materialfluss von höheren Wertschöpfungsniveaus in tiefere Niveaus beinhaltet, dann entfallen folgende Kategorien der Kreislaufwirtschaft³: „Wiederverwendung“ sowie die „Vorbereitung zur Wiederverwendung“ und die „Beseitigung“. Es verbleiben die oben genannten Kategorien „Recycling“, „sonstige stoffliche“ und „energetische Verwertung“. Des Weiteren fällt auch das closed-loop-Recycling aus dieser strengen Definition der Kaskadennutzung heraus, weil hier das Wertschöpfungsniveau erhalten bleibt.

³ Nach Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) § 6: Abfallhierarchie.

Bei den sonstigen stofflichen Verwertungsmaßnahmen können die auf „Verfüllung“ zielenden Verfahren ebenso ausgeschlossen werden, da sie das Ende einer Kaskade bilden und keine spätere energetische Verwertung mehr zulassen. Die sogenannte rohstoffliche Verwertung, die das Material auf niedermolekularer Ebene erhält (z.B. Vergasung), kann durchaus eine Stufe der Kaskadennutzung bilden.

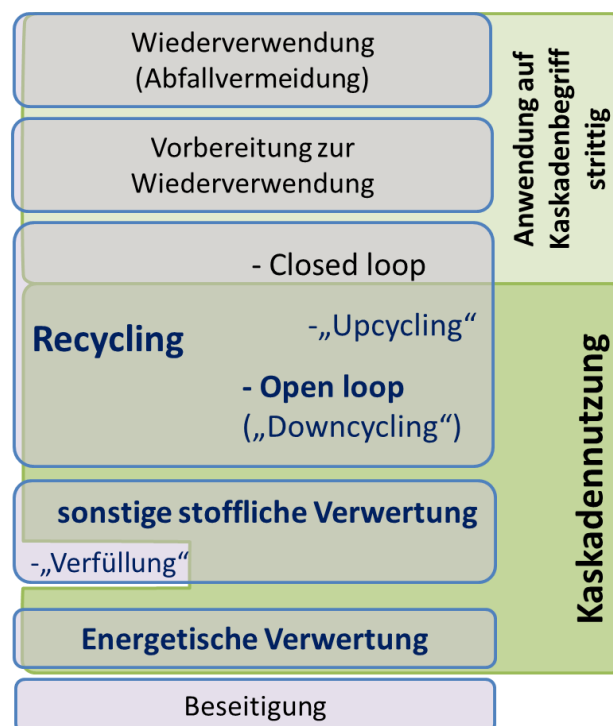
Somit decken sich folgende Begriffe mit dem Prinzip der Kaskadennutzung:

- ▶ open-loop-Recycling
- ▶ rohstoffliche Verwertung
- ▶ energetische Verwertung

Zu erwähnen sei noch ein weiterer geläufiger, jedoch schwer zu präzisierender Begriff: „Up-Cycling“. Er wird insbesondere als Gegenbegriff zum häufig als „Downcycling“ verstandenen open-loop-Recycling verwendet und drückt Sachverhalte aus, in welchen aus einem Material mit vergleichsweise geringer Wertigkeit (z.B. rohstoffartiges Material „am Fuß“ einer Kaskade) wieder ein Produkt auf hoher Wertschöpfungsebene erzeugt wird.

In Abbildung 8 werden die Begriffe nochmals systematisch zusammengestellt. Das grüne Feld markiert die Überschneidungsbereiche mit der Kaskadennutzung im engeren Sinne.

Abbildung 8: Überschneidung der Hierarchieebenen der Kreislaufwirtschaft nach Verzahnung der Abfallrichtlinie (2008/98/EG) mit dem Prinzip der Kaskadennutzung (eigene Darstellung)



2.7 Fazit

Die Wiederentdeckung der Nutzungskaskade in den letzten 10 bis 20 Jahren ist ein Spiegel für den Energie- und Rohstoffhunger der Neuzeit. Die stoffliche und energetische Nutzung von Biomasse bewegt sich in den Spannungsfeldern zwischen Nahrungsmittelsicherheit, Knappheit fossiler Ressourcen und den daraus entstehenden Abhängigkeiten sowie einer Hinwendung zu erneuerbaren Energien. In aktuellen öffentlichen Debatten gilt die Kaskadennutzung von Biomasse als eine Strategie, diese Spannungsfelder aufzulösen oder zumindest zu entschärfen.

Bereits seit den 1990er Jahren wurden Theorie und Konzept der Kaskadennutzung umfangreich in nationaler und internationaler Literatur als eine sequenzielle Nutzung von Biomasse beschrieben. Die Kaskadennutzung von Biomasse folgt dabei dem Prinzip, Biomasse zunächst stofflich zu verwenden, bevor sie energetisch genutzt wird. Einige Konzepte stellen die Kaskadennutzung im Zusammenhang mit umfassenden Rohstoffverwendungs- bzw. -verwertungsstrategien dar. Dies ist grundsätzlich positiv, führt jedoch zu einer unspezifischen Verwendung des Kaskaden-Begriffes. Darüber hinaus wird der Begriff der Kaskadennutzung in unterschiedlichen Disziplinen und Branchen kontextabhängig mit verschiedenen Bedeutungen verwendet. In der Holzwerkstoffindustrie wird die Kaskadennutzung als Mittel zur Erweiterung der Rohstoffbasis angesehen. In der Papier- und Zellstoffindustrie wird der Begriff synonym für den Begriff des Recyclings genutzt. Im Bereich der Tallöl-Chemie wird er dagegen im Sinne einer optimierten Co-Produktnutzung bzw. Reststoffverwertung verstanden.

Einige Quellen beschreiben den Kaskadenbegriff mit normativen Wertevorstellungen und verbinden Definitionen mit politischen Zielen und Ansprüchen. Die Kaskadennutzung soll ökologisch sinnvoll sein, um die Natur zu entlasten, Rohstoffe einzusparen und schädliche Emissionen zu vermindern. Sie soll ökonomisch von Vorteil sein, um sowohl die Rentabilität von Unternehmen als auch die Wertschöpfung der Wirtschaft zu steigern. Sie soll dem Wohl der Gesellschaft dienen, um die Ressourceneffizienz zu steigern und Innovation zu schaffen.

Ob diese Ansprüche in der Realität umgesetzt werden, bleibt bisher im Verborgenen, denn die Datenlage zur Messung des Beitrags von Kaskaden zu den politischen Zielen ist ungenügend. Zum einen gibt es nur wenige Instrumente zur Quantifizierung kaskadenartig genutzter Rohstoffe. Dazu zählen Stoffstromanalysen und die Berechnung von Kaskadenfaktoren, die über die Art und Dauer der Nutzungskaskaden sowie über die Anzahl der wiederholten Nutzungen ein und derselben Biomasse Auskunft geben. Zum anderen liegen nur unzureichende Informationen über mögliche Effekte der Kaskadennutzung von Biomasse zur Verfügung. Diese können u.a. direkte Effekte zur Einsparung von Treibhausgasemissionen oder zur Steigerung der Wertschöpfung sein. Aber auch indirekte Effekte wie die Extensivierung der Landnutzung durch eine Steigerung der Nutzung von Sekundärrohstoffen sind möglich.

In der Praxis sind wenige etablierte Nutzungskaskaden von Biomasse zu finden. Kaskaden, die mengenmäßig bedeutende biogene Stoffströme repräsentieren, gibt es in den Bereichen der Holz- und Papierindustrie. Für beide Branchen wurde in Europa im Jahr 2010 ein Kaskadenfaktor von 1,57 ermittelt, d.h. die genutzten Holzressourcen aus dem Forst wurden etwas mehr als anderthalbmal genutzt (Mantau 2012). Das Handelsvolumen von Altholz, das entweder für energetische oder stoffliche Zwecke eingesetzt werden kann, lag im selben Jahr bei 8,1 Mio. t (Mantau et al. 2012). Der Verbrauch von Altpapier für die Produktion von Papier, Karton und Pappe lag im Vergleich dazu in Deutschland im Jahr 2014 bei 16,2 Mio. t (VDP 2015).

Daneben existieren bereits heute Nutzungskaskaden in anderen Branchen, u.a. der Textil-, der Kunststoff- und der Korkindustrie. Zahlreiche Kunststoffe können aus Biomasse hergestellt und auch recycelt werden. Dazu zählen unter anderem bio-PE, bio-PET und PLA. Heutzutage werden allerdings nur die beiden bio-basierten Kunststoffe bio-PE und bio-PET in großem Maßstab recycelt, da sie mit identischen chemischen Eigenschaften wie ihre konventionellen Gegenstücke PE und PET im Abfallmanagement behandelt werden.

Anhand der Ergebnisse aus Literaturanalyse, Expertenkonsultationen und zwei durchgeführten Workshops wird deutlich, dass ein einheitliches Verständnis für den Begriff der Kaskadennutzung weder in der Forschung noch in der Wirtschaft oder der Politik existiert und eine praktische Umsetzung des Kaskadenprinzips viele Fragen aufwirft. Dies wird auch in zahlreichen Politikpapieren bemängelt. Zudem ist die Integration der Kaskadennutzung in die gesetzliche Rahmgebung verschiedener Staaten unterschiedlich wie auch die daraus resultierenden Effekte.

Daher wurde im Rahmen dieses Projektes eine neue, deskriptive Definition der Kaskadennutzung von Biomasse entwickelt mit dem Anspruch, begriffliche Klarheit zu schaffen und zu einem besseren Verständnis für Kaskadennutzung und verwandte Konzepte beizutragen. Zudem sollen aus der Definition auch praktische Handlungsempfehlungen und politische Strategien abgeleitet werden, welche die Kaskadennutzung im weiteren Projektverlauf in ein Gesamtkonzept der Biomassennutzung einbindet.

Entsprechend der Projektdefinition liegt eine Kaskadennutzung von Biomasse vor, wenn ein biogener Rohstoff zu einem biobasierten Endprodukt verarbeitet wird und dieses Endprodukt mindestens ein weiteres Mal stofflich oder energetisch genutzt wird. Man spricht von einer einstufigen Kaskadennutzung von Biomasse, wenn ein biogener Rohstoff zu einem biobasierten Endprodukt verarbeitet wird und dieses Endprodukt mindestens ein weiteres Mal energetisch genutzt wird. Man spricht von einer mehrstufigen Kaskadennutzung von Biomasse, wenn ein biogener Rohstoff zu einem bio-basierten Endprodukt verarbeitet wird und dieses Endprodukt mindestens ein weiteres Mal stofflich genutzt wird. Erst nach der stofflichen Mehrfachnutzung kann eine energetische Nutzung folgen.

3 Analyse der Rohstoffbereitstellung

3.1 Aufgabenstellung und Ziel

Vor dem Hintergrund bestehender und künftig zunehmender Konkurrenz um nachwachsende Rohstoffe untersucht das zweite Arbeitspaket die Frage nach der Biomasseverfügbarkeit und die Rahmenbedingungen zur Bereitstellung definierter Rohstoffqualitäten für ausgewählte Biomassekaskaden. Hierzu spiegelt dieses Kapitel den Rohstoffbedarf für definierte Kaskadenkonzepte (vgl. Kapitel 2.2) auf Basis bestehender Studien sowie geschätzter Marktentwicklungen wider und bindet diesen in eine Gesamtschau derzeit diskutierter Biomasse-Nutzungspfade ein. Ferner definiert dieser Abschnitt – gemeinsam mit Wissenschaft und Industrie – Anforderungen hinsichtlich der prozessspezifisch darzustellenden Rohstoffquantität (umsetzbare Mengen) und -qualität (Eigenschaften, Bereitstellungsform) sowie die erforderliche Logistik für die Bereitstellung und den Einsatz der Rohstoffe.

3.2 Vorgehensweise

Die durchzuführenden Untersuchungen werden thematisch grob nach stofflichen, technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftspolitischen Betrachtungsebenen differenziert. Für die ersten beiden Ebenen werden vertiefte Analysen durchgeführt. Zusätzlich werden wirtschaftliche und gesellschaftspolitische Ansatzpunkte aus Stoffstromsicht identifiziert und für eine vertiefte Analyse im Arbeitspaket 3 (siehe Kapitel 4) aufbereitet.

Für die Analyse der Rohstoff-Verfügbarkeiten im Agrarsektor gilt es zwischen zwei grundsätzlich unterschiedlichen Ansätzen zu differenzieren:

- ▶ Ansatz 1: kein weiterer Ausbau des Anbaus von nachwachsenden Rohstoffen für den Non-Food-Bereich (Deckelung des Flächenansatzes auf den im Jahr 2013 beanspruchten Wert); dies hat ggf. einen Eingriff in den Biomassenutzungsbestand – verbunden mit einer potenziellen Stoffumlenkung von energetischen zu stofflichen Nutzungsoptionen - zur Folge (vgl. Hierarchie der Biomassenutzung); potenziell frei fallende Flächen (Ertragssteigerungen, Bevölkerungsentwicklung etc.) werden der (globalen) Nahrungsmittelversorgung zugeschlagen.
- ▶ Ansatz 2: weiterer Ausbau des Anbaus von nachwachsenden Rohstoffen für den Non-Food-Bereich im Rahmen identifizierter Flächenpotenziale (Analyse der Varianzen einschlägiger Studien)

Die im Zusammenhang mit Nutzungsverlagerungen bzw. Ausbauszenarien potenziell zu berücksichtigenden Effekte (z.B. Auswirkungen der Qualitätsansprüche im Bereich der stofflichen Nutzung auf den NawaRo-Anbau im Vergleich zu Energiepflanzen bzw. zu Marktfrüchten) werden beschrieben.

Im Rahmen der Untersuchungen zur technischen Dimension ist es erforderlich, quantitative bzw. qualitative Veränderungen der Biomasse-Stoffströme zu beschreiben und die daraus resultierenden Möglichkeiten und Anforderungen an einen weiteren stofflichen Nutzungsschritt zu identifizieren. Diesbezüglich gilt es zu berücksichtigen, dass Biomassen nach einer einmaligen stofflichen Nutzung vielfach als Abfälle (u.a. als Verbundmaterial) im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG 2012) anfallen, so dass vor diesem Hintergrund sowohl die einschlägigen rechtlichen Rahmenbedingungen, als auch die potenziell erforderlichen Erfassungs- und Sortiersysteme im Hinblick auf die Ermöglichung weiterer Nutzungsschritte untersucht werden müssen.

Die im Rahmen der Untersuchungen festgestellten, potenziell möglichen Stoffströme werden nach Biomassearten und Herkunftsbereichen sowie möglichen Produktlinien geclustert.

3.3 Untersuchte Biomassekaskaden

Vor dem Hintergrund der Vielzahl möglicher Kaskadennutzungen wurde auf Basis einer ersten Marktbetrachtung im Rahmen der Bearbeitung des AP 1 (siehe Kapitel 2) eine Auswahl an Kaskaden getrof-

fen. Bei dieser Selektion stand vor allem der Bezug zur Praxis im Vordergrund. Eine Prämisse war dabei, dass die ausgewählten Kaskadennutzungen in der Praxis bereits getestet wurden bzw. am Markt etabliert sind. Einige wenige Sonderfälle wurden ebenfalls aufgenommen.

Die ausgewählten Kaskaden unterscheiden sich hinsichtlich der resultierenden Produkte und den eingesetzten Biomassen und versuchen dadurch ein breites Marktspektrum im Hinblick auf die potenziellen Biomasse-Nutzungsoptionen abzudecken. Danach werden die Holz-, die Papier-, die Faser-, die Polymer- und die Chemiekaskade im Rahmen der Untersuchungen dargestellt. In allen Bereichen sind sowohl ein- als auch mehrstufige Kaskaden vorhanden. Im Folgenden wird dabei ein besonderes Augenmerk auf die mehrstufigen Kaskadennutzungen gelegt.

In Anhang A, Tabelle A-1 sind die ausgewählten Kaskaden, die Zielprodukte sowie die benötigten Biomasse-Rohstoffe und betroffenen Märkte aufgelistet.

3.3.1 Relevante Märkte

In der Industrie werden Öle und Fette zu Tensiden, Bioschmierstoffen, Polymeren und Lacken, bzw. Farben verarbeitet. Aus Stärke und Zucker werden Kunststoffe und Grundchemikalien produziert und Zellstoff wird für zellulose-basierte Chemiefasern verwendet. Einen Überblick über die Vielzahl der Verwendungsmöglichkeiten stofflich genutzter Biomassen liefert AP 1. Jedoch ist die Industrie in allen Fällen auf kohlenstoffhaltige Rohstoffe angewiesen, deren Quelle gemäß dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) in einem zunehmenden Maße erneuerbare Kohlenstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sein sollen (Die Bundesregierung, 2012). Auch das aktuelle Deutsche Ressourceneffizienzprogramm II betont hier nochmals die Rolle der Biomasse als regenerative Kohlenstoffquelle (BMUB 2016).

Die untersuchten Kaskadenprozesse beziehen ihre Biomassen aus unterschiedlichen Quellen, die sich im Wesentlichen im Bereich der Forst- und Landwirtschaft (Acker- und Grünland) sowie im Rahmen sekundärer Nutzungsschritte im Entsorgungssektor finden lassen. Eine Steigerung der Urproduktion bzw. die Erschließung zusätzlicher Flächen durch Ausbau bzw. Umnutzung führt damit letztlich auch zu einer Bereicherung der Kaskadenmärkte, wobei jedoch die Auswirkungen auf die einzelnen Nachhaltigkeitskriterien (siehe hierzu AP 4 und 5) zu berücksichtigen sind. Im Sinne eines Ausbaus und einer Etablierung der Kaskadennutzung wird im vorliegenden Text insbesondere die Nutzung von Rest- und Abfallströmen in den Blick genommen. Dabei haben sich im Laufe der Analyse folgende betroffene Märkte herauskristallisiert:

- ▶ Produkte aus Forst- und Holzwirtschaft mit:
 - Altholz-Markt
 - (Alt)Papier-Markt
- ▶ Produkte aus Landwirtschaft mit:
 - Naturfaser- bzw.(Alt)Textil-Markt,
 - Zucker-Markt
 - Stärke-Markt.
- ▶ Die Bewirtschaftung von Bioabfall

3.3.2 Aktuelle Entwicklungen an den relevanten Märkte

Waldholz

Aktuell ist auf den Diskurs bezüglich der Steigerung der Holzerträge zu verweisen, welcher u.a. durch den Bioökonomierat in seinem Papier „Holz in der Bioökonomie – Chancen und Grenzen“ (Bioökonomierat, April 2016) initiiert wurde. Die dort dokumentierten Vorschläge wie z.B. die Waldverjüngung, höhere Nadelholzanteile und chemische Pflanzenschutzmaßnahmen werden von Umweltverbänden stark kritisiert und als nicht vereinbar mit den Zielen der nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt gesehen (NABU 2016).

Signifikante und derzeit noch ungenutzte Waldrestholzpotenziale in einer Größenordnung von ca. 11,7 Mio. t TS werden in einer durch den FNR e.V. geförderten Studie „Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen“ (DBFZ, 2015) dokumentiert. Auch hier erscheinen jedoch ergänzende Diskussionen unter Berücksichtigung von Derbholzgrenzen im Kontext jeweiliger Standortverhältnisse erforderlich. In der gleichen Quelle werden zudem verfügbare Landschaftspflegehölzer in einer Größenordnung von 1,2 Mio. t TS als derzeit noch ungenutztes Potenzial ausgewiesen. Die Versorgungslage mit Waldhackschnitzel wird von der Branche im Sommer 2016 als gut beschrieben. Teilweise wird für energetische Zwecke höherwertiges Industrieholz angeboten, welches wegen Werksschließungen nicht von der Spanplattenindustrie abgenommen wird. Die Effekte von z.B. FSC-Zertifizierungen im kommenden Winter müssen noch abgewartet werden (euwid 33 2016)

Altholz

Aktuell klagt die Branche – trotz der Tatsache, dass in den letzten Jahren vermehrt Altholz z.B. in der Spanplatte eingesetzt wurde (Schrägle, 2015) – über ein Überangebot an Altholz auf dem Markt und dementsprechend eher über Entsorgungsengpässe, als über Mangelsituationen. Ursachen für das Überangebot waren u.a. der Bauboom, aus strategischen Gründen weiterhin hoch gehaltene Importmengen, Abfälle aus Überschwemmungen, getrennte Stoffströme aus der Sperrmüllsammmlung sowie Anlagenstillstände (milde Winter) (euwid 30, 2016). Das Marktvolumen ist dabei auf ca. 10 Mio. t angestiegen (Groll, U., 2016). Entsprechend sinken die Preise. Weitere Reduktionen werden durch die Branche erwartet, eine Beibehaltung der energetischen Verwertung wird als notwendig erachtet. Für Altholz(heiz)kraftwerke besteht derzeit keine Aussicht auf Folgefinanzierung durch das EEG, zumal Altholz seinen Status als Biomasse im Sinne der Biomasseverordnung verloren hat. Hinsichtlich der hochwertigen energetischen Nutzung am Ende eines Kaskadenprozesses erwächst dadurch ein Handlungsbedarf, zumal bei einer Intensivierung der Kaskaden-Nutzung (auch bezogen auf den Primärrohstoff Holz) das Mengenaufkommen – und ggf. die Schadstoffbelastung – potenziell ansteigen.

(Alt)Papier

Der Papiermarkt verhält sich im Vergleich zum Zeitpunkt der Datenerhebung mit Produktionsmengen von ca. 22,6 Mio. t, einem Marktvolumen von ca. 41,9 Mio. t und Altpapiereinsatzquoten von ca. 74 % relativ konstant (vdp Papierkompass, 2016). Im Altpapiersektor ist dabei nach wie vor ein Importüberschuss bei zunehmenden Importmengen zu konstatieren (euwid 35, 2016). Gleichzeitig hat der Altpapiereinsatz als Faserquelle weiter zugenommen.

Landwirtschaft

Die im Agrarsektor genutzten Flächen zum Anbau nachwachsender Rohstoffe blieben mit 2,47 Mio. ha im Vergleich zum Zeitpunkt der Datenerhebung sowohl für stoffliche, als auch für energetische Nutzungsoptionen annähernd konstant. Hinsichtlich der durch die Novellierung des EEG mittel- bis langfristig möglichen Entwicklungen wird auf den Abschnitt 6.3 verwiesen. Die Selbstversorgungsgrade

sind nach BLE konstant geblieben, bzw. sogar leicht gestiegen. Durch die möglichen Effekte der aktuellen Milchpreisdiskussion können Auswirkungen auf die Verfügbarkeit und Nutzung von Grünlandflächen unterstellt werden.

Naturfasern – Textilien

Im Gegensatz zur globalen Entwicklung (Steigerung auf 66,8 Mio. t bzw. 74 % des globalen Fasermarktes) ist die Produktion von Chemiefasern in Deutschland rückläufig. Die Einsatzbereiche verschoben sich dabei stark in technische und medizinische Anwendungen (Dispan, 2015). Im Bereich der Bekleidungstextilien berichtet die Branche von schwierigen Absatzmärkten für Second-Hand-Ware in Afrika (Liquiditätsprobleme). Die Ostafrikanische Gemeinschaft diskutiert zudem über ein Importverbot für Second-Hand-Bekleidung ab 2018, was den Markt zusätzlich unter Druck setzen würde. Die Erfassungsmengen an Alttextilien haben sich nach einem kurzen Rückgang (wahrscheinlich bedingt durch die Flüchtlingsversorgung) wieder normalisiert. Der Absatz von Recyclingsorten z.B. in der Industrie (Reifenproduktion) steht unter einem starken Preisdruck (euwid 32, 2016).

Zucker

Die Produktionsmengen von Zucker haben sich in Deutschland nach einem Rückgang im Zeitraum 2013/14 wiederum erhöht und liegen im Zeitraum 2014/15 bei knapp 4,5 Mio. t. Da die Inlandsabsätze und die Ausfuhren nur leicht zugenommen haben, ist bei den Lagerbeständen ein Zuwachs auf nunmehr ca. 4,1 Mio. t zu verzeichnen, was dem Gesamtabsatz (Inland und Ausfuhr) des Zeitraumes 2014/15 gleichkommt. Für 2015/16 werden reduzierte Zuckerrübenanbauflächen und entsprechend rückläufige Produktionsmengen angezeigt (WVZ, 2016).

Stärke

Bezogen auf den Zeitraum zwischen 2010 und 2014 war der Stärkemarkt trotz leichter Schwankungen relativ konstant. Im Jahr 2014 wurde dabei mit 1,66 Mio. t die höchste Produktionsmenge erzielt (WVZ e.V., 2016). Nach Einschätzung des DMK e.V. ist die Branche zuversichtlich, durch verbesserte Pflanzzüchtungen und Anbautechniken zukünftig verstärkt auch heimischen Mais in der Produktion einsetzen zu können.

Bioabfall

Die Bioabfallmengen haben sich bis 2013 nur leicht auf ca. 14,7 Mio. t erhöht (Biogut ca. 4,0 Mio. t, Grüngut ca. 4,1 Mio. t). Hinsichtlich der Erzeugung biobasierter Produkte aus Bioabfällen ist u.a. auf die Forschungsergebnisse von Kannengießler zu verweisen. Hier liegen Erkenntnisse aus der Extraktion von Carbonsäuren aus Bioabfällen unter Nutzung einer Fest-Flüssig-Trennung im Bereich eines Kompostwerkes vor (Kannengießler, 2015).

Biobasierte Kunststoffe

Nach Benzing (VCI) liegt der NawaRo-Anteil beim Rohstoffeinsatz in der chemischen Industrie nach wie vor bei ca. 13 %. Die Dynamik ist noch verhalten. Hemmend wirken derzeit insbesondere die niedrigen Preise für Mineralöl.

3.4 Biomassepotenzial

Im Zuge der (teilweise weltweiten) Diskussion um Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen wurden in den letzten Jahren für Deutschland verstärkt Studien erstellt, um das „freie“ Flächen- und Biomassepotenzial für den Non-Food-Bereich im Agrarsektor bis 2030 bzw. 2050 zu ermitteln. Das Spektrum der Ergebnisse ist dabei sehr breit und spiegelt u.a. die unterschiedlichen Annahmen sowie die Einschätzung der Entwicklung relevanter Stellgrößen wider.

Je nach den zugrunde gelegten Prämissen sowie den jeweiligen Szenarien-Ansätzen streut die Spanne hinsichtlich der „frei“ nutzbaren Agrarflächen in Deutschland dabei naturgemäß sehr stark und liegt gemäß den unterschiedlichen Einschätzungen zwischen 2,4 und 7 Mio. ha. Der „Mainstream“ unterschiedlicher Einschätzung hat sich in den letzten Jahren in einer Größenordnung von ca. 4 Mio. ha eingependelt.

Die derzeit genutzten Flächen zur NawaRo-Produktion im Agrarbereich stagnieren seit einigen Jahren. Dies liegt insbesondere in den Novellierungsschritten des EEG sowie der Stagnation der stofflich genutzten NawaRo begründet. Der Flächenansatz von 4 Mio. ha zur Produktion von Energiepflanzen wird zwar nach wie vor in verschiedenen Potenzialdarstellungen genannt (u.a. (FNR, 2016)), eine Ausweitung der Flächennutzung auf diese Größe ist derzeit jedoch unwahrscheinlich. Derzeit laufen einige Forschungsvorhaben zum Thema Biomassepotenziale wie z.B. das Projekt „Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem“ (FKZ 3716 43 102 0) oder „Optionen für Biogas-Bestandsanlagen bis 2030 aus ökonomischer und energiewirtschaftlicher Sicht“ (FKZ 37EV 16 111 0). Eine gute Zusammenstellung bestehender Studien hat IZES (IZES, 2015) geliefert. Hier wurden über 15 Biomassepotenzialstudien vergleichend zusammengestellt.

3.4.1 Primäre Biomassebereitstellung in Deutschland

Neben den Flächenpotenzialen im Agrarsektor spielt die Art der Nutzung dieser Flächen eine entscheidende Rolle. Dabei sind neben den Zielen der Bundesregierung zur Hierarchie der Biomassenutzung weitere Rahmenbedingungen, die einen Einfluss auf die Agrarflächennutzung haben, zu berücksichtigen. Diese sind:

- ▶ 2 % der deutschen Fläche werden bis 2020 entsprechend der „Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt“ der Natur überlassen (Bundeskabinett, 2007)
- ▶ 20 % der Ackerfläche soll in den nächsten Jahren ökologisch bewirtschaftet werden⁴ (Die Bundesregierung, 2002)
- ▶ Futtermittelimporte (der Energiebedarf der Nutztiere wird nur zu rund 90 % aus inländischer Futtermittelerzeugung gedeckt) (Deutscher Bundestag, 2012), eine 100 % Deckung wird angestrebt.
- ▶ Die tägliche Flächeninanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrsflächen lag 2011 bei 74 ha, bis zum Jahr 2020 soll dieser Wert auf 30 ha pro Tag gesenkt werden (BMEL, 2012)

Im Folgenden werden zwei Szenarien genauer betrachtet. Vor dem Hintergrund der aktuellen Flächennutzung werden unter den Optionen „gleichbleibender Flächenbedarf für Nahrungsmittel“ (= kein weiterer Flächen-Ausbau im Bereich stofflich/energetisch genutzter nachwachsender Rohstoffe) und „sinkender Flächenbedarf für Nahrungsmittel“ (= Flächen-Ausbau im Bereich stofflich/energetisch genutzter nachwachsender Rohstoffe) die möglichen Biomassenutzungspfade dargestellt.

⁴ Anstieg des deutschen Ökolandbaus von 1,9 % in 1994 auf 5,9% der Flächen in 2010 (Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, 2013)

Landwirtschaftliche Flächennutzung bei gleichbleibendem Flächenbedarf für den Nahrungs- und Futtermittelanbau

Ausgehend von der Situation im Jahr 2013 wird die Zuordnung der Ackerflächen zu den beiden Sektoren Nahrungs-/Futtermittelanbau und Anbau von nachwachsenden Rohstoffen für stoffliche/energetische Nutzungen konstant gehalten. Ein Ausbau stofflicher Nutzungen steht dadurch in direkter Konkurrenz zu energetischen Nutzungspfaden.

Als Basiswert wurden diesbezüglich nach Angaben der FNR (2013c) in 2013 in Deutschland auf 2,39 Mio. ha Ackerland nachwachsende Rohstoffe angebaut. Davon waren 2,11 Mio. ha Energie- und 0,28 Mio. ha Industriepflanzen.

Unter Berücksichtigung der mittlerweile dominierenden Flächeninanspruchnahme durch den Anbau von Pflanzen für die Biogaserzeugung werden sich nach der Novellierung des EEGs in 2014 im Bereich der Biogasnutzung deutliche Veränderungen einstellen. Neue Anlagen werden sich unter Berücksichtigung aktueller Einschätzungen der Branche auf den Bereich "Reststoffnutzung" konzentrieren. Ein signifikanter Zubau im Bereich landwirtschaftlicher Biogasanlagen auf der Basis von Energiepflanzen wird nicht mehr erwartet. Bestehende Anlagen werden mittelfristig – nach Ablauf des EEG-Vergütungszeitraumes (20 Jahre) – wahrscheinlich aus der Produktion gehen. Der nachfolgenden Modellierung werden daher folgende Prämissen zugrunde gelegt:

- ▶ Es erfolgt kein weiterer Zubau von Biogasanlagen (BGA) auf der Basis von Energiepflanzen
- ▶ Es besteht ein Bestandsschutz, d.h. vorhandene BGA gehen erst nach Ablauf des EEG-Vergütungszeitraumes vom Netz
- ▶ Die wirtschaftlichen Entwicklungen im Wärmemarkt sowie im Bereich der Biotreibstoffe sind kein Treiber für den weiteren Ausbau von Biomethan; der Ausbau des flüssigen Biokraftstoffmarktes erfolgt ausschließlich über Reststoffe
- ▶ Die durch Bioenergie erbringbaren Systemdienstleistungen im Stromsystem (z.B. Regelenergie) führen nicht zu Erlössituationen die einen Weiterbetrieb/Ausbau der BGA ermöglichen.

Im Ergebnis werden die Flächen, die derzeit Biomasse für die Biogaserzeugung produzieren⁵, auf mittelfristige Sicht⁶ wieder verfügbar sein. Diese Flächen können z.T. für die Produktion von Biomasse zur stofflichen Verwertung genutzt werden.

Abbildung 9 gibt einen Überblick zur derzeitigen Ackerflächennutzung sowie die – aus den obigen Ansätzen resultierende - potenzielle Entwicklung bis 2050 im Sinne einer exemplarischen Darstellung. Vor dem Hintergrund, dass nicht alle - bisher für die Biogasproduktion - genutzten Flächen für die ackerbauliche Produktion von stofflicher Biomasse geeignet sind⁷, wurden Flächen mit Holzpflanzen für Chemie (Kurzumtriebsplantagen [KUP]) berücksichtigt.

Danach stellt sich für 2050 folgendes Bild dar:

- ▶ die Flächen des Nahrungs-/Futtermittelanbaus bleiben konstant bei etwa 9,5 Mio. ha
- ▶ der Flächenanteil für die stoffliche Nutzung steigt von derzeit 0,28 Mio. ha auf 1,6 Mio. ha; ab 2020 sind dabei signifikante Flächenzugewinne zu erwarten;

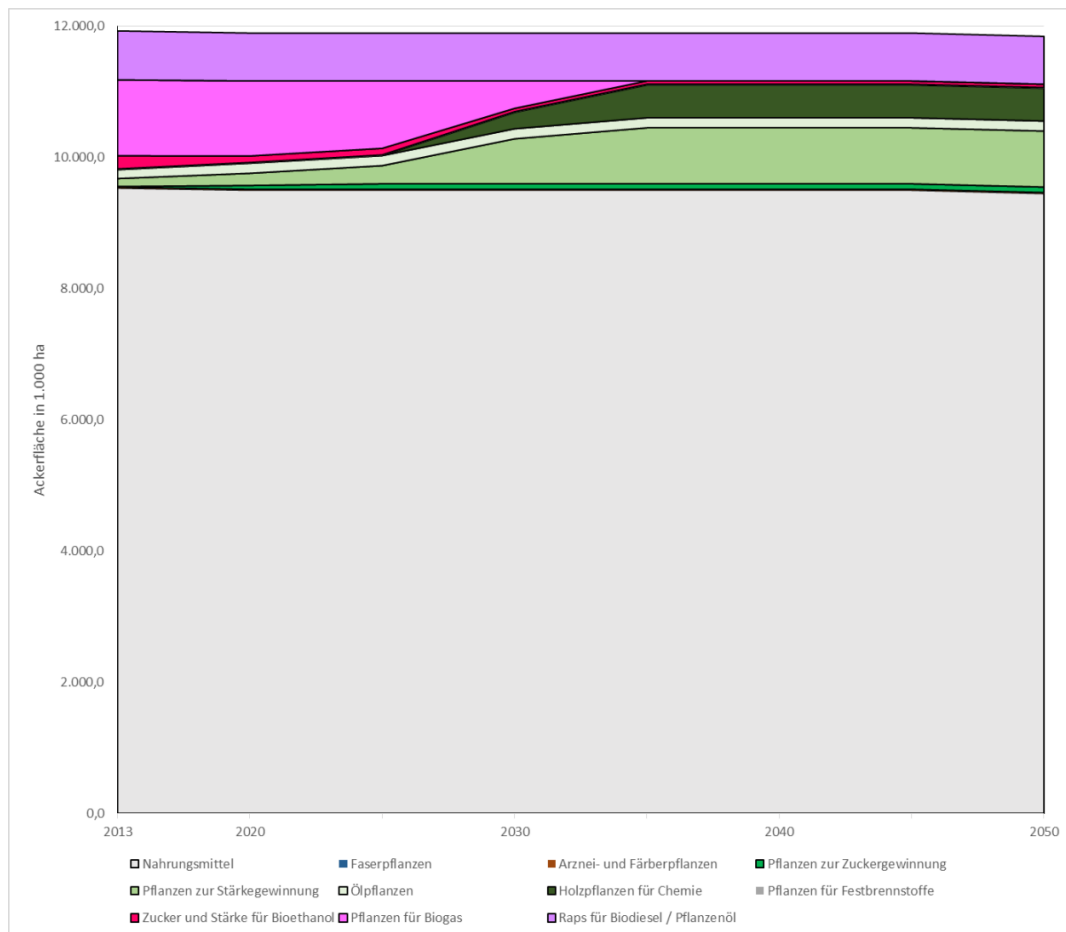
⁵ 1,157 Mio. ha in 2013

⁶ in 10-15 Jahren, spätestens 2032

⁷ Der für die Biogasanlage angebaute Mais erreicht derzeit nicht die Qualität zur Stärkeerzeugung und kann daher nicht als Stärke-Lieferant verwendet werden (vgl. Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

- ▶ Flächenpotenziale für die stoffliche Nutzung ergeben sich insbesondere in den Bereichen 'Pflanzen für die Stärke- und Zuckergewinnung' und 'Anbau von Holzpflanzen für die Chemie (KUP)'
- ▶ die Flächen der energetischen Biomasseproduktion sinken von 2,1 Mio. ha auf 0,79 Mio. ha; insbesondere die Biomasseproduktion für Biogas wird deutlich reduziert und sinkt bis 2032 auf Null.

Abbildung 9: Ackerlandnutzung in Deutschland bis 2050 bei gleichbleibendem Flächenbedarf für den Nahrungs-/Futtermittelanbau (grau: Nahrungs-/Futtermittel, grün: stoffliche Nutzung, rot: energetische Nutzung)



Landwirtschaftliche Flächennutzung bei sinkendem Flächenbedarf für Nahrungsmittel

Dieser Ansatz basiert gleichfalls auf den zuvor beschriebenen Annahmen, jedoch wird in diesem Fall ein sinkender Flächenbedarf für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion unterstellt. Durch Ertragssteigerungen, Effizienzmaßnahmen⁸ und die Effekte des demografischen Wandels⁹ werden u.a. nach Ansicht des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft bisher genutzte (landwirtschaftliche) Flächen „frei“. Diese Fläche stehen grundsätzlich für eine anderweitige Nutzung zur Verfügung (BMEL, 2012).

⁸ Steigerung der Ernteerträge pro Flächeneinheit, effiziente Nutzung der Biomasse; die möglichen Ertragssteigerungen sind je nach Frucht unterschiedlich zu bewerten, im Rahmen einschlägiger Untersuchungen wird im Mittel von einer Bandbreite von 0,8 – 1,5 % pro Jahr ausgegangen

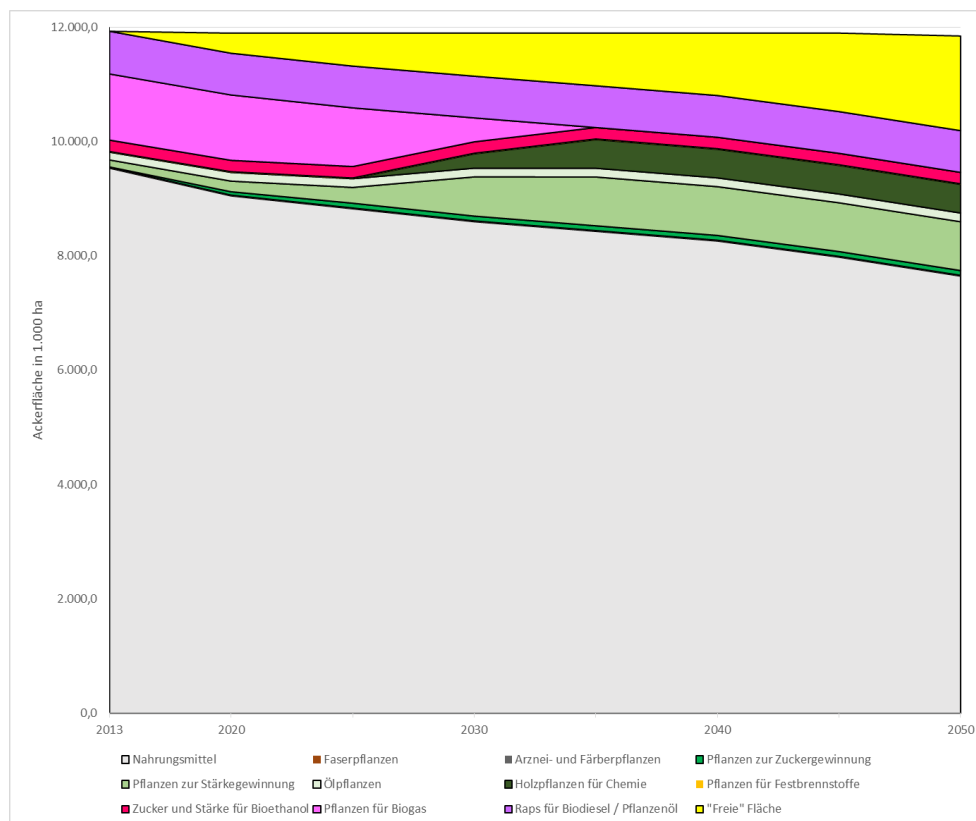
⁹ Reduktion der Bevölkerung und damit einhergehend sinkender Bedarf an Lebensmitteln, Futtermitteln

Wie in Abbildung 10 zu sehen, stellt sich die Situation in 2050 danach folgendermaßen dar:

- ▶ die Flächen des Nahrungs-/Futtermittelbaus sinken auf 7,6 Mio. ha
- ▶ der Flächenanteil für die stoffliche Nutzung steigt von 0,28 Mio. ha auf 1,6 Mio. ha
- ▶ die Flächen der energetischen Biomasseproduktion sinken von 2,1 Mio. ha auf 0,79 Mio. ha
- ▶ insgesamt werden 1,8 Mio. ha "frei"

Die freiwerdenden Flächen können vorrangig der stofflichen Produktion (insbesondere für Stärke und Zucker) zur Verfügung gestellt werden. Dabei zu beachten, dass nicht alle Standorte die erforderliche Bodenqualität und -güte haben oder dass die klimatischen Bedingungen für eine Produktion von Stärke und Zucker geeignet sind. Ungeeignete Standorte könnten daher weiterhin zur Produktion von energetischer Biomasse verwendet werden. Zur Abschätzung der Anteile für die stoffliche und energetische Verwendung bedarf es daher einer exakten Regionalanalyse der landwirtschaftlichen Anbaubedingungen. Dies ist im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchung nicht möglich.

Abbildung 10: Ackerlandnutzung in Deutschland bis 2050 bei sinkendem Flächenbedarf für den Nahrungsmittelanbau (grau: Nahrungs-/Futtermittel, grün: stoffliche Nutzung, rot: energetische Nutzung, gelb: freiwerdende Fläche)



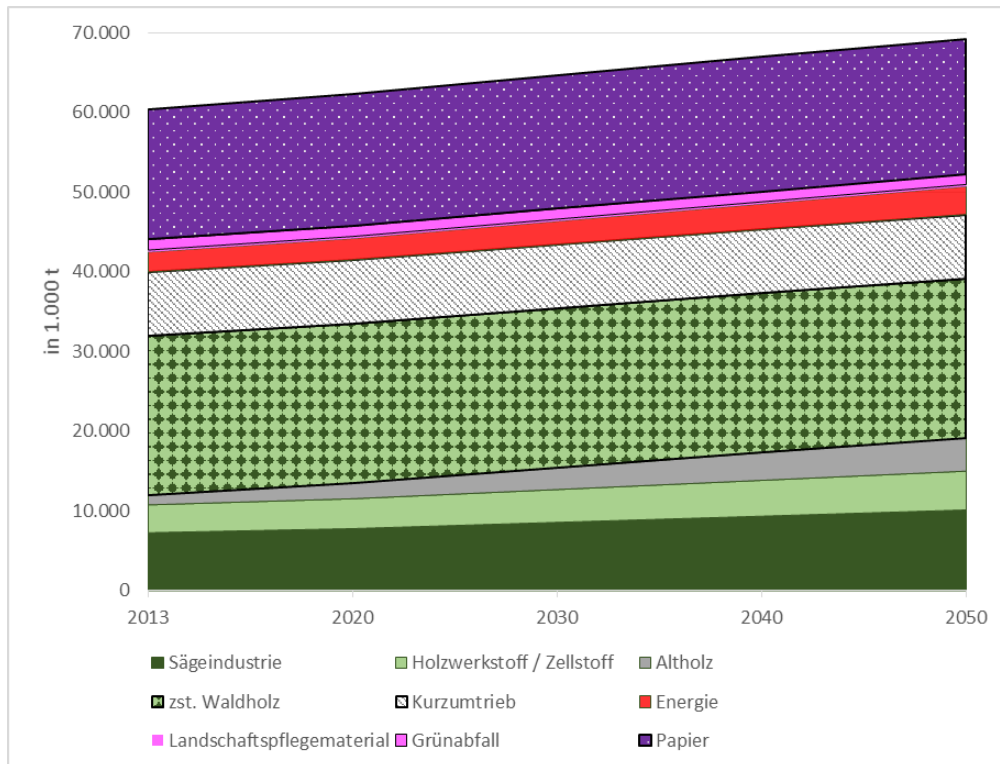
Holzbereitstellung

Die zu Grunde gelegten Stoffströme forstlicher Biomasse unterliegen danach bis 2050 voraussichtlich folgenden Entwicklungen (vgl. Abbildung 11):

- ▶ die Waldholznutzung steigt von 53 Mio. m³ (entspricht 28 Mio. t) auf 78 Mio. m³ (entspricht 39 Mio. t)
- ▶ die stoffliche Altholznutzung steigt von 1,2 Mio. t auf 4,2 Mio. t
- ▶ die Potenziale aus dem Privatwald, der Landschaftspflege und des Grünschnitts in Höhe von 25,6 Mio. t werden erschlossen

- ▶ die Altpapiernutzung steigt geringfügig von 16,4 Mio. t auf 17 Mio. t

Abbildung 11: Holzbereitstellung und -Nutzung in Deutschland bis 2050 (grün: Waldholz stoffliche Nutzung, rot: energetische Nutzung, lila: Holzprodukt Papier) (BMELV, 2013) (VDP, 2014b) (BMELV, 2011b) (BMELV, 2011a) (Mantau, Weimar, & Kloock, 2012)



Der Anteil der energetischen Holznutzung erscheint in Abbildung 11 vergleichsweise gering. Wissenschaftliche Erhebungen gehen bereits von einer Waldholznutzung für energetische Zwecke von 50 % aus. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die oben dargestellten Zahlen lediglich die direkt aus dem Wald verkauften Energieholzmengen erfasst. Nebenprodukte der Holzverarbeitenden Industrie (Sägewerke, Holzwerkstoffe), die nach dem ersten Verarbeitungsschritt energetisch genutzt werden, sind hier nicht dargestellt.

Insgesamt können in Deutschland bis 2050 etwa 52 Mio. t Holz bzw. 70 Mio. t Holzprodukte für den Markt erschlossen werden. Der Anteil der (potenziellen) Kaskaden lässt sich dabei auf max. 4,2 Mio. t Altholz und 17 Mio. t Altpapier beziffern.

Sonderfall: KUP

Ein Sonderfall stellt der Anbau von Kurzumtriebsplantagen dar. Diese liefern Holz von landwirtschaftlichen Anbauflächen zur Nutzung auf verschiedenen Märkten (u.a. Holzmarkt, Treibstoff, chemische Industrie etc.). Im obigen landwirtschaftlichen Szenario werden 500.000 ha für den Anbau von KUP angenommen. Bei durchschnittlichen Ernteerträgen von etwa 10 t/ha*a ergibt sich ein Erntevolumen von 5 Mio. t. Im obigen Modell wird von 8 Mio. t Material ausgegangen. Die Differenz ergibt sich aus KUP-Anbauten, die nicht auf Ackerland erfolgen (z.B. Uferstreifen, Deponien).

Da sich jedoch bisher die Kurzumtriebsplantagen nicht durchsetzen konnten, ist diese Entwicklung fraglich. Andere Pflanzen haben höhere Deckungsbeiträge. Diese Situation würde sich nur ändern, wenn auf absehbare Zeit die Holzpreise steigen.

Transfer von Biomasse von der energetischen zur stofflichen Nutzung

Die in diesem Abschnitt nur grob skizzierten Ansätze sind zwischenzeitlich Gegenstand weitergehender Untersuchungen in Forschungsarbeiten (z.B. IZES 2016, DBFZ 2016). Bedingt durch die im EEG 2017 verankerten Rahmenbedingungen wird ein Anpassungsprozess stattfinden, der im Biogassektor dazu führen wird, dass nur effiziente und systemdienliche Anlagenkonzepte längerfristig ‚überleben‘ werden. Das zukünftig stark durch fluktuierende erneuerbare Energien geprägte Stromsystem benötigt dabei im Hinblick auf die erforderliche Netzstabilität netztechnische Anlagen zur Erbringung von sogenannten Systemdienstleistungen (z.B. Regelenergie). Diese können grundsätzlich in einer regenerativen Form durch Biogasanlagen erbracht werden. Insofern sind Strategien und Anpassungsprozesse erforderlich, die einen langfristigen Übergang zu anderen Technologien zur Erbringung von Systemdienstleistungen ermöglichen. Dies wird nach derzeitiger Einschätzung mittel- bis langfristig (ab 2023) Flächen ‚frei‘ setzen, welche dann grundsätzlich für stoffliche Nutzungen zur Verfügung stehen. Es besteht somit die Möglichkeit, einen schlüssigen Übergang von der energetischen in die stoffliche (Kaskaden-) ‚Welt‘ zu gestalten, bei dem sowohl die Ansprüche des Energiesystems als auch die Entwicklungen im Bereich der stofflichen Nutzung Berücksichtigung finden können.

3.4.2 Biomassebereitstellung durch Kaskadennutzung

Biomasse ist ein begrenztes Gut und schon jetzt in vielfältigen Nutzungsketten gebunden. Zudem können nur bedingt weitere Potenziale erschlossen werden. Vor diesem Hintergrund gilt es, Biomasse effizient zu nutzen, wie es beispielsweise über Kaskaden-Prozesse ermöglicht wird. Durch die Nutzung von Biomasse in Kaskaden kann die Menge der nutzbaren Biomasse im System erhöht bzw. der Zufluss von „frischer“ Biomasse ins System reduziert werden. Jedoch ist nicht jede Biomasse für alle Verwendungsbereiche einsetzbar. So sind hinsichtlich der Qualität und auch der Massenströme Grenzen in der (Wieder)Verwendung gesetzt.

In diesem Zusammenhang werden nachfolgend die mehrstufigen Kaskadensysteme in Bezug auf Rohstoffbedarf bzw. Größe der Produktionseinheiten und den möglichen Einsatz von Kaskadenprodukten (Reststoffen) grob bewertet. Tabelle 1 gibt einen Überblick bezüglich der jeweiligen Einschätzungen zu den im Einzelnen bewerteten Kaskadennutzungen.

Wie die dargestellte Auflistung zeigt, können die etablierten Produktionsketten Reststoffströme anteilig, aber auch vollständig aufnehmen. Somit sind Kaskadennutzungskonzepte nur bedingt von (großen) Mengenströmen abhängig. Bereits kleine Stoffstrommengen können in die Produktionsprozesse eingespeist werden. Jedoch werden an die Qualität bzw. Reinheit der Rohstoffe z.T. hohe Anforderungen gestellt. Diese Anforderungen können durch den Produktionsprozess vorgegeben, oder auch durch rechtliche Rahmenbedingungen begründet sein. So dürfen in den Produktionsprozess von Biokunststoffen lediglich reine Kunststoffarten einfließen (technisch bedingt). Hingegen können rein technisch auch heterogen zusammengesetzte Alttextilien zu Dämmstoffen verarbeitet werden. Jedoch ist rechtlich nur eine Verwendung gleichbleibender Rohstoffzusammensetzungen für eine Zulassung als Baustoff möglich.

Daraus resultiert, dass sich eine Abhängigkeit bzgl. des Mengenanfalls nicht nur aus der Nutzung, sondern vielmehr auch vor dem Hintergrund der Sammlung und Sortierung der Rest- und Abfallstoffe ergibt. Eine möglichst sortenreine Sortierung ist zudem ausschlaggebend für die weitere Verwendbarkeit der Rohstoffe. Daher können, durch eine gezielte Sammlung und Sortierung, Rohstoffe für die etablierten Biomassemärkte verfügbar gemacht werden. Nachfolgend wird dies für die Rohstoffmärkte im Einzelnen betrachtet.

Tabelle 1: Ausgewählte und bewertete Kaskaden, deren Produktionseinheiten (inkl. Kapazitäten) und Rohstoffeinsatz

Nr.	Name	Produktkette	Produktionseinheit	Einsatz von Kaskadenprodukten (technisch)
1	Holzskaskade 1	Span-, Faserplatten, Möbel	Spanplattenwerk: etwa 365.000 m ³ /Jahr	Bis zu 100% Altholz (je nach Produkt) Qualität: AI, AII
3	Papierkaskade	Papier	Papierproduktion Etwa 250.000 t / Jahr	Bis zu 100% Altpapier (abhängig vom Produkt)
4	Faserkaskade 1	Cellulosefasern	Faserproduktion: 40.000 – 268.000 t/ Jahr	Qualität: holziges Frischmaterial (holzige Anteile des Grünschnitts nur bedingt)
5	Faserkaskade 2	Dämmstoffe	Dämmstoffproduktion: 3.500 t, 250.000 m ³ /Jahr	100 % Alttextilien Qualität: reine Baumwollfaser ^{a)}
7	Polymerkaskade 1	Verpackungsmaterial		Bis zu 100% Recycling-PLA Qualität: reines PLA, keine Verunreinigungen durch andere Kunststoffe
8	Polymerkaskade 2	PET-Flaschen		Bis zu 100% Recycling-PET Qualität: reines PET
9	Polymerkaskade 3	Polyurethane	PUR-Herstellung 976 t/Jahr	Bis zu 100% Recycling-Bio-PUR Qualität: reines PUR

- a) Für eine Baustoffprüfung bedarf es homogener und immer gleichbleibender Inputstoffe (vgl. Kapitel 4); technisch betrachtet könnten auch andere Stoffe Verwendung finden.

Altholz

Durch eine optimierte Sortierung und Aufbereitung des Altholzes könnten aus rechtlicher Sicht die Altholzkategorien I und II vollständig in den stofflichen Markt zurückgeführt werden. Dabei handelt es sich um etwa 81 % des Marktvolumens bzw. um nahezu 7,5 Mio. t. Nach diesem ersten Optimierungsschritt stehen – bezogen auf den Status quo - noch etwa 19 % für die energetische Verwertung zur Verfügung (vgl. Abbildung 12).

Bisher werden lediglich 1,2 Mio. t bzw. 13 % des Altholzes in der stofflichen Nutzung wiederverwertet. Bei einer Kaskaden-optimierten Nutzung könnte dieser Wert – unter der Voraussetzung einer Konstanz der Zuordenbarkeit zu Altholzkategorien – um mehr als das Siebenfache gesteigert werden. Für die Holzwerkstoffindustrie hieße dies, dass von den derzeitigen 17 Mio. t Faserbedarf rund 52 % aus Altholz gedeckt werden könnten (Mantau 2012b).

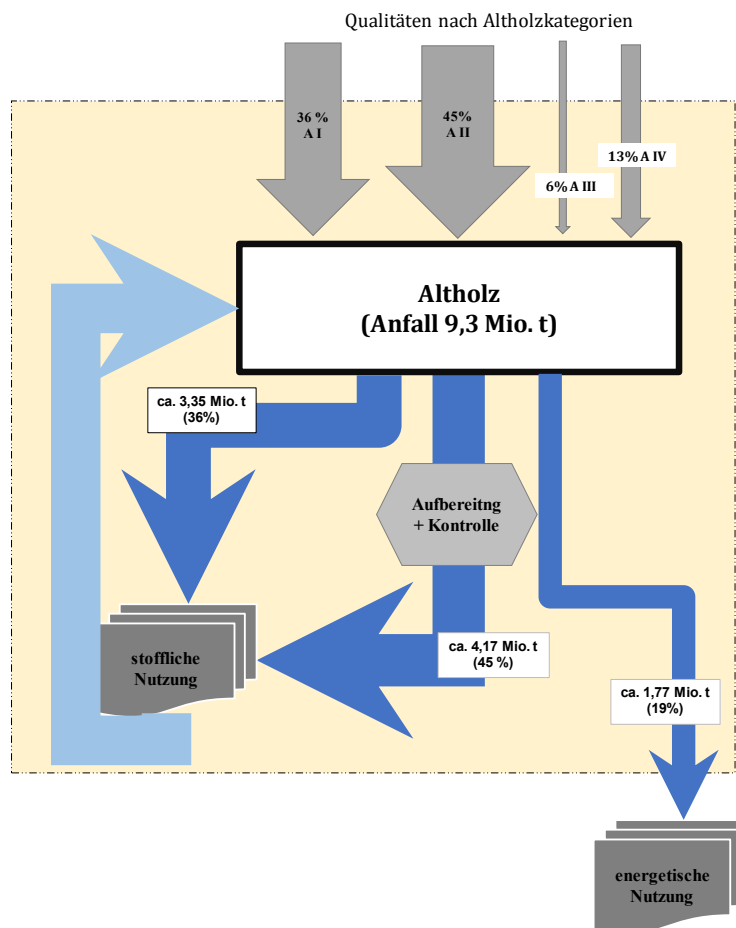
Diese Umstellung verursacht potenziell Effekte im Absatz des Waldholzes (Reduktion der Frischholznachfrage). Zudem ergeben sich daraus erhöhte Altholz-Abfallmengen und deutlich schlechtere Altholz- bzw. Faser-Qualitäten¹⁰. Zu beachten ist zudem, dass auch die Schadstoff-Grenzwerte der Altholzverordnung eingehalten werden müssen. Studien zeigen, dass insbesondere Teile der Altholzkategorie II hinsichtlich des PCP-Gehaltes deutlich über den Grenzwerten liegen und daher nicht für eine stoffliche Nutzung zur Verfügung stehen (Scholl, 2014). Daraus würde sich eine geringere stofflich nutzbare Altholzmenge ergeben.

Angesichts des bis 2016 auftretenden Überangebotes an Altholz auf dem Markt in Verbindung mit den preislichen Entwicklungen, ist die Zeit günstig, um angepasste Erfassungsstrategien (Sortierung, De-

¹⁰ Größere Holzfaserlängen, Belastung mit Schwermetallen, etc.

tektion, Materialaufbereitung, Qualitätssicherung) im Hinblick auf eine intensiviertere stoffliche Nutzung zu implementieren. Aufgrund der derzeit bereits massiv praktizierten, grenzüberschreitenden Stoffstromverlagerungen bedarf es im Hinblick auf die erforderliche Qualitätssicherung aber dringend einer europäischen Regelung z.B. im Sinne einer europäischen Altholzverordnung. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einschätzung, dass intensiviertere Holz-Kaskaden – zumindest potenziell – zu Schadstoffanreicherungen und damit zu Verlagerungen hinsichtlich der Zuordnung zu Altholz-Kategorien führen können, ist Sorge zu tragen, dass am Ende der Nutzungskette noch ein Bestand an effizienten Anlagen zur energetischen Nutzung (bzw. innovativer Konzepte im Sinne von LC-Bioraffinerien sowie thermo-chemischen Prozessen) verfügbar ist. Da für die aktuell betriebenen Altholzkraftwerke – nach Auslaufen des 20-jährigen EEG-Vergütungszeitraumes – keine energiewirtschaftliche Folgefinanzierung mehr vorgesehen ist¹¹, erscheint ein Diskurs hinsichtlich der erforderlichen Rahmenbedingungen zur Besicherung eines angepassten (und effizienten) Anlagenbestandes erforderlich.

Abbildung 12: Idealisertes Stoffstrommodell des deutschen Altholzmarktes im Kaskaden-optimierten Szenario; eigene Darstellung, Datenquellen: (Mantau, Weimar, & Klock, 2012) (UBA, 2007)



(Alt)Papier

¹¹ Dies kann theoretisch ab 2020 und insbesondere ab 2025 zu signifikanten Rückgängen der Anlagenkapazitäten führen (von > 600 MW_{el} im Jahr 2020 auf ca. 200 MW_{el} im Jahr 2026 (2030: nahe Null))

Der Altpapier-Markt zeigt beispielhaft, wie nachhaltiges Ressourcen-Management gestaltet werden kann. Derzeit liegen die Rücklaufquote bei ca. 77 % und die Einsatzquote bei ca. 74 %. Daher sollte nunmehr eine Schärfung der Definition zwischen Abfall und Wertstoff bzw. Ressource erfolgen. In einer aktuell veröffentlichten Pressemitteilung erklärt der europäische Verband CEPI die Bedeutung eines möglichst hochwertigen Recyclings (CEPI, 2014). Nicht nur die Masse des Altpapiers sei zu sammeln, sondern diese sollte möglichst getrennt nach Produktqualitäten sortiert werden. Je gezielter eine Sortierung erfolgt, desto höherwertiger kann das Altpapier wiederverwertet werden. Für eine gezielte Sortierung kann die Liste der Europäischen Standardsorten und ihre Qualitäten – EN 643 verwendet werden. Bei einer bestmöglichen Verwendungskaskade sowie einer optimalen Sortierung kann eine Recyclingquote von 85 % erzielt werden. Vor diesem Hintergrund gilt es insbesondere, die Sortierung von Altpapier-Sorten zu verbessern, die Altpapieranteile im Hausmüll zu reduzieren bzw. einem Recycling zuzuführen und bereits bei der Produktion auf eine Recyclingfähigkeit der Produkte zu achten¹². Die Einsatz- und Rücklaufquoten für den gesamten Altpapiersektor bleiben relativ konstant. Defizitär erscheinen – auch im Sinne der Kaskadennutzung - mit ca. 50 % derzeit noch die Altpapier-Einsatzquoten im Bereich der Hygienepapiere.

Naturfasern – Textilien

Im Bereich der Naturfasern bzw. der Alttextilien besteht ebenfalls bereits ein gut etablierter Recyclingmarkt. Jedoch können in diesem Bereich noch weitere Anteile erschlossen werden. Derzeit werden etwa 33 % der Alttextilien keiner Sammlung zugeführt. Zudem werden 7 % thermisch verwertet und 7 % entsorgt. Bei einer Aufnahme dieser Textilmengen in die Kaskadennutzung könnte sich das Rohstoffvolumen um 526.000 t erhöhen. Dies entspricht einer Verdopplung der aktuellen stofflichen Verwertungsmenge. Jedoch können die Fasern und Stoffe nicht unendlich wiederverwertet werden. Daher wird mit einer Ausschussquote von 20 % kalkuliert.¹³ Doch selbst unter der Berücksichtigung der Ausschussmenge könnten dem Textilmarkt rund 0,9 Mio. t Alttextilien zurückgeführt werden.

Im Textilsektor erscheint derzeit insbesondere ein Diskurs hinsichtlich der Wertigkeit von Second-Hand-Nutzungen (sozio-ökonomische Effekte bei Exporten in Entwicklungsländer), der Verstärkung von Suffizienz (Textilverbrauch) sowie der verstärkten Nutzung langlebiger Produkte (vs. Billigprodukte) erforderlich.

Biokunststoffe

Der Markt der Biokunststoffe bezieht seine Rohstoffe im Wesentlichen aus dem Zucker- und Stärke-Markt. Ein Einsatz von biogenen Reststoffen (z.B. Backwaren) wird angestrebt. Der Markt in Deutschland ist insgesamt derzeit noch sehr klein, Prognosen sagen jedoch einen Marktanstieg und damit eine steigende Rohstoffnachfrage voraus.

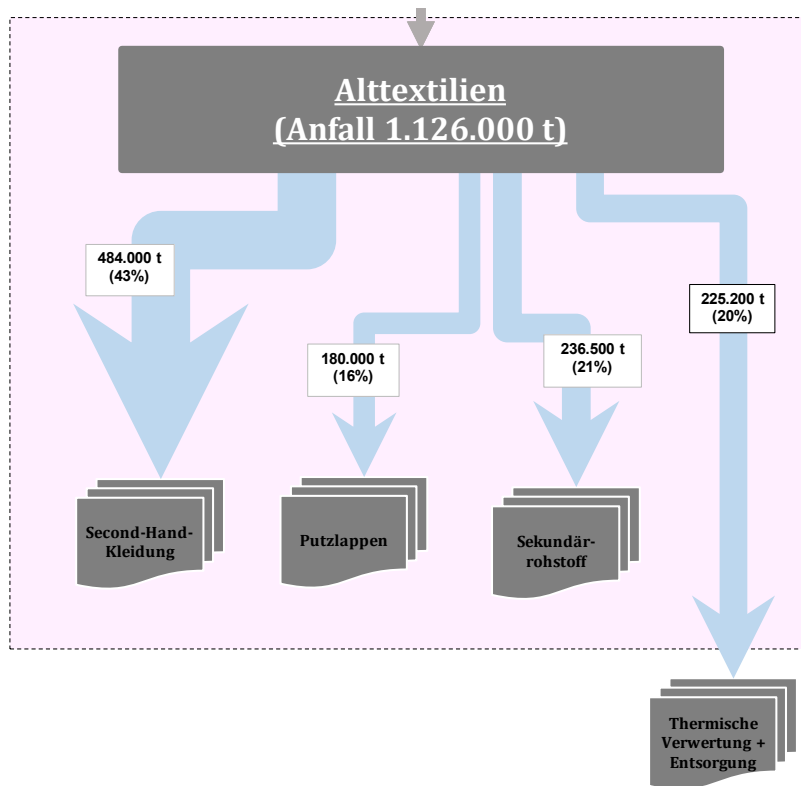
Vor diesem Hintergrund gilt es, sich auch mit der Thematik der Recyclingfähigkeit von biobasierten Kunststoffen auseinander zu setzen. Dabei haben erste Versuche gezeigt, dass ein Recycling der biobasierten Kunststoffe prinzipiell möglich ist. Durch Nah-Infrarot-Technologie können Bio-Kunststoffe im Recycling-Prozess von petrochemischen Kunststoffen sortenrein getrennt werden (Nordwig, 2012). Der sortenreine Biokunststoff kann dann anschließend in den Markt zurückgegeben und wiederverwertet werden. Diese Art der Selektion findet jedoch derzeit (noch) nicht statt. Dies liegt u.a. daran, dass das Marktvolumen biobasierter Kunststoffe sehr gering ist. Der Anteil der biobasierten Kunststof-

¹² Vgl. „Mineralöl-Rückstände auch in Lebensmittelkartons“ – DIE WELT (04.12.2012) (AFP/oc, 2012)

¹³ 10 % thermische Verwertung + 10 % Entsorgung (bvse, 2008)

fe an der gesamten Kunststoff-Verpackungsindustrie liegt z.B. bei unter einem Prozent (Nordwig, 2012).

Abbildung 13: Stoffströme auf dem Kaskaden-optimierten Textilmarkt (eigene Darstellung, bvse 2008)



Sollte jedoch mehr Material in das System eingespeist werden, könnte sich der Aufbau einer Selektier-Anlage auch ökonomisch lohnen. Dann könnten auch biobasierte Kunststoffe aus Stärke, Zucker oder Pflanzenöl in den Kaskadenprozess integriert werden und somit zu einer Entlastung am Rohstoffmarkt beitragen. Wird im Rahmen eines Recyclings nicht zwischen bio-basierten und fossilen Kunststoffen differenziert (u.a. ‚drop-in‘) steigt am Ende der Nutzungskette der biogene Anteil in den dann potenziell energetisch zu verwertenden Stoffströmen. Auch hier muss – analog zum Altholzsektor – auf die Verfügbarkeit eines effizienten Anlagenbestandes geachtet werden.

Hinsichtlich der Rohstoffversorgung (hier insbes. Zucker und Stärke) erscheint es – aufgrund der aktuellen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen – möglich, mittel- bis langfristig einen schlüssigen Übergang von der Energiepflanzenproduktion hin zur Bereitstellung von nachwachsenden Rohstoffen für stoffliche Nutzungen zu gestalten. Angesichts der Notwendigkeit zur Bereitstellung hoher Qualitäten (z.B. Reifegrade beim Mais) sollten jedoch rechtzeitig Rahmenbedingungen im Sinne einer nachhaltigen Landwirtschaft geschaffen werden, um die Fehler der Vergangenheit im Biogassektor nicht zu wiederholen (Monokulturen, Gewässerschutz, etc.).

3.4.3 Zusammenfassung der Potenziale

Insgesamt kann die derzeitige Biomassenutzung sowohl durch die Kaskadennutzung als auch durch eine Erweiterung der Rohstoffbasis ausgedehnt werden.

Abbildung 14 zeigt, am Beispiel der untersuchten Märkte, wie das Aufkommen an Biomasse in Deutschland insgesamt gesteigert werden kann. Danach lässt sich durch die optimierte Kaskadennutzung theoretisch ein Potenzial von 0,5 Mio. t. Alttextilien und 2,9 Mio. t Altholz zusätzlich erschließen. Auch Anteile des Bioabfalls (Grünschnitt/Lebensmittelabfälle) können Rohstoffe liefern. Das Recyclingsystem im Bereich Altpapier ist bereits sehr gut aufgestellt, daher ergeben sich hier nur geringe

zusätzliche Potenziale. Der Bereich der biobasierten Kunststoffe ist derzeit noch im Aufbau. Ein Recycling ist möglich, jedoch derzeit noch unrentabel.

Im Vergleich dazu könnte durch einen zusätzlichen Biomasseanbau (bei Freiwerden von Ackerland in der Größenordnung von bis zu 1,8 Mio. ha) zu gleichen Teilen Weizen, Mais und KUP produziert werden. Danach ließen sich ca. 3,6 Mio. t Weizen und ca. 6 Mio. t Holz als Rohstoffe für biobasierte Kunststoffe verwenden. Durch Mais könnten aufgrund des hohen Ertragspotenzials und der Eignung zum Anbau auf vielen Standorten weitere 6 Mio. t bereitgestellt werden. Jedoch eignen sich die heimischen Maissorten aufgrund der Qualitätsanforderungen nicht für die Stärkeproduktion.

Abbildung 14 Rohstoffquellen für eine nachhaltige Biomassenutzung

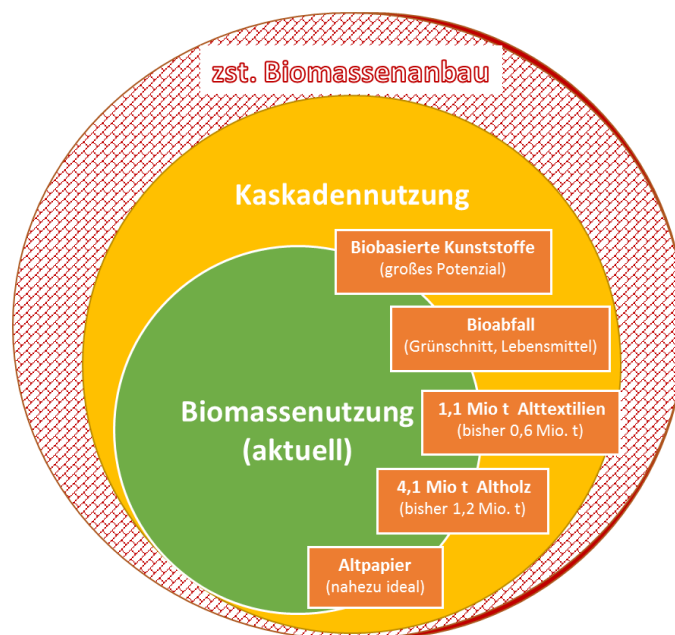


Tabelle 2: Anbauprodukte auf den potenziell frei werdenden Ackerflächen

Fruchtart	Anbaufläche [ha]	Ertrag [t/ha]	Ertrag [t]	Produkte
Weizen	601.700	6	3.610.000	Stärke /Zucker
Mais	601.700	10	6.017.000	Futter/ Energie
KUP	601.700	10	6.017.000	Holz
Gesamt	1.800.000		15.644.000	

3.5 Nutzungskonkurrenzen

Boden bzw. Land ist ein begrenztes Gut. Dabei liefert die zur Verfügung stehende Fläche seit jeher Nahrungs- und Futtermittel, Biomasse und Energie (u.a. Bauholz, Kleidung, Brennmaterial, etc.) und natürliche Umwelt (u.a. Biodiversität, Erholung). Eine Steigerung bzw. Ausdehnung eines dieser Zweige geht zwangsläufig bei limitierter Fläche zu Lasten eines anderen Sektors. Hinzu kommt, dass neben den Ansprüchen aus Land-, Forstwirtschaft und Naturschutz auch insbesondere der außerlandwirtschaftliche Flächenverbrauch u.a. für Straßen und Siedlungen zunimmt. Jedoch ist es ein Ziel der Bundesregierung – auch unter Berücksichtigung langfristiger demografischer Entwicklungstendenzen – dies in Zukunft zu reduzieren.¹⁴

Der limitierende Faktor ist somit der Boden an sich. Steigt nunmehr die Nachfrage nach einem Rohstoff an, tritt dieser in Konkurrenz zu etablierten Rohstoffströmen. Dabei ergeben sich bis zum fertigen Produkt im Wesentlichen zwei Konkurrenzfelder:

- ▶ die Produktionsebene konkurriert um Anbauflächen und
- ▶ die Produktebene konkurriert um Rohstoffe.

Diese beiden Konkurrenzfelder werden wiederum auf vier verschiedenen Betrachtungsebenen beeinflusst: die technische, die stoffliche, die wirtschaftliche sowie die gesellschaftspolitische Ebene. Dabei kann Konkurrenz sowohl positive als auch negative Folgeeffekte hervorrufen. Gömann et al. (2013) fokussieren im Bereich der Landwirtschaft im Wesentlichen auf zwei Effekte:

- ▶ Preiseffekte: Durch eine anderweitige Nutzung landwirtschaftlicher Fläche reduziert sich das ursprüngliche Angebot an Ackerfrüchten. Aus dem reduzierten Angebot können höhere Preise resultieren.
- ▶ Mengeneffekte: Ein reduziertes heimisches Angebot kann bei einer gleichbleibenden Nachfrage die Importströme von Ackerfrüchten (oder Holzprodukten) fördern.

Darüber hinaus weist die Studie „Globale Landflächen und Biomasse“ darauf hin, dass

- ▶ Angebotssteigerungen durch Agrarflächenausdehnung (direkt oder indirekt), häufig zu Lasten anderer Schutzgüter wie beispielsweise der biologischen Vielfalt, erfolgen,
- ▶ eine Intensivierung der Produktion zu Umweltproblemen wie Kontaminationen, Eutrophierung, etc. führen kann,
- ▶ im Wald das Risiko der negativen Nährstoffbilanzen sowie der Verlust der CO₂-Senkenfunktion besteht (UBA 2013).

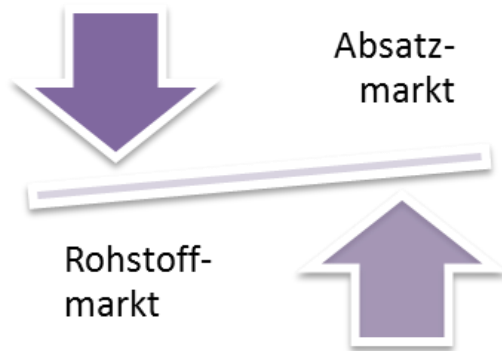
Die dargestellten Rahmenbedingungen bezüglich sich ergebender Nutzungskonkurrenzen gelten einheitlich für alle Rohstoffmärkte. In den einzelnen Sektor-Märkten kommen jedoch noch spezifische Kriterien auf Grund der rechtlichen Rahmenbedingungen oder der regional- bzw. marktspezifischen Gegebenheiten hinzu.

Mit der Verabschiedung des „Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRes)“ hat die Bundesregierung (2012) sich auf eine klare „Ziel-Hierarchie der Biomassenutzung“ (vgl. auch Kapitel 7) verständigt und versucht mögliche Konkurrenzsituationen innerhalb der Biomassenutzung bereits im Voraus auszuschalten. Dabei berücksichtigt die Bundesregierung, dass durch Effizienzmaßnahmen und die Effekte des demografischen Wandels bisher genutzte (landwirtschaftliche) Flächen bzw. Holzfraktionen „frei“ werden. Diese Flächen und Sortimente stünden somit für eine anderweitige Nutzung

¹⁴ Ziel der Bundesregierung ist es die Flächeninanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrsflächen bis zum Jahr 2020 auf 30 Hektar pro Tag zu senken (BMEL, 2012)

zur Verfügung (BMEL 2012). Alternativ wird die Nutzung von Roh- und Reststoffen, der Einsatz innovativer biotechnologischer Verfahren, die Koppel- und Kaskadennutzung oder Bioraffinerien zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen angestrebt (BMEL 2013). Der Ausbau der Kaskadennutzung ist insbesondere für die Biomassenutzung ein interessantes – wenn auch kein einfaches – Feld. Denn die Produkte bzw. Hersteller treten nicht nur in Konkurrenz um den Rohstoff. Auch das Kaskaden-Produkt trifft auf einen etablierten Markt mit etablierten Herstellern von z.T. fossilen Produkten. Insbesondere die Konkurrenzsituation innerhalb des Absatzmarktes macht es vielen Produkten daher – derzeit noch – schwer, sich zu etablieren.

Abbildung 15 Kaskadenprodukt zwischen den Konkurrenzen des Rohstoff- und Absatzmarktes



Zudem muss berücksichtigt werden, dass insbesondere die Diskussion stofflicher versus energetischer Nutzung nicht immer auf Augenhöhe geführt werden kann, bzw. in dieser Stringenz geführt werden muss. So können für die energetische Nutzung auch qualitativ schlechtere Sortimente verwendet werden, wohingegen insbesondere eine hohe Qualität des Rohstoffs in den meisten Fällen ausschlaggebend für die stoffliche Nutzung ist. Darüber hinaus können bei der Biogas-Pflanzenproduktion im Vergleich zu konventionellen Marktfrüchten im Rahmen optimierter Anbaukonzepte u.a. bereits verbesserte Biodiversitätseffekte erzielt werden. Beim Anbau von Früchten zur stofflichen Nutzung sind vergleichbare Effekte noch zu hinterfragen.

Im Agrarsektor scheint der Druck auf die Fläche durch die novellierten energiewirtschaftlichen Regelungen (EEG) etwas nachzulassen. Die Anbauflächen für Energiepflanzen stagnieren und sind langfristig wahrscheinlich rückläufig. Dies bietet – im Rahmen eines gestaltbaren Übergangsprozesses – Raum für den Ausbau stofflicher Nutzungsketten. Allerdings ist hier frühzeitig auf eine nachhaltige Agrarproduktion zu achten, um die Fehler der Vergangenheit im Biogassektor nicht zu wiederholen. Im Bereich der Holzwirtschaft sind hauptsächlich bei den qualitativ hochwertigen Holzsortimenten Konkurrenzsituationen mit dem Energiesektor vorhanden (hier insbesondere durch Scheitholzfeuerungen im Wärmemarkt). Diese sind aktuell insbesondere durch die milden Winter sowie die günstigen Heizölpreise etwas entschärft.

3.6 Fazit

Im Sinne des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRes) gilt es neben der Sicherung der Nahrungsmittelproduktion, auch die Nutzung von Biomasse für stoffliche und energetische Zwecke effizient und nachhaltig auszubauen (Die Bundesregierung 2012). Ziel ist es, das Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch zu entkoppeln. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, an welchen Stellen bereits genutzte oder zusätzliche Biomasseströme im Sinne potenziell effizienterer Nutzungskonzepte erschlossen werden können. Hierfür könnte die Rohstoffbasis durch einen gesteigerten Anbau erhöht, oder alternativ könnten bereits genutzte Biomassen durch eine effiziente Kaskadennutzung im Markt gehalten werden.

Die Steigerung des Biomasseaufkommens durch einen gezielten Anbau ist nur in einem begrenzten Umfang möglich. Die landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland ist limitiert und nimmt zudem (marginal) ab. Zudem befindet sich die westeuropäische Landwirtschaft auf einem sehr hohen Ertrags- und Technisierungsniveau. Eine weitere Zunahme kann daher in erster Linie nur über Effizienzmaßnahmen (Steigerung der Ernteerträge pro Flächeneinheit, effiziente Nutzung der Biomasse) oder eine Verschiebung bisheriger Stoffströme erfolgen.

Auch die Kaskadennutzung kann zu einer Steigerung des Biomasseaufkommens beitragen. Damit Biomasse aus Produkten wie Holzfenstern, PET-Flaschen oder Pullovern wiederverwertet bzw. in die Kaskaden eingespeist werden kann, bedarf es jedoch einer sortenreinen Sammlung der Reststoffströme. Dabei gilt es – wie teilweise bereits in der Altholzverordnung verankert – eine Quellensortierung anzustreben. In diesem Fall werden die Reststoffe bereits am Ort des Anfalls bzw. der Quelle mit optimierter Technik sortiert. Die technischen Verfahren haben sich in den letzten Jahren deutlich weiterentwickelt. Bereits heute können automatisiert u.a. durch Nah-Infrarot-Spektroskopie Biokunststoffe von fossilen Kunststoffen getrennt oder Althölzer in die verschiedenen Altholzkategorien sortiert werden. Denn eine hochwertige Sortierung erlaubt letztlich eine hochwertige (und häufigere) Wiederverwendung der Biomasse.

Daneben benötigt eine erfolgreiche Kaskade möglichst „reine“ Ausgangsstoffe. Daher sollte bereits bei der Produktion der Waren darauf geachtet werden, dass diese für eine Wiederverwertung geeignet sind. Eine Zugabe von fossilbasierten Bindemitteln, Zusatzstoffen oder Klebern sollte danach möglichst reduziert werden.

Insgesamt könnte bereits jetzt durch eine optimierte Erfassung ein Potenzial von 0,5 Mio. t Alttextilien und 2,9 Mio. t Altholz im Hinblick auf eine stoffliche Nutzung zusätzlich erschlossen werden. In naher Zukunft könnten sich zudem deutliche Recycling-Potenziale im Bereich Biokunststoff ergeben.

Im Hinblick auf die Konkurrenzsituation zwischen stofflicher und energetischer Nutzung von Anbaubiomassen ist auf der Grundlage der aktuellen Novellierung des EEG (2014) aufgrund des faktischen Ausbaustopps von landwirtschaftlichen Biogasanlagen davon auszugehen, dass ab 2020 in einem signifikanten Maße Flächen aus dem Anbau von Energiepflanzen „freifallen“. Unter Berücksichtigung der im stofflichen Nutzungssektor noch erforderlichen Entwicklungen am Markt und von Technologien lässt sich daraus zumindest theoretisch – selbst bei einer Beibehaltung der aktuell stofflich/energetisch genutzten Agrarflächen – ein „harmonischer“ Übergang von der energetischen zur stofflichen Nutzung ableiten. Dies gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die (bedarfsgerechte) Stromerzeugung aus Biogas im zukünftigen Energiesystem nicht in einem signifikanten Maße Systemdienstleistungen erbringen muss. Des Weiteren dürfen zukünftige Marktmechanismen im Wärme- und Treibstoffsektor nicht zu einer Ausweitung der dortigen Potenzialnachfrage führen.

Unterstellt man einen rückläufigen Flächenbedarf für Nahrungs- und Futtermittel, könnte eine Erweiterung der Anbaufläche für die stoffliche und energetische Biomassenutzung in einer Größenordnung von 1,8 Mio. ha bis 2050 etwa 15,6 Mio. t Biomasse liefern. Eine Steigerung der Urproduktion bzw. die Erschließung zusätzlicher Flächen führt zudem auch zu einer Bereicherung der Kaskadenmärkte.

4 Hemmnisse und Erfolgsfaktoren für Kaskadennutzung

4.1 Aufgabenstellung und Ziel

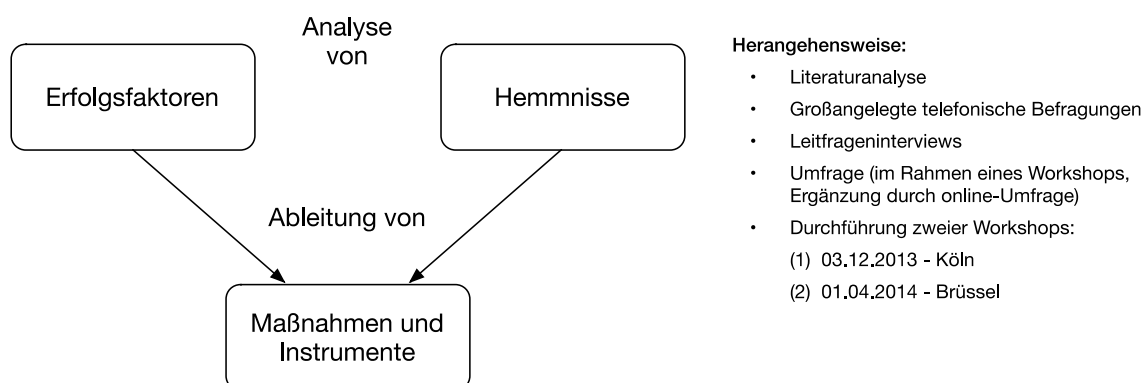
Das dritte Arbeitspaket (AP3) „Erfolgs- und Hemmnisanalyse verschiedener Konzepte der Kaskadennutzung von Biomasse“ verfolgt das Ziel, verschiedene Kaskadennutzungskonzepte zu untersuchen und anhand einer differenzierten Hemmnisanalyse aufzuzeigen, warum die breite Realisierung der Kaskadennutzung bislang nicht gelungen ist. Anhand konkreter Praxisbeispiele sollen darüber hinaus kaskadenspezifische Erfolgsfaktoren und Hemmnisse herausgefiltert werden. Anschließend sollen Handlungsfelder identifiziert werden, um die gefundenen Hemmnisse mit geeigneten Instrumenten und Maßnahmen künftig überwinden zu können.

Kaskadenübergreifende Erfolgsfaktoren und Hemmnisse wurden auf Basis einer Umfrage unterschiedlicher Interessengruppen bewertet. Ferner werden exemplarische Fallbeispiele und damit verbundene kaskadenspezifische Hemmnisse und Erfolgsfaktoren aufgezeigt.

4.2 Vorgehensweise

Die Identifizierung und Analyse von Erfolgsfaktoren und Hemmnissen für die stoffliche Biomassenutzung in Kaskaden erfolgte für den vorliegenden Bericht mit unterschiedlichen Methoden. Die folgende Grafik zeigt die unterschiedlichen Herangehensweisen zur Analyse von Hemmnissen und Erfolgsfaktoren sowie der Ableitung von Maßnahmen und Instrumenten daraus.

Abbildung 16 Methodisches Vorgehen im Arbeitspaket 3



In einer Literaturanalyse wurden wissenschaftliche Literatur sowie Positionen verschiedener Verbände auf nationaler und internationaler Ebene untersucht. Im Zentrum standen sowohl die Kaskadennutzung als auch verwandte Themen wie Recycling, Abfallwirtschaft und Koppel- bzw. Nebenprodukt-nutzung.

Die im ersten Schritt erarbeiteten Konzepte, Erfolgsfaktoren und Hemmnisse wurden im Rahmen zweier Workshops zur Kaskadennutzung vorgestellt, von Teilnehmern ergänzt und diskutiert.

Für die Umfrage wurde ein quantitativer, halbstrukturierter Fragebogen initiiert. Die Befragung beinhaltete Angaben zur Institution, der Branche und dem Herkunftsland der Befragten. Den Hauptteil des Fragebogens bildete die Beurteilung von Hemmnis- und Erfolgsfaktoren. Da der Schwerpunkt auf der Analyse der Hemmnisse lag, wurden hier detaillierte Antwortmöglichkeiten vorgegeben, welche jeweils ein potenzielles Hemmnis aufzeigten. Die Hemmnisse wurden aus den zuvor erarbeiteten Ergebnissen (AP1 und AP2) abgeleitet und von den Teilnehmern der Umfrage auf einer Skala von 1 (kein Hemmnis) bis 5 (starkes Hemmnis) bewertet. Die Faktoren wurden in die Themenbereiche ökonomisches Umfeld, technisches Umfeld, Markt und Nachhaltigkeit sowie politische Rahmensetzung und Regulierung gegliedert. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die in der Umfrage zu bewertenden Hemmnisse.

Die Arbeiten der Literaturanalyse und Workshops wurden durch Experteninterviews und Firmenbesichtigungen ergänzt, um Hemmnisse und Erfolgsfaktoren aus konkreten Praxisbeispielen zu identifizieren. Die näher zu untersuchenden Praxisbeispiele wurden auf einem Workshop der Projektpartner gemeinsam mit dem Auftraggeber ausgewählt. Dabei wurde auf eine möglichst große Spannbreite unterschiedlicher Branchen (Chemieindustrie, Holzwerkstoffindustrie, etc.), Konzepte (einstufig, mehrstufig), Biomasseströme (Holz, Naturfasern, etc.) und spezifischer Problemfelder (Nutzungskonkurrenzen, ökologische Auswirkungen, etc.) geachtet.

Tabelle 3: Untersuchte Themenbereiche und Hemmnisse der Umfrage
Quelle: Eigene Darstellung)

Themenbereiche und Hemmnisse
Ökonomisches Umfeld <ul style="list-style-type: none"> ▶ Unsicherheiten bei der Rohstoffbereitstellung ▶ Hohe und schwankende Preise für biogene Rohstoffe ▶ Fehlende Kooperation zwischen den Akteuren in der Wertschöpfungskette ▶ Fehlender Zugang zu Rest- und Abfallstoffen
Technisches Umfeld <ul style="list-style-type: none"> ▶ Einbußen in der Produktivität ▶ Unzureichende technische Eigenschaften / geringe Qualität der Produkte ▶ Kontamination durch die Verwendung von Altmaterial ▶ Technische Implementierung unwahrscheinlich / unmöglich
Markt und Nachhaltigkeit <ul style="list-style-type: none"> ▶ Geringe Akzeptanz für Produkte in Nutzungskonkurrenz mit Nahrungs- und Futtermitteln ▶ Kein Alleinstellungsmerkmal gegenüber konventionell hergestellten Produkten ▶ Negatives Produkt-Image verbunden mit recycelten und wiederverwerteten Materialien ▶ Generelle Umweltbedenken der Endverbraucher
Politische Rahmensetzung und Regulierung <ul style="list-style-type: none"> ▶ Subventionen für konkurrierende Biomassenutzungen (z.B. durch Erneuerbare Energien Richtlinie) ▶ Restriktionen der Abfall- und Kreislaufwirtschaft (z.B. durch Abfallrahmenrichtlinie)

4.3 Kaskadenübergreifende Erfolgsfaktoren und Hemmnisse

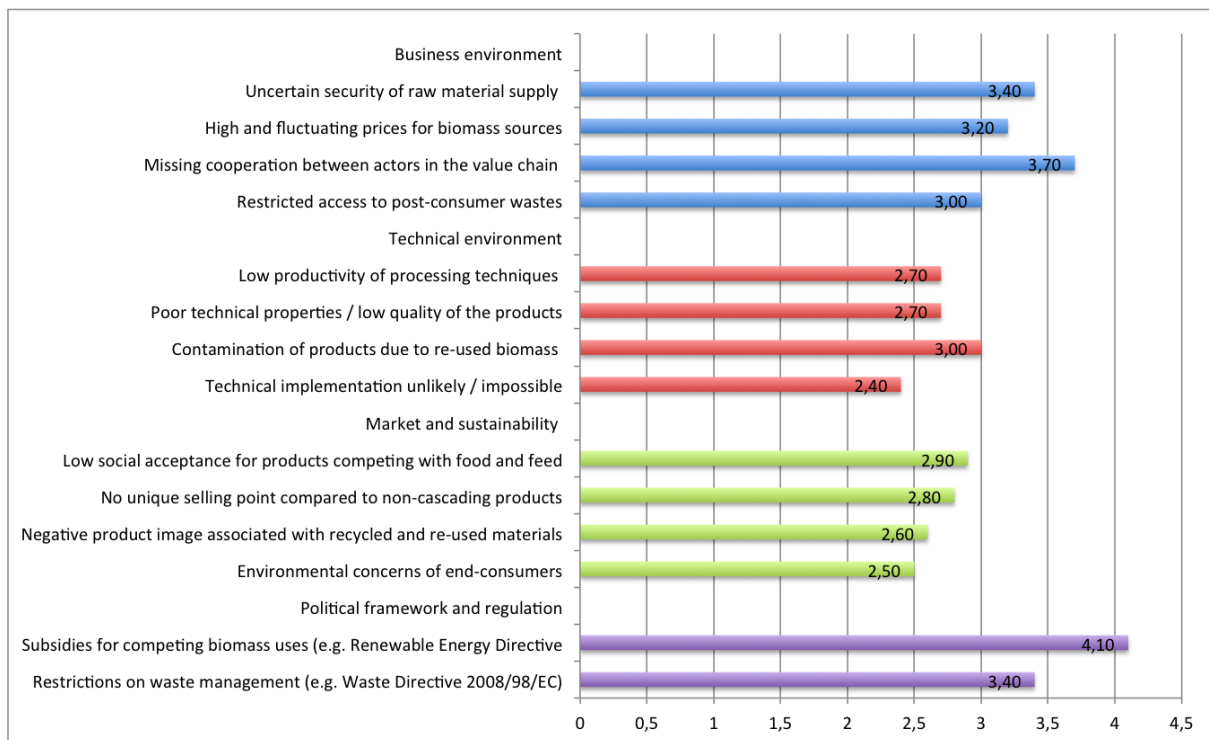
4.3.1 Ergebnisse der Workshops

Die Branchenzugehörigkeit und Expertise der Teilnehmer der Umfrage umfasst mit zehn oder mehr Nennungen hauptsächlich die Land- und Forstwirtschaft, die Chemie- und Kunststoffindustrie sowie den Bereich der Energie und Bioenergie. Mit weiteren vier oder fünf Nennungen waren die Zellstoff- und Papierindustrie, der Umwelt- und Naturschutz sowie das Abfallmanagement als weitere Interessensgruppen vertreten. Nur jeweils eine oder zwei Nennungen entfallen auf das Bauwesen, die Textilindustrie und die Holzverarbeitung. Unter der Kategorie „Andere“ wurden Produktpolitik, Innovationspolitik und Strategie, Lebensmittel sowie Biotechnologie genannt. Aus den Branchen Bergbau und Finanzwesen haben keine Personen an der Umfrage teilgenommen.

In einem ersten Schritt wurden die Hemmnisse in den Bereichen ökonomisches Umfeld, technisches Umfeld, Markt und Nachhaltigkeit sowie politisches Umfeld untersucht. In Abbildung 17 sind die Mittelwerte der Bewertungen aller 38 Teilnehmer an der Befragung dargestellt. Starke Hemmnisse sind

insbesondere in den Themenbereichen „Politische Rahmensezung und Regulierung“ sowie „Ökonomisches Umfeld“ zu finden. In den Themenbereichen „Technisches Umfeld“ und „Markt und Nachhaltigkeit“ werden die Hemmnisse dagegen von den Teilnehmern der Umfrage als weniger stark bewertet.

Abbildung 17: Übersicht der Mittelwerte aller Hemmnisse auf einer Skala von 1 (kein Hemmnis) bis 5 (starkes Hemmnis) (Quelle: Eigene Darstellung)



Im Themenbereich *Politische Rahmensezung und Regulierung* wurden beide vorgegebenen Faktoren als starkes Hemmnis bewertet. Mit einem Mittelwert von 4,1 wurde als stärkstes Hemmnis die politische Rahmensezung und Regulierung in Form von Subventionen genannt, welche derzeit die konkurrierenden Nutzungen von Biomasse begünstigen. Dazu zählt unter anderem die Förderung der Bioenergie durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) in Deutschland.

Im Themenbereich der *ökonomischen Rahmenbedingungen* wurden die genannten Faktoren eher als stärkere Hemmnisse bewertet. Als stärkstes Hemmnis wurde die fehlende Kooperation zwischen Akteuren der Wertschöpfungskette genannt.

Im Bereich des *technischen Umfelds* stellt insbesondere die Kontamination durch die Verwendung von Altmaterial ein Hemmnis dar, gefolgt von Produktivitäts- und Qualitätseinbußen.

Als relativ wichtiges Hemmnis wurde im Bereich Märkte und Nachhaltigkeit die Nutzungskonkurrenz zwischen stofflicher bzw. energetischer Nutzung und der Nutzung von Biomasse als Lebensmittel gesehen. Viele der Befragten sehen in der Kaskade auch kein Alleinstellungsmerkmal ihrer Produkte, d.h. marketingtechnisch gäbe es keinen Vorteil aus der Kaskadennutzung von Biomasse. Allerdings wird auf der anderen Seite auch nicht unbedingt ein negatives Produktimage gefürchtet. Die Kaskadennutzung ist aus diesem Grunde eher eine Strategie, die zwischen unterschiedlichen Unternehmen (B2B-Kommunikation) und weniger zwischen Unternehmen und Endkunden (B2C-Kommunikation) kommuniziert werden kann.

4.3.2 Handlungsfelder zur Überwindung der Hemmnisse

4.3.2.1 Sammlung und Verwertung

Die Ergebnisse der vorangegangenen Analyse zeigen, dass viele Hemmnisse im Handlungsfeld des Abfallmanagements, der Sammlung und der Verwertung liegen. Beispielsweise finden sich zwei der

fünf stärksten Hemmnisse in der Umfrage in diesem Handlungsfeld, namentlich die Restriktionen der Abfall- und Kreislaufwirtschaft und der fehlende Zugang zu Rest- und Abfallstoffen. Darüber hinaus wird das Handlungsfeld in zahlreichen Literaturquellen und einer Vielzahl von Fallbeispielen erwähnt.

4.3.2.2 Politische Rahmenbedingungen

In der Kaskadendiskussion ist eine große Angst vor Überregulierung und fehlgeleiteten Anreizsystemen spürbar. Kein Akteur befürwortet eine verpflichtende Kaskadennutzung. Auch die Kaskadennutzung sollte sich am Markt orientieren. Die ökonomische Machbarkeit von Kaskaden sehen viele Industrievertreter optimistisch, unter der Voraussetzung, dass der politische Rahmen eine Kaskadennutzung unterstützt, beispielsweise durch eine Gleichbehandlung der stofflichen und der energetischen Biomassenutzung.

Zwar bewegen sich die etablierten Kaskaden mehr oder weniger in einem abgegrenzten Sektor, es gibt jedoch auch zunehmend sektorenübergreifende Anwendungen wie das untersuchte Beispiel PET zu Textilien. Die Komplexität der Wechselwirkungen möglicher Anreizsysteme für Kaskaden ist nur schwer zu durchschauen, da innerhalb der Wertschöpfungskette zahlreiche Abhängigkeiten bestehen. Kaskade ist nur ein kleiner Teil der Biomassenutzung. Das heißt, wichtig zur Ausgestaltung von Maßnahmen ist die Sichtweise über das gesamte Wirtschaftssystem über die biobasierte Industrie hinaus. Verzerrungen zwischen fossil-basierten und bio-basierten Produkten sind ebenso wenig wünschenswert wie eine ungleiche Förderung von energetischer gegenüber stofflicher Nutzung (Odegard et al. 2012).

4.3.2.3 Vernetzung von Akteuren

Viele Unternehmen, die sich als „aktiv“ im Themenfeld der Kaskadennutzung verstehen, sehen die Kaskade als Konzept innerhalb der eigenen Produktionsabläufe. Dies ist nachvollziehbar, zeigt aber auf, dass einem einzelnen produzierenden Unternehmen das Verständnis fehlt, Teil einer stoffstromübergreifenden Biomassekaskade zu sein, soweit das Konzept der Kaskadennutzung nicht in der Strategie des Unternehmens verankert ist. Die Integration von einstufigen Kaskadenkonzepten in einer Produktionsstätte bzw. über die Unternehmensgrenze hinaus kann somit auch zu Hindernissen für die Einführung von mehrstufigen Kaskaden führen.

Eine Grundvoraussetzung zur Etablierung von Kaskaden sind funktionierende Logistik- und Lieferketten der Rohstoffe. Funktionierende, zweckmäßige und umfassende Sammlungen, sowie eine gute Trennung der Rohstoffe erleichtern die Etablierung von Kaskaden.

4.3.2.4 Innovationsförderung, Start-ups, Produktdesign

Neben der großindustriellen Reststoffnutzung findet man in der Praxis zahlreiche Nischenprodukte und neuartige Produktentwicklungen. Viele Vorhaben scheitern jedoch am Übergang von der Idee, bzw. vom Labormaßstab, in die kommerzielle Umsetzung. Zwar gibt es auch einige Förderprogramme, doch beschränken sich diese meist auf die Phase der Produktentwicklung. Programme, die über die reine Entwicklung hinaus auch das up-scaling, d.h. das Anheben der Produktentwicklung auf Industriemaßstab, umfassen, sind selten. Gerade diese Phase entscheidet jedoch häufig über Erfolg oder Misserfolg innovativer Ideen. Ein Schritt ist die Initiative GO-Bio, die die Validierungs- und Kommerzialisierungsphase wissenschaftlicher Ergebnisse finanziell unterstützt (BMBF 2015).

4.4 Kaskadenspezifische Erfolgsfaktoren und Hemmnisse

Im Projektverlauf wurden beispielgebende Kaskadenkonzepte definiert und hinsichtlich ihrer Erfolgsfaktoren und Hemmnisse analysiert. Die als relevant identifizierten Branchen sind dabei der Holzsektor, der Papiersektor, der Bereich der Faserindustrie sowie der Kunststoffindustrie mit der Ausrichtung auf Biokunststoffe (siehe hierzu auch Tabelle 1). Mit Unternehmen aus diesen Sektoren wurden Firmenbesuche und Expertengespräche durchgeführt. Ein Auszug der wesentlichen Erkenntnisse wird im Folgenden beschrieben.

4.4.1 Kaskadennutzung im Holzsektor

Im betrachteten Fallbeispiel werden Möbel, Balken und andere Materialien aus Frischholz hergestellt. Nach Lebensende dieser Produkte gelangt ein Teil davon als Altholz in die Abfallbehandlung in Deutschland. Das Altholz wird sortiert, falls nötig aufbereitet und kann dann in den Produktionsprozess von Holzwerkstoffen eingespeist werden.

Zur Beschreibung der Holzkaskade wurden drei Praxisbeispiele untersucht. Das erste beschreibt klassisches Altholzrecycling am Beispiel der Firma EGGER GmbH & Co OG in Österreich. Das zweite Praxisbeispiel zielt auf die Substitution von Holz durch alternative Rohstoffe ab, die wiederum in Kaskade genutzt werden können. In letzterem Beispiel wird die lignozellulosehaltige Fraktion von Gärresten - im Folgenden Gärprodukte genannt - aufbereitet und in Spanplatten und Laminatfußböden verarbeitet. Diese Kaskadenstufe wurde zwar erfolgreich in Tests entwickelt, eine industrielle Umsetzung blieb jedoch bislang aus.

Beschrieben sei hier das Fallbeispiel Firma Fritz EGGER, die 30 % Recyclingholz in der EGGER EURO-SPAN® Spanplatte einsetzt. Der Hersteller versucht mit dem Einsatz von Recyclingholz die Rohstoffbasis zu erhöhen und damit einen Beitrag zur Ressourcenschonung zu leisten. Jedoch muss in allen Fällen die Qualität der Endprodukte gewährleistet bleiben. Dies kann der Hersteller über die gesetzlichen Grundlagen „Deutsche Altholzverordnung“, „Österreichische Recyclingholz-Verordnung“, „Französische EPF-Umwelt- und Entsorgungsnorm“ sowie in Großbritannien über die „WRAP PAS 111:2012“ nach eigenen Aussagen sicherstellen, denn darin werden Qualitätsanforderungen an das eingesetzte Altholz definiert.

Das größte Hemmnis zur Verwendung von Altholz in Spanplatten stellt die Sammlung und die Qualität des Rohstoffes dar. Bei der industriellen Sammlung im Bau- und Abbruchbereich werden häufig unterschiedliche Güteklassen der so genannten Altholzkategorien nach §2 der Altholzverordnung gemeinschaftlich entsorgt (vgl. Tabelle 4). Dies führt dazu, dass sich naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Holz mit behandeltem, verunreinigtem oder mit Schadstoffen belastetem Holz vermischt. Das Problem setzt bei der gewerblichen und privaten Sammlung sogar noch früher ein, denn hier wird das Altholz bisher nur zu Teilen geborgen.

Wenn zum Beispiel in Deutschland eine Sortierung stattfindet, dann häufig erst am Recyclinghof und dann meist nur visuell, d.h. auf Basis von Qualitätsmerkmalen, die mit dem bloßen Auge zu erkennen sind. Jedoch stellt insbesondere die visuelle Einschätzung von Schadstoffgehalten (wie z.B. Arsen, Blei, Cadmium) ein großes Problem dar. Um einer Fehleinschätzung zu entgehen, werden viele Hölzer daher in die qualitativ schlechtere Altholzkategorien eingestuft. Diese Altholzkategorien können dann unter Umständen nicht mehr stofflich genutzt werden und gelangen in die thermische Verwertung. Der stofflichen Nutzung von Altholz werden durch diese Handhabung potenzielle Rohstoffe entzogen. Stofflich verwertet kann nur Altholz der Klassen A I und A II werden, sofern Schadstoffgrenzwerte sicher eingehalten werden (bvse 2015).

Ansätze zur Vereinfachung der Altholzverordnung in Richtung, nur noch in „augenscheinlich unbehandeltes Holz“ sowie „augenscheinlich behandeltes Holz“ zu unterscheiden, werden vom Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (bvse) als Rückschritt bewertet. Zwar stellt der Ansatz eine Vereinfachung der kommunalen Altholzerfassung dar, doch ist zu befürchten, dass dadurch noch mehr Altholz als notwendig in die thermische Verwertung gelangt (bvse 2015).

Die in Österreich 2012 erlassene „Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über das Recycling von Altholz in der Holzwerkstoffindustrie (RecyclingholzV)“ ermöglicht ähnlich der deutschen Altholzverordnung (AltholzV) den Einsatz von Altholz, das bestimmten Anforderungen genügt, in der Holzwerkstoffindustrie und ist damit ein Erfolgsfaktor für die Holzkaskade. In der Verordnung wird besonderer Wert auf eine Quellensortierung (Sortierung direkt am Anfallort) und getrennte Lagerung gelegt. Zudem wird ein Ende der Abfalleigenschaft des

Altholzes bei Einhaltung bestimmter qualitativer Bedingungen definiert, d.h. es kann als Produkt verwertet werden und unterliegt keinen weiteren Auflagen.

Darüber hinaus werden für das Altholz Beurteilungsnachweise erstellt, die über Abfallart, Herkunft, Behandlungsschritte, Kontaminationen und ähnliche Eigenschaften Auskunft geben. Dazu muss der Altholzstrom zunächst sortiert und beprobt werden. Die Beprobung wird bei jeder Einzelcharge oder alternativ bei Massenströmen bei mindestens zwei qualitativen Stichproben im Jahr durchgeführt. Von der Pflicht zum Beurteilungsnachweis und damit einer analytischen Beprobung sind lediglich unveränderte, naturbelassende Holzströme sowie Spanplattenabfälle zur Eigenverwendung ausgeschlossen.

4.4.2 Kaskadennutzung im Papiersektor

Die Papierkaskade ist eine weitere, bereits lange am Markt etablierte und quantitativ bedeutende Biomassekaskade. Als Rohstoff für Papier wird Holz eingesetzt. Die Sammlung, Aufbereitung und Herstellung von recyceltem Papier und Pappe sorgt dafür, dass die eingesetzten Holzfasern mehrfach genutzt werden. Der Europäische Dachverband der Papier-Industrie CEPI geht von einer theoretischen, maximalen Rückführung an Recyclingpapier von 78% aus. Das bedeutet, dass 78% des Papiers eingesammelt und zu recyceltem Papier weiterverarbeitet werden kann (CEPI 2011).

Großes Potential steckt in der Recyclingquote der einzelnen EU-Länder. Momentan weisen 12 EU-Länder eine Recyclingquote von weniger als 60 % auf, 13 EU-Länder von mehr als 70%. Die Schwankungsbreite liegt zwischen rechnerischen 1,5 Recyclingkreisläufen in Polen und 6,5 in den Niederlanden. In der Verbesserung der Recyclingwirtschaft liegt daher noch ein großes, bislang ungenutztes Potential zur Steigerung der Kaskadennutzung. Unüberwindbare technische Barrieren sieht CEPI dafür nicht. Aktuell gibt es zudem Bemühungen, Adhäsive und Druckfarben zu optimieren, um die Recyclingfähigkeit verbessern.

Eine Grundvoraussetzung für späteres Recycling ist eine hohe Qualität der Rohstoffe. Je hochwertiger die Ausgangsmaterialien, desto besser die Recyclingfähigkeit. CEPI (2014) beschreibt drei Szenarien, die die Kaskadennutzung im Bereich der Papierindustrie bedrohen bzw. bedrohen können:

- ▶ Die obligatorische Zufeuerung von Biomasse in Kohlekraftwerken
- ▶ Überkapazitäten kommunaler Müllverbrennungsanlagen
- ▶ Zunahme der gemischten Abfallsammlung in Europa

Handlungsbedarf sieht CEPI darin, Subventionen für die energetische Nutzung abzubauen, Getrennt-Sammlungen zu unterstützen und auszubauen, sowie eine umfassende Prüfung bestehender Richtlinien und Verordnungen auf die Unterstützung von Recycling zu prüfen und anzupassen. Darüber hinaus besteht eine große Konkurrenz zwischen Recyclern innerhalb und außerhalb Europas, daher sollte recyclingfähiges Material nur an Recycler gehen, die Umweltstandards einhalten, die mit europäischen Standards vergleichbar sind.

Den Eigenbeitrag der Papierindustrie sieht Ulrich Leberle von CEPI darin, die Sammlung von Altpapier in allen EU-Ländern zu erhöhen und Adhäsive und Druckfarben zu verbessern. Die Recyclingfähigkeit sollte ein Kriterium für „Green Products“ sein und bereits im Designprozess berücksichtigt werden.

4.4.3 Kaskadennutzung im Bereich von Naturfasern

Zur Analyse der Kaskadennutzung von Naturfasern wurden drei Praxisbeispiele bewertet.

- ▶ Die Firma Alchimea Naturwaren GmbH
- ▶ Die Lenzing Gruppe (Cellulosefasern zur Verwendung in Bekleidungs- oder Schlaftextilien und Hygiene- und Kosmetikprodukten)
- ▶ das Start-Up QMilk GmbH (stellt Kasein aus Milch zu Fasern und Kunststoffgranulat her)

An dieser Stelle sei das Beispiel der Firma Alchimea Naturwaren beschrieben, stellvertretend für das Altkleiderrecycling. Mit Sitz in Bexbach hat das Unternehmen seinen Verkaufsschwerpunkt auf den Sektoren Naturfarben, -lacke sowie Dämmstoffe aus Schafwolle. Für letzteres wird im Wesentlichen „neue“ Schafwolle eingesetzt. Die am Markt ebenfalls verfügbare recycelte Schafwolle wird vornehmlich im Autobau verwendet. Schafwolle wird weltweit gehandelt. Der Markt ist – ähnlich wie andere Agrarmärkte – starken Preis- und Mengenschwankungen unterworfen. Die Firma war in den letzten Jahren im Zuge von starken Preisanstiegen der Ausgangprodukte auf der Suche nach alternativen Rohstoffen. Recycelte Textilien, aus denen ein vergleichbarer Dämmstoff erstellt werden kann, stellen vor diesem Hintergrund eine preiswerte Alternative dar.

Die Motivation des Herstellers liegt vornehmlich in der Erweiterung der Rohstoffbasis. Dabei legt der Hersteller großen Wert darauf, Naturwaren einzusetzen. Für die Entwicklung des Produktes und vor allem der neuen Maschinenteknik konnten Fördermittel des „Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand“, kurz ZIM-Programm, akquiriert werden. Dabei kooperierte die Alchimea Naturwaren GmbH mit einem Hersteller von Produktionsmaschinen aus der Schweiz. Gemeinsam entwickelten sie eine Maschine zur Herstellung des neuen Dämmstoffs.

Um dieses Produkt nunmehr am Markt zu etablieren, benötigt der Dämmstoff als neuer Baustoff eine Zulassung. Das Zulassungsverfahren wurde offiziell seitens des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) in Berlin im Jahr 2010 eröffnet. Dafür durchläuft der Stoff unterschiedliche Tests (u.a. Brandtest, Zugfestigkeit). Es ist jedoch zum Teil nicht umfassend transparent, welche Kriterien geprüft werden. Das gesamte Zulassungsverfahren kann bis zu drei Jahre in Anspruch nehmen.

Während des Zulassungsprozesses wurde die europäische Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten erlassen. Die letzten Anpassungen dazu traten am 01. Juli 2013 in Kraft. Dazu gehörte u.a. ein neues Verfahren zur Zulassung von Baustoffen. Die alten Bestimmungen liefen somit im Juni 2013 aus. Die letzte Zulassung bzw. die Nachweise über die erfolgreich bestandenen Prüftests durften bis 31. März 2013 eingereicht werden. Da der Dämmstoff trotz mehrmaligen Nachfragens beim DIBt die relevanten Prüftest nicht in der erforderlichen Zeit aufweisen konnte, konnte keine Zulassung nach alter Gesetzgebung erfolgen. Aktuell ist leider der Rahmen des zukünftigen Gesetzes noch nicht bekannt, daher erfolgen derzeit keinerlei Zulassungen. Die Situation befindet sich nunmehr seit mehr als einem Jahr in der Schwebe.

Der Dämmstoff könnte daher zwar vertrieben werden, erfüllt jedoch offiziell noch nicht die Vorgaben der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, d.h. das Material wird bei vielen Anwendern nicht wahrgenommen bzw. findet aufgrund der fehlenden Zulassung keinen Absatz. Demzufolge werden die Produkte derzeit nur auf direkten Kundenwunsch hergestellt. In der übrigen Zeit steht die Produktionslinie still.

Insgesamt stellt das Zulassungsverfahren somit die größte Hürde zur Umsetzung des Projekts dar. Dabei sind bereits die Voraussetzungen zur Aufnahme einer Prüfung für flexible Lösungen hemmend. Der Hersteller von neuen Baustoffen muss im Voraus exakt definieren, aus welchen Rohstoffen und Gemischen das Produkt zusammengesetzt ist. Zudem muss der Dämmstoff immer die gleichen Zusammensetzungen und Eigenschaften aufweisen. Das ist jedoch bei Alttextilien nicht der Fall. Eine Spannweite der Angaben von z.B. 50-80% Baumwolle und 20-50% Polyester ist zur Klassifizierung eines Baustoffes nicht zulässig. Infolgedessen hat sich Alchimea Naturwaren GmbH auf einen reinen Baumwolldämmstoff konzentriert.

Darüber hinaus existieren in der Branche vielerlei Logos und Siegel zur Verifizierung der Sicherheit, der Nachhaltigkeit oder auch der Verträglichkeit des Baustoffs. Die Beantragung und Verleihung eines Prüfsiegels muss jedoch häufig vom Hersteller entgeltlich vergütet werden. Insbesondere kleine und mittelständige Unternehmen sind finanziell nicht in der Lage, diese Siegel bzw. evtl. sogar mehrere zu

bezahlen. Ein fehlendes Siegel stellt jedoch sofort einen Wettbewerbsnachteil und damit auch Marktverluste dar.

4.4.4 Kaskadennutzung im Bereich Biokunststoffe

Die Etablierung von Biomassekaskaden im Bereich von Biokunststoffen setzt voraus, dass die betrachteten Biokunststoffe am Markt existieren und recycelt werden können. Das Kunststoffrecycling unterliegt einem eigenen, relativ komplexen Rechtsfeld auf den Gebieten Chemie-, Abfall- und Produktrecht. Durch die Vielzahl unterschiedlicher Biokunststoffe und die geringen Absatzmengen am Markt sind Recyclingverfahren sowie korrespondierende Erfassungssysteme zum jetzigen Zeitpunkt jedoch kaum entwickelt, obwohl sie technisch realisierbar sind. Als Fallbeispiele wurden deshalb zwei Arten von Biokunststoffen näher betrachtet. Biopolyethylenterephthalat (bioPET) und Biopolyethylen (bioPE) sind sogenannte Drop-Ins, die chemisch strukturgleich zu konventionellen petrochemischen Kunststoffen sind, jedoch aus biogenen Rohstoffen hergestellt werden. Polymilchsäure (Polylactic acid, PLA) ist dagegen ein neuartiger, bio-basierter Kunststoff. Beide bio-basierten Kunststoffe können aus zucker- und stärkehaltigen Pflanzen hergestellt werden, die in Form von Zuckerrübe und Mais auch in Deutschland vorhanden sind.

BioPET bzw. bio-PE

Die Coca-Cola Erfrischungsgetränke AG ist als Konzessionär für die Abfüllung sowie den Vertrieb von Coca-Cola Markenprodukten in Deutschland verantwortlich. Das Sortiment umfasst rund 80 Produkte, die in regionalen Betrieben abgefüllt werden. Die beiden Materialien bioPET und bioPE befinden sich seit ca. 2 Jahren in der Nutzung, vor allem im Verpackungsbereich. Bisher sind keine Schwierigkeiten mit der mechanischen Verwertung bekannt. Es wird somit von den Herstellern und Produkthanwendern davon ausgegangen, dass eine Kaskadennutzung nicht nur möglich ist, sondern bereits stattfindet. Durch die Vermengung mit konventionellem PET und PE im Zuge der Entsorgung können die Kaskadenwege jedoch nicht explizit dargestellt werden.

Ein Hemmnis für diese Art der Kaskadennutzung ist die Kontrolle der Stoffströme. Das Problem bei bepfandeten Einweg-PET-Flaschen besteht in Deutschland darin, dass das Material beim Handel landet und dieser die Kontrolle über die weitere Verwendung und damit auch über Ort und Art des Recyclings hat. Zudem ist in einigen Ländern Europas die getrennte Erfassung von gebrauchten Kunststoffprodukten zum Zweck der Verwertung immer noch sehr schwach ausgeprägt. Hier besteht der grundsätzliche Bedarf an verbesserten Rahmenbedingungen im Bereich der Abfallwirtschaft und hinsichtlich des Verbraucherverhaltens.

Polylactic acid, PLA

NatureWorks (NW) ist der derzeit weltgrößte Hersteller des Biopolymers Polymilchsäure und steht in engem Austausch mit PLA-Vorarbeitern und Herstellern von Endprodukten aus PLA. NW ist zudem an verschiedenen Stellen in Projekte zur Erforschung bzw. Weiterentwicklung der Sortier- und Verarbeitbarkeit von Abfällen aus PLA (Prozessabfälle, Consumer-Abfälle) einbezogen.

Bei den Herstellern neuartiger biobasierter Kunststoffe wie PLA – im Unterschied zu biobasierten Kunststoffen, die chemisch strukturgleich zu konventionellen petrochemischen Kunststoffen sind – besteht die erste Priorität nach wie vor darin, einen ausreichenden Absatz des Materials sicherzustellen. Die zweite Priorität besteht in der Entwicklung von Compounds (PLA + Zuschlagstoffe/Additive) für eine möglichst breite Produktpalette. Probleme und Herausforderungen der Entsorgung haben ebenfalls eine hohe Relevanz, wobei die Biokunststoffhersteller hier auch von den Gegebenheiten nationaler bzw. regionaler Infrastrukturen und politischer Randbedingungen abhängen bzw. sich diesen in einem gewissen Maß ausgeliefert sehen.

Die Kostenstruktur und Marktakzeptanz von biobasierten Kunststoffen gegenüber konventionellen Kunststoffen hat sich in den vergangenen Jahren erheblich verbessert. Dennoch gibt es in einigen EU-Ländern weiterhin Hemmnisse, besonders durch höhere Verpackungsmaterial-Lizenzgebühren für PLA im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen, z.B. PET.

Die vielfältigen PLA-Qualitäten bringen außerdem das Problem mit sich, dass aus gebrauchten PLA-Produkten nicht einfach beliebige Rezyklate hergestellt werden können, die sich in beliebige neue PLA-Produktwege einspeisen lassen. Die Rezyklierbarkeit kann somit ein Hemmnis für die Etablierung von Biomassekaskaden darstellen.

Ein grundsätzliches Problem der Gewinnung von PLA-spezifischen Fraktionen aus Post-Consumer Abfällen besteht darin, dass erst ab Marktmengen in der Größenordnung von 20.000 tPLA Material, der Aufbau der benötigten Infrastrukturen zu erwarten ist. Die Gewinnung PLA spezifischer Fraktionen ist wiederum die entscheidende Voraussetzung für die Erzeugung von PLA Rezyklaten definierter Qualitäten, worauf wiederum die Entwicklung mehrstufiger Kaskaden aufbauen könnte. Eine Motivation von NatureWorks zur Beteiligung an Projekten zur Weiterentwicklung der PLA Entsorgung ist es, gegenüber Handel und Verbrauchern den Nachweis der Sortier- und Verarbeitbarkeit von PLA Post-Consumer-Abfällen zu erbringen.

4.5 Fazit

Eine breite Realisierung von Biomassekaskaden hat mit Ausnahme der Papier- und Holzwerkstoffindustrie in Deutschland bisher nicht stattgefunden. Eine differenzierte Hemmnisanalyse unterschiedlicher Kaskadenkonzepte hat gezeigt, dass dafür keine Einzelfaktoren verantwortlich sind. Vielmehr handelt es sich um ein komplexes Zusammenwirken verschiedener Hemmnisse, die eine Kaskadennutzung von Biomasse verhindern.

Dazu zählen zunächst die **politischen Rahmenbedingungen**, die auf einer Fülle von Gesetzesvorgaben beruhen und keine einheitliche Strategie zur Nutzung von Biomasse verfolgen. So ist beispielsweise die energetische Nutzung von Biomasse, die durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) gefördert wird, ein grundlegendes Hemmnis für die Kaskadennutzung: Die energetische Nutzung von Biomasse, sei es primäre Biomasse aus der Land- und Forstwirtschaft (z.B. Weizenstroh, Stammholz, etc.), sekundäre Biomasse aus den verarbeitenden Industrien (z.B. Sägenebenprodukte, Weintrester, etc.) oder tertiäre Biomasse aus dem Post-Consumer Bereich (z.B. Holzabfall der Kategorie 2, Bioabfall aus der braunen Tonne), stellt in der Regel das Ende einer Wertschöpfungs- und auch Stoffstromkette dar. Jede Tonne an Biomasse, die energetisch genutzt wird, reduziert somit das Potenzial, die Ressourceneffizienz mit Hilfe der Kaskadennutzung zu steigern. Dies wirkt sich umso stärker aus, je höher der Anteil primärer Biomasse zur energetischen Nutzung ausfällt.

In Strategiepapieren und Verträgen sind zahlreiche Absichtserklärungen zur Stärkung der Kaskadennutzung zu finden, allerdings fehlt es in der praktischen Umsetzung an einer klaren Linie, langfristiger Stabilität und ambitionierten Zielen. Auf nationaler und internationaler Ebene wäre deshalb eine Gesamtstrategie der Biomasseverwertung wünschenswert, die über die Abfallhierarchie hinaus auch die Verwendung biogener Rohstoffe einschließt und sowohl stoffliche als auch energetische Nutzungsoptionen berücksichtigt (siehe hierzu auch Kapitel 7).

Weiterhin spielen auch **marktspezifische Hemmnisse** eine wesentliche Rolle. Der Abbau von Subventionen konkurrierender Biomassenutzungen ist einer der wichtigsten Bausteine, um die Nutzungsdauer von Biomasse zu verlängern und damit auch politisch induzierte Rohstoffverknappung zu entschärfen. Die Versorgungssicherheit mit Rohstoffen wurde insbesondere im Spannungsfeld zwischen energetischer und stofflicher Nutzung als bedeutendes Hemmnis genannt. Insbesondere etablierte Kaskaden im Bereich der Holzwerkstoffindustrie sowie der Papier- und Zellstoffindustrie sehen hier großes Potential, größere Mengen an Rohstoffen zu geringeren Preisen einzusetzen.

Für eine langfristige Etablierung von Biomassekaskaden ist deren **ökonomische Machbarkeit** entscheidend. Die meisten Rückmeldungen von Teilnehmern zweier Workshops und zahlreichen Expertengesprächen sehen dies unter der Voraussetzung optimistisch, dass es die richtigen politischen Rahmenbedingungen gibt. Wichtig ist hierbei auch die Ausweitung des Betrachtungsraums über das gesamte Wirtschaftssystem. Verzerrungen zwischen petrochemischen und bio-basierten Produkten sind ebenso wenig wünschenswert wie eine Konkurrenz zwischen energetischer und stofflicher Nutzung. Auch indirekte Verzerrungen (z.B. Nachhaltigkeitskriterien, die einseitig für Biomasse, nicht jedoch für petrochemische Produkte eingehalten werden müssen) erschweren die Kaskade. Als Erfolgsfaktor für die Etablierung von Biomassekaskaden kann daher die politische Gleichbehandlung der stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse identifiziert werden.

Dauerhaften Erfolg hatten bislang nur diejenigen Konzepte, die auf lange Sicht ohne staatliche Beihilfen auskommen. Als Anschubfinanzierung sowie zur Überbrückung der Produktentwicklung bis zur industriellen Umsetzung sind staatliche Förderprogramme hilfreich, nicht jedoch als Basis eines Geschäftsmodells. Möglichen **Anreizsystemen** kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, weil sie gegebenenfalls zu weiteren Marktverzerrungen führen, Produkte ganz oder teilweise ausschließen, innovative Ideen verhindern oder sogar etablierte Kaskaden zerstören. Eine stete Überprüfung im Hinblick auf den Beitrag einer Maßnahme bzw. eines Förderinstruments zur Zielsetzung „mehr Ressourceneffizienz“ ist daher ratsam.

Die fehlende **Kooperation innerhalb von Wertschöpfungsketten** spielt eine besondere Rolle als Hindernis für die Etablierung von Biomassekaskaden, weil sich die beteiligten Unternehmen oft nicht als Teil einer Kaskadennutzung empfinden und nur dann Interesse zeigen, wenn es die Verwertung von Neben- und Abfallprodukten als alternative und kostengünstige Rohstoffe betrifft. 8 von 12 untersuchten Branchen nennen diesen Punkt als einen der Top-5 Hemmnisse für die Kaskadennutzung von Biomasse (vgl. Kapitel 3.1.1). Auch in der Literatur finden sich zahlreiche Beispiele (u.a. Goverse 2001), dass eine verbesserte Kooperation z.B. durch die Berücksichtigung von Rückgewinnung und Recyclingfähigkeit der Rohstoffe in Produkten wesentlich zur Stärkung der Kaskaden beitragen kann. Die Praxisbeispiele untermauern diese These in zweierlei Hinsicht. Zum einen kann die Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit im Prozess die Kaskadennutzung wesentlich einfacher, sicherer und kostengünstiger gestalten (Beispiel Altholz, Druckfarben im Papierrecycling), zum anderen helfen etablierte Strukturen und Transparenz über die Prozesskette, die Kaskadennutzung umzusetzen.

Technische Herausforderungen wurden eher als geringes Hemmnis eingestuft. Auf dieses Ergebnis lassen die Diskussionen auf dem Workshop und die Umfrageergebnisse schließen: Vertreter der Papier-, Zellstoff und Holzwerkstoffindustrie haben technische Herausforderungen als einen Faktor identifiziert, in dem ein Eigenbeitrag der Industrien gerne und erfolgversprechend geleistet werden kann. Darüber hinaus gibt es für viele ambitionierte Konzepte der stofflichen Nutzung von Biomasse bereits heute etablierte Verfahren, die jedoch aufgrund anderweitiger Hindernisse, insbesondere des Mehraufwands für Transporte, Lagerung, Sortierung, Aufbereitung und ähnliche Prozesse, nicht zum Einsatz kommen.

In Expertengesprächen wurde festgestellt, dass eine Verbesserung von Sammelquantität und -qualität ebenso förderlich ist wie funktionierende Logistik- und Lieferketten. EU-weit einheitliche Vorgaben und **Standards** zu Sammlungen und Sortierung von Abfällen werden daher als Erfolgsfaktoren und Chancen für die Etablierung von Nutzungskaskaden gewertet.

Kaum steuerbar, wenn auch ein relevantes Hemmnis ist die **Rohstoffverfügbarkeit**, die insbesondere bei der Reststoffverwertung eng an das Hauptprodukt gekoppelt ist. Auf dieses Hemmnis weisen sowohl die Umfrage als auch branchenspezifische Recherchen hin. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits eine Vielzahl möglicher Kaskaden aus der Nutzung biogener Reststoffe besteht, die einerseits großes Potenzial für mehr Ressourceneffizienz besitzen, andererseits jedoch vornehmlich Nischen besetzen. Ein **investitionsfreundliches Klima** für Start-Ups im Bereich der biogenen Reststoffverwertung, aber

auch Transparenz in Prüfungsverfahren und Zulassungsprozessen sowie der Abbau bürokratischer Hindernisse kann ein Erfolgsfaktor in diesen Bereichen sein.

Marketing und Produktimage haben im Fall der Kaskadennutzung einen geringen Einfluss auf die Entscheidungen von Unternehmen, sodass hier nur geringe Hindernisse bei der Etablierung von Biomassekaskaden zu erwarten sind. Dies deckt sich auch mit den Erkenntnissen, dass Kaskadennutzung von der Industrie fast ausschließlich als Ressourcenstrategie wahrgenommen wird. Nachhaltigkeitsaspekte sind eine zusätzliche Motivation, jedoch kein entscheidendes Verkaufsargument. Meist gingen den Entwicklungen von Kaskadenprozessen Überlegungen zu einer Vergrößerung der Rohstoffbasis voraus.

Eine Chance bietet die Berücksichtigung der Recyclingfähigkeiten von Produkten bereits im **Designprozess**. Zum Beispiel kann sich der Einsatz verbesserter Adhäsive und Druckfarben im Papierbereich positiv auf die Recyclingfähigkeit auswirken. Eine Stärkung des umweltfreundlichen Produktdesigns wäre demnach ein Erfolgsfaktor für die Stabilisierung und Ausweitung bestehender und noch zu entwickelnder Kaskadenkonzepte.

Auf EU-Ebene wurde zwar erst jüngst das noch unter der Barroso-Kommission vorgeschlagene Kreislaufwirtschaftspaket zurückgezogen, diesem soll jedoch bis Ende 2015 ein ambitionierteres Paket folgen. Das Paket sieht unter anderem die Steigerung der Ressourceneffizienz um 30 % in der EU bis 2030 vor, eine Überprüfung der Ökodesign-Richtlinie, die Erhöhung der Recyclingziele auf mindestens 70% der Siedlungsabfälle, Deponieverbot von recycelbarem und biologisch abbaubarem Abfall bis 2025 und ein generelles Verbot der Deponierung bis 2030, die Einführung von Gebühren für Deponierung und Verbrennung sowie die Abschaffung von umweltgefährdenden Subventionen. Alle genannten Maßnahmen weisen in eine vielversprechende Richtung. Nachdem der erste Entwurf jedoch verworfen wurde, darf man gespannt sein, welche politischen Weichen in Brüssel gestellt werden.

5 Ökologische Bewertung der Kaskadennutzung

5.1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Anfangserwartung dieses Forschungsprojekts beschreibt die Kaskadennutzung als ein Ansatz zur Erhöhung der Ressourceneffizienz. Diese bezieht sich in diesem Zusammenhang nicht nur auf einen minimierten Bedarf an natürlichen Ressourcen, sondern auch auf die Minimierung negativer Auswirkungen auf möglichst alle Bereiche der Nachhaltigkeit.

Eine Kernaufgabe des Forschungsprojekts ist es, die tatsächlich erreichbare Ressourceneffizienz ausgewählter Nutzungskaskaden anhand von Ökobilanzen zu analysieren und soziale und ökonomische Effekte mit zu betrachten. Außerdem werden weitere methodische Aspekte wie die zeitliche Komponente der Kaskaden und die Frage der Speicherfunktion in den stofflichen Produkten diskutiert.

Die Ökobilanzen sollen vor allem auch eine Grundlage liefern für die im Rahmen des Bewertungskonzepts (siehe Abschnitt 6) sinnvoll und notwendigerweise einzusetzenden Prüfindikatoren.

Im Folgenden werden nach kurzem Einblick in die Methodik der Ökobilanzen die Ökobilanzergebnisse für die ausgewählten Kaskaden zusammengefasst.

5.2 Vorgehensweise

5.2.1 Auswahl der zu untersuchenden Kaskadenbeispiele

Die Auswahl ist zunächst ein Resultat der vorangehenden Arbeiten im Forschungsprojekt, die sich mit den realisierten Kaskadenkonzepten, der Rohstoffverfügbarkeit und den Umsetzungshemmnissen befasst haben. Die daraus abgeleitete Auswahl erstreckt sich auf verschiedene Varianten von Kaskadennutzungen aus den Stoffbereichen

- ▶ **Holz:**
erste Ökobilanzen liegen hierzu vor (Gärtner et al. 2013, Rettenmaier et al. 2014), jedoch wurde die mögliche Rolle, das Potenzial und die Wechselwirkungen im Gesamtstoffstrom für Holz bisher nicht ökobilanziell bewertet.
- ▶ **Papier, Pappe, Karton:**
der erfolgreichste Sektor bezüglich Kaskadennutzung; teilweise auch ökobilanziell gut untersucht, jedoch nicht mit Blick auf den konkreten ökologischen Vorteil mehrfacher Kaskadenführung
- ▶ **Textilien:**
Mit dem Rohstoff Baumwolle ein ökologischer und sozioökonomischer Brennpunktthema; hier steht somit im Vordergrund, durch Kaskadennutzung diesen Rohstoff effizienter zu nutzen.
- ▶ **Biokunststoffe:**
Großthema der Bioökonomie, großes Nutzungspotenzial (Substitution der fossile Kunststoffe) und bis auf weiteres auf agrarische Rohstoffe angewiesen.

5.2.2 Systemgrenzen

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. Im Rahmen dieser Arbeit sollen daher über bisherige Erkenntnisse (Gärtner et al. 2013, Rettenmaier et al. 2014) hinausgehende Fragen beantwortet werden.

„Standardfall“

In den genannten bisherigen Studien werden die betrachteten Systeme anhand einer funktionalen Einheit definiert, die sich aus der Summe der einzelnen Produkte der Kaskadenkette zusammensetzt.

Auf jeder Kaskadenstufe wird das jeweilige Referenzprodukt, welches durch das Produkt aus der Kaskadenkette substituiert wird, definiert. Abbildung 18 zeigt die Systemgrenzen in schematischer Form.

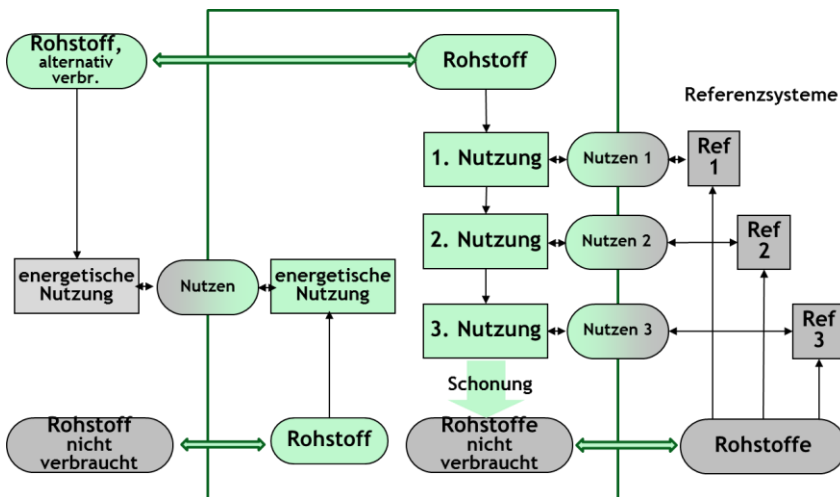
Diese Vorgehensweise soll für alle Kaskadenbeispiele angewandt werden, für die bislang keine Ökobilanzen durchgeführt wurden. Das ist für die Textil- und die Biokunststoffkaskaden der Fall. Auch für die Papierkaskaden wird so vorgegangen, da hier gerade der Nutzen der mehrfachen seriellen Kaskadierung bewertet werden soll.

„Stoffstrombilanz“

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

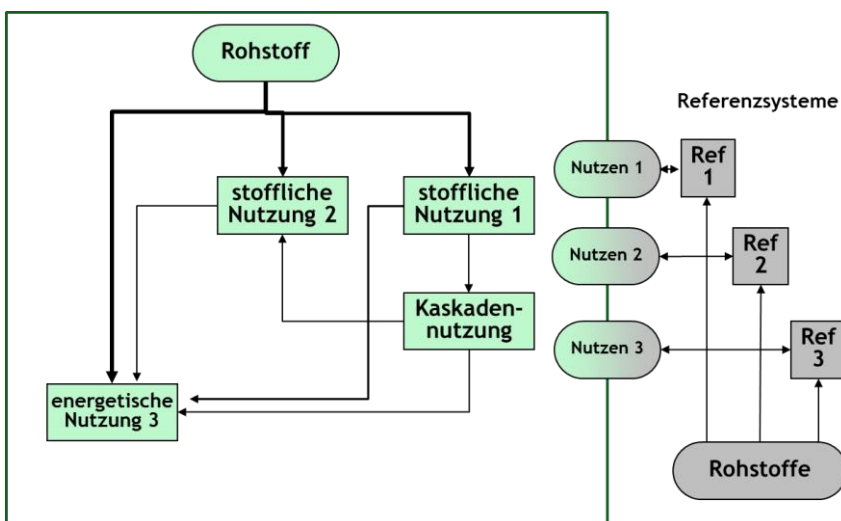
Abbildung 19 zeigt in starker Vereinfachung den Systemumfang einer Stoffstrom-Ökobilanz. Der Sinn dieses Ansatzes besteht darin, ausgehend von einem Status quo Maßnahmen zur verstärkten Kaskadennutzung als Veränderung der Gesamtbilanz des Sektors bewerten zu können.

Abbildung 18 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.

Abbildung 19 Vorgehen bei der Stoffstrom-Bilanz für Kaskaden



Die Systemgrenze des Gesamtstoffstroms bildet das Rechteck, die Referenzsysteme außerhalb des Rechtecks bewahren die Nutzengleichheit beim Vergleich von (Kaskaden-) Varianten innerhalb des Gesamtstoffstroms durch ausgleichende Gut-/Lastschriften.

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

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.

5.2.4 Vorgehen bei der Wirkungsabschätzung und der Bewertung

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 4 mit Wirkungskategorien als geeignete Basisauswahl anzusehen. Sie entspricht dem in Ökobilanzen für das Umweltbundesamt gängigen Standard.

Für die Bewertung 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 verbalargumentative 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.)¹⁵ dessen Ergebnisse bereits teilweise in diese Untersuchung eingeflossen sind.

In Tabelle 4 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 als eher mehr gravierend oder eher weniger gravierend anzusehen ist. Dazu werden den einzelnen Wirkungskategorien in „sehr große“ bis „geringe“ Bedeutung zugewiesen. Grundlage dafür ist die ökologische Gefahr, die von Experten-, Politiker-, Bevölkerungssicht als besonders bedrohend angesehen wird (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 4

¹⁵ UBA-Projekt-Nr.: 23128: Aktualisierung der UBA-Methodik zur Ökobilanzierung;

(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 4: 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)	sehr groß
bewertet nach Naturferne	m ² *a (NFP)	1.536	bewertet durch ifeu	
Einwohnerzahl		80.523.700	StBA 12.01.2015	

5.3 Holzkaskaden

5.3.1 Datengrundlagen für das Holz-Stoffstrommodell

Ausgangslage für die Modellierung des Holzstoffstroms in Deutschland ist die differenzierte Analyse der Holzrohstoffbilanz Deutschlands von Mantau (2012). Ergänzt wird diese Datengrundlage zur Erstellung eines Stoffstrommodells für die Ökobilanz mit den Ergebnissen aus dem in Kapitel 3 beschriebenen Arbeitspaket dieses Projekts, sowie folgenden weiteren Quellen: Döring, Mantau (2012), Albrecht (2008), Destatis. Ein paar wesentliche Rahmendaten zur Herkunft und Verbleib von Holz aus dem Wald sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

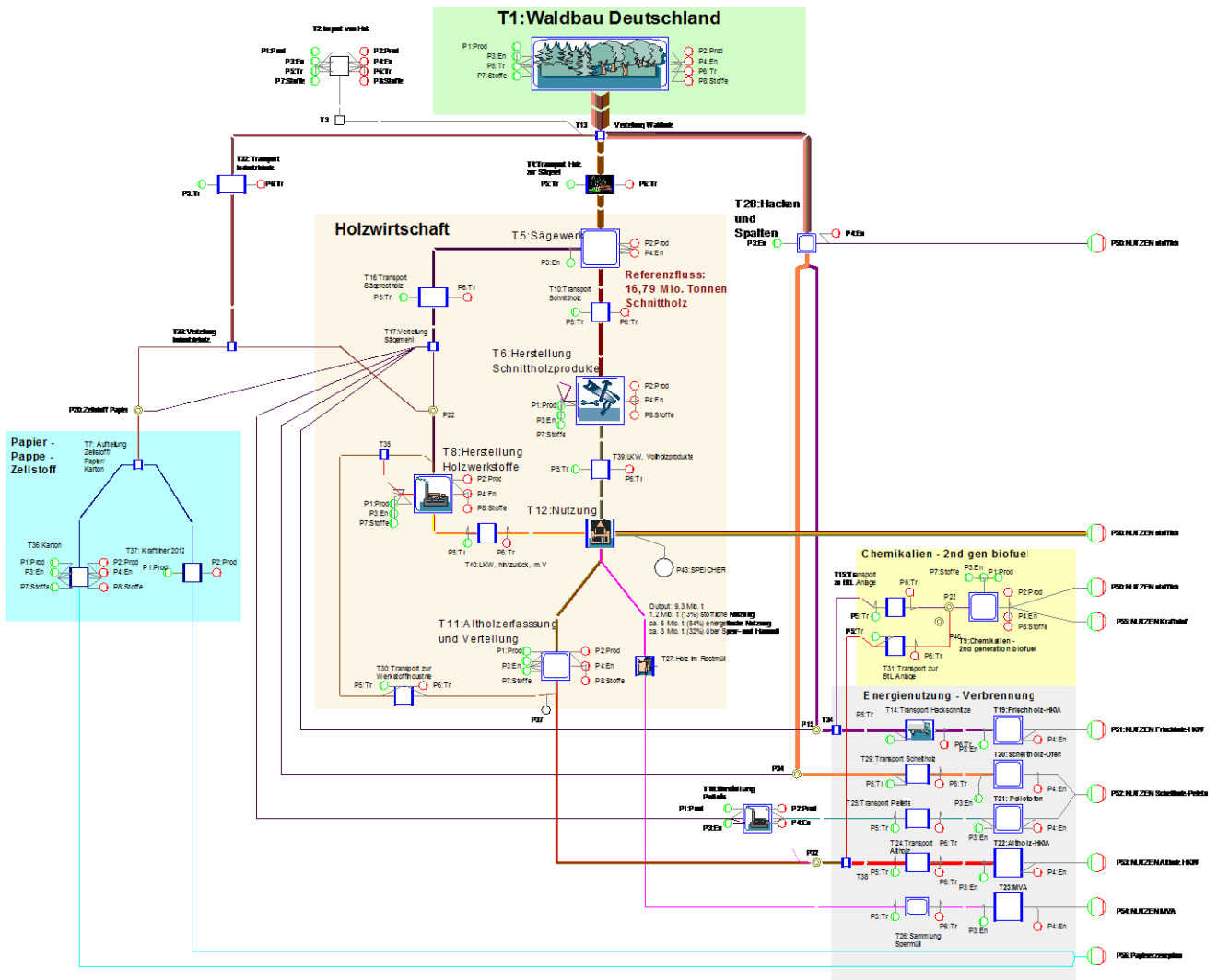
Tabelle 5 Basisdaten zu Waldholz für das Holz-Stoffstrommodell (Zusammenstellung ifeu, nach Mantau 2012)

in Mio. m ³ / Jahr	Gesamt	Stammholz		sonst. Derbholz		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 Sägerestholz	14,5	13,7	0,76			
Input Holzwerkstoffindustr.	14,5	6,8 (SRH)		5,6	2,1	
Input Zellstoffindustrie	10,6	3,8 (SRH)		4,2	2,6	
Input Energieanlagen	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

SRH: Sägerestholz

Die Mengengerüste aus den genannten Quellen wurden mit Hilfe der Software Umberto in ein Stoffstrommodell für die Ökobilanz umgesetzt (siehe Abbildung 20).

Abbildung 20 Umsetzung des Holzstoffstrom in ein Umberto-Modell



5.3.2 Bewertete Optionen einer Erhöhung der Kaskadennutzung im Holzsektor

Ausgehend von der Basisoption kann eine Erhöhung des Kaskadenanteils entweder durch verschiedene Umlenkungsmaßnahmen erreicht werden, z.B.:

- ▶ eine verstärkte stoffliche Nutzung der erfassten Altholzmengen anstelle der dominierenden energetischen Nutzung
- ▶ Erhöhung der absoluten Menge an stofflich genutztem primärem Holzrohstoff

Auf diesen Überlegungen werden vier Optionen zur vergleichenden Bewertung mit der Basisoption definiert.

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. Da die anderen Inputmengen in die Holzwerkstoffpro-

duktion 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).

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.

Option 4: Umlenkung allen Energiefrischholzes in zusätzliche Primäranwendungen für Holz (Bauholz) zur Erhöhung des stofflichen Biomasse-Inputs in den Stoffkreislauf

Diese „radikale“ Option leitet sich ab aus konsequenter Umsetzung einer Maximalforderung „keine energetische ohne vorhergehende stoffliche Nutzung“. Dies bedeutet somit die vollständige Umlenkung allen direkt aus dem Wald in die Nutzung gehenden Energieholzes in eine stoffliche Nutzung. Sinn eines solchen Szenarios ist es das hypothetische Maximum einer Kaskadennutzung ökobilanziell zu bewerten. 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 um 40 % erhöhten Durchsatz über die Sägereien 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.

Substituierte Prozesse bzw. Produkte (Gutschriften) und entgangene Nutzen (Lastschriften)

Die **Optionen 1** und **2** weisen gegenüber dem Basisszenario eine höhere Produktion von **Spanplatten** auf. Grundsätzlich bestehen verschiedene Möglichkeiten andere Produkte im Markt damit zu ersetzen. Im Rahmen dieses Zwischenberichts werden drei Produktarten einbezogen, die in den folgenden Berechnungen der Gutschriften entsprechend den Anwendungsbereichen von Spanplatten mit folgenden Anteilen eingerechnet werden:

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

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

Durch **Option 3** wird Frischholz anstelle der direkten energetischen Nutzung 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 **Dieselmotortreibstoff** gutgeschrieben.

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 7,6 Mio. t zusätzlichen Konstruktionsholzes die jährlich verarbeitete Menge an Baustahl in Deutschland von ca. 13 Mio. t übersteigen.¹⁶ 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.

Alle Optionen führen durch die Verlagerung zu mehr stofflicher Nutzung zur teilweisen Verringerung des Energienutzens. Für diese geringere Strom- und Wärmeerzeugung auf Holzbasis werden als Lastschriften angerechnet aus dem durchschnittlichen deutschen Netzmixes (Strom) und Erdgasfeuerung (Wärme).

5.3.3 Ergebnisse der Ökobilanz der Holzkaskaden

Aus den detaillierten Darstellungen im Anlagenbericht „Ökologische Betrachtung ausgewählter Biomassekaskaden“ sind hier wesentliche Erkenntnisse zusammengestellt.

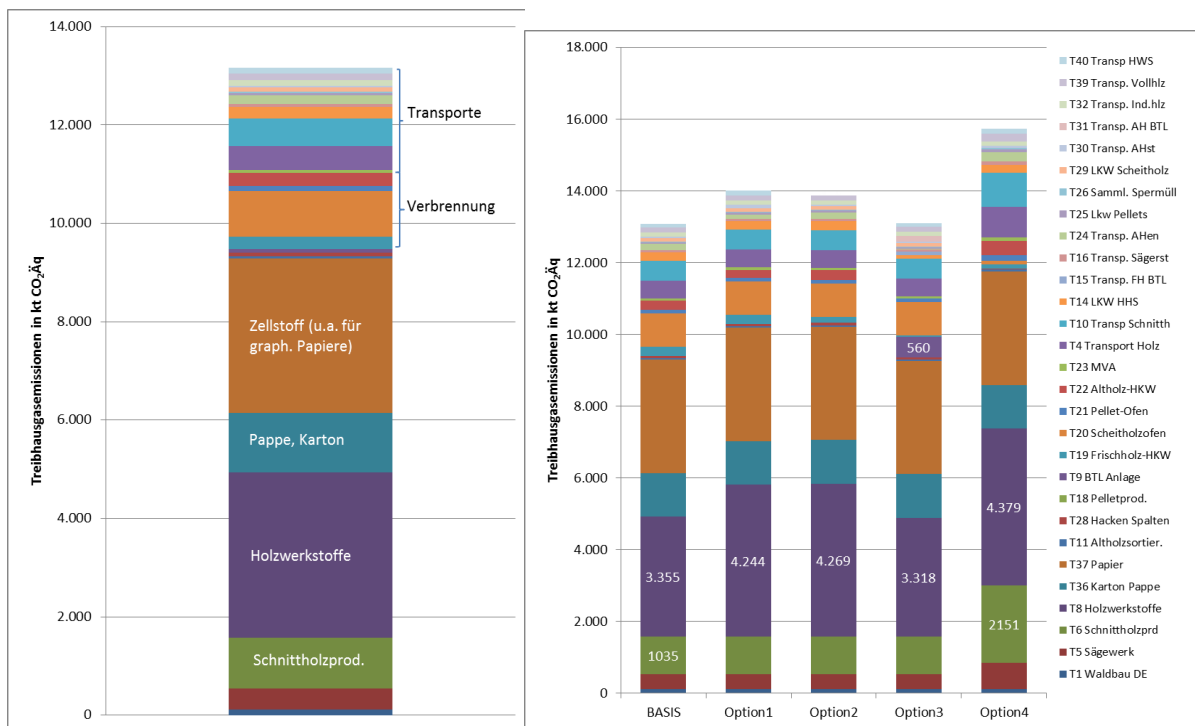
Einzelprozessanalyse auf der Basis der Treibhausgasemissionen

Im Stoffstrommodell sind ca. 30 Einzelprozesse enthalten. Zum Verständnis, welche davon welchen Anteil am Ergebnis einnehmen zeigt Abbildung 21 exemplarisch für die Treibhausgasemissionen eine entsprechende Analyse. In der linken Hälfte des Diagramms sind die Emissionen für das Basisszenario der Holzwirtschaft in Deutschland nach den einzelnen Modulen aufgeschlüsselt. Die Gesamtsumme der Holzwirtschaft in Deutschland beträgt danach ca. **13 Mio. t CO₂Äq** im Jahr, am stärksten daran beteiligt: Zellstoffprodukte (Papier, Pappe) und die Holzwerkstoffe.

¹⁶ Nach: http://www.stahl-online.de/index.php/statistiken/2/#stahlmarkt_d : 31 % der Gesamtstahlproduktion von 42,7 Mio. t zählen zum Baustahl

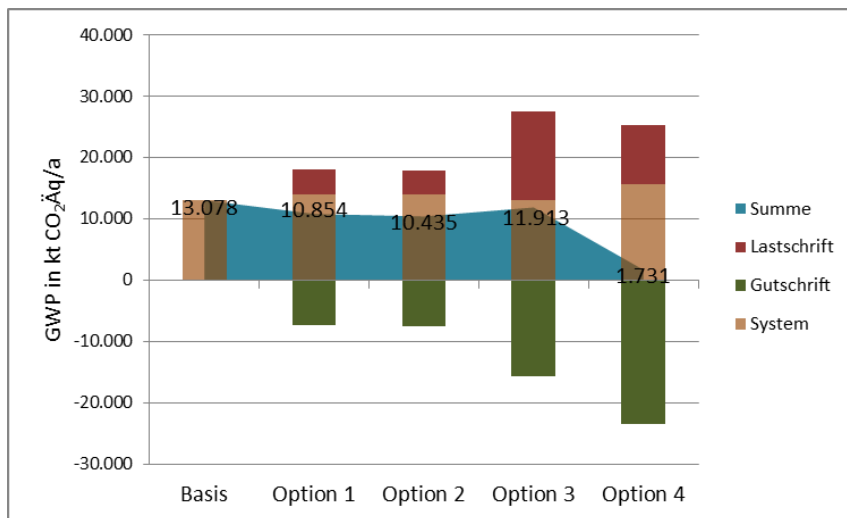
Wie sich in den vier Vergleichsoptionen die Ergebnisse verschieben, ist in der rechten Hälfte der Grafik dargestellt. Die Erhöhung des Anteils an Holzwerkstoffprodukten in den Optionen 1 und 2 (hier Spanplatten durch den zusätzlichen Altholzinput bzw. Umlenkung von Energieholz) führt zu entsprechend 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 21 Ergebnis zu Treibhausgasemissionen (GWP100) für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft in Deutschland im Basisszenario (links) und im Vergleich mit den Optionen 1 bis 4



Rechnet man den Balken der Optionen zur Herstellung von Nutzengleichheit die entsprechenden Gut- und Lastschriften hinzu (Abbildung 22), ergeben sich für Optionen bessere Netto-Ergebnisse gegenüber der Basis. Deutlich am besten schneidet dabei Option 4 ab.

Abbildung 22 Ergebnis zu Treibhausemissionen (GWP100) für den Gesamtstoff der Holzwirtschaft inklusive der Gut- und Lastschriften für das Basisszenario und die Optionen 1 bis 4



Gesamtergebnis auf normierter Basis

Mit Blick auf alle betrachteten Wirkungskategorien wiederholt sich in den meisten Fällen das Bild des Vorteils aller Optionen gegenüber der Basis. 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.

Abbildung 23 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 24 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.

Die Frage der Ressourceneffizienz

In Anbetracht der Aufgabenstellung des Forschungsprojekts sollte die Kategorie „Ressourcenschonung“ besondere Beachtung finden. Da jedoch bei der Definition der Optionen die Holzentnahme aus dem Wald (70 Mio. t) über alle Varianten gleichgehalten ist, ergeben sich für den Indikator *biotischer Kumulierter Rohstoffaufwand* (KRA_{bio}) keine Unterschiede (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24).

Das Bild würde jedoch anders aussehen, 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 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. Diese Zahlen machen deutlich, dass der Effekt auf die Ressourceneffizienz überaus signifikant ist.

Abbildung 23 Unterschiede der Optionen 1 bis 4 gegenüber der Basis normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – negative Werte bedeutet Vorteil für die Option.

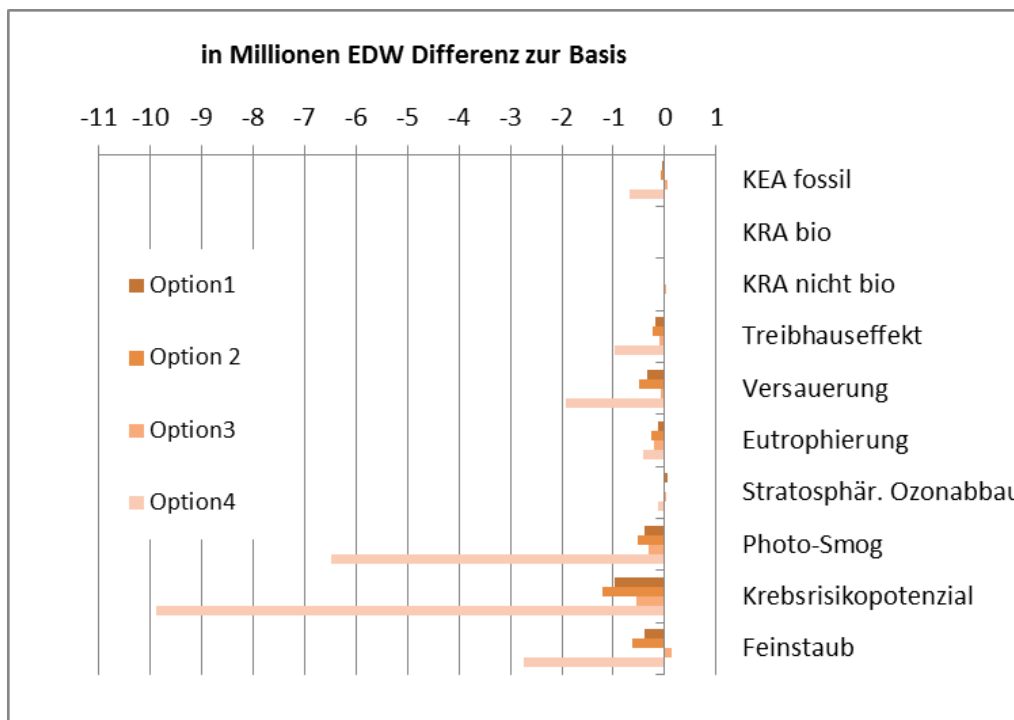
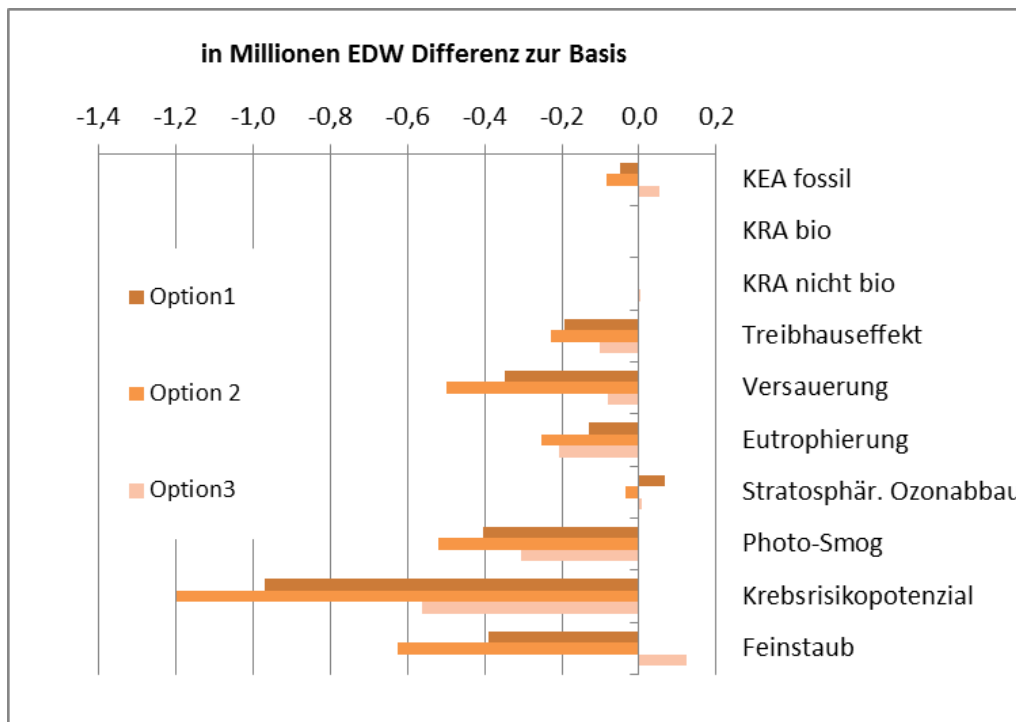


Abbildung 24 Unterschiede der Optionen 1 bis 3 gegenüber der Basis normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – negative Werte bedeutet Vorteil für die Option.



5.3.4 Fazit zur Holzkaskade

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 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 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.

5.4 Papierkaskaden

Während bei Holz ein hoher Prozentanteil direkt als aus dem Wald entnommen energetisch genutzt wird, stellt die Produktion von 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.).

5.4.1 Bewertete Optionen der Papierkaskade

Anders als beim vorausgehenden Beispiel Holz, für welches die Gesamtbranche modelliert wurde, werden für das Beispiel Papier allein die Unterschiede von ein- bis mehrstufigen Kaskaden herausgearbeitet. 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 werden hier ein- bis mehrstufige Kaskadenlinien modelliert.

Alle Optionen starten mit der Papierherstellung aus Frischzellstoff nach dem Kraft-Prozess (Funktionelle Einheit = 1 kg Kraftpapier aus Primärfaser).

Option 1: einstufige Kaskade

Hier wird nach der Nutzungsphase eine direkte energetische Verwertung angenommen, Recycling findet nicht statt.

Option 2: zweistufige Kaskade

Das aus der ersten Stufe gesammelte Altpapier wird einem Recycling zu graphischen Papier zugeführt und nach der zweiten Nutzungsphase und energetisch verwertet.

Option 3: dreistufige Kaskade

Hier wird nach der Nutzung als Recycling-Papier eine weitere Kaskade mit der Produktion von Wellpappe eingefügt. Diese wird dann nach der Nutzung energetisch verwertet.

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.

5.4.2 Ergebnisse der Ökobilanz der Papierkaskaden

Gesamtergebnis auf normierter Basis

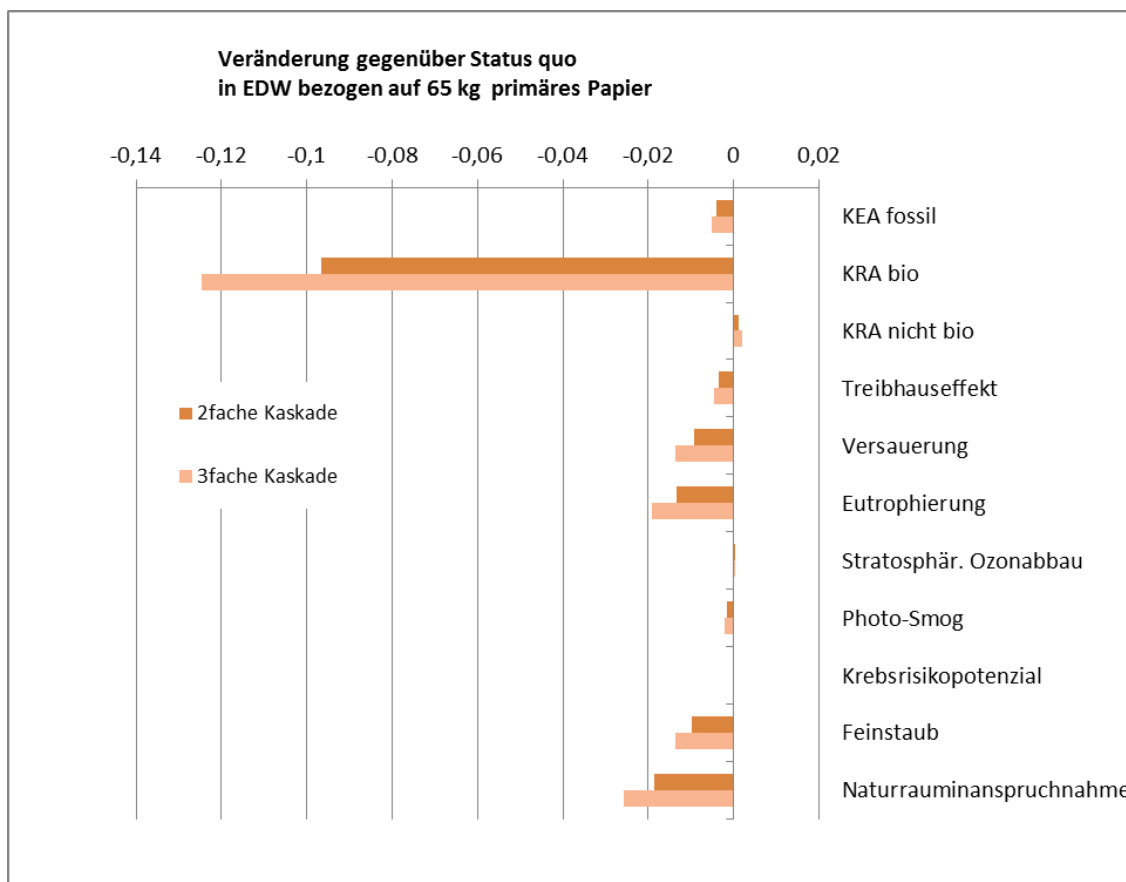
Die Ergebnisse zeigen in deutlicher Weise den ökobilanziellen Vorteil der Kaskadennutzung von Papier, der sich hier erhöht, je häufiger das Material in Kaskade geführt wird. Damit wird der ökologische Nutzen der bereits im großen Umfang umgesetzten Kaskadennutzung bei Papier nochmals unterstrichen. Bemühungen,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

Für die Normierung werden die Zahlen des Verbands der Papierfabriken, wonach der Gesamtverbrauch an Papier und Zellstoffprodukten bei 20,5 Mio. Tonnen im Jahr 2015 und die Recyclingquote bei 74 % liegt, herangezogen (VDP 2016). Damit ergeben sich pro Kopf und Jahr 250 kg an Gesamtverbrauchsmenge und 65 kg als der auf Basis zugeführten Frischzellstoffs hergestellte Anteil.

Abbildung 25 zeigt nun die Differenz in den auf 65 kg Frischpapier normierten Ergebnissen der Wirkungsabschätzung der Optionen 2 und 3 gegenüber der einstufigen Option 1. Die Grafik zeigt somit das Potenzial an ökologischer Veränderung, würde man für diese Menge nochmals die Kaskadenzahl erhöhen. Natürlich unterliegt diese Betrachtung einer extremen Sichtweise, weil aus Qualitätsgründen ein Mindestanteil an Frischzellstoff dem Markt an PPK-Produkten zugeführt werden muss.

Die Größenordnung der Zahlen drückt aus, wie groß der Einfluss des Umfangs an Recycling im Papierbereich auf die persönliche Umweltlast pro Person ist. Ein Wert von minus 0,02 EDW bei der Eutrophierung für Option 3 bedeutet somit, dass weitere zwei Kaskadenstufen für den bisher nicht recycelten Anteil in der Verbesserung der persönlichen Umweltbilanz einer Person um 2 % niederschlagen würden. Dieser Effekt beruht auf den bereits erwähnten hohen spezifischen Phosphatfrachten über den Abwasserstrom der Primärzellstoffherstellung. Beim Rohstoffindikator KRA_{bio} ist das Potenzial noch bedeutsamer: bei nur einer weiteren Kaskadenschleife lässt sich die spezifische Gesamtlast bezüglich Biomasseverbrauch um nahezu 10 % reduzieren. Mit großen Beiträgen sind außerdem die Naturrauminanspruchnahme, die Versauerung und der Feinstaub verbunden. Bei der Naturrauminanspruchnahme zeigt sich ebenfalls die erhebliche Entlastung, die sich durch die mehrfache Kaskadenführung ergibt

Abbildung 25 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; 0,1 EDW ist gleichbedeutend mit 10 % spezifischer Last



5.4.3 Fazit zur Papierkaskade

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 stellen bereits einen hohen Standard dar und ist als beispielhaft für eine erfolgreiche Kaskadennutzung zu sehen.
 - ▶ Eine weitere Optimierung dieser bereits heute als erfolgreich zu wertenden Kaskadennutzung kann im Rahmen des technisch Möglichen und logistisch Sinnvollen die Ressourceneffizienz weiter erhöhen.
 - ▶ 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 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.

5.5 Textilkaskaden

Das Fallbeispiel konzentriert sich auf den Rohstoff Baumwolle, die mit Abstand bedeutendsten Naturfaser. Auch wird eine Übersichtsökobilanz erstellt und verschiedene Optionen der Nutzung von Alttextilien bewertet auf der Basis der verbrauchsüblichen Menge an Baumwolltextilien. Wie beim Beispiel Papier stellen auch die Textilien gemäß der im Rahmen dieses Projekts formulierten Definition vom Prinzip her immer eine Kaskadennutzung dar.

5.5.1 Bewertete Optionen der Textilkaskade

Ziel dieser Bewertung ist die Reduktion des Verbrauchs des als ökologisch kritisch bewerteten Rohstoffs Baumwolle. Aus diesem Grunde wurden keine Varianten zur Nutzung von Alttextilien in Sektoren, in welchen keine Neu-Textilien ersetzt werden, betrachtet (z.B. Dämmstoffe, diese ersetzen mineralische Dämmstoffe aber nicht Baumwollprodukte). Als funktionale Einheit bildet die Herstellung eines Baumwoll-T-Shirts den Ausgangspunkt für alle betrachteten Optionen.

Die Systemgrenze umfasst alle wesentlichen Lebenswegabschnitte mit Ausnahme der Nutzungsphase der jeweiligen Produkte. Der Anbau der Baumwolle und die Verarbeitung zu einem T-Shirt erfolgt in China. Die Optionen werden nach der ersten Nutzungsphase unterschieden in:

Option 1: die direkte energetische Verwertung von Alttextilien

Entsorgung in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) in Deutschland mit Erzeugung von Strom und Wärme.

Option 2: Die Wiederverwendung als Second-hand-Kleidung:

Hierbei handelt es sich nicht als eine Kaskadennutzung im Sinne der Projekt-Definition, vielmehr soll mit diesem Beispiel eine der wichtigsten gebräuchlichen Optionen für Alttextilien einbezogen werden. Durch die Verlängerung der Nutzungsdauer wird die Substitution eines neuen T-Shirts unter Anrechnung eines Äquivalenzfaktors von 0,6 angesetzt. Am Ende des Lebenswegs steht auch hier die energetische Verwertung.

Option 3: Recycling zu Putzlappen

Die aus den T-Shirts hergestellten Putzlappen ersetzen aus neuer Baumwolle in China hergestellte Industrieputzlappen. Bei dieser Kaskadennutzung handelt es sich ebenfalls um eine verbreitete Praxis (nach Korolkow (2015) für 21 % der Alttextilien). Am Ende der Nutzung findet auch hier eine energetische Verwertung statt.

Option 4: 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); Bei diesem Verfahren 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 stellen die Flusenrückstände somit stoffliche Verluste dar, für die – anders als das aus den Fasern erzeugte Kaskadenprodukt – keine energetische Verwertung erfolgt.

Bei dieser Option 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 für mehrfache Kaskadennutzung analog zum Faserrecycling bei Papier aufweist, soll sie hier mit betrachtet werden. Die Belastbarkeit der Datengrundlage ist hier jedoch eingeschränkt

Referenzsysteme

Wie bereits erwähnt, wird im Falle von Wiederverwendung und stofflicher Nutzung die Substitution von äquivalenten Baumwollprodukten berücksichtigt. Bei der abschließenden thermischen Verwertung in einer MVA wird der jeweilige Energiemix gegen gerechnet.

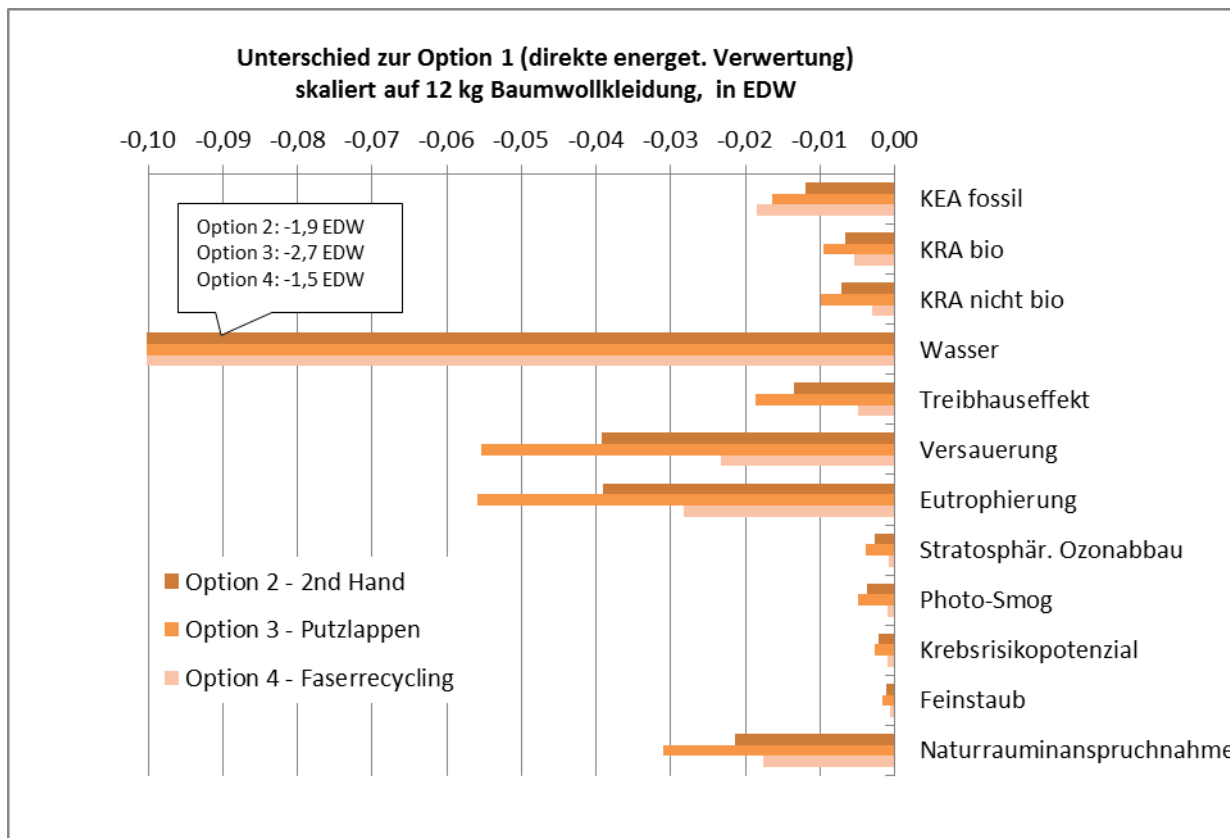
5.5.2 Ökobilanzergebnisse der Textilkaskade

Gesamtergebnis auf normierter Basis

Die Normierung erfolgt auf den Jahresverbrauch an Textilien und damit der durchschnittlichen Verbrauchsmenge von 12 kg Bekleidungstextilien pro Kopf (Korolkow 2015) hochgerechnet, das entspricht etwa 80 T-Shirts. In Abbildung 26 werden die normierten Unterschiede der drei verschiedenen Mehrfachnutzungen (Optionen 2 bis 4) zur direkten Verbrennung (Option 1) dargestellt. Die Negativwerte drücken Entlastungen aus. Der Wert von minus 0,02 EDW der Option 3 beim Treibhauseffekt bedeutet, dass mit der Kaskadennutzung als Putzlappen gegenüber der direkten die Klimabilanz die spezifische Klimabilanz um 2 % verbessert werden kann.¹⁷

¹⁷ Diese Betrachtung ist nur als Orientierung zu verstehen, genaue Konsummuster und persönliche CO₂-Fußabdrücke werden hierdurch nicht errechnet

Abbildung 26 Nettoergebnisse der Optionen der Textilkaskade normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW – unten ohne den Ressourcenindikator Frischwasser.



Zusätzlich zu den in Tabelle 4 aufgeführten Wirkungskategorien wird für die Textilkaskade auch die Ressource Wasser einbezogen. Das Ergebnis der Normierung bewegt sich für diesen Indikator in einer deutlich höheren Dimension als alle anderen Kategorien bzw. Indikatoren: hier reichen die Einsparungen gegenüber der einfachen Textilnutzung in Bereiche von 1,5 bis 2,7 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.

Lässt man die Ressource Wasser außen vor, so leisten die Kaskaden-Optionen gegenüber der nur einstufigen Nutzung in den Kategorien Versauerung, Eutrophierung und Naturrauminanspruchnahme die größten spezifischen Entlastungen, wie Abbildung 26 zeigt.

5.5.3 Fazit zur Textilkaskade

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.

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.

Bei den Textilien zeigt sich somit 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 Vorgehensweisen in eine stoffliche Nutzung überführt werden.
- ▶ weitere alternative Nutzungsweisen neben der zwar effizienten aber nur einstufigen 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.

5.6 Biokunststoffkaskaden

Die Ökobilanzierung von Biokunststoffkaskaden lässt sich anders als bei den vorangehenden Beispielen schwerlich auf reale Mengenströme beziehen. Hierzu sind die derzeitigen Mengen eingesetzter Biopolymere im Vergleich zu den konkurrierenden fossil basierten Produkte zu gering und die verfügbaren Daten über installierte Produktionskapazitäten, abgesetzte Marktvolumina und eingeschlagene Recyclingströme zu ungenau. 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.

Die hier zu untersuchenden Beispiele orientieren sich daher an der Frage, welches der umweltverträglichste Nutzungspfad einer definierten Ausgangsmenge an biogenem Rohstoff ist. Exemplarisch wird hierzu als Ausgangsmenge eine Tonne Zuckerrohr aus brasilianischer Produktion und der daraus gewonnenen Menge an Ethanol herangezogen. Für dieses Ethanol wird zusätzlich zur Herstellung verschiedener Biokunststoffe die direkte energetische Nutzung als Biokraftstoff mit betrachtet.

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 erforderlich¹⁸, 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.

5.6.1 Bewertete Optionen der Biokunststoffkaskaden

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). Inklusive der als Biokraftstoffvariante werden somit folgende Optionen definiert

Option 1: Bioethanol als Kraftstoff

¹⁸ 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)

Standardmäßiges Verfahren, Bioethanol aus Zuckerrohr ist der weltweit am meisten hergestellte Biokraftstoff.

Option 2a: PLA-Produkt (einstufige Kaskade)

Der „eigenständige“ Biokunststoff Polylactide (PLA) ist mit 200.000 t weltweiter Produktionskapazität (IfBB 2014) einer der wichtigsten Biokunststoffe. Es wird die Herstellung eines Verpackungsprodukts bilanziert sowie die energetische Verwertung nach der Nutzung.

Option 2b: PLA-Produkt (zweistufige Kaskade)

In Erweiterung zu Option 2a wird hier nach der ersten Nutzungsphase ein werkstoffliches Recycling im Rahmen einer Mischkunststofffraktion zur Herstellung von Palisaden eingesetzt. Am Ende erfolgt auch hier die energetische Verwertung.

Option 3a: BioPE-Produkt (einstufige Kaskade)

Der sogenannte Drop-In-Kunststoff Bio-Polyethylen (BioPE) lässt sich in die Materialströme fossiler Kunststoffe direkt einbringen. Für BioPE liegen mit PLA vergleichbare Produktionskapazitäten vor (IfBB 2014). Es wird die Herstellung eines Verpackungsprodukts bilanziert sowie die energetische Verwertung nach der Nutzung.

Option 3b: BioPE-Produkt (zweistufige Kaskade)

In Erweiterung zu Option 3a wird hier nach der ersten Nutzungsphase ein werkstoffliches Recycling im Rahmen eines stoffreinen PE-Recyclings zur Herstellung von Produkten aus primären, fossilem PE eingesetzt. Am Ende erfolgt auch hier die energetische Verwertung.

5.6.2 Ökobilanzergebnisse der Biokunststoffkaskaden

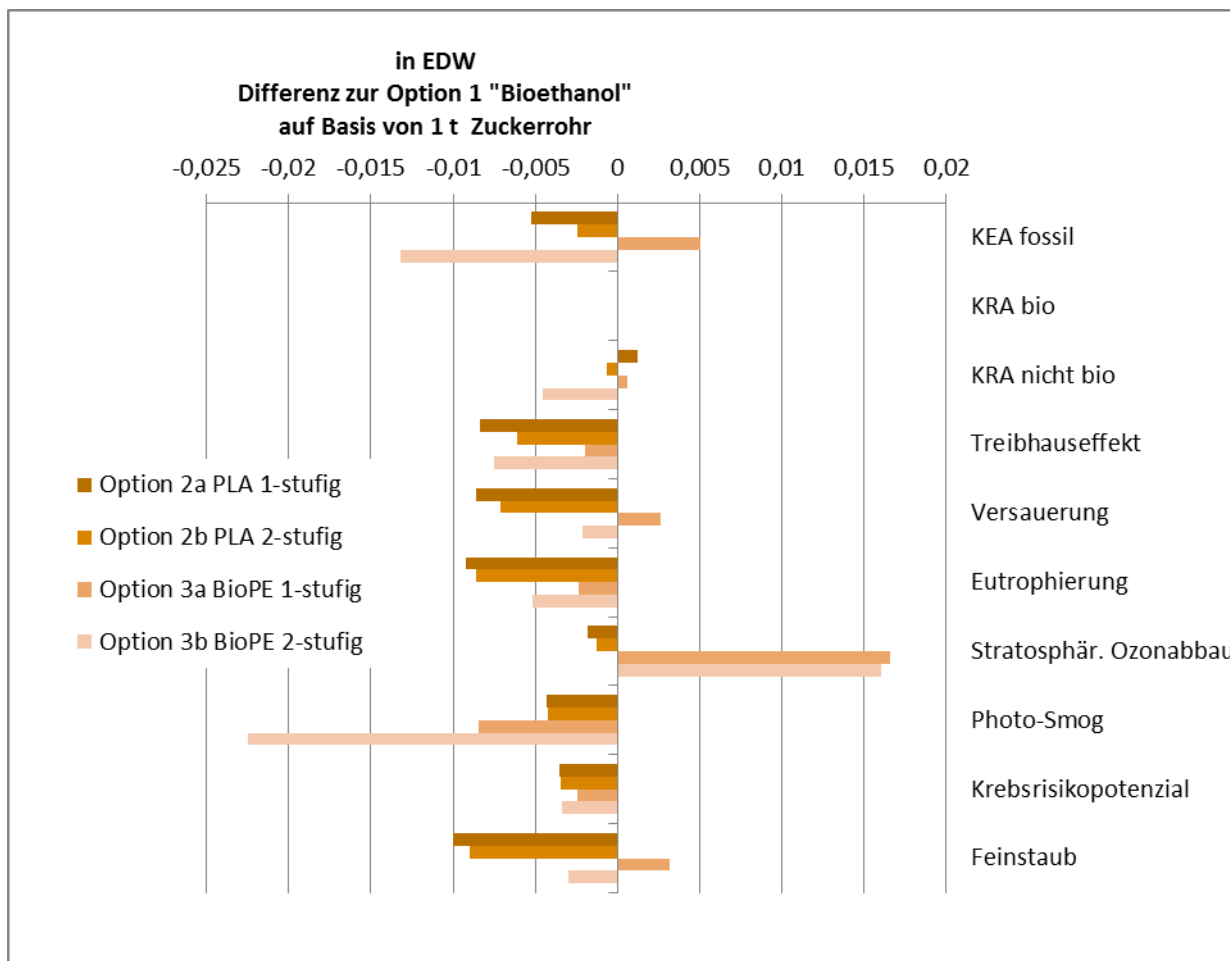
Für die Normierung wurde die Bezugsmenge ausgehend vom Anbau von 1.000 t Zuckerrohr beibehalten, da sie mit einer Biokunststoffmenge im Bereich von 50 kg korrespondiert. Der Pro-Kopf-Verbrauchsmenge an Kunststoffen in Deutschland liegt nach Zahlen von PlasticsEurope bei 120 kg im Jahr, der Verpackungsbereich nimmt davon etwa 40 kg ein (Consultic 2014). In etwa entspricht das Mengenbeispiel (1.000 t Zuckerrohr zu 50 kg Biokunststoff) daher dem Verbrauch an Verpackungskunststoff eines Bundesbürgers.

In Abbildung 27 sind die Unterschiede der Kaskaden-Optionen gegenüber der Option 1 „Bioethanol“, der direkten Nutzung der Biomasse als Energieträger dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass in den meisten Kategorien die Kaskaden-Optionen fast durchgehend im Vorteil sind. Die Vorteile liegen überwiegend im Bereich 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.

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.

Abbildung 27 Nettoergebnisse der Optionen der Biokunststoff-Kaskade normiert in Einwohnerdurchschnittswerte EDW (oben) und Differenz der Kaskaden-Optionen mit der Option „Benzin“ (unten).



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.

5.6.3 Fazit zu Biokunststoffkaskaden

Die Gesamtschau der Ergebnisse der ökobilanziellen Abschätzung der Kaskaden von Biokunststoffen lässt 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.

Aufgrund der noch geringen Anteile an Biokunststoffen im Kunststoffsektor ist die 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.

5.7 Sozioökonomische Aspekte

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

5.7.1 Soziale Aspekte

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. Als soziale Kernbereiche stellen sich der Wald mit seinen diversen sozialen Funktionen und die Wertschöpfungskette dar. Auf ersteres wird eine verstärkte Kaskadennutzung eher kaum relevante Einflüsse haben. 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 für nachhaltige Produkte 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 bietet diesen Ländern auf der einen Seite wirtschaftliche Chancen 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 und 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 jungen, dynamischen Markts für Biokunststoffe wird den bestehenden Trend zur Ausdehnung der Anbauflächen verstärken. 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.

5.7.2 Volkswirtschaftliche Aspekte

Für die in der Ökobilanz untersuchten Beispiele der Kaskadennutzung wurde die Literatur zur volkswirtschaftlichen Bedeutung ausgewertet. Die betrachteten Studien schließen grundsätzlich auf positive Eigenschaften der Kaskadennutzung bzgl. volkswirtschaftlicher Zusammenhänge. Jedoch behandelt keine der Studien die volkswirtschaftlichen Effekte systematisch für die Kaskadennutzung. In der Tat wurden entsprechende Effekte der Kaskadennutzung im Rahmen der Bioökonomie bisher nicht umfassend untersucht, weswegen auch hier keine quantifizierende volkswirtschaftliche Bewertung erfolgen kann.

Aus Sicht der klassischen Wertschöpfungsdefinition macht die positive Bewertung der Kaskadennutzung grundsätzlich 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.

5.7.3 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.

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

Positiv: 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. 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.

5.8 Fazit zur ökologischen Bewertung

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass die Kaskadennutzung in der Mehrzahl der Fälle Vorteile in nahezu allen Umweltaspekten erbringt. Eine Generalisierung ist jedoch 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.

Zusammenfassend sind vor allem zwei Faktoren für die Vorteilhaftigkeit von Biomassekaskaden relevant:

- ▶ Eine hohe Qualität der stofflich substituierten Produkte
- ▶ Die 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 ökonomische Hemmnis dar, bleiben in der Ökobilanz jedoch in der Regel unauffällig.

6 Kaskadennutzung im Rahmen eines Gesamtkonzepts der Biomassenutzung

6.1 Aufgabenstellung und Ziel

Das fünfte Arbeitspaket (AP5) mit dem Titel „Einordnung der Kaskadennutzung in ein Gesamtkonzept der Nutzung von Biomasse“ verfolgt das Ziel, die Entwicklung eines methodischen Konzepts zur Einordnung der Kaskadennutzung in ein Gesamtkonzept der Biomassenutzung in verschiedenen Strategien der Bundesregierung zu ermöglichen. Damit soll das Arbeitspaket die Möglichkeit einer Nachhaltigkeitsbewertung von Biomassekaskaden zur Einordnung in eine übergreifende Strategie der Nutzung natürlicher Ressourcen für Deutschland schaffen, sodass nationale Rohstoffstrategien hinsichtlich der untersuchten Effekte geprüft und ggf. weiterentwickelt werden können. Damit kann es für die Bundesregierung möglich werden, eine Vorreiterrolle zur richtungssicheren Umsetzung von Biomassekaskaden wahrzunehmen, zukünftige Innovationen der Biomassenutzung zu bewerten und ggf. die Verknüpfung mit einer internationalen Perspektive zu diskutieren.

Die Frage, ob ein konkreter Fall von Kaskadennutzung grundsätzlich nachhaltig und ressourceneffizient ist, ist häufig nicht einfach zu beantworten. Mit dem hier erarbeiteten Konzept wird ein Instrument vorgeschlagen, welches in Form eines „Frühwarnsystems“ für eine richtungssichere Nachhaltigkeitsbewertung konkreter Biomassekaskaden dienen kann.

Eine entscheidende Frage ist dabei, wie umfassend oder wie stark vereinfachend das Bewertungskonzept zu gestalten ist. Hierfür sind z.T. auch die Ergebnisse der vorangehenden Schritte des Projekts bestimmend. Im Verlaufe des Projekts wurden folgende grundsätzliche Anforderungen an das Konzept formuliert:

- ▶ Es soll eine Anbindung an bestehende Methoden bestehen
- ▶ Verständlichkeit, Kommunizierbarkeit und Nachvollziehbarkeit
- ▶ Multikriterielle Entscheidungsunterstützung in einem konsistenten Modell
- ▶ Bewertung soll auf zwei Ebenen möglich sein:
 - (a) Kaskadennutzung im Gesamtsystem (Makrooptimierung) oder
 - (b) im Vergleich von Alternativen (Mikrooptimierung)
- ▶ Anwendung soll auf Sektorebene wie auch für Einzelfälle möglich sein.

Da die Materie in mehrfacher Weise komplex ist (Nachhaltigkeitsbewertung an sich, Systeme der Kaskadennutzung umso mehr) wurde ein Ansatz gewählt, der mit der Auswahl an Indikatoren die ökologischen und sozioökonomischen Kernaspekte einbezieht, damit einen guten Überblick gibt, und für die Anwendung einen überschaubaren Aufwand bedeutet. Der Anwendungsbereich ist angesichts der noch frühen Phase einer Umsetzung des Kaskadengedankens primär die wissenschaftliche Beratung für eine politische Umsetzung. Damit liegt die Anwenderzielgruppe vorrangig im Bereich der Wissenschaft.

Damit kann auch ein gewisses Maß an Reflektion bei der Anwendung vorausgesetzt werden. Aufgrund der Komplexität der Aufgabenstellung wäre eine zu starke Automatisierung der Bewertung im Übrigen nicht zielführend und richtungssichere Ergebnisse nicht sichergestellt. Somit ist eine aktive Befassung mit der Materie gefordert (z.B. Recherche nach Ökobilanzergebnissen oder eigene kurze Screening-LCA, begründete Argumente zu den sozioökonomischen Indikatoren).

6.2 Entwicklung eines methodischen Konzepts

Die Entwicklung eines methodischen Konzepts zur Einordnung der Kaskadennutzung in ein Gesamtkonzept der Biomassenutzung soll deren Einordnung in verschiedene Strategien der Bundesregierung ermöglichen. Damit soll die Möglichkeit einer Nachhaltigkeitsbewertung von Biomassekaskaden zur

Einordnung in eine übergreifende Strategie der Nutzung natürlicher Ressourcen für Deutschland geschaffen werden, sodass nationale Rohstoffstrategien hinsichtlich der untersuchten Effekte geprüft und ggf. weiterentwickelt werden können. Damit kann es für die Bundesregierung möglich werden, eine Vorreiterrolle zur richtungssicheren Umsetzung von Biomassekaskaden wahrzunehmen, zukünftige Innovationen der Biomassenutzung zu bewerten und ggf. die Verknüpfung mit einer internationalen Perspektive zu diskutieren.

Zur Entwicklung des methodischen Konzeptes wurden einerseits die wissenschaftlichen Anforderungen an ein solches Bewertungskonzept vor dem Hintergrund politischer Rahmenbedingungen diskutiert. Andererseits war es v.a. bedeutsam die Anwendbarkeit zu fokussieren. Daher wurde in verschiedenen Ansätzen auch mit Experten auf einem Fachgespräch mögliche Anforderungen und Bewertungskonzepte diskutiert, die sich in ihrer Struktur und Ausprägung unterscheiden. Das gemeinschaftliche ausgewählte methodische Konzept wurde dann beispielhaft an den im Projekt untersuchten Kaskaden getestet.

6.2.1 Politische Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Überblick über die politischen Rahmenbedingungen der Kaskadennutzung von Biomasse, sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene. Um ein besseres Verständnis von der derzeitigen politischen Förderung der Kaskadennutzung zu erlangen, werden daraufhin zentrale Politikinstrumente analysiert. Die Analyse der nationalen Ebene, die hier fokussiert werden soll, basiert dabei zum größten Teil auf der ausgewählten Studie von Arnold et al. (2009). Diese wurde aktualisiert bzw. um einige Instrumente ergänzt. Die Analyse der europäischen und internationalen Ebene, die etwas kürzer gefasst ist, erfolgt nach gleichem Schema, jedoch durch eigene Recherche.

Um die Kaskadennutzung von Biomasse in die Rohstoffstrategien der Bundesregierung bzw. in ein Gesamtkonzept der Nutzung natürlicher Ressourcen einordnen zu können, werden nachfolgend zunächst aktuelle, für die Kaskadennutzung von Biomasse zentrale Politikinstrumente betrachtet. Einleitend wird dazu ein Überblick über die Politikinstrumente auf verschiedenen Ebenen gegeben. Anschließend werden zentrale Politikinstrumente auf nationaler und internationaler Ebene in Bezug auf die Kaskadennutzung von Biomasse analysiert. Dabei wird die nationale Ebene in den Fokus gestellt. Abschließend werden Herausforderungen für eine wissenschaftlich begründete Politik abgeleitet.

Überblick zu Politikinstrumenten im Mehr-Ebenen-System

Dem Bereich der Governance einer nachhaltigen Bioökonomie lassen sich viele aktuelle Politikinstrumente zuordnen. Da die Kaskadennutzung als eines der zentralen Elemente der Bioökonomie gilt, sind sie für die Darstellung eines Gesamtkonzeptes der Nutzung natürlicher Ressourcen relevant. Abbildung 28 gliedert beispielhafte Politikinstrumente in drei Ebenen, die europäische bzw. internationale Ebene, die nationale Ebene sowie die regionale bzw. lokale Ebene. Dabei lassen sich planungsrechtliche, ordnungsrechtliche, fiskalpolitische, informelle, Diffusions- und F&E-Instrumente auf allen Ebenen wiederfinden. Dem Pfeil von unten nach oben folgend, lässt sich annähernd der Grad der Verbindlichkeit der Instrumente ablesen.

Im Folgenden werden die politischen Instrumente auf allen drei Ebenen im Hinblick auf die Förderung der Kaskadennutzung analysiert.

Förderung biobasierter Produkte sind wiederum überwiegend auf Innovation, Diffusion und Forschung & Entwicklung ausgerichtet.

Fazit zu den politische Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Die im Projekt durchgeführte Analyse der nationalen sowie europäischen und internationalen Politikinstrumente mit Bezug zur Kaskadennutzung zeigt, dass zurzeit die energetische Nutzung von Biomasse vordergründig gefördert wird, die Förderung der Kaskadennutzung dagegen vernachlässigt wird. Eine evidenzbasierte Politik sollte die vermehrte Kaskadennutzung zunächst rechtfertigen und zur Entwicklung von Instrumenten oder der Implementierung in bestehende Instrumente zur Förderung der Kaskadennutzung führen (unter dem Nachweis der Nachhaltigkeit). Dabei sollte die Kaskadennutzung in eine übergeordnete Strategie der Nutzung von Biomasse integriert werden und Zielsetzungen der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie berücksichtigen, um eine richtungssichere Umsetzung von Biomassekaskaden zu gewährleisten.

6.2.2 Anforderungen an ein methodisches Konzept

Für die generell an das Bewertungskonzept zu stellenden Anforderungen, wird für die methodische Konzeption auf die von Coenen (2002) identifizierten Anforderungen an Nachhaltigkeitsindikatoren zurückgegriffen. Sie spiegeln die verschiedenen Anforderungsebenen aus Sicht der Nutzer, aus praktischer, wissenschaftlicher und funktionaler Perspektive wider (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6 Anforderungen an Nachhaltigkeitsindikatoren zur Übertragung auf Anforderungen auf das Bewertungskonzept

Anforderungen	Erläuterung
Anforderungen aus der Sicht von Nutzern	<ul style="list-style-type: none"> • Zielbezug • Adressen-adäquate Verdichtung von Information • Politische Steuerbarkeit • Verständlichkeit für Politik und Öffentlichkeit • Gesellschaftlicher Mindestkonsens über Eignung eines Indikators zur Abbildung von Zusammenhängen
Praktische Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Datenverfügbarkeit • Möglichkeit regelmäßiger Aktualisierung • Vertretbarer Aufwand der Datenbeschaffung
Wissenschaftliche Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Repräsentativität und Adäquanz bezüglich der jeweiligen ökologischen, ökonomischen, sozialen Zusammenhänge • Reproduzierbarkeit • Nachvollziehbarkeit in Aggregation und Herleitung • Datenqualität und Transparenz bei Datenunsicherheit
Funktionale Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Sensitivität gegenüber Änderungen im Zeitablauf • Frühwarnfunktion • Internationale Kompatibilität • Sensitivität unter ökonomischen, ökologischen und sozialen Wechselwirkungen

Quelle: Coenen (2002: 6), eigene Übersetzung

Auf die nutzerbezogenen und funktionalen Anforderungen wird im Folgenden weiter eingegangen.

Nutzerbezogene Anforderungen:

- ▶ Es braucht einen klaren Zielbezug. Hierzu dienen die oben beschriebenen Zielsysteme, die aber aufgrund des Charakters des Nachhaltigkeitsleitbildes nicht ohne Konfliktlinien sind. Riesner (2010) zeigt beispielhaft, dass z.B. "Gerechtigkeit" verschieden interpretiert wird, generell eine Ausprägung von schwacher oder starker Nachhaltigkeit eine Rolle spielt, die verschiedenen Nachhaltigkeitsdimensionen unterschiedlich gewichtet werden, die Bedeutung von Wachstum als zentrales Ziel nicht eindeutig bestimmt ist.

- ▶ Es braucht eine adäquate Verdichtung von Informationen je nach Adressat. Derzeit gibt es jedoch keinen Indikator, der alle idealtypischen Anforderungen erfüllt bzw. ist die Aggregation (Verdichtung) zwar wünschenswert, aber oft nicht möglich. Ein Indikator, der zur Kommunikation an die Öffentlichkeit gerichtet ist, benötigt eine stärkere Verdichtung als ein an die Wissenschaft gerichteter Indikator. (vgl. Coenen 2002)
- ▶ Aus Sicht der Nutzer gilt es daher auch Prinzipien zur Vermeidung von Nutzungskonflikten bzw. den Umgang mit divergierenden Aussagen der verschiedenen Indikatoren zu formulieren.

Die funktionalen Anforderungen an das Bewertungskonzept lassen sich anhand der im vorherigen Kapitel dargestellten politischen Rahmenbedingungen und Herausforderungen aufzeigen:

- ▶ Das Bewertungskonzept muss anschlussfähig an die bestehende politische Rahmensetzung sein und es bedarf im Sinne einer evidenzbasierten Politik eines Zusammenwirkens von Politik und Wissenschaft
- ▶ Es bedarf einer Politikintegration, um die internationale Kompatibilität als auch die Wechselwirkungen zwischen den ökologischen, sozialen und ökonomischen Wirkdimensionen abzubilden

Diese Anforderungen wurden auf dem Fachgespräch "Einordnung der Kaskadennutzung in ein Gesamtkonzept der Nutzung von Biomasse" (4. November 2015) mit Experten diskutiert und eine Priorisierung für die Anforderungen an das methodische Konzept diskutiert. Die Diskussion der Frage "Welche Anforderungen an ein Konzept zur Bewertung von Biomassennutzungspfaden sind aus Ihrer Sicht die relevantesten?" ergab die folgende Zusammenfassung:

- ▶ Ziel der Bewertungsmethodik herausstellen
 - Zielgruppen definieren: Die Wirksamkeit muss für Verbraucher deutlich sein.
 - Zeitpunkt der Bewertung klären (ex ante / ex post)
 - Sensitivitäten auch über die Zeit abbilden
 - Umgang mit Unsicherheiten darstellen
- ▶ Kein Methodenmix, es sollte ein konsistentes Modell entwickelt werden; Einbindung in bestehende Methoden
- ▶ Betrachtung sollte global sein, sodass sich nationale Betrachtungen in globale Fragen einordnen lassen
 - Wirkung auf Ökosysteme
 - Es sollten auch Potenziale betrachtet werden
 - Referenzsysteme - Trends sichtbar machen
 - Nachfrage einordnen in globalen Konsum / Gerechtigkeit
- ▶ Frühwarnfunktion
 - für Politik
 - Steuerungsfunktion
 - Internationale Kompatibilität
- ▶ Verständlichkeit, Kommunizierbarkeit und Nachvollziehbarkeit

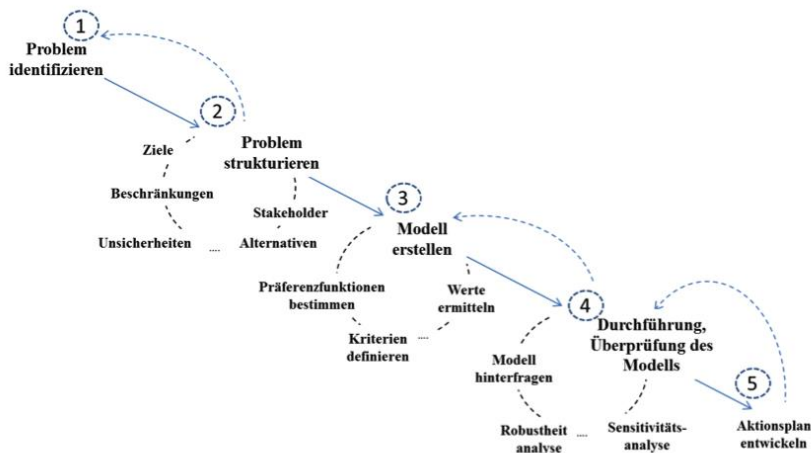
Die auf dem Fachgespräch diskutierten Anforderungen wurden in die Entwicklung des methodischen Konzepts integriert.

6.2.3 Untersuchte Ansätze

Ansatz: Methodik der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung

Die Entwicklung des methodischen Bewertungskonzeptes orientierte sich an den Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (engl. Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA). Im Folgenden werden die grundlegenden Überlegungen für diesen Ansatz dargestellt.

Abbildung 29 Multikriterielle Entscheidungsunterstützung



Ansatz: Paarweiser Vergleich zur Optimierung von Biomasse- und Kaskadennutzung

Ein umfassender Ansatz, der für die Entwicklung des methodischen Konzeptes zur Bewertung diskutiert wurde, ist das Schema zur Ermittlung der optimalen Nutzungsform eines Rohstoffs durch paarweisen Vergleich. Die Optimierung der Biomasse- und Kaskadennutzung kann anhand der dargestellten Entscheidungsmatrix systematisch abgefragt werden. Es handelt sich um eine schematische Bewertungsmethodik in den folgenden drei Schritten (Abbildung 30):

1. Auswahl nachhaltiger Rohstoffe
2. Optimierung der Rohstoffproduktion
3. Auswahl der optimalen Nutzungsform

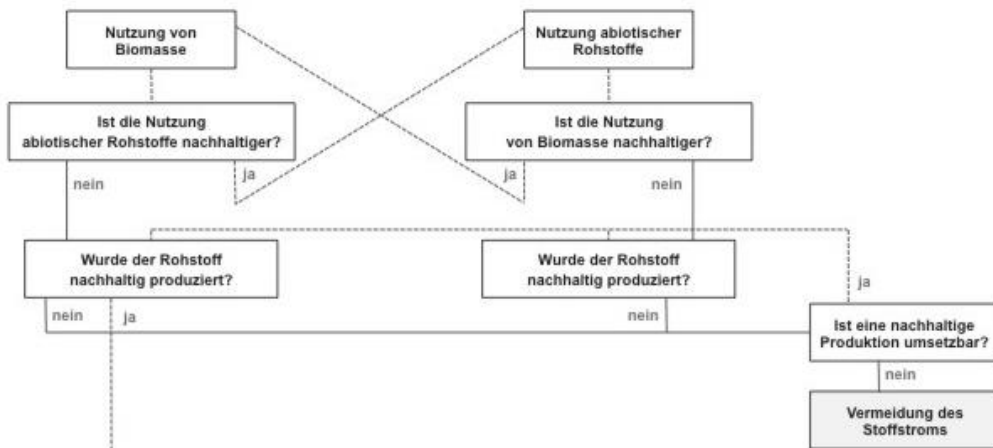
Hierbei führt die Bewertungsmethodik zu drei möglichen Ergebnissen:

- a) Nachhaltige Kaskadennutzung eines Rohstoffs mit zwei oder mehr Nutzungen.
- b) Nachhaltige Nutzung des Rohstoffs ohne Kaskadennutzung.
- c) Vermeidung des Stoffstroms, wenn weder (a) noch (b) zutrifft.

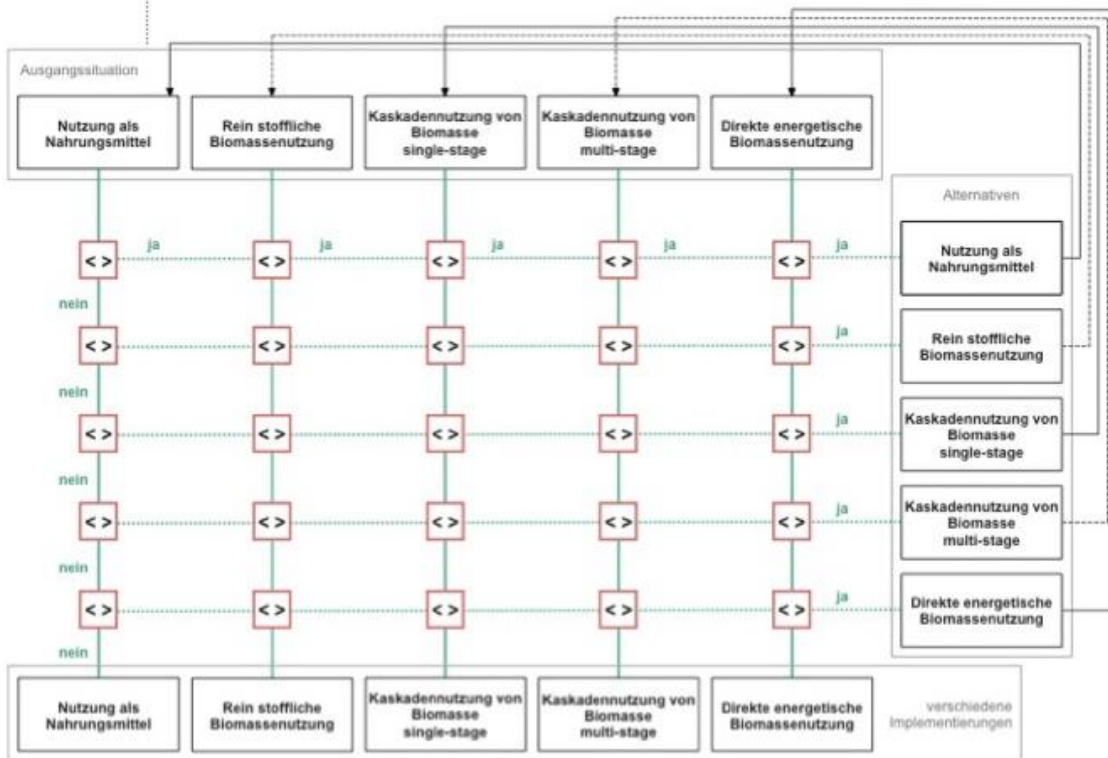
Prinzipiell ist die iterative Prüfung zur weiteren Optimierung der Biomasse- bzw. Kaskadennutzung mit zeitlichem Abstand notwendig, um Kaskaden zu entwickeln, zu optimieren oder die Rohstoffe nachhaltiger zu nutzen.

Abbildung 30 Paarweiser Vergleich zur Optimierung von Biomasse- und Kaskadennutzung

Optimierung der Rohstoffwahl- und -produktion



Optimierung von Biomasse- und Kaskadennutzung



<> **Paarweiser Vergleich** anhand zweier Fragen

Ist die alternative Nutzung technisch-ökonomisch umsetzbar?
 Ist die alternative Nutzung nachhaltiger als die vorherige Nutzung?

ja = beide Fragen werden mit „ja“ beantwortet
nein = eine oder beide Fragen werden mit „nein“ beantwortet

6.2.4 Schlussfolgerungen für die Wahl eines angepassten Ansatzes

Für die Herleitung möglicher Indikatoren wurden vorhandene Indikatoren- und Messsysteme abgeglichen, um zu einem die Schnittstellen zu bestehenden politischen Programme und Strategien aufzuzeigen (siehe Tabelle 7). Damit können auch die Ergebnisse aus AP4 und die verwendete Methodik der Ökobilanz nutzbar gemacht werden. Aus der Gesamtmatrix wurde in einem ersten Schritt einem Kriterienkatalog von sechs ökologischen und vier gesellschaftlichen Kategorien ausgewählt. Grundsätzlich ist die Berücksichtigung weiterer Bewertungskategorien möglich.

Die Auswahl differenziert zwischen heutigen und zukünftigen Wirkungen und bezieht hierzu verschiedene Wirkebenen von regional (Bereitstellung und Nutzung in der Region), national (bzw. gemeinsamer Wirtschaftsraum großräumig) bis zum globalen Kontext ein.

Die Zielvorgabe eines „Frühwarnsystems“ erfordert eine Konzentration auf die wesentlichen negativen Wirkungen, Datenlücken und Einschränkungen der positiven Wirkungen. Eine automatisierte Klassifizierung anhand eines komplexeren und dynamisierten Konzepts scheidet anhand der zu hohen Vielfalt und Komplexität des Kaskadenkontexts und der tatsächlichen Kaskaden aus.

Die Vorgehensweise bei der Bewertung kann daher keine quantifizierende (und schon gar nicht eine aggregierte) Rechenfunktion sein, sondern basiert auch qualitativen Klassen mit gestaffelten Wertungen wie „positiver Effekt“, „neutral“, negativer Effekt“ usw.

Von Wichtigkeit sind die transparente Darstellung von Datenlücken sowie die Angabe der jeweiligen Quellen und die Begründung für die Bewertungen.

Tabelle 7 Schnittstellen zwischen Indikatoren(bereichen) der Nachhaltigkeitsstrategie und ökobilanzieller Betrachtungen

Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (alt)*		Wirkungskategorien AP4												
Indikatorenbereiche	Indikatoren	Ressourcen (KEA fossil+nukl.)	Ressourcen (KRA bio)	Ressourcen (KRA abiot.)	Treibhauseffekt	Versauerung	Eutrophierung, terr.	Strat. Ozonabbau	Photo-Smog	Krebsrisikopotenzial	Feinstaub	Naturraum (bewertet)	Naturraum (unbewertet)	Anmerkung
Ressourcenschonung	1a Energieproduktivität	o												
	1b Primärenergieverbrauch	o												
	1c Rohstoffproduktivität			x										
Biomasse	kein Indikator		x											Qualitätsanforderungen an die Biomasserohstoffe sind hier relevant
Klimaschutz	2 Treibhausgasemissionen				x									
Erneuerbare Energien	3a Anteil EE am Endenergieverbrauch	o												
	3b Anteil Strom aus EE am Stromverbrauch	o												
Flächeninanspruchnahme	4 Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche											o	o	Was ist mit indirekten Landnutzungsänderungen (ILUC)
Artenvielfalt	5 Artenvielfalt und Landschaftsqualität (2015=100)											?	?	Einflüsse auf die Biodiversität: Habitatveränderungen Klimawandel Gebietsfremde Arten (Neobiota) Übernutzung Emissionen und Immissionen
Wirtschaftliche Leistungsfähigkeit	10 BIP je Einwohner (Preise von 2010 in 1000 Euro)													
Landbewirtschaftung	12a Stickstoffüberschuss 3JD (kg/ha landw. gen.)						o							Eutrophierung als Hilfsgröße

6.3 Das Bewertungskonzept

Das Konzept ist als multikriterielle Bewertungsmatrix ausgestaltet. Es beinhaltet einen Block mit ökologischen und einen mit sozioökonomischen Indikatoren. Die Bewertung einer Kaskadenoption erfolgt dabei stets mit einer anderen Biomassenutzungsoption (Referenz), die entweder einen Status quo oder einen definierte Fall von „nicht-Kaskade“ beschreibt.

Im Beispiel der Biokunststoffe wurden die Kaskaden mit der Nutzung der Anbaubiomasse zu Bioethanol als Kraftstoff verglichen. Im Beispiel Holz dagegen wurde der Status quo der Holznutzung zu Grunde gelegt.

Die Einstufung erfolgt anhand einer 5-stufigen ordinalen Werteskala mit folgender Ausgestaltung: „Im Vergleich zum Referenzfall (Status quo oder ohne Kaskade) weist die bewertete Option

- ▶ einen herausragend positiven Effekt auf
- ▶ einen positiven Effekt auf
- ▶ weder einen positiven noch negativen Effekt auf, sie verhält sich neutral
- ▶ einen negativen Effekt auf
- ▶ einen stark negativen Effekt auf“

2
1
0
-1
-2

Von zentraler Wichtigkeit ist die Transparenz der Vorgehensweise beim Einstufen und deren Begründung. Daher ist der Methode eine Einstufungsanleitung beigelegt, welche Orientierung gibt, ab wann die Bewertung „2“ gerechtfertigt ist oder unter welchen Aspekten eine „-1“ zu vergeben wäre (siehe Tabelle 8 und Tabelle 9). Es bleibt dabei Handlungsspielraum für die Anwender, die jeden Wert argumentativ begründen müssen. So ist die Vergabe eines -1-Werts beispielsweise auch im Falle einer naheliegenden Vermutung, die begründet aber nicht nachgewiesen sein muss, sinnvoll, um einen Warnhinweis zu geben, der durch vertiefte Nachprüfung zu bestätigen oder zu widerlegen wäre.

Die ausgewählten ökologischen und sozioökonomischen Indikatoren werden nachfolgend aufgeführt. Dabei wird auch die jeweilige Einstufungsanleitung pro Indikator in die Wertklassen +2 bis -2 dargelegt.

6.3.1 Ökologische Indikatoren

Für die Bewertung der Umweltseite sind drei Indikatoren zur Beschreibung von **Ressourceneffizienz** sowie jeweils ein Indikator zu **Klimaschutz**, **Eutrophierung** und **Naturraum** (Biodiversität) definiert.

Als Ressourcenindikatoren gelten:

- ▶ Der quantitative Kaskadeneffekt, der ausdrücken soll, in welchem Umfang der Biomasserohstoff so lange, so häufig und so effizient wie möglich genutzt wird; er wird in diesem Vorschlag durch den **Biomass Utilization Factor (BUF)** zum Ausdruck gebracht, der bereits in Abschnitt 2 beschrieben worden ist.
- ▶ Die Einsparung oder der Mehrverbrauch an nicht erneuerbare Energieträgern, ausgedrückt durch den **Kumulierten Energieaufwand (KEA_{fossil/nuklear})**
- ▶ Die Einsparung oder der Mehrverbrauch an biogenem Rohstoff, ausgedrückt durch den biogenen **Kumulierten Rohstoffaufwand (KRA_{bio})**

Die Indikatorergebnisse zu Klimaschutz (Treibhausgasemissionen), Eutrophierung (Freisetzung von N- und P-Verbindungen) sowie Naturrauminanspruchnahme (über das Hemerobiekonzept auch als Information über Biodiversität) werden wie der KEA_{fossil/nuklear} und der KRA_{bio} aus Ökobilanzergebnissen entnommen werden, wie sie im Rahmen dieses Projekts durch die Arbeiten in AP 4 (siehe Abschnitt 5) vorliegen.

In Tabelle 8 wird dargestellt, wie Einstufung je Indikator in die Wertklassen +2 bis -2 erfolgt.

Tabelle 8 Einstufungsanleitung für die einzelnen ökologischen Indikatoren in die Wertklassen +2 bis -2

Indikator	Einstufungsanleitung: alle Angaben verstehen sich im Vergleich gegenüber dem Referenzsystem (Status quo oder keine Kaskade)	Klasse
Ressourceneffizienz	Kaskadeneffekt: BUF	+2
		+1
		0
		-1
		-2
	Verbrauch nicht erneuerbare Energie: KEA _{fossil+nuklear}	+2
		+1
		0
		-1
		-2
	Ressource Biomasse: KRA _{bio}	+2
		+1
		0
		-1
		-2
Klimaschutz: (GWP in CO ₂ -Äq.)	+2	
	+1	
	0	
	-1	
	-2	
Eutrophierung (in PO ₄ ³⁺ -Äq.)	+2	
	+1	
	0	
	-1	
	-2	
Naturraum: (Biodiversität) z.B. gemessen in Naturfernepotenzial (NFP), anderen anerkannten Indikatoren	+2	
	+1	
	0	
	-1	
	-2	

6.3.2 Sozioökonomische Indikatoren

Für die Bewertung sozioökonomischer Aspekte sind folgende vier Indikatoren zur Beschreibung definiert:

- ▶ **Produktqualität:**
Das schließt zum einen generell die materielle Qualität aufgrund von verstärkter Nutzung von rezykliertem Material ein, im Speziellen auch die Frage von Schadstoffanreicherungen.
- ▶ **Ernährungssicherung:**
Hier geht es um Agrarrohstoffe und die Vermeidung von Konkurrenzen zur Nahrungsmittelproduktion; andere Rohstoffe wie Holz sind hier neutral zu werten.

► **Gesellschaftliche Wahrnehmung**

Die Umsetzung neuer Produktionsweisen oder neuer Produkte kann von der Gesellschaft in unterschiedlicher Weise und Intensität aufgenommen werden, wobei die Gesellschaft hier als Komplex aus Stakeholdern und Konsumenten zu verstehen ist.

► **Politische Rahmenbedingungen**

Sofern die Randbedingungen nicht bereits positiv sind, erfordern Umsetzungen in der Regel politische Flankierung. Diese kann aufwändig sein oder im Konflikt stehen mit anderen politischen Zielsetzungen oder Randbedingungen.

Anders als bei den Umweltindikatoren lassen sich in der Regel keine quantifizierte Ökobilanzdaten heranziehen. Daher sind diese Indikatoren anhand von Leitfragen zu beantworten. Sie sind in Tabelle 9 gleich mit der jeweiligen Einstufungsanleitung in die Werteklassen aufgeführt.

Tabelle 9 Einstufungsanleitung für die einzelnen sozioökonomischen Indikatoren in die Wertklassen +2 bis -2

Indikator	Leitfragen	Einstufungsanleitung: alle Angaben verstehen sich im Vergleich gegenüber dem Referenzsystem (Status quo oder keine Kaskade)	Klasse
Produktqualität	Gibt es eine Schadstoffanreicherung in Produkten? Gibt es Einfluss auf andere Qualitätsfaktoren?	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Schadstoffanreicherung ausgeschlossen, weitere Faktoren zur Qualitätsverbesserung gegeben. ▶ Sind definitiv auszuschließen, weitere Faktoren zur Qualitätsverbesserung möglich. ▶ keine nennenswerte Erhöhung zu erwarten ▶ Sind nicht ausgeschlossen, gewisse Erhöhungen zu vermuten ▶ Sind nachgewiesen, Grenzwertüberschreitungen 	+2
			+1
			0
			-1
			-2
Ernährungssicherung	Bestehen hier Konflikte, werden solche durch die Option gegenüber Status quo gemindert?	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Trägt direkt bei zur Unterstützung der Nahrungsmittelproduktion, z.B. Nutzung degradierter /kontaminierter Flächen ▶ Verminderung bestehender Konkurrenz mit Nahrungsmittelproduktion durch Reduktion des agrar. Rohstoffbedarfs ▶ Keine Konkurrenz mit Nahrungsmittelproduktion ▶ Konflikte mit Ernährungssicherung nicht ausgeschlossen ▶ Klare Konflikte mit Ernährungssicherung 	+2
			+1
			0
			-1
			-2
Gesellschaftliche Wahrnehmung	Wird diese Option in der Gesellschaft wahrgenommen?	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Sehr positive Wahrnehmung, Umsetzung positiv belegt, keine Konflikte mit Stakeholdern ▶ Weitgehend positive Wahrnehmung, Umsetzung positiv belegt, keine Konflikte mit Stakeholdern ▶ Keine breitere Wahrnehmung, keine Konflikte mit Stakeholdern, keine negativen Folgen für Konsumenten ▶ Eher negative Wahrnehmung in der Gesellschaft, Konflikte mit Stakeholdern bestehen, gewisse Eingriffe in Konsumentenverhalten erforderlich ▶ Erhebliche Eingriffe in Konsumverhalten erforderlich, starke ablehnende Positionen von relevanten Vertretern der Zivilgesellschaft 	+2
			+1
			0
			-1
			-2
Politische Rahmenbedingungen	Sind die politischen Rahmenbedingungen gegeben für eine Umsetzung der Option?	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Ausgangslage optimal für Umsetzung, politischer Wille auf breiter Basis gegeben. ▶ Rechtsgrundlagen gegeben, keine Konkurrenz mit anderen politischen Zielen, eher gewisse Synergien ▶ Rechtsgrundlagen gegeben, Konkurrenz mit anderen politischen Zielen besteht, ist aber unkritisch ▶ Anpassungen im bestehenden Recht erforderlich, Konkurrenz mit anderen politischen Zielen besteht ▶ Erhebliche Änderungen im bestehenden Recht erforderlich, deutliche Konkurrenz mit anderen politischen Zielen 	+2
			+1
			0
			-1
			-2

6.4 Anwendung auf die Kaskadenbeispiele

6.4.1 Bewertung der Holzkaskaden

In Abschnitt 5.3 wurden folgende Optionen zu Holzkaskaden im Vergleich zum Status quo (Basisoption) untersucht:

- ▶ Option 1: Teilweise Umlenkung von Altholz zu mehr stofflicher Nutzung in Holzwerkstoffen
- ▶ Option 2: Teilweise Umlenkung von Energieholz aus dem Wald zu stofflicher Nutzung in Holzwerkstoffen
- ▶ Option 3: Teilweise Umlenkung von Energieholz aus dem Wald als Input in chemische Syntheseprozesse (als Basis für Chemikalien oder „fortschrittliche“ Biokraftstoffe)
- ▶ Option 4: Vollständige Umlenkung von Energieholz aus dem Wald zu stofflicher Nutzung (v.a. im Bausektor) und damit Erhöhung der Kaskadennutzung im Holzsektor insgesamt

Details zu den Optionen können Abschnitt 5.3 bzw. dem Anlagenbericht „Gesamtökologische Betrachtung ausgewählter Biomassekaskaden“ entnommen werden. Die in Tabelle 10 vorgenommene Bewertung der Holzkaskaden beruht auf der direkten Auswertung der Diagramme im Kapitel 5.2 .1 (Wirkungsabschätzung) des Anlagenberichts.

Die Berechnung des BUF wurde anhand der Erhöhung des in Kaskade geführten Materials errechnet. Bei den Optionen 1 und 2 werden aufgrund der vergleichsweise geringen Anteile am Gesamtmassenstrom „nur“ eine Erhöhung des BUF von etwas mehr als 10 % erreicht. Bei Option 3 wurde primär ein Einsatz des Syntheseprodukts als Kraftstoff angesetzt, was zu keiner Veränderung des BUF führen würde. Ein Einsatz als Chemiegrundstoff würde zu einem Wert 1 führen. Option 4 dagegen führt zu erheblicher Umlenkung von einer in erster Stufe energetischen Nutzung in die stoffliche Nutzung, wodurch ein Wert 2 erreicht wird.

Das „neutrale“ Ergebnis bei der *Ressource Biomasse* und bei *Naturraum* beruht darauf, dass die Optionen unter Voraussetzung keiner Veränderung der Waldbewirtschaftung (Menge Holzentnahme) modelliert sind. Würde man der Kaskadennutzung anstelle verstärkter Substitution von Produkten einen höheren Verbleib von Holz im Wald zurechnen, würden die Optionen 1 und 2 voraussichtlich Werte von 1 erzielen, Option 4 dagegen sogar einen Wert 2.

Die Einstufung der übrigen ökologischen Indikatoren erschließen sich recht eindeutig aus der Ökobilanz. Die sozioökonomischen Indikatoren dagegen bedürfen verbaler Erläuterung. So wird bei *Produktqualität* für die Option 1 (mehr Holzwerkstoffe aus Altholz) ein -1 gesetzt, was unter den Randbedingungen rein deutscher Produktionsstandards eher nicht zutreffend wäre (hier greifen die Schadstoffgrenzwerte der AltholzV). Die aus benachbarten Ländern importierten Holzwerkstoffprodukte unterliegen jedoch nicht diesen Qualitätskontrollen (Schrägle 2015), weswegen hier für den Zweifelsfall ein -1 angesetzt wird.

Beim Indikator *Ernährungssicherung* wiederum liegt die „neutrale“ Einstufung des Holzsektors auf der Hand.

Bezüglich der *gesellschaftlichen Wahrnehmung* wird davon ausgegangen, dass die Optionen 1, 2 und 3 sich ebenfalls eher neutral verhalten. Bei 2 und 3 werden durch die Umlenkungen von Frischholz zwar bestimmte Wirtschaftskreise betroffen sein, eine negative (oder positive) Wahrnehmung auf breiterer Ebene in der Gesellschaft ist jedoch nicht zu erwarten. Ebenfalls sind kaum Eingriffe in Konsumentenverhalten erforderlich.

Die *politischen Rahmenbedingungen* sind für die Umsetzung von Option 1 und 2 eher günstig. Neue Rechtsgrundlagen sind nicht erforderlich, das Mehr an Recycling bzw. stofflicher Nutzung von Holz ist kompatibel mit den Politikzielen, die Änderungen des EEG mindern deutlich die Konkurrenz zur Bioenergieausbau. Für Option 3 dagegen sind die Rahmenbedingungen derzeit noch nicht in ausreichen-

dem Maße gegeben, um die ökonomischen Hemmnisse (hohe Kosten) zu kompensieren. Für die „Extrem“-Option wären sogar noch weit größere Eingriffe erforderlich, um die radikale Umlenkung umsetzbar zu machen. Hier wären erhebliche Änderungen im bestehenden Recht und umfassende Anreizsysteme erforderlich.

Tabelle 10 Bewertungskonzept angewandt auf die Ergebnisse der untersuchten Holzkaskaden; siehe dazu Erklärungen im Text

Indikator	Information aus ...	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	
Ökologisch						
Ressourcen- effizienz	Wertschöpfungskette/ Kaskadeneffekt	Erhöhung der Kaskadenstufen (BUF)	1	1	(0)	2
	nicht erneuerbare Energieträger	LCA Ergebnis: KEA _{fossil/mineralisch}	1	1	-1	2
	Ressource Biomasse	LCA Ergebnis: kumulierter biogener Rohstoffaufwand, KRA _{bio}	(0)	(0)	(0)	(0)
Klimaschutz: Treibhausgasemissionen	LCA Ergebnis	1	1	1	2	
Eutrophierung	LCA Ergebnis	1	1	1	2	
Naturraum Biodiversität	LCA Ergebnis	(0)	(0)	(0)	(0)	
Sozioökonomisch						
Leitfragen:						
Produktqualität	Gibt es eine Schadstoffanreicherung in Produkten?	-1	0	0	0	
Ernährungssicherung	Bestehen hier Konflikte, werden solche durch die Option ggü. Status quo gemindert?	0	0	0	0	
Gesellschaftliche Wahrnehmung	Wird diese Option in der Gesell- schaft wahrgenommen? Wenn ja, positiv?	0	0	0	1	
Politische Rahmenbedingungen	Sind die politischen Rahmenbedin- gungen gegeben für eine Umset- zung der Option?	1	1	-1	-2	

6.4.2 Bewertung der Papierkaskaden

In Abschnitt 5.4 wurden drei Optionen ökobilanziell bewertet.

- ▶ Option 1: einstufige Kaskade: direkte energetische Verwertung angenommen nach der Nutzungsphase eine Recycling findet nicht statt.
- ▶ Option 2: zweistufige Kaskade: Recycling des aus der ersten Stufe gesammelten Altpapiers zu graphischen Papier und energetisch verwertet nach der zweiten Nutzungsphase.
- ▶ Option 3: dreistufige Kaskade: Weitere Kaskade mit der Produktion von Wellpappe, ebenfalls mit energetischer Verwertung am Ende.

Die in Tabelle 11 dargestellte Auswertung setzt Option 1 als Ausgangspunkt und stellt dar, wie sich die Erhöhung der Kaskadenanzahl im Ergebnis niederschlägt.

Der BUF ergibt für Option 2 eine Erhöhung um etwas weniger als 50%, Option 2 erzielt einen darüber liegenden Wert. Der Verbrauch an nicht erneuerbarer Energie nimmt dagegen mit der Kaskadenanzahl zu. Die Schonung der Ressource Biomasse dagegen schlägt sich bereits für Option 2 als deutlicher Vorteil nieder. Ebenso deutlich positiv ist die Wertung für Eutrophierung und Naturraum.

Bei der *Produktqualität* ist ab der zweiten Stufe eine Verschlechterung zu vermuten, die für das entsprechende Produktdesign keine Einschränkung bedeuten muss. Ebenso sind Schadstoffanreicherungen keineswegs zwangsläufig zu erwarten. Die Wertung mit -1 ist hier somit eher vorsorglich.

Wie bei Holz verhalten sich auch die Papierkaskaden beim Indikator *Ernährungssicherung* „neutral“.

Bezüglich der *gesellschaftlichen Wahrnehmung* wird davon ausgegangen, dass die Option 2 eher unauffällig bleibt, da Recyclingpapier im Alltag üblich ist. Eine weitere Kaskade wie in Option 3 kann darüber hinaus als eher positiv gewertet werden, da das positive Image von Recyclingprodukten die Annahme durch Konsumenten erleichtern sollte.

Die *politischen Rahmenbedingungen* sind für die Umsetzung von Option 2 als günstig zu werten. Für Option 3 wird eher eine neutrale Einstufung vorgenommen. In beiden Fällen sind neue Rechtsgrundlagen jedenfalls nicht erforderlich. Ein hohes Maß an Recycling bzw. stofflicher Nutzung von Holz ist kompatibel mit den Politikzielen und wird dank ökonomischer Vorteile vorangebracht.

Tabelle 11 Bewertungskonzept angewandt auf die Ergebnisse der untersuchten Papierkaskaden; siehe dazu Erklärungen im Text

Indikator	Information aus ...	Option 2	Option 3	
Ökologisch				
Ressourcen- effizienz	Wertschöpfungskette/ Kaskadeneffekt	Erhöhung der Kaskadenstufen (BUF)	1	2
	nicht erneuerbare Ener- gieträger	LCA Ergebnis: KEA _{fossil/mineralisch}	-1	-1
	Ressourcenschonung: Biomasse	LCA Ergebnis: kumulierter biogener Rohstoff- aufwand, KRA _{bio}	2	2
Klimaschutz: Treibhausgasemissionen	LCA Ergebnis	1	1	
Eutrophierung	LCA Ergebnis	2	2	
Naturraum Biodiversität	LCA Ergebnis	2	2	
Sozioökonomisch				
	Leitfragen:			
Produktqualität	Gibt es eine Schadstoffanreicherung in Produk- ten?	0	(-1)	
Ernährungssicherung	Bestehen hier Konflikte, werden solche durch die Option ggü. Status quo gemindert?	0	0	
Gesellschaftliche Wahrnehmung	Wird diese Option in der Gesellschaft wahrgenommen? Wenn ja, positiv?	0	1	
Politische Rahmenbedingungen	Sind die politischen Rahmenbedingungen gege- ben für eine Umsetzung der Option?	1	0	

6.4.3 Bewertung der Textilkaskaden

Folgenden Textilkaskaden wurden in Abschnitt 5.5 betrachtet:

- ▶ Option 1: die direkte energetische Verwertung von Alttextilien
- ▶ Option 2: Die Wiederverwendung als Second-Hand-Kleidung (nicht als Kaskade im Sinne der Projektdefinition betrachtet)
- ▶ Option 3: Recycling zu Putzlappen
- ▶ Option 4: Faserrecycling

Wie bei den Papierkaskaden werden hier die Optionen 2 bis 4 im Vergleich zur Option 1 gewertet. In Tabelle 12 ist das Ergebnis zusammengestellt.

Alle Optionen führen zur Erhöhung des BUF, Option 3 sogar um mehr als 50 %. Bei den Ökobilanzbasierten Indikatoren wiederholt sich das bereits in Abschnitt 5.5 beschriebene Muster: Die Option mit Putzlappen-Recycling führt durchweg zu mehr als 50 % Einsparung gegenüber Option 1, während Option 2 und 4 zwischen 10 und 50 % liegen.

Bei der *Produktqualität* sind weder positive noch negative Effekte anzunehmen. Die etablierte Nutzung als 2nd-Hand-Kleidung ist auf die ausreichend gute Qualität der Alttextilien angewiesen. Für Putzlappen sind die Anforderungen vergleichsweise gering. Für das Faserrecycling stellt die Qualität des Ausgangsmaterials (Abnahme an reinen Baumwolltextilien am Markt) bisher einen einschränkenden Faktor für das Verarbeitungspotenzial dar. Die Qualität der Recyclingfaser selbst ist jedoch nicht eingeschränkt. In punkto *Produktqualität* ist jedoch generell für den Textilsektor anzumerken, dass die Verschlechterung der Textilqualität durch die Zunahmen an Billigprodukten auch die stoffliche Nutzung in Kaskaden beeinträchtigen wird.

Der Indikator *Ernährungssicherung* ist hier – anders als bei den vorausgehenden Kaskaden – durchaus relevant, denn der durch Kaskaden eingesparte Rohstoff Baumwolle ist ein Agrarprodukt und grundsätzlich mit Nahrungsmitteln in Konkurrenz um Anbaufläche.

Bezüglich der *gesellschaftlichen Wahrnehmung* wird davon ausgegangen, dass die Option 3 eher unauffällig bleibt, da die industrielle Nutzung der Lappen kaum in der Öffentlichkeit von Interesse ist. Second Hand und auch Faserrecycling haben dagegen unmittelbaren Verbraucherbezug und weisen ein eher positives Image auf.

Die *politischen Rahmenbedingungen* sind für alle Optionen im Grunde gegeben, wesentliche Hindernisse oder Förderungen bestehen nicht. Daher werden alle neutral eingestuft.

Tabelle 12 Bewertungskonzept angewandt auf die Ergebnisse der untersuchten Textilkaskaden; siehe dazu Erklärungen im Text

Indikator	Information aus ...	Option 2	Option 3	Option 4	
Ökologisch					
Ressourcen- effizienz	Wertschöpfungskette/ Kaskadeneffekt	Erhöhung der Kaskadenstufen (BUF)	1	2	1
	nicht erneuerbare Energieträger	LCA Ergebnis: KEA _{fossil/mineralisch}	1	2	1
	Ressourcenschonung: Biomasse	LCA Ergebnis: kumulierter biogener Rohstoff- aufwand, KRA _{bio}	1	2	1
Klimaschutz: Treibhausgasemissionen	LCA Ergebnis	1	2	1	
Eutrophierung	LCA Ergebnis	1	2	1	
Biodiversität: Naturraum	LCA Ergebnis	1	2	1	
Sozioökonomisch					
	Leitfragen:				
Produktqualität	Gibt es eine Schadstoffanreicherung in Pro- dukten?	0	0	0	
Ernährungssicherung	Bestehen hier Konflikte, werden solche durch die Option ggü. Status quo gemindert?	(1)	(1)	(1)	
Gesellschaftliche Wahrnehmung	Wird diese Option in der Gesellschaft wahrge- nommen? Wenn ja, positiv?	1	0	1	
Politische Rahmenbedingungen	Sind die politischen Rahmenbedingungen gegeben für eine Umsetzung der Option?	0	0	0	

6.4.4 Bewertung der Biokunststoffkaskaden

Die Ökobilanzergebnisse hierzu finden sich in Abschnitt 5.6. Die betrachteten Optionen beruhen alle auf einer einheitlichen Ausgangsmenge an angebautem Zuckerrohr unterschieden nach folgenden Pfaden:

- ▶ Option 1: Herstellung von Ethanol als Biokraftstoff (keine Kaskade)
- ▶ Option 2a: Herstellung eines Verpackungsmittels aus PLA-Produkt mit anschließender energetischer Nutzung (einstufige Kaskade)
- ▶ Option 2b: Herstellung eines Verpackungsmittels aus PLA mit anschließendem Recycling zu einem Mischkunststoffprodukt und anschließender energetischer Nutzung (zweistufige Kaskade)
- ▶ Option 3a: Herstellung eines Verpackungsmittels aus bioPE (als Drop-in) mit anschließender energetischer Nutzung (einstufige Kaskade)
- ▶ Option 3b: Herstellung eines Verpackungsmittels aus bioPE (als Drop-in) mit anschließendem Recycling zu einem weiteren sortenreinen PE Produkt und anschließender energetischer Nutzung (zweistufige Kaskade)

Auch hier erfolgt die Einstufung im Vergleich mit der Option1 (keine Kaskade). In Tabelle 13 findet sich die Auswertung.

Auch hier führen alle Optionen zur Erhöhung des BUF – bis auf Option 3a sogar alle um mehr als 50 %.

Wie bei den Holzkaskaden ergeben sich auch hier durch die Annahme einer gleichhohen Biomasseproduktion „neutrale“ Ergebnisse bei der *Ressource Biomasse* und bei *Naturraum*. Recyceltes BioPE substituiert in dem betrachteten System bei primäres BioPE sondern weiterhin fossiles PE. Das Bild würde sich ändern, wenn BioPE bereits den Kunststoffmarkt dominieren würde und dann durch Recycling Biomasse eingespart würde.

Die Einstufung der übrigen ökologischen Indikatoren erschließen sich auch hier recht eindeutig aus der Ökobilanz, wie sie in Abschnitt 5.6. bzw. im Anlagenbericht „Gesamtökologische Betrachtung ausgewählter Biomassekaskaden“ entnommen werden können. Insbesondere die Treibhausgasbilanz fällt deutlich besser aus als für die reine Ethanol-Variante.

Bei der *Produktqualität* sind nachteilige Effekte im Grunde nur bei dem Recyclingprodukt aus PLA (im Verbund mit anderen gemischten Kunststoffen) zu sehen. dabei sind auch hier Qualitätsnormen zu beachten.

Die Bewertung des Indikators *Ernährungssicherung* ist hier in gleicher Weise erschwert wie beim Naturraum: alle Optionen verhalten sich gegenüber Option 1 gleich, wobei jede für sich genommen Land in Anspruch nimmt und insofern mit der Ernährungssicherung im Konflikt steht. Daher wird hier einheitlich eine -1 vergeben.

Die *gesellschaftliche Wahrnehmung* von biobasierten Produkten wird als vorwiegend positiv eingeschätzt, ebenso das Recycling. Eine Einschränkung gilt hier eher bei Option 2b, da das Kunststoffrecycling zu eher minderwertigen Produkten in der Gesellschaft eher kritisch gesehen wird. Daher für die Option eine 0-Wertung.

Die *politischen Rahmenbedingungen* sind für alle Optionen im Grunde gegeben bzw. wesentliche Hindernisse oder Förderungen bestehen nicht. Daher werden alle neutral eingestuft.

Tabelle 13 Bewertungskonzept angewandt auf die Ergebnisse der untersuchten Biokunststoffkaskaden; siehe dazu Erklärungen im Text

Indikator	Information aus ...	Option 2a	Option 2b	Option 3a	Option 3b	
Ökologisch						
Ressourcen-effizienz	Wertschöpfungskette/ Kaskadeneffekt	Erhöhung der Kaskadenstufen (BUF)	2	2	1	2
	nicht erneuerbare Energieträger	LCA Ergebnis: KEA _{fossil/mineralisch}	1	1	-1	2
	Ressource Biomasse	LCA Ergebnis: kumulierter biogener Rohstoffaufwand, KRA _{bio}	(0)	(0)	(0)	(0)
Klimaschutz: Treibhausgasemissionen	LCA Ergebnis	2	2	2	2	
Eutrophierung	LCA Ergebnis	1	1	0	1	
Naturraum Biodiversität	LCA Ergebnis	(0)	(0)	(0)	(0)	
Sozioökonomisch						
Leitfragen:						
Produktqualität	Gibt es eine Schadstoffanreicherung in Produkten?	0	-1	0	0	
Ernährungssicherung	Bestehen hier Konflikte, werden solche durch die Option ggü. Status quo gemindert?	-1	-1	-1	-1	
Gesellschaftliche Wahrnehmung	Wird diese Option in der Gesellschaft wahrgenommen? Wenn ja, positiv?	1	0	1	1	
Politische Rahmenbedingungen	Sind die politischen Rahmenbedingungen gegeben für eine Umsetzung der Option?	0	0	0	0	

6.5 Fazit

Darüber, wie Einstufung der Kaskadennutzung in ein Gesamtkonzept der Nutzung von Biomasse gestaltet werden sollte, dienen die verschiedenen Strategien der Bundesregierung zur grundsätzlichen Orientierung. Wie die Analyse der nationalen sowie europäischen und internationalen Politikinstrumente zeigt, weisen diese Zielvorgaben wenig konkrete Ansatzpunkte für ein Gesamtkonzept der Biomassenutzung mit Priorität der Kaskadennutzung auf. Die grundlegenden Kriterien für ein solches Konzept lassen sich jedoch aus den Strategien ableiten. Auf dieser Basis wurde hier ein multi-kriterielles Bewertungskonzept entwickelt und anhand der Praxisbeispiele getestet.

Mit dem Ziel, eher eine Art „Frühwarnsystem“ statt eines komplexen Analysemodells vorzulegen, konzentriert sich der Vorschlag auf die Bewertung der wesentlichen Wirkungen. Die Bewertungsmatrix umfasst einen Katalog von sechs ökologischen und vier sozio-ökonomischen Kriterien. Eine automatisierte Klassifizierung anhand eines komplexeren und dynamisierten Konzepts scheidet anhand der zu hohen Vielfalt und Komplexität des Kaskadenkontexts und der tatsächlichen Kaskaden aus. Die Vorgehensweise bei der Bewertung beruht daher auf qualitativen, fünfstufigen Klassen mit den Wertungen „stark positiver Effekt“, „positiver Effekt“, „neutral“, „negativer Effekt“, „stark negativer Effekt.“ Die Zuordnung erfolgt nach einer transparenten Einstufungsanleitung. Die optische Gestaltung (Farb-Code von dunkelgrün bis rot) macht das Bewertungsergebnis und die relevanten Aspekte einfach erfassbar.

Außerdem werden durch den Ansatz Datenlücken und Einschränkungen von positiven Wirkungen herausgestellt.

Das Bewertungsraster wurde auf die im Projekt untersuchten Kaskaden angewandt. Diese Vorarbeit kann generell als Orientierung, insbesondere aber als Leitfaden für die Übertragung auf andere Kaskadennutzungen dienen.

Das Prinzip beruht auf der Einstufung einer Kaskadenoption mit einer anderen Biomassenutzungsoption (Referenz), die entweder einen Status quo oder einen definierte Fall von „nicht-Kaskade“ beschreibt. Im Beispiel der Biokunststoffe wurden die Kaskaden mit der Nutzung der Anbaubiomasse zu Bioethanol als Kraftstoff verglichen.

Die Ergebnisse ermöglichen richtungssichere Einschätzungen von bestehenden Biomassekaskaden sowie zukünftigen Innovationen der Biomassenutzung. Die Grundlagen für die Bewertung sind nachvollziehbar auf der Basis gesetzter Ziele und Prioritäten und u.a. vor dem Hintergrund verfügbarer Daten (insbesondere bei bestehenden Ökobilanzen).

7 Eckpunkte einer Strategie zur Implementierung der Kaskadennutzung von Biomasse

7.1 Bezug bestehender Politikstrategien auf die Kaskadennutzung

Der Begriff der Kaskadennutzung findet sich in verschiedenen relevanten Strategie- und Positionspapieren der deutschen und der europäischen Politik (s. Abschnitt 2). Dabei wird er stets im Zusammenhang mit der **Biomassenutzung** und dem Ziel der **Erhöhung der Ressourceneffizienz** geführt. In diesem Projekt wurden wesentliche Strategie- bzw. Positionspapiere daraufhin analysiert, wie die Kaskadennutzung konkret adressiert wird und mit welchen Ansätzen sie umgesetzt werden soll. Tabelle 1 führt die Kernaussagen dieser Dokumente zur Kaskadennutzung und den strategischen Zusammenhang auf.

Auf die verschiedenen Verständnisse und Definitionen zur Kaskadennutzung in den Papieren wurde in Abschnitt 2 hingewiesen. Mit den Neuauflagen der *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie* von 2016 und des *Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRes II)* wird – insbesondere in Deutschland – die Rolle der Kaskadennutzung strategisch **eng mit den Zielen der Kreislaufwirtschaft gekoppelt** (siehe Kästen in Abschnitt 2).

Die untersuchten Strategie- und Positionspapiere bleiben, was die konkrete Benennung von **Maßnahmen und Handlungsfelder zur Umsetzung der Kaskadennutzung** im Sinne dieser Ziele angeht, weitgehend allgemein. Die wesentlichen genannten Ansatzpunkte für strategische Handlungsfelder lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Zertifizierungs- und Produktkennzeichnung, da die Konsumentenseite genauso wichtig ist wie die Produzentenseite (Nachhaltigkeitsstrategie 2016)
- ▶ Lenkung von nachwachsenden Rohstoffen in die stoffliche Nutzung (ProgRes II)
- ▶ Verknüpfung von Wertschöpfungsketten (BioÖkonomie Strategie)
- ▶ Mehr multidisziplinäre und sektorübergreifende Forschung (DG Forschung)
- ▶ Konkrete Leitlinien für die Verbreitung bewährter Verfahren der Kaskadennutzung (DG Umwelt)
- ▶ Konsequente Umsetzung der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, d.h. der Abfallhierarchie, sowie eines nachhaltigen Ökodesigns der Produkte (EEA)

In der *Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt* (Bundesregierung 2007) ist der Begriff der Kaskadennutzung zwar noch nicht enthalten, doch finden sich in den darin geforderten Maßnahmen zur Umsetzung der Handlungsziele Elemente, die mit einigen der oben genannten Punkte übereinstimmen („... *größt-mögliche Schonung der Ressourcen durch sparsamen und effizienten Einsatz, eine verstärkte Verwendung von Recyclingprodukten und nachwachsenden Rohstoffen ...*“).

Das bedeutendste Thema in der Umweltpolitik ist der Klimaschutz. Als relevantes nationales Strategiepapier dazu ist das *Aktionsprogramm Klimaschutz 2020* der Bundesregierung (BMUB 2014) zu nennen. Die Kaskadennutzung wird darin nicht explizit genannt, klingt jedoch implizit mit, wenn gesteigerte Ressourceneffizienz, verstärktes Recycling und Wiederverwendung als Maßnahmen für den Klimaschutz benannt werden. Zur Umsetzung der Beschlüsse von Paris entwickelt die Bundesregierung derzeit den *nationalen Klimaschutzplan 2050*. Noch im Sommer 2016 soll hierüber ein Beschluss beschlossen werden. Die erforderlichen Maßnahmen bis zum Reduktions-Zielwert von 80 bis 95 % im Jahr 2050 werden dabei in einem breiten Dialogprozess ausgearbeitet. Aktuell wurde hierzu ein Maßnahmenkatalog veröffentlicht, der die Kaskadennutzung im Kontext von Recycling und Kohlenstoffspeicher in Produkten als Maßnahme für den Klimaschutz aufführt (Wuppertal Institut et al. 2016). In einem Positionspapier nimmt auch das UBA (2016) Stellung zu den notwendigen Schlüsselmaßnahmen für den *Klimaschutzplan 2050* und bezieht sich dabei vorwiegend auf die effiziente Nutzung von kohlenstoffhaltigen Reststoffen.

Tabelle 14: Übersicht einer Auswahl von relevanten Strategie- und Positionspapieren mit Bezug zur Kaskadennutzung

Strategisches Papier	Herausgeber	Rolle der Kaskadennutzung	Umsetzung über
Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, Neuauflage 2016	Bundesregierung (2016)	Mit Bezug auf 12. SDG: „ <i>Nachhaltige Produkte sollen möglichst <u>langlebig gestaltet, ressourceneffizient und nach ihrer Nutzung so weit wie möglich wiederverwertbar sein (Kaskadennutzung)</u></i> “	Zertifizierungs- und Produktkennzeichnung
Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II (ProgRes II)	Bundesregierung (BMUB 2015)	es „ <i>gilt, die <u>Materialeffizienz</u> von nachwachsenden Rohstoffen und die <u>Effizienz technischer Prozesse</u> mit gezielter Forschung zu <u>optimieren</u> und voll aususchöpfen. Durch den Ausbau der Kaskadennutzung werden diese Prinzipien unterstützt“</i> “	Lenkung von nachwachsenden Rohstoffen in die stoffliche Nutzung
Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030	BMBF (2010)	„ <i>Produkte mit einem <u>höheren Wertschöpfungspotenzial</u> zu bevorzugen... Wo möglich und sinnvoll, ist eine Kaskaden- und Koppelnutzung von Biomasse vorzuziehen.</i> “	Bioraffinerien, intelligente Verknüpfung von Wertschöpfungsketten
Maßnahmenkatalog - Ergebnis des Dialogprozesses zum Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung	BMUB (Wuppertal Institut, ifeu, Öko-Institut, ISI, IRESS, IFOK 2016)	Nennung der Kaskadennutzung in den Maßnahmen: <i>Förderung nachhaltiger, multifunktionaler Forstwirtschaft (KSP-L-09)</i> <i>Hochwertige Verwendung und Verwertung von Stoffen, Bauteilen und Baugruppen, Einsatz nachhaltiger Baustoffe (KSP-G-02)</i>	Stoffliche Weiterverwendung / Recycling fördern Kohlenstoffspeicher langlebiger Holzprodukte, innovative Ansätze
UBA Position zum Klimaschutzplan	UBA (2016)	„ <i>Kohlenstoffhaltige Reststoffe von produzierenden Unternehmen ... sollten nach Möglichkeit auch zur Energiegewinnung genutzt werden, wenn <u>höherwertige Verwendungen bzw. Verwertung im Sinne einer Biomassenkaskadennutzung ausgeschöpft sind.</u></i> “	Effiziente Nutzung von kohlenstoffhaltigen Reststoffen
Waldstrategie 2020	Bundesregierung (BMEL 2011)	„ <i>Zur <u>Steigerung der Ressourceneffizienz sind die Vermeidung von Abfällen und die Rückführung von Wertstoffen aus Abfällen in den Wirtschaftskreislauf unverzichtbar.</u> Grundsätzlich soll die sinnvolle Kaskadennutzung knapper Rohstoffe in der Holz- und Papierwirtschaft <u>weiter verstärkt werden.</u> Hier bestehen zusätzliche Reserven, die – unterstützt von Forschungsmaßnahmen – erschlossen werden müssen.</i> “	Entwicklung innovativer Holzprodukte und effizienter Herstellungsverfahren
Innovating for Sustainable Growth a Bioeconomy for Europe	EU Kommission DG Research and Innovation (2012)	„ <i>Promote the setting up of <u>networks ... including the necessary logistics and supply chains</u> for a cascading use of biomass and waste streams.</i> “	multi-disciplinary and cross-sectoral research

Strategisches Papier	Herausgeber	Rolle der Kaskadennutzung	Umsetzung über
Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft	EU Kommission DG Environment (2015)	„...kreislauforientierte Wirtschaft, bei der es darum geht, den <u>Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen innerhalb der Wirtschaft so lange wie möglich zu erhalten und möglichst wenig Abfall zu erzeugen</u> “.	Erstellung von Leitlinien und die Verbreitung bewährter Verfahren der Kaskadennutzung
Circular economy in Europe — Developing the knowledge base	EEA (2015)	... biomass is best used in a cascade in which energy generation is the last step rather than the first.“ Verständnis : cascading use = low-level recycling	Ecodesign, Fördermaßnahmen, Business models, Ecoinnovation
Resource efficiency: moving towards a circular economy (2014/2208(INI))	European Parliament (2015)	“This includes fully implementing a cascading use of resources, sustainable sourcing, a waste hierarchy, creating a closed loop on non-renewable resources, using renewables within the limits of their renewability and phasing out toxic substances” Kaskadennutzung als ein Baustein eines möglichst ressourceneffizienten Wirtschaftssystem	Diverse Maßnahmen über die Wertschöpfungskette
Policy briefing: Cascading use of biomass: opportunities and obstacles in EU policies	EEB, BirdLife Europe (2015)	Kaskadennutzung ist die konsequente Umsetzung der Abfallhierarchie	Ökonomische Belohnung von konformen Verhalten gegenüber der Abfallhierarchie
Cascading of woody biomass: definitions, policies and effects on international trade	IEA Bioenergy Task 40 (Olsson et al. 2016)	“cascading” ... could be among the appropriate policy tools, but for a vital debate, it is important <u>not to assume that cascading is the silver bullet</u> ”	warnen vor gesetzlichen Vorgaben zur Umsetzung der Kaskade

7.2 Verortung der Kaskadennutzung in den drei „Kernstrategien“

Eine der Aufgaben des Projekts ist es, die Kaskadennutzung von Biomasse im Lichte der drei Kernstrategien zur Senkung der Ressourceninanspruchnahme zu spiegeln:

- ▶ **Effizienz** (Verhältnis von Nutzen zum dafür nötigen Ressourceneinsatz).
- ▶ **Konsistenz** (vereinfacht: die Substitution von fossilen Ressourcen durch erneuerbare; → Bioökonomie)
- ▶ **Suffizienz** (Verringerung der Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen)

Die Kaskadennutzung von Biomasse soll zur **Ressourceneffizienz** beitragen. Sie soll die begrenzt zur Verfügung stehende Ressource Fläche für den Anbau von Biomasse bzw. die Biomasse effizienter nutzen und damit Konkurrenzen, v.a. gegenüber der Nahrungsmittelsicherheit, verringern. Gleichzeitig werden damit Beiträge zum Klimaschutz, Biodiversitätsschutz und andere Umweltvorteile verbunden.

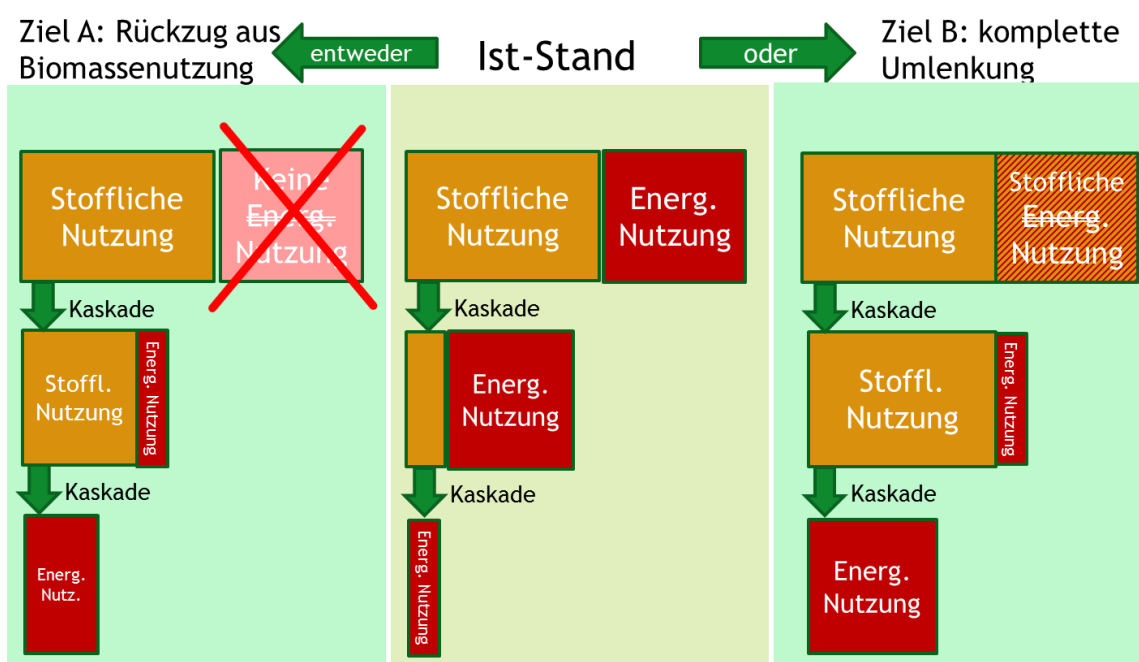
Die Ergebnisse dieses Projekts bestätigen, dass diese Erwartungen für die Mehrzahl der Fälle berechtigt sind.

Konsistenz und **Suffizienz** dagegen können durchaus gegenläufige Erwartungen an die Ausgestaltung der Kaskadennutzung stellen. Je nachdem, welchem übergeordneten Umweltziel man Vorrang einräumt, kann die positive Ressourceneffizienz der Kaskadennutzung dazu genutzt werden:

- ▶ entweder **weniger Flächeninanspruchnahme** und damit **weniger Rohstoffentnahme** bei quantitativ etwa gleich hoher (und teilweise zeitlich versetzter) Biomassenutzung in der Material- und Energiewirtschaft zu ermöglichen.
 Unter der Annahme, dass alle Agrarflächen vollständig genutzt werden und die agrarische Produktion nicht mehr über eine Flächenausdehnung gesteigert werden kann, sondern tendenziell zurück zu fahren sei, würde sich die Kaskadennutzung hier einer auf Suffizienz ausgerichteten Politik zuordnen.
- ▶ oder der Wirtschaft **mehr biobasiertes Ausgangsmaterial** zur Verfügung zu stellen bei gleich hohem Verbrauch an primären Rohstoffen und damit Flächen.
 Unter der Voraussetzung, dass die vollständige Substitution von fossilen Rohstoffen (Konsistenz) gerade dieses Mehr an Biomasserohstoff erfordert, würde hier die Kaskadennutzung die freiwerdenden Flächen für den Ausbau stofflicher Produkte zur Verfügung stellen. Die auf der Fläche erzeugten Biomasserohstoffe werden hier in die stoffliche Nutzung umgelenkt. Sie erreichen die energetische Nutzung in Abhängigkeit der Nutzungsdauer in einem zeitlichen Versatz.

Auf politisch übergeordneter Ebene braucht es in der Tat eine Priorisierung, an welcher der beiden Richtungen die Kaskadennutzung nun ausgerichtet werden soll. In der konkreten Praxis lassen sich die beiden „Entweder/Oder“-Ansätze durchaus auch kombinieren, um mit beiden Strategien die bisher mäßige Umsetzung der Kaskadennutzung zu stärken. Denn tatsächlich werden derzeit nach wie vor sehr hohe Anteile an Biomasse direkt energetisch genutzt. Bei Holz entspricht die derzeitige Situation in etwa den Verhältnissen, wie sie als Status quo in Abbildung 31 dargestellt sind (44 % werden ohne stoffliche Nutzung verbrannt).

Abbildung 31 Schematische Vergleich der gegenläufigen Ziele zum Umgang mit dem Effizienzgewinn durch Kaskadennutzung am Bsp. Holz



Neben weiteren erwarteten Umweltentlastungseffekten sollte ein teilweiser Rückzug aus der primären energetischen Biomassenutzung mit einer Umlenkung der dann verfügbar werdenden Primärrohstoffe in die stoffliche Nutzung grundsätzlich folgenden Handlungszielen dienen:

- ▶ Entlastung des Drucks auf die Flächennutzung
- ▶ Steigerung der für die stoffliche Nutzung verfügbaren Biomasse,
 - a.) durch die Umlenkung der hohen bereits direkt energetisch genutzten Biomassemenge.
 - b.) für den Umstieg in die „Bioökonomie“ (verstanden als weitgehende Ablösung der fossilbasierten Stoffwirtschaft in eine biobasierte)

Dabei gilt es in erster Linie im Rahmen der Bioökonomie zu klären, wie umfassend der Wandel von einer erdöl- zu einer bio-basierten Wirtschaft (BMBF 2010) erfolgen soll. Tatsächlich würde eine vollständige Substitution fossiler Rohstoffe durch biotische Rohstoffe erhebliche Ressourcenmengen in Anspruch nehmen mit den gleichen Konflikten, die seit nunmehr zehn Jahren zur Bioenergie-/Biokraftstoffpolitik diskutiert werden. Die Kaskadennutzung wird hier ihren Beitrag zur Entlastung leisten können, sicher aber nicht alle potenziellen Konflikte einer umfassenden „Bioökonomisierung“ abfangen können.

7.3 Rolle der Kaskadennutzung in der Ressourcenpolitik

Wie aus der vorangehenden Analyse hervorgeht, ist die Kaskadennutzung von Biomasse als eigenständige Strategie außerhalb der zuvor beschriebenen Zusammenhänge wenig sinnvoll, da sie bereits mit bestehenden Politikstrategien (Ressourceneffizienz, Bioökonomie, Circular Economy) methodisch eng verzahnt ist. Dazu kommen folgende praktische Argumente:

- ▶ Kaskadennutzung ist als generalisierte Anforderung in der komplexen Welt der Produktherstellung sehr aufwändig umzusetzen. Das zeigen auch die Ergebnisse der Einzelbetrachtungen dieses Forschungsprojekts, welche existierende Kaskadenkonzepte sowie Hemmnisse und Erfolgsfaktoren untersucht haben. Erfolgreiche Praxisbeispiele sind überaus rar.
- ▶ Kaskadennutzung spielt sich im engen Geflecht von Lieferketten ab und ist abhängig von perfekt geschlossenen und qualitätsgesicherten Stoffkreisläufen. Daher zeigen sich in der Praxis neben der Papierwirtschaft und Teilen der Holzwirtschaft bisher nur Umsetzungen in Nischenprodukten und Nischenmärkten.

Anstatt als eigenständige Strategie muss Kaskadennutzung vielmehr als ein „**Prinzip**“ zur **Unterstützung von übergreifenden Zielen und deren Strategien** verstanden werden. Darin kann sie spezifisch dienen

- ▶ zur Steigerung der Ressourceneffizienz per se (z.B. im Rahmen der Ressourcenstrategie)
- ▶ für einen ressourceneffizienten Umstieg in die biobasierte Stoffwirtschaft. In der Bioökonomie würde sie als essenzielle Komponente benötigt.

Das Ziel einer Strategie zur Implementierung der Kaskadennutzung von Biomasse würde somit lauten:

Der konsequente Weg zu biobasierten Produkten im Sinne der Bioökonomie muss aus der zwingenden Notwendigkeit der nachhaltigen und umweltgerechten Nutzung von Biomasse (Flächenbedarf, -konkurrenz, ILUC etc.) die **Kaskadennutzung als Prinzip** umsetzen.

„Als Prinzip“ bedeutet gleichzeitig: nachweislich der tatsächlichen Verbesserung der Ressourceneffizienz im Einzelfall. Hierzu bedarf es geeigneter Messgrößen und Indikatoren, wie sie z.B. vom Projekt vorgeschlagen werden. Eine solche Einzelfallprüfung ist notwendig, denn nicht jegliche Kaskadennut-

zung ist von vorne herein sinnvoll und zielführend. **Unbedingt zu vermeiden** ist neben einer Berücksichtigung der sonstigen Prüfkriterien gemäß § 6 Abs. 2 KrWG:

- ▶ Verdrängung von wünschenswerten höherwertigen Wiederverwendungen,
- ▶ Erzeugung von „nutzlosen“ Produkten, für die erst ein Markt erzeugt werden muss,
- ▶ Schadstoffanreicherungen in Produkten.

Was bedeutet das für die Politik?

Erste Voraussetzung ist eine klarere Zielstruktur für die sogenannte Bioökonomie. In diese muss die Kaskadennutzung als Grundelement für die Optimierung der Effizienz bei der Ressourcennutzung eingebettet werden.

7.4 Anknüpfungspunkte der Kaskadennutzung an bestehende Strategien

Aus den vorangehenden Analysen zeichnen sich zwei Kernstrategien ab, mit welcher das Prinzip der Kaskadennutzung eng verflochten ist, bzw. welche durch die Kaskadennutzung gerade miteinander verzahnt werden:

- ▶ Die Bioökonomie
- ▶ Die erweiterte Kreislaufwirtschaft (circular economy)

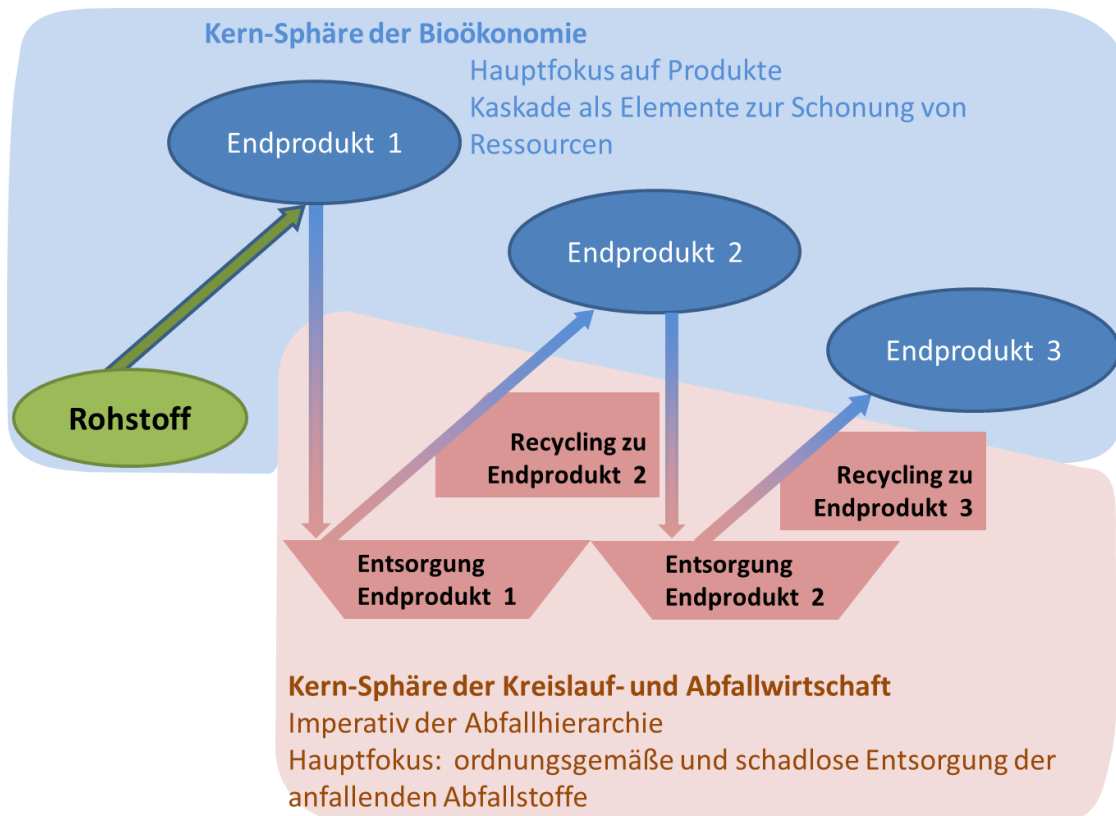
Abbildung 32 zeigt die Verzahnung in schematischer Weise. Beiden Ansätzen ist das Ziel der Schonung von Ressourcen mit einer insgesamt effizienteren Bewirtschaftung der Ressourcen gemein. Die Bioökonomie hat den deutlichen Fokus auf biobasierte Produkten und innovative Verfahren zur Herstellung der Produkte. Wenngleich aktuelle Strategiepapiere zur Bioökonomie (BMBF 2010, EC DG Research and Innovation 2012) die Kaskadennutzung anders definieren (siehe Abschnitt 7.1), so stimmen Ziel und Leitlinien doch überein.

Die Kreislaufwirtschaft ist über die Abfallhierarchie bereits nahezu vollständig „harmonisiert“ mit dem Kaskadenprinzip, was den Nach-Konsumenten-Bereich betrifft. Die Prozesse einer stoffgerechten Erfassung, Sammlung, Getrennthaltung bzw. Trennung entsorgter Post-Konsumenten-Abfälle und deren Recycling (open-loop, closed-loop, up/down), stoffliche und energetischer Verwertung spiegeln somit für biogene Sekundärrohstoffe eins zu eins das Kaskadenprinzip wider (siehe hierzu auch Abbildung 8).

Die Kreislaufwirtschaft ist somit das Prinzip der Stoffstromführung quer über Wertschöpfungsketten hinweg, welches allgemeingültig für alle Arten der Stoffwirtschaft gilt, ob biobasiert, fossil, mineralisch. Der Mehrwert des Begriffs der Biomassekaskadennutzung liegt darin, das (allgemein etablierte, wenngleich keinesfalls zufriedenstellend umgesetzte) hierarchische Prinzip substantiell in der Bioökonomiestrategie zu verankern.

Das Kaskadenprinzip entsprechend der Definition dieses Projektes schließt durch die Integration beider Aspekte damit die Lücke zwischen der Biomasseverwendung in Haupt- und Co-Produkten und der Abfallhierarchie (nova 2015).

Abbildung 32: Verzahnung der Kern-Sphären der Bioökonomie und der Kreislaufwirtschaft über das Prinzip der Kaskadennutzung



7.5 Strategische Eckpunkte zur Verstärkung der Kaskadennutzung

Die Eckpunkte werden nach verschiedenen Handlungs- und Entscheidungsebenen geordnet unterschieden. Sie richten sich **prioritär an politische Entscheidungsträger** und gliedern sich dort in Handlungsbereiche

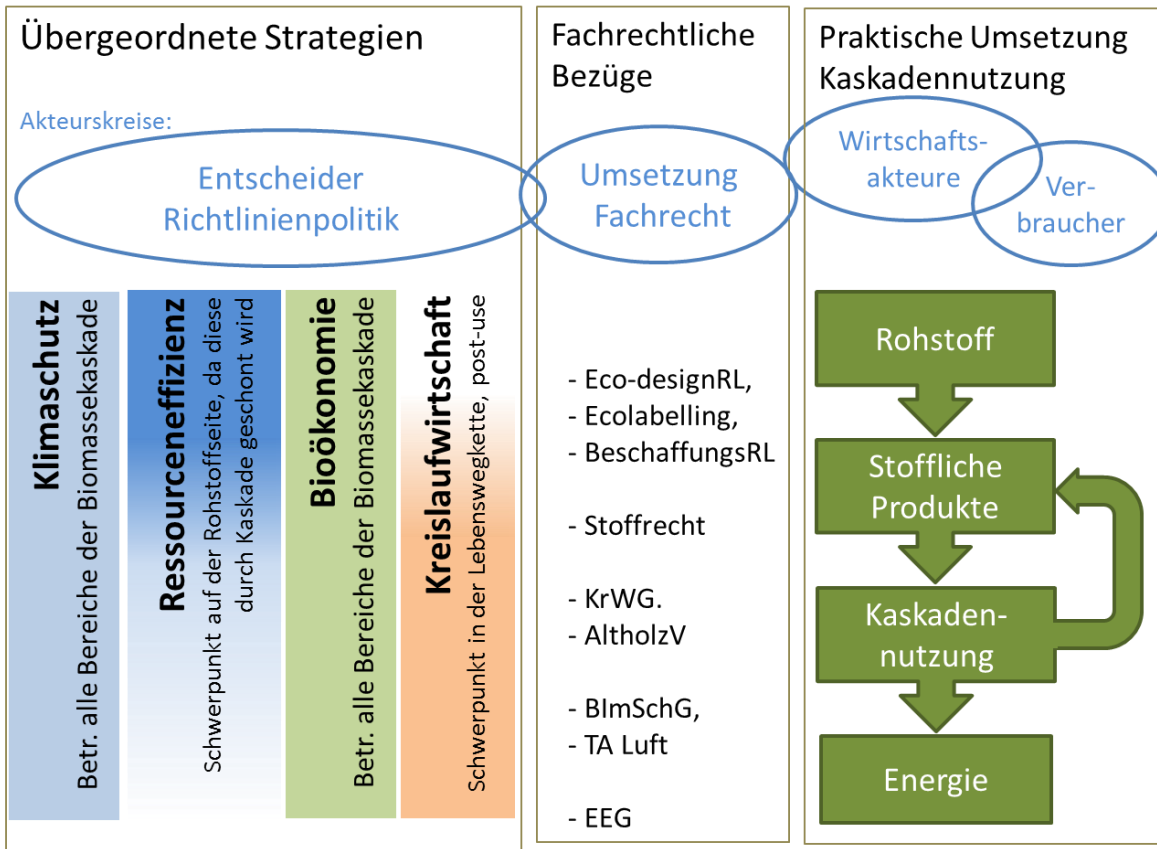
- ▶ zur Gestaltung der weiteren Rahmenbedingungen,
- ▶ zur Gestaltung des Fachrechts,
- ▶ zur Schwerpunktsetzung in der Forschung.

Angesprochen sind gleichermaßen

- ▶ die **Wirtschaftakteure**, die die Kaskadennutzung schließlich umsetzen und mit ökonomischem Leben füllen müssen
- ▶ die **Verbraucher**, die durch ihr Kaufverhalten maßgeblich beteiligt sind. Schließlich betont die Nationale Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2016): „*Nachhaltiger Konsum und nachhaltige Produktion sind damit ‚zwei Seiten derselben Medaille‘*“. Und auch über das Thema Suffizienz ist die Einbeziehung der Verbraucher unerlässlich.

In Abbildung 33 sind die betroffenen Ebenen von Handlungsfeldern (die übergeordneten Strategien, das Fachrecht, die Umsetzung) mit den angesprochenen Akteurskreisen (Politik, Wirtschaft, Verbraucher) entlang der „Kaskadenkette“ zusammengeführt.

Abbildung 33: Verschneidung der betroffenen Ebenen von Handlungsfeldern und Akteurskreisen und für die strategischen Eckpunkte zur Verstärkung der Kaskadennutzung



In der Struktur dieser Ebenen werden die Eckpunkte zu konkreten Handlungsempfehlungen in Tabelle 15 zusammengefasst. Sie sind als Vorschlag dieses Vorhabens zu verstehen, welchen es zu diskutieren, zu kondensieren bzw. auch zu erweitern gilt.

Tabelle 15: Eckpunkte zur Implementierung und Stärkung von Biomassekaskaden

A. Politische Entscheidungsträger	
A.1: Handlungsbereiche zur Gestaltung der weiteren Rahmenbedingungen	
<ul style="list-style-type: none"> • Kaskadennutzung soll von in einer aktualisierten Bioökonomie-Strategie explizit verankert werden 	<p>→ Klarstellung der Definition und des Bezugsrahmens der Kaskadennutzung, welche Erwartungen werden konkret an sie gestellt?</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Kaskadennutzung soll innerhalb der Bioökonomie-Strategie als (ein) Prinzip zur Optimierung der Ressourceneffizienz verankert werden 	<p>→ Quervernetzung mit dem Ressourceneffizienzprogramm ProgRess II</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Es bedarf einer expliziten Klarstellung: Kaskadennutzung schließt die Lücke zwischen der Biomassebereitstellung/-verwendung und der konkreten Umsetzung der Abfallhierarchie 	<p>→ Klarstellung dieser Rolle der-Kaskadennutzung in Relation zu den Anforderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Es bedarf einer Entscheidung über die politischen Ziele zur Biomassenutzung: 	<p>→ Welche Anteile an energetischer Nutzung werden von der Politik gewollt/akzeptiert, (Abstimmung mit den zahlreichen Szenarien zum Klimaschutz, Energiewende, Verkehrswende etc.)</p> <p>Oder soll das dem Markt überlassen werden, im Rahmen von verbindlich zu erfüllenden Nachhaltigkeitsanforderungen für den einzelnen Wirtschaftsteilnehmer?</p> <p>→ Wie ist das für die stoffliche Nutzung zu handhaben?</p> <p>Sollen indikative Ziele für konkrete Maßnahmen definiert werden, als Bezugsrahmen, als Reserve? (konkret sollte es dabei keinesfalls um strenge Lenkung gehen, sondern vielmehr um die Frage, ob die verschiedenen Politikziele überhaupt mit Blick auf die Nutzung der Biomasseressourcen in Einklang zu bringen sind)</p> <p>→ Bedarf es einer zeitlich dynamisierten nationalen Flächennutzungsstrategie?</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Abbau von Marktverzerrungen und/oder Einführung möglicher Anreizsysteme, • Abbau von Barrieren, • Schaffung zielorientierter Wettbewerbsbedingungen. 	<p>(siehe Ergebnis der Hemmnisanalyse im Rahmen dieses Projekts (AP3))</p> <p>→ Müssen aus diesem Grund für Biomasse zur Strom-/Wärmeerzeugung nicht auch analog zu RED für Biokraftstoffe verbindliche Nachhaltigkeitsnachweise eingeführt werden? (v.a. auch Effizienzkriterien)</p>

- **Es braucht praxistaugliche Indikatoren für die Bewertung des Nutzens der Bioökonomie zur Messbarkeit und Kommunizierbarkeit des Beitrags der Kaskadennutzung**

→ Dieses Projekt liefert dazu z.B. einen Vorschlag für ein Bewertungskonzept (AP5);
 → ebenso ist der parallel entwickelte Biomass Utilization Factor (BUF) ein Konzept zur Evaluierung der Wechselwirkungen verschiedener Strategien und Rahmenbedingungen (nova 2015) oder die Ansätze von Mantau (2012a)
- **Rahmenbedingungen und Fachrecht unterstützen nicht zwangsläufig dieselben Zielsetzungen.**

→ Die Wechselwirkungen sollten genauer untersucht und möglichst quantifiziert werden. Daraus können konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.
- **Die abfallwirtschaftlichen Systeme sind sowohl hinsichtlich der Erfassungs-Infrastrukturen, als auch hinsichtlich der energetischen Verwertung anzupassen bzw. effizienter zu gestalten.**

→ Kompatible Infrastrukturen zur Sammlung (Bring- und Holsystem) sollten europaweit aufgebaut werden.
 → Durchsetzung eines europaweiten Deponieverbots für biogene Reststoffe.
 → Qualitätssichernde Standards und Vereinfachungen des grenzüberschreitenden Warenverkehrs.

A.2 Handlungsbereiche zur Gestaltung des Fachrechts

- **Anpassung des EEG an den Punkten, die für eine Unterstützung des Kaskadenprinzips angepasst werden müssten**

→ Förderung z.B. von Holz als Baustoff bei direktem Ersatz von Mauerwerk und/oder Stahl als Ausgleich der Benachteiligung durch die Ausnahmen der Zement-/Stahl-/Aluminiumindustrie aus Klimahandel und EEG-Umlage.
 → Bioenergie aus Nadelholz generell aus der EEG-Förderung nehmen, damit dieses werkstofflich gut geeignete Holz möglichst wenig verfeuert wird.
- **Die Altholz-Verordnung**

→ sollte zur Verbesserung der Erfassung und Sortierung von Altholz mit höheren Anteilen an Klasse I konsequenter umgesetzt werden
 ggf. Überarbeitung erforderlich
 → sollte als Standard für eine europaweite Regelung dienen.
- **Das in § 8 KrWG thematisierte Hochwertigkeitsgebot der Verwertung ist im Sinne der Kaskadenprozesse zu interpretieren.**

→ Definition wirksamer Effizienzkriterien hinsichtlich Erfassung und abschließender energetischer Verwertung bio-basierter Produkte.

A.3 Handlungsbereiche zur Schwerpunktsetzung in der Forschung

- **Cluster Holz:**

→ Mit dem schwindenden Nadelholz müssen hochwertige Nutzungsanwendungen für Laubholz erforscht und umgesetzt werden (z.B. Schichtleimholz als tragende Bauelemente)
 → Standortabhängiger Bodenschutz: Es bedarf der Prüfung wissenschaftlicher Bewertungsschemata,

die mit Blick auf das FSC-Kriterium „Derbholzgrenze“ eine nachhaltige Nutzung alternativ z.B. nach Nährstoffversorgung der Böden definiert.

- **Cluster Agrarische Biomasse:**

→ Welche Folgen hat eine Umstellung von mehr industriell genutzter Biomasse gegenüber Energiepflanzen für den Anbau (Thema: Sortenwahl, Anbautechnologie, GVO).

→ Wie kann die Recyclingfähigkeit und auch die Akzeptanz der im Stoffkreislauf neuartigen biobasierten Produkte in der Recyclingwirtschaft sichergestellt werden.

- **Allgemein**

→ weitergehende Untersuchungen von Marktpotenzialen und Strukturen zur Etablierung neuer Kaskaden.

→ Quantitative Evaluierung der Ressourceneffizienz von Biomassekaskaden und deren Wechselwirkungen durch die Integration von Co-Produktion (wie **effizient** wird die Biomasse genutzt?) und der Kaskadennutzung (wie **oft** wird die Biomasse genutzt?).

B. Wirtschaftsakteure

- **Holz:**

→ Mit dem schwindenden Nadelholz müssen hochwertige Nutzungsanwendungen für Laubholz erforscht und umgesetzt werden (z.B. Schichtleimholz als tragende Bauelemente)

→ Hochwertige Produkte aus kleinteiligen Holzsortimenten müssen weiter entwickelt werden (ggf. auch Verbunde)

- **biobasierte Produkte allgemein**

→ Umsetzung der Recyclingfähigkeit für jede Art von Produkten im Rahmen der bestehenden Systeme, z.B.: Kompatibilität von biobasierten Kunststoffen mit bestehenden Kunststoffrecycling-Systemen

→ Konsequente Umsetzung von Prinzipien der Eco-design-Richtlinie.

→ Herstellung von Lieferketten-Verantwortung.

C. Verbraucher/innen, Konsument/innen

- **Aufmerksamkeit für die Problematik fördern**

- **Umwelt- und Nachhaltigkeits-Kennzeichnung für die Kaufentscheidung stärken**

- **Den Suffizienz-Gedanken breiter zugänglich machen**

- **Akzeptanz der Sammlungen erhalten und ggf. Anreize prüfen.**

8 Zusammenfassung

Die Erhöhung der Ressourceneffizienz hat politisch eine hohe Priorität und aktuelle Bedeutung. Die 2017 aktualisierte Nachhaltigsstrategie und das Ressourcenprogramm ProgRes II greifen die Kaskadennutzung als wichtiges Element auf. Tatsächlich hat der Begriff der Kaskadennutzung seit dem Jahr 2000 zunehmend an Bedeutung gewonnen in Wissenschaft, Politik und Wirtschaft. Er wird in verschiedenen Zusammenhängen verwendet und zeigt dadurch eine enge Verflechtung mit Kreislaufwirtschaft, Recycling, Bioraffinerie, Bioökonomie. Bis heute bestehen allerdings Unklarheiten, was dieser Begriff Neues zum Ausdruck bringt oder wie er abzugrenzen sei.

Die **im Projekt entwickelte Definition** der Kaskadennutzung war daher notwendig und ermöglicht zum einen klare Abgrenzungen zwischen den Begriffen, macht zum anderen auch die Überschneidungen und Zusammenhänge der verschiedenen Politikfelder für die Erhöhung der Ressourceneffizienz deutlich. Das Forschungsprojekt leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Schärfung des Kaskadenbegriffs.

Im ersten Schritt des Forschungsprojekts wurden **existierende Konzepte der Kaskadennutzung** in Theorie und Praxis zusammengefasst und bewertet. Dabei wurde deutlich, dass in der Praxis die Anzahl an erfolgreichen Beispielen überschaubar ist. Herausgearbeitet wurden als relevante Felder:

- ▶ Der **Holzsektor**, mit bereits vorhandenen Umsetzungen aber auch weiterem Potenzial für Kaskadennutzung
- ▶ Der **Papiersektor**, mit der bereits erfolgreichsten Umsetzung
- ▶ Der **Textilsektor**, mit insgesamt sehr vielen Konfliktlinien bezüglich Umwelt und Nachhaltigkeit
- ▶ Der Kunststoffsektor, der zunächst einer Transformation in Richtung **Bio-Kunststoffe** bedarf, wobei die bestehenden Recycling-Erfolge konventioneller Kunststoffe bewahrt und ausgebaut werden müssten.

Nach der im Forschungsprojekt durchgeführten Analyse scheinen bisher für die Kaskadennutzung die **Hemmnisse** gegenüber den Erfolgsfaktoren zu überwiegen. Entscheidende Faktoren sind

- ▶ die Konkurrenz zur direkten energetischen Nutzung,
- ▶ die fehlende Kooperation zwischen den Marktakteuren angesichts komplexer Wertschöpfungsketten im Falle von Kaskadennutzung.
- ▶ Produktsicherheit und Produktqualität (Stichwort Schadstoffanreicherung in den Produkten).

Von erheblicher Bedeutung ist das agrarische und forstliche **Rohstoffpotenzial** als Ausgangspunkt der Kaskade. Im Forschungsprojekt wurde untersucht, wie hier die Märkte strukturiert sind und inwieweit für den Bedarf zur stofflichen Nutzung im Inland das Potenzial, sprich die Flächen zur Verfügung stehen. Die durch den Wegfall der Förderung energetischer Nutzung (EEG) freiwerdenden Flächen könnten für die stoffliche Nutzung ein großes Potenzial bieten. Die Frage, ob dies dann auch politisch gewollt wird, und wenn ja in welchem Umfang, bleibt zu erörtern.

Im Rahmen des Projekts wurden umfassende **Ökobilanzen** zu verschiedenen Kaskadenoptionen jeweils innerhalb der oben genannten vier Sektoren durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten deutliche umweltseitige Vorteile für die Mehrzahl der untersuchten Kaskadenoptionen gegenüber dem Referenzfall ohne oder nur mit einer Kaskadenstufe. Verallgemeinerungen sind jedoch schwierig, es bedarf Einzelfallbetrachtungen. Folgende Faktoren stellen sich als Ökobilanzergebnis als entscheidend dar:

- ▶ Was wird substituiert? Eine hohe Qualität des Substituts kann zur Vermeidung erheblicher Umweltlasten führen.
- ▶ Möglichst geringe Stoffverluste über die Kette.

Insgesamt jedoch zeigen die Ökobilanzen eine Vielzahl an relevanten Einzelaspekten. Es ist aber auch deutlich geworden, dass mit der Ökobilanzmethode je nach Gestaltung der Systemgrenze nicht alle

Fragen der Ressourceneffizienz für den Spezialfall der Kaskadennutzung vollständig beantwortet werden können.

In Fortführung der Erkenntnisse aus den komplexen Ökobilanzen wurde daher ein **Bewertungskonzept** entwickelt und vorgeschlagen, das der Einschätzung möglicher Kaskadenansätze zwar auf breiterer Ebene, jedoch auch mit geringerer Detaillierungstiefe dienen soll. Es liefert eine Orientierung darüber, ob ein Ansatz aus Nachhaltigkeitssicht als sinnvoll bzw. erfolversprechend einzustufen wäre. Wenngleich die Bewertung hier auf vereinfachtem Abstraktionsniveau erfolgt, bedarf es dennoch Expertensachverstand bei der Anwendung. Die Komplexität der Sachverhalte lassen eine zu starke Vereinfachung oder gar Automatisierung der Ergebnisfindung nicht zu, setzt man ein richtungssicheres Ergebnis voraus. Die darin enthaltenen Elemente können den Beitrag der über Kaskaden geführten Biomasse in einer bio-basierten Produkt-Wertschöpfungskette oder einem gesamten Sektor aufzeigen. Zur Quantifizierung wurde der *Biomass Utilization Factor* (BUF) vorgestellt, der Produktionseffizienz und Kaskadennutzung in ein übergreifendes Konzept integriert und als Messinstrument in das Bewertungskonzept integriert werden kann.

Bei der Vorstellung der im Forschungsprojekt erarbeiteten **Eckpunkte einer Strategie** zur Förderung der Kaskadennutzung von Biomasse wurde deutlich gemacht, dass das Kernziel der Kaskadennutzung in der Erhöhung der Ressourceneffizienz besteht. Gleichzeitig wurde herausgestellt, dass Kaskadennutzung per se nicht Ressourceneffizienz garantieren kann. Umso wichtiger ist es folglich, die Kaskadennutzung nicht als eigenständige Politikstrategie sondern sie als „Prinzip“ zur Unterstützung übergreifender Politikziele und Strategien einzubinden. Dazu bedarf es dann auch unterstützender Bewertungskonzepte (s.o.), um sich der positiven Effekte im Einzelfall sicher zu sein, bzw. negative Effekte auszuschließen (z.B. Verdrängung höherwertiger Wiederverwendung, Schadstoffanreicherungen, „nutzlose“ Produkte).

Die strategisch entscheidende Rolle der Kaskadennutzung liegt in der **Verknüpfung der Leitstrategien Bioökonomie und Kreislaufwirtschaft** (Circular Economy). Sie muss hierzu die Eckpunkte für die notwendige konkrete Gestaltung der politischen Rahmenbedingungen (v.a. Ressourceneffizienzpolitik, Bioökonomie), des Fachrechts (z.B. EEG, AltholzVO, BImSchG) und der Forschung setzen, um die Umsetzung von Kaskadennutzungen zu ermöglichen. Auch die Wirtschaft muss ihren Beitrag leisten im Kontext von ökologischen Innovationen, Ecodesign und Produktverantwortung über die gesamte Lieferkette hinweg.

Zuletzt ist auch der Konsument in der Pflicht. Hierzu bedarf es Bewusstseinsbildung, vor allem in Richtung der effektivsten Strategie zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs: der Suffizienz.

Es wird daher ein Mix oder vielmehr ein Zusammenwirken von Strategien benötigt, zum nachhaltigen Umgang mit Ressourcen. Allein die Forderung nach mehr Kaskadennutzung greift zu kurz. Der „Erfolg“ muss im Einzelfall messbar und nachweisbar sein, wofür das oben angeführte Bewertungskonzept dienen kann. Kaskadennutzung muss gekoppelt einhergehen mit effizienten Produktionsweisen und entsprechenden Produktdesigns, um Wechselwirkungen und Rückkopplungseffekte verschiedener Politikfelder und Wirtschaftszweige transparent abzuschätzen und damit steuerbar zu machen.

9 Quellenverzeichnis

Kapitel 1 - Hintergrund und Zielsetzung

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

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

Steffen, W. et al. (2015) : Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet , Science 347, 1259855 (2015). DOI: 10.1126/science.1259855

Kapitel 2 - AP1

AEBIOM, CEPF, COPA-COGECA, ELO, European Industry of Pellet Suppliers, eustafor (2013): Joint Statement on cascade use of wood. Brussels, 25th November 2013

Aeschelmann, F. & M. Carus (2015): Bio-based Building Blocks and Polymers in the World – Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends toward 2020. Nova-Institut, Hürth.

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

Blue Economy (2012): Blue Economy calls for joint strategy with UNEP. March 23, 2012. Retrieved March 03, 2015.
<http://www.blueeconomy.eu/blog/blue-economy-calls-for-joint-strategy-with-unep/>

BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) 2015: Fachliche Schlussfolgerungen aus dem F+E-Vorhaben zur Getrenntsammlung von Bioabfällen; Referat WR II 4; 03.04.2014, aktualisiert 07.05.2015
<http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/getrennte-sammlung-von-bioabfaellen-ab-1-januar-2015/>

Bos-Brouwers, H.E.J.; Langelaan, H.C.; Sanders, J.P.M.; Dijk, M. van; Vuuren, A.M. van (2012): Chances for biomass: integrated valorisation of biomass resources. Research Report. Wageningen UR, 2012

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) 2010: Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030, Bonn, Berlin, 2010

BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) 2013: Politikstrategie Bioökonomie - Nachwachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie, Berlin, Stand: Juli 2013

BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, BMU (Bundesministerium für Umwelt) 2010: Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland - Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung Berlin, Stand September 2010

BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) 2008: Bekanntmachung über die Förderung der angewandten Forschung auf dem Gebiet der nachwachsenden Rohstoffe im Rahmen des Förderprogramms «Nachwachsende Rohstoffe» der Bundesregierung zum Schwerpunkt «Innovative Mehrfachnutzung von nachwachsenden Rohstoffen, Bioraffinerien». 24. April 2008.

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) 2015: Deutsches Ressourceneffizienz-programm (ProgRes) - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Kabinettsbeschluss: 29. Februar 2012. 2. Auflage: Februar 2015

Bundesregierung (2008): Fortschrittsbericht 2008 zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie - Für ein nachhaltiges Deutschland. Berlin 2008

Bundesregierung 2012: Roadmap Bioraffinerien - im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Hrsg.: BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), BMU (Bundesministerium für Umwelt), BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie). Berlin, Stand: Mai 2012

- bvse - Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (2008): Textilrecycling in Deutschland. bvse, Bonn.
- Braungart, M & W. McDonough (2013): Cradle to Cradle – Einfach intelligent produzieren. München, 2013.
- Bruton, T.; Lyons, H.; Lerat, Y.; Stanley, M.; Rasmussen, M.B. (2009): A review of the potential of marine algae as a source of biofuel in Ireland. Sustainable Energy Ireland, Dublin (2009)
- Carus, M. (2014): Cascading concepts and proposal for a new definition. Presentation on the second workshop “Cascading use of biomass – from theory to practice. Brussels, 01. April 2014
- Carus, M.; Dammer, L.; Hermann, A.; Essel, R. (2014): nova-Paper #4 on bio-based economy: “Proposals for a Reform of the Renewable Energy Directive (RED) to a Renewable Energy and Materials Directive (REMD)”, main text and appendix II.9 “Cascading Use of Biomass”. (www.bio-based.eu/nova-papers).
- CDU, CSU, SPD (2013): Deutschlands Zukunft gestalten -Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU UND SPD, 18. Legislaturperiode. 2013
- CEPF, COPA COGECA & ELO (2015): Joint statement - European forest owners strongly question the benefits and practicability of the cascade use principle. Brussels, 6th July 2015
- Corticeira Amorim (2011): Sustainability Report 2011. Mozelos, Portugal
- 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. World Wide Fund For Nature (WWF), Switzerland.
- Dornburg, V. (2004): Multi-functional Biomass Systems. Dissertation an der Universität Utrecht. Available at: <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2004-1207-114735/full.pdf>
- Ellen MacArthur Foundation (2013): Towards the Circular Economy, Opportunities for the consumer goods sector. Ellen MacArthur Foundation.
- Essel, R.; Breitmayer, E.; Carus, M.; Fehrenbach, H.; Geibler, J.v.; Bienge, K. & F. Baur (2014): Defining cascading use of biomass. Discussion paper. R&D-Project “Increasing resource efficiency by cascading use of biomass – from theory to practice” (FKZ 3713 44 100). Nova-Institut, Hürth. Available at: http://biomassekaskaden.de/wp-content/uploads/2014/04/14-03-14_Cascading_use_Discussionpaper.pdf.
- European Commission (2014): Für ein Wiedererstarken der europäischen Industrie. COM (2014), Brüssel, 22.01.2014.
- European Commission (2014): Hin zu einer Kreislaufwirtschaft: Ein Null-Abfallprogramm für Europa. COM(2014) 398 final. Brüssel 02 Juli 2014
- European Commission (2013): Eine neue EU-Waldstrategie: für Wälder und den forstbasierten Sektor COM(2013) 659 final/2. Brüssel, Mai 2014
- European Commission, DG Enterprise and Industry (2013): Industrial policy indicators and analysis - June 2013 – Special Feature: Bio-based sector achievements and further challenges, with focus on the Bio-based products Task Force. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/industrial-competitiveness/economic-crisis/files/monthly-note-june-2013_en.pdf
- European Commission, DG Research and Innovation (2012): commission staff working document accompanying the document Communication on Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe Innovating for Sustainable Growth – A Bioeconomy for Europe. Brussels, 2012
- ERPC - European Recovered Paper Council (2014). Natural limits. Von European Recovered Paper Council abgerufen am 16. Juli 2014: <http://www.paperforrecycling.eu/paper-recycling/natural-limits>
- European Union, (2008): Directive 2008/98/EC of the European Parliament and the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives. Official Journal of the European Union, 22/11/2008
- EUROSTAT (2015) Abgerufen am Aufkommen und Behandlung von Siedlungsabfällen. <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdpc240&language=de> . Abgerufen am 22. September 2015.
- Fehrenbach (2014): Abgrenzung und Zusammenhang der Kaskadennutzung mit den Basisbegriffen der Abfall-/Kreislaufwirtschaft. IFEU-Institut. Heidelberg, 2014
- Fraanje, P.J. (1997): Cascading of pine wood. In: Resources, Conservation and Recycling 19: 21-28

- Frühwald, A.; Morgan R. M.; Diederichs S. (2010): Verwendungspotentiale heben durch Kaskadennutzung am Beispiel Holz. (online). *Erneuerb Energie* 4:37-49. Retrieved: March 03, 2015. <http://ask-eu.de/default.asp?Menue=179&ArtikelPPV=18359>
- Gärtner, S.; Hienz, G.; Keller, H.; Müller-Lindenlauf, M. (2013): Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz – Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg
- Goverse, T.; Hekkert, M-P.; Groenewegen, P.; Worrell, E.; Smits, R.E.H.M. (2001): Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints. *Resources, Conservation and Recycling* 34 (2001) 53–74
- Haberl, H. & S. Geissler (2000): Cascade utilization of biomass: strategies for a more efficient use of a scarce resource. In: *Ecological Engineering* 16: 111-121
- Höglmeier, K.; Steubing, B.; Weber-Blaschke, G.; Richter, K. (2015): LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading use of wood. *Journal of Environmental Management*, Volume 152, p. 158-170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.018>.
- Indufor (2013): Study on the Wood Raw Material Supply and Demand for the EU Wood-processing Industries; on behalf of European Commission, Enterprise and Industry Directorate General; Helsinki 2013.
- Johann Heinrich von Thünen Institute: Development of process cascades to improve resource efficiency und maximize the material uses of process wastes and residues. Retrieved: March 03, 2015. <https://www.ti.bund.de/en/hf/fields-of-activity/bio-based-basic-materials-and-products/process-cascades-and-material-uses-of-by-products/>
- Keegan, D.; Kretschmer, B.; Elbersen, B.; Panoutsou, C. (2013): Review: Cascading the use of biomass. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 7:193–206 (2013) <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.1351>
- Malins, C.; Searle, S.; Baral, A.; Turley, D.; Hopwood, L. (2014): Wasted: Europe’s untapped resource (online). Retrieved: March 04, 2015. <http://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2014/02/WASTED-final.pdf>.
- Mantau, U. Saal, U.; Prins, K.; Steierer, F.; Lindner, M.; Verkerk, H.; Eggers, J.; Leek, N.; Oldenburger, J.; Asikainen, A.; Antilla, P. (2010): EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report. Hamburg/Germany, June 2010.
- Mantau, U.; Weimar, H.; Kloock, T. (2012): Standorte der Holzwirtschaft - Holzrohstoffmonitoring. Altholz im Entsorgungsmarkt – Aufkommens- und Vertriebsstruktur 2010. Abschlussbericht. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft. Hamburg, 2012.
- Mantau, U. (2012): Wood flows in Europe (EU27). Project report. Celle 2012, 24 pp
- Moran, K. (2013): Pine Chemicals: A Call to Action. Vortrag: 2013 PCA International Conference, Pine Chemicals Association, Hotel Rey Juan Carlos I, Barcelona, 15.-17. September 2013
- Morris, Ch. (2015): Pine Chemicals as an Engine for Economic Growth and Sustainability. Press release. January 29, 2015. Retrieved March 03, 2015. <http://www.pinechemicals.org/news/213690/Pine-Chemicals-as-an-Engine-for-Economic-Growth-and-Sustainability.htm>
- nova-Institut (2015): “Biomass Utilization Factor” - The new concept for combining and quantifying cascading use and co-production of biomass. Workshop “The Optimised Cascading Use of Wood”. Brüssel, 30. Juni 2015.
- Odegard, I, H. Croezen, G. Bergsma (2012). Cascading of biomass, 13 solutions for a sustainable biobased economy. Report Delft, August 2012. CE Delft
- Olsson, O.; Bruce, L.; Roos, A.; Hektor, B.; Guisson, R.; Lamers, P.; Hartley, D.; Ponitka, J.; Hildebrandt, J. & D. Thrän (2016): Cascading of Woody Biomass: definitions, policies and effects on international trade. IEA Bioenergy Task 40. April 2016.
- Sathre, R. and Gustavsson, L. (2006): Energy and carbon balances of wood cascade chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 47(4): 332-355.
- Sirkin, T. & M. ten Houten (1994): The cascade chain - A theory and tool for achieving resource sustainability with applications for product design. In: *Resources, Conservation and Recycling* 10 (3): 213-276
- Sokka, L.; Koponen, K. & J.T. Keränen (2015): Cascading use of wood in Finland – with comparisons to selected EU countries. VTT Technical Research Centre, Espoo, Finland.

Standing Committee on Agricultural Research (2014): Where next for the European bioeconomy? The latest thinking from the European Bioeconomy Panel and the Standing Committee on Agricultural Research Strategic Working Group (SCAR). European Union, 2014. Retrieved: March 03, 2015. http://ec.europa.eu/research/bioeconomy/pdf/where-next-for-european-bioeconomy-report-0809102014_en.pdf.

Umweltbundesamt (2012): Glossar zum Ressourcenschutz. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

VDP – Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (2015): Papier Kompass. VDP, Bonn.

Vis, M.W.; Reumermann, P. & S. Gärtner (2014): Cascading in the wood sector. Final Report. Biomass Technology Group (BTG), Enschede.

Wern, B. (2012): Holzkaskaden – Strategie und Maßnahmen zur Holzenergienutzung unter Berücksichtigung von Holzkaskaden am Beispiel des Saarlandes. Vortrag auf der 4. Statuskonferenz des Förderprogramms Energetische Biomassenutzung, Berlin

Wern, B.; Kay, S.; Vogler, C.; Baur, F.; Gärtner, S.; Hienz, G.; Keller, H.; Müller-Lindenlauf, M.; Stockmann, F.; Wenzelides, M.; Hagemann, H.; Schulte (2014): Regionale Konzepte zum Ausbau der Bioenergieerzeugung aus Holz – nachhaltige und energieeffiziente Strategieentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Holzkaskadennutzung. Endbericht. Saarbrücken, Heidelberg, Münster, März 2014

Werner, F.; Taverna, R.; Hofer, P.; Thürig, R.; Kaufmann E. (2009): National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *environmental science & policy* 13 (2010) 72–85

Wimmer, E.; Mackwitz, H.; Schemitz, S.; Burner, U.; Stadlbauer, W. (2003): NaWaRo-Cascading für die Wellness-Regio. Untersuchung der kaskadischen Nutzungsmöglichkeiten von Steinobst-Restmassen im Food- und Non-food-Bereich. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.), Wien

Kapitel 3 – AP2

AFP/oc. (04. Dezember 2012). Mineralöl-Rückstände auch in Lebensmittelkartons. Von DIE WELT: <http://www.welt.de/gesundheit/article111796002/Mineraloel-Rueckstaende-auch-in-Lebensmittelkartons.html> abgerufen

Agrar-Europe. (23. Oktober 2013). Zu viel Zucker auf dem Weltmarkt. Abgerufen am 14. Juli 2014 von [www.agrarheute.com: http://www.agrarheute.com/zuckerpreise-weltmarkt](http://www.agrarheute.com/zuckerpreise-weltmarkt)

Arizona Chemical. (14. Juli 2010). Tree of life - creating a sustainable future with pine chemicals. Almere. Abgerufen am 22. 07 2014 von http://www.arizonachemical.com/Global/Graphs/Company_Materials_Tree_of_Life.pdf

Aulenbacher, F. (03. Juni 2014). Alchimea Naturwaren GmbH. (S. Kay, Interviewer)

Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung. (2013). Ökologischer Landbau und Bioenergieerzeugung - Zielkonflikte und Lösungsansätze. Berlin: Deutscher Bundestag 17. Wahlperiode.

BAV, BDE & VBS. (03. Dezember 2013). Ergebnisse des Altholztages 2013 von BSV, BDE und VBS. Von BDE - Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V.: <http://www.bde-berlin.org/?p=8701>

Beckhove, A. (15. Juli 2014). Lebensmittelnachfrage wird bis 2023 kräftig steigen. *topagrar.online*. Abgerufen am 15. Juli 2014 von <http://www.topagrar.com/news/Markt-Marktnews-Lebensmittelnachfrage-wird-bis-2023-kraeftig-steigen-1490404.html>

Beller, S. (2012). Von der Abschaffung des Mülls. *greenpeace magazin* 3.12.

BioÖkonomieRat. (2012). Nachhaltige Nutzung von Bioenergie - Empfehlungen des BioÖkonomieRats. Berlin: Forschungs- und Technologierate Bioökonomie (BÖR).

BLE & BMELV. (2014a). 205. Selbstversorgungsgrad bei Nahrungsmitteln insgesamt. Bonn: Bundesamt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) und Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

BLE & BMELV. (2014b). 206. Selbstversorgungsgrad bei landwirtschaftlichen Erzeugnissen. Bonn: Bundesamt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) und Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

BMEL. (2012). Quelle für den Rohstoffwandel. (BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) Abgerufen am 13. Juli 2014 von <http://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachwachsende-Rohstoffe/BiobasiertesWirtschaften/texte/QuellenRohstoffwandelweb15.html>

- BMEL. (2013). Nationale Politikstrategie Bioökonomie - Nachwachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie. Berlin: BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.
- BMELV & BMU. (2010). Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland. Berlin: BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz + BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- BMELV. (2004). Verstärkte Holznutzung zugunsten von Klima, Lebensqualität, Innovation und Arbeitsplätzen (Charta für Holz). Bonn: BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- BMELV. (2006). Die zweite Bundeswaldinventur - BWI² - Der Inventurbericht. Bonn: BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- BMELV. (2011a). Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland. (L. u. BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Hrsg.) Berlin: Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup.
- BMELV. (2011b). Waldstrategie 2020. Nachhaltige Waldbewirtschaftung – eine gesellschaftliche Chance und Herausforderung. Bonn: BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- BMELV. (2013). Ernte 2013: Mengen und Preise. Berlin: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- BMU. (2012). BMU-Leitstudie "Deutschland 2050" - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart + Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel + Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Teltow. Berlin: BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- BMVBS. (2010). Globale und regionale Verteilung von Biomassepotenzialen. Status-quo und Möglichkeiten der Präzisierung. (B. u. BMVBS - Bundesministerium für Verkehr, Hrsg.) Berlin.
- Bremer Baumwollbörse. (2014). Jahresbericht 2013. Bremen.
- Bundeskabineett. (2007). Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Berlin: BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- BVdDP. (Mai 2013). Verband des Deutschen Papiergroßhandels. (B. -B. e.V., Hrsg.) Abgerufen am 10. Juli 2014 von Zahlen und Fakten - Jahresbericht 2012: <http://www.verband-papiergrosshandel.de/pdf/BVdDP.pdf>
- BVS. (2012). Daten und Fakten 2012. Berlin: BVS - Bundesverband der Stärkekartoffelerzeuger e.V.
- bvse. (2008). Textilrecycling in Deutschland. Bonn: bvse - Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. + FTR - Fachverband Textil-Recycling e.V.
- CEPI. (04. Juli 2014). Joint press release: Adoption of the EU Circular Economy Package highlights the need to shift focus from waste to resource management. Von Cepi - Confederation of European Paper Industries: <http://www.cepi.org/node/17978>
- DBFZ. (2011). Identifizierung strategischer Hemmnisse und Entwicklung von Lösungsansätzen zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen beim weiteren Ausbau der energetischen Biomassenutzung. DBFZ-Report Nr. 4, DBFZ - Deutsches BiomasseForschungszentrum gGmbH, Leipzig.
- DBFZ (2013). Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen. Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie. DBFZ - Deutsches BiomasseForschungszentrum gGmbH, Leipzig; BMVBS - Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- DBFZ (2016): Kurzstudie: Entwicklung der Biomasseverstromung bei Fortschreibung der aktuellen EEG-Vergütung, gefördert durch FNR, 2016
- DBV. (2012). Situationsbericht 2012/2013 - Trends und Fakten zur Landwirtschaft. Berlin: Deutscher Bauernverband DBV.
- DESTATIS. (2014). Textilien und Kleidung aus Baumwolle 2010. Abgerufen am 11. Juni 2014 von DESTATIS: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/STATmagazin/Umwelt/2013_06/Tabellen/ImporteRohbaumwolle.html
- Deutscher Bundestag. (2012). Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Bärbel Höhn, Thilo Hoppe, Cornelia Behm, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 17/8216 –. Berlin: Deutscher Bundestag.

Die Bundesregierung. (2002). Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Berlin: Die Bundesregierung.

Die Bundesregierung. (2009). Aktionsplan der Bundesregierung zur stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen. Berlin: BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

Die Bundesregierung. (2012). Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen - Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.02.2012. Berlin: BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

DMK. (15. Juli 2014). Die Stärke-Industrie. Von Deutsches Maiskomitee e.V. (DMK):
<http://www.maiskomitee.de/web/public/Verwertung.aspx/Industrie/St%C3%A4rkeindustrie>

Engelhardt, A. W. (2013). Der textile Weltmarkt 2012. Speicher: The Fiber Year GmbH.

European Recovered Paper Council. (16. Juli 2014). Natural limits. Von European Recovered Paper Council:
<http://www.paperforrecycling.eu/paper-recycling/natural-limits>

eurostat. (2011). Jährliche Prodcom-Daten. Eurostat -.

eurostat. (07. Juli 2014a). Faser- und Zellstoffe, Papier und Karton. Von www.eurostat.eu:
<http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>

eurostat. (07. Juli 2014b). Schnittholz, Platten und Furniere. Von www.eurostat.eu:
<http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>

FAO. (2014). FAO Statistics Division 2014. (FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS) Abgerufen am 7. Juli 2014 von <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>

FNR. (2013a). Stoffliche Einsatzmengen organischer Rohstoffe in der chemischen Industrie in Deutschland 2011. (F. -F. e.V., Hrsg.) Abgerufen am 15. Juli 2014 von Abb 113: <http://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/industrielle-nutzung/chemische-industrie/stoffliche-einsatzmengen-organischer-rohstoffe-in-der-chemischen-industrie-in-deutschland-2011.html>

FNR. (2013b). Stoffliche Einsatzmengen nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie in Deutschland 2011. Abgerufen am 13. Juli 2014 von Abb 115: <http://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/industrielle-nutzung/chemische-industrie/stoffliche-einsatzmengen-nachwachsender-rohstoffe-in-der-chemischen-industrie-in-deutschland-2011.html>

FNR. (2013c). Tabelle der Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe 2013. Abgerufen am 15. Juli 2014 von FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.: <http://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/anbau/anbauflaeche-fur-nachwachsende-rohstoffe-2013-tabelle.html>

FNR. (2013d). Strom - natürlich aus Biogas. (F. -F. e.V., Herausgeber) Abgerufen am 06. August 2014 von Artikelnummer 497: http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/f/n/fnr510_grafik_biogas_von_1ha_2013_300dpi_rgb.jpg

Forstliche Bildungsstätten der Bundesrepublik Deutschland. (2011). Der Forstwirt. Stuttgart: Eugen Ulmer KG.

Fraunhofer-Institut für Holzforschung WKI. (April 2014). Altholz-Recycling. Abgerufen am 19. August 2014 von http://www.wki.fraunhofer.de/content/dam/wki/de/documents/flyer/Flyer_Altholz-Recycling_deu_2014-04.pdf

FTR. (2014). Der Weg der Altkleider von der Sammlung zur Wiederverwendung. (FTR - Fachverband Textilrecycling) Abgerufen am 11. Juli 2014 von http://www.bvse.de/356/6770/Der_Weg_der_Altkleider_von_der_Sammlung_zur_Wiederverwendung

Germany Trade Invest. (2014). Konsumgüter und Einzelhandel, Deutschland - Ein großer Absatzmarkt und effizienter Produktionsstandort. Berlin: Germany Trade Invest.

Gesamtverband textil+mode. (2012). Textil, Mensch & Umwelt: Zusammenhänge und Fakten rund um ein sensibles Beziehungsgeflecht. Berlin: Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e.V.

Gömann, H., de Witte, T., Peter, G., & Tietz, A. (2013). Auswirkungen der Biogaserzeugung auf die Landwirtschaft. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut.

Grammel, R. (1989). Forstbenutzung: Technologie, Verwertung und Verwendung des Holzes. Hamburg, Berlin: Pareys Studientexte, Nr. 67.

Gries, T., Veit, D., & Vulffhorst, B. (2014). Textile Fertigungsverfahren: Eine Einführung. München: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

- Hildenbrand, K.-P., & Lorenz, T. (2011). Landschaftspflegematerial - logistische Anforderungen und energetische Nutzung. Simmern: RheinHunsrück Entsorgung.
- Holzmarktinfo.de. (11. September 2014). Indexpreis für Industrieholz. Von Forstpraxis.de: <http://www.forstpraxis.de/indexwerte-fuer-industrieholz> abgerufen
- IfBB - Institute for Bioplastics and Biocomposites. (27. September 2013). Biopolymerplattform – das Informationsportal für Biokunststoffe. (H. H.-U. Arts, Herausgeber) Von www.downloads.ifbb-hannover.de abgerufen
- IVC. (2014). Die Chemiefaserindustrie in der Bundesrepublik Deutschland 2013/2014. Frankfurt am Main: IVC - Industrievereinigung Chemiefaser e.V. .
- IZES. (2011). Biomasse-Potenzialanalyse für das Saarland. Der Teilplan Biomasse zum Master-Plan Neue Energie. . Saarbrücken: IZES gGmbH.
- IZES. (2014a). Regionale Konzepte zum Ausbau der Bioenergieerzeugung aus Holz – nachhaltige und energieeffiziente Strategieentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Holzkaskadennutzung. Saarbrücken: IZES gGmbH.
- IZES. (2014b). Meilensteine 2030. unveröffentlicht. Saarbrücken: IZES gGmbH.
- IZES, ifeu (2016): Biogas – quo vadis?, gefördert durch BMUB, Saarbrücken, 2016
- Keller, H. J. (2014). The Cascading Use of Animal Fats in the Oleochemical Industry. Vortrag am 01.04.2014. Brüssel: Emery Oleochemicals.
- Klaus, T., Vollmer, C., Werner, K., Lehmann, H., & Müschen, K. (2010). Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen. Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- KTBL. (2009). Faustzahlen für die Landwirtschaft (Bd. 14. Auflage). Darmstadt: KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.
- Landesforstverwaltung Nordrhein-Westfalen. (kein Datum). Rundholzsortierungsvorschrift - RSV88 -. Landesforstverwaltung Nordrhein-Westfalen.
- Lenzing Aktiengesellschaft. (22. Juli 2014). Lenzing Gruppe - Standorte. Von <http://www.lenzing.com/konzern/lenzing-gruppe/standorte.html> abgerufen
- Leopoldina. (2012). Bioenergie: Grenzen und Möglichkeiten. Halle: Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina - Nationale Akademie der Wissenschaft.
- LfL. (2011). Nutzung von Grünland zur Biogaserzeugung - Machbarkeitsstudie. LfL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising-Weißenstephan: LfL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- LfU. (2012). Altholz. Augsburg: LfU - Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Mantau, U. (2010). EU Wood - Real potentials for changes in growth and use of EU forest.
- Mantau, U. (2012a). Holzrohstoffbilanz Deutschland: Entwicklung und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwertung von 1987 bis 2015. Hamburg: INFRO Informationssysteme für Rohstoffe; Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft.
- Mantau, U. (2012b). Standorte der Holzwirtschaft, Holzrohstoffmonitoring, Holzwerkstoffindustrie - Kapazitätsentwicklung und Holzrohstoffnutzung im Jahr 2010. Hamburg: Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft. Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft.
- Mantau, U., Weimar, H., & Kloock, T. (2012). Altholz im Entsorgungsmarkt - Aufkommen und Vertriebsstruktur 2010. Arbeitsbereich: Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft, Zentrum Holzwirtschaft. Hamburg: Universität Hamburg.
- Meo Carbon Solutions GmbH. (2014). Marktanalyse nachwachsende Rohstoffe (Bde. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe - Band 34). Gülzow-Prüzen: FNR - Fachagentur nachwachsende Rohstoffe.
- MIV. (2013). Milchwirtschaft in Deutschland – Beilage zum Geschäftsbericht 2012/2013 des Milchindustrieverband e.V. – Zahlen – Daten – Fakten. Berlin: MIV - Milchindustrieverband.
- Nitsch, J., Pregger, T., Scholz, Y., Naegler, T., Sterner, M., Gerhardt, N., . . . Wenzel, B. (2011). „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global.“ Bericht zur

„Leitstudie 2010“. DLR Stuttgart, IWES Kassel, IFNE Teltow. Berlin: BMU - Bundesministerium für Umweltschutz, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Nordwig, H. (07. November 2012). Kaum Recycling bei Biokunststoffen - Auch Bioplastik hat Umweltnachteile. Von Deutschlandfunk: http://www.deutschlandfunk.de/kaum-recycling-bei-biokunststoffen.676.de.html?dram:article_id=227258 abgerufen

nova. (2013). Bio-based Polymers in the World - Capacities, Production and Application: Status Quo and Trends towards 2020. Köln: nova-Institut.

Qmilk. (20. Februar 2014). Qmilk collect. Von Qmilk Deutschland GmbH: <http://qmilk-collect.com/qmilk-eu/> - Stand: 20.02.2014 abgerufen

Rapier, R. (2012). Why Sugarcane Bagasse is the Most Promising Pathway for Cellulosic Ethanol.

Reichart, A. (9. Oktober 2014). Alte Bücher sind zu schade für die Tonne. Umweltbundesamt.

Reichart, A. (08. Oktober 2014). Altpapier-Recycling. (S. Kay, Interviewer)

Rodsrud, G. (2014). Wood based biorefineries and cascading. Vortrag am 01.04.2014. Sarpsborg: Borregaard AS.

Rösch, C., Raab, K., Skarka, J., & Stelzer, V. (2007). Energie aus dem Grünland - eine nachhaltige Entwicklung? Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe.

Scholl, F. (9. Oktober 2014). Export von Altholz - Auswirkungen auf die energetische Verwertung. BBE-Holzkongress Augsburg, (S. 14). Augsburg.

Schütte, A. (2013). BIOMASSEPOTENZIALE - Möglichkeiten der Optimierung der nachhaltigen Biomassennutzung. Vortrag auf der FNR-Tagung „Möglichkeiten zur Optimierung der nachhaltigen Biomassennutzung unter Berücksichtigung der Ernährungssicherung“ - 19.03.2013. Berlin: FNR - Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V.

Seintsch, B., & Weimar, H. (2013). Holzbilanzen 2010 und 2012 für die Bundesrepublik Deutschland. Hamburg: Thünen Working Paper 9.

Spellmann, H. (2013). Masse statt Klasse? Waldbauliche Konsequenzen aus einer veränderten Rohstoffnachfrage. Vortrag auf dem 33. Freiburger Winterkolloquium Forst und Holz. Freiburg.

Statisches Bundesamt. (2012). Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Wachstum und Ernte - Feldfrüchte. Fachserie 3 Reihe 3.2.1. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

TextilExchange. (27. 10 2014). Recycled Cotton. Von TextilExchange - Creating Material Change: <http://textileexchange.org/node/958> abgerufen

UBA. (2007). Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung. IE -Institut für Energetik und Umwelt gGmbH + IZES Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH + Öko-Institut e.V. Dessau: UBA - Umweltbundesamt.

UBA. (2010). Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz. (Bd. Texte 43/2010). (U. Umweltbundesamt, Hrsg.) Dessau-Roßlau.

UBA. (2012). Glossar zum Ressourcenschutz. Dessau-Roßlau: UBA - Umweltbundesamt.

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

UBA. (2014). Abfälle im Haushalt - Vermeiden, Trennen, Verwerten. Dessau: Umweltbundesamt (UBA).

UNICA. (2012). Harvest update. Bi-Weekly bulletin.

Universität Stuttgart. (2012). Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland. iswa - Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft + Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Abfallwirtschaft. Stuttgart: BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

VDGS. (08. Juli 2014). Zahlen & Daten zur deutschen Stärke-Industrie. Von VDGS - Verband der deutschen Getreideverarbeiter und Stärkehersteller e.V.: <http://www.staerkeverband.de/html/zahlen.html> abgerufen

VDP. (2013). Papier 2013 - Ein Leistungsbericht. Bonn: Verband Deutscher Papierfabriken e.V.

- VDP. (2014a). Statistische Kurzinformationen deutscher Zellstoff- und Papierfabriken. Bonn: VDP - Verband Deutscher Papierfabriken e.V.
- VDP. (2014b). Papier Kompass 2014. Bonn: VDP - Verband Deutscher Papierfabriken e.V.
- Venus, J. (2013). Pilot plant facility for the manufacture of bio-based products. Potsdam-Bornim: ATB - Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
- Weiser, C., Zeller, V., Reinicke, F., Wagner, B., Majer, S., Vetter, A., & Thrän, D. (2013). Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany. Applied Energy. Von <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.016> abgerufen
- WVZ. (07. Juli 2014a). Empfängergruppen für Zucker 2011/12. Von Wirtschaftliche Vereinigung Zucker e.V. - Verein der Zuckerindustrie: <http://www.zuckerweb.de/zuckermarkt/zahlen-und-fakten/zuckermarkt-deutschland/zuckermarkt.html> abgerufen
- WVZ. (07. Juli 2014b). Melasse. Von Wirtschaftliche Vereinigung Zucker e.V. - Verein der Zuckerindustrie: <http://www.zuckerweb.de/zuckermarkt/zahlen-und-fakten/zuckermarkt-deutschland/melasse.html> abgerufen
- WVZ. (15. Juli 2014c). EU-Zuckerpolitik. Von Wirtschaftliche Vereinigung Zucker e.V. - Verein der Zuckerindustrie: <http://www.zuckerweb.de/zuckermarkt/eu-zuckerpolitik/eu-zuckerpolitik.html> abgerufen
- Zeddies, J., Bahrs, E., Schönleber, N., & Gamer, W. (2012). Globale Analyse und Abschätzung des Biomasse-Flächennutzungspotenzials. Hohenheim: Universität Hohenheim, Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre.
- Zinke, O. (27. Mai 2014). Welt-Zuckermarkt: Der Überschuss schrumpft. (marktkompass.com, Hrsg.) www.agrarheute.com. Abgerufen am 15. Juli 2014 von <http://www.agrarheute.com/s-607020>

Kapitel 4 – AP3

- Ahr, N. (2011): Diese Frau schneidert Kleider aus Milch. WeltN24 GmbH <http://www.welt.de/wirtschaft/karriere/junge-profis/article13415070/Diese-Frau-schneidert-Kleider-aus-Milch.html> . Abgerufen am 09. Juni 2015.
- Baig, R. (2013): UMWELT - Altkleider-Sammlung bei H&M. Deutsche Welle 26. Februar 2013. <http://dw.com/p/17mEy> . Abgerufen am 21. Juli 2015.
- Baumann, D. (2012): Primark: Kaufen, anziehen, wegwerfen. Frankfurter Rundschau – Wirtschaft, 28. Juli 2012. <http://www.fr-online.de/wirtschaft/primark-kaufen--anziehen--wegwerfen,1472780,16735048.html>. Eingesehen am 01. Juni 2015.
- BAV, BDE & VBS. (03. Dezember 2013). Ergebnisse des Altholztages 2013 von BSV, BDE und VBS. Von BDE - Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V.: <http://www.bde-berlin.org/?p=8701> . Abgerufen am 09. Juni 2015.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU, 2015): Untersuchung von Spanplatten vor dem Hintergrund der stofflichen Verwertung von Altholz. Augsburg, Stand: März 2015
- BBE – Fachverband Holzenergie im Bundesverband BioEnergie e.V. (BBE): Holzenergiebranche befürchtet Versorgungsengpässe durch Novellierung der Österreichischen Recyclingholzverordnung. Pressemitteilung vom 2.10.2015. BBE, Augsburg. http://www.bioenergie.de/index.php?option=com_content&view=article&id=1404:pm-holzenergiebranche-befuerchtet-versorgungsengpaesse-durch-novellierung-der-oesterreichischen-recyclingholzverordnung&catid=7:pm-bbe&Itemid=23. Abgerufen am 09. Oktober 2015.
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) 2015: Gründungsoffensive Biotechnologie GO-Bio. <http://www.bmbf.de/de/go-bio.php> . Abgerufen am 05. Mai 2015.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), BMU (Bundesministerium für Umwelt), BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) 2012: Roadmap Bioraffinerien - im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Berlin, Stand: Mai 2012.
- Böchzelt, H.G. (2013): Kaskadische Biomassenutzung - Die Grüne Bioraffinerie. Vortrag im Rahmen des Workshops „Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Biomassenutzung in Kaskaden. 03. Dezember 2013, Köln.

Bos-Brouwers, H.E.J.; Langelaan, H.C.; Sanders, J.P.M.; Dijk, M. van; Vuuren, A.M. van (2012): Chances for biomass: integrated valorisation of biomass resources. Research Report. Wageningen UR, 2012.

BUND (2013): Viel zu viel Müll wird produziert, deponiert und verbrannt. BUNDletter 3/13.

http://www.bund.net/publikationen/bundletter/32013/europas_muellproblem/ . Abgerufen am 05. Mai 2015.

Bundesverband der Altholzaufbereiter und –verwerter e.V. (BAV, 2012): Leitfaden der Altholzverwertung. 7. Auflage. Berlin, 2012.

Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V. (BDE 2010): BDE-Positionspapier zur Studie „Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft“. Berlin, 12. Jan. 2010. www.bde-berlin.org/?cat=7&paged=27. Abgerufen am 23. Februar 2015.

Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V. (BDE 2015): BDE: Rücknahme des Kreislaufwirtschaftspaketes wäre fatales Signal für Beschäftigung, Wachstum und Investitionen. <http://www.bde-berlin.org/?p=10522> . Abgerufen am 05. Juni 2015.

Bundesverband der deutschen Industrie (BDI, 2013): Stellungnahme: Grundsätze zur Erarbeitung von Nachhaltigkeitszielen im Rahmen des Rio+20-Prozesses. 12. April 2013.

http://www.bdi.eu/download_content/KlimaUndUmwelt/130412_Stn_Nachhaltigkeitsziele.pdf . Abgerufen am 01. Juni 2015.

Bundesverband Deutscher Kapitalbeteiligungsgesellschaften e.V. (BVK, 2015): BVK stellt Gesetzentwurf für Venture Capital-Gesetz vor: "Die Politik muss ihren Worten Taten folgen lassen.

Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. - Fachverband Textilrecycling (unbk.): Geschichte des Textilrecyclings.

http://www.bvse.de/356/6041/Geschichte_des_Textilrecyclings. Abgerufen am 08. Juni 2015.

Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. - Fachverband Ersatzbrennstoffe, Altholz und Biogene Abfälle (2015): Repräsentative Probenahmen sichern qualitativ hochwertige Verwertungswege. Bonn, 03.06.2015

http://www.bvse.de/337/8471/Altholz_Repraesentative_Probenahmen_sichern_qualitativ_hochwertige_Verwertungswege . Abgerufen am 05. Juni 2015.

Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. - Fachverband Textilrecycling (unbk.): Abkühlung am Markt für Alttextilien – Krisen beeinflussen Nachfrage.

http://www.bvse.de/15/7887/Abkuehlung_am_Markt_fuer_Alttextilien_Krisen_beeinflussen_Nachfrage . Abgerufen am 05. Juni 2015.

Coca-Cola Erfrischungsgetränke AG (Stand 2013): <http://www.cceag.de/unternehmen/daten-fakten/> . Abgerufen am 09. Juni 2015.

Confederation of European Paper Industries (2011): The Forest Fibre Industry - 2050 Roadmap to a low-carbon bio-economy. Brussels, Belgium.

Ellen MacArthur Foundation (2013): Towards the Circular Economy, Opportunities for the consumer goods sector. Ellen MacArthur Foundation.

Essel, R.; Breitmayer, E.; Carus, M.; Fehrenbach, H.; Geibler, J.v.; Bienge, K. & F. Baur (2014): Defining cascading use of biomass.

Discussion paper. R&D-Project "Increasing resource efficiency by cascading use of biomass – from theory to practice" (FKZ 3713 44 100). Nova-Institut, Hürth. Available at: [http://biomassekaskaden.de/wp-content/uploads/2014/04/14-03-](http://biomassekaskaden.de/wp-content/uploads/2014/04/14-03-14_Cascading_use_Discussionpaper.pdf)

[14_Cascading_use_Discussionpaper.pdf](http://biomassekaskaden.de/wp-content/uploads/2014/04/14-03-14_Cascading_use_Discussionpaper.pdf) .

European Parliament (2015): DRAFT REPORT on resource efficiency: moving towards a circular economy (2014/2208(INI)). Committee on the Environment, Public Health and Food Safety. Rapporteur: Sirpa Pietikäinen. 24.3.2015

Eurostat (2015): Municipal waste generation and treatment, by type of treatment method.

<http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=en&pcode=tsdpc240> . Abgerufen am 06. Juli 2015.

Fairwertung (unbk.): Altkleidersammlungen – Zahlen, Daten, Fakten.

<http://www.fairwertung.de/info/hintergrund/zahlen.2/index.html> . Abgerufen am 10. Juni 2015.

Fehrenbach, H. (2014): Abgrenzung und Zusammenhang der Kaskadennutzung mit den Basisbegriffen der Abfall-/Kreislaufwirtschaft. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg.

Gärtner, S.; Hienz, G.; Keller, H.; Müller-Lindenlauf, M. (2013): Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz – Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungs-systeme im Vergleich. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch § 44 Abs. 4 G vom 22. Mai 2013 (BGBl. I S. 1324).

Govrse, T.; Hekkert, M. P.; Groenewegen, P.; Worreil, E.; Smits, R.E.H.M. (2001): Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints Resources. Conservation and Recycling 34 (2001) 53–74.

Holmberg, A. (2014a): persönliches Gespräch im Rahmen des Workshops „Cascading use of Biomass – from theory to practice. 01.04.2014, Brüssel.

Holmberg, A. (2014): Creating highest value from Crude Tall Oil (CTO) by applying cascading use. Vortrag im Rahmen des Workshops „Cascading use of Biomass – from theory to practice. 01.04.2014, Brüssel.

Keller, H.J. (2014): The Cascading Use of Animal Fats in the Oleochemical Industry. Vortrag im Rahmen des Workshops „Cascading use of Biomass – from theory to practice. 01.04.2014, Brüssel.

Körner, S. (VHI, 2014): Cascading use of wood & the Initiative WoodProClimate. Vortrag im Rahmen des Workshops „Cascading use of Biomass – from theory to practice. 01.04.2014, Brüssel.

LaminatePark GmbH & Co. KG (Stand 2015): <http://www.laminate-park.de/index.php?unternehmen> . Abgerufen am 09. Juni 2015.

Leberle, U. (2014): Recycling in the paper industry: a success story. Vortrag im Rahmen des Workshops „Cascading use of Biomass – from theory to practice. 01.04.2014, Brüssel.

Malins, C.; Searle, S.; Baral, A.; Turley, D.; Hopwood, L. (2014): Wasted: Europe’s untapped resource (online). Retrieved: March 04, 2015. <http://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2014/02/WASTED-final.pdf> .

Odegard, I, H. Croezen, G. Bergsma (2012). Cascading of biomass, 13 solutions for a sustainable biobased economy. Report Delft, August 2012. CE Delft.

Philipp, R. (2015): BDE: Rücknahme des Kreislaufwirtschaftspaketes wäre fatales Signal für Beschäftigung, Wachstum und Investitionen. 21.01.2015. <http://www.bde-berlin.org/?p=10522> . Abgerufen am 05.05.2015.

QMilk (Stand 2015): <http://de.qmilk.eu/> . Abgerufen am 09. Juni 2015.

Poulter, S. (2008): the Daily Mail, 25. November 2008. <http://www.dailymail.co.uk/news/article-1089094/The-Primark-effect-Throwaway-fashion-recycled-makes-30-cent-waste-council-tips.html#ixzz3cZqu0LAL> . Eingesehen am 01. Juni 2015.

Rehbock, E. (2012): bvse: EU-Fördermittel für mehr Recycling einsetzen. Veröffentlicht am: 23.02.2012. http://www.bvse.de/2/5258/bvse_EU_Foerdermittel_fuer_mehr_Recycling_einsetzen . Abgerufen am 09. Juni 2015.

Rødsrud, G. (2014): Wood based biorefineries and cascading. Vortrag im Rahmen des Workshops „Cascading use of Biomass – from theory to practice. 01.04.2014, Brüssel.

Schrägle, R. (2015): Schadstoffe in Spanplatten - Status quo vor dem Hintergrund von Kaskadennutzung und Altholzeinsatz. Holz-Zentralblatt Nummer 3. 16. Januar 2015

Standing Committee on Agricultural Research (2014): Where next for the European bioeconomy? The latest thinking from the European Bioeconomy Panel and the Standing Committee on Agricultural Research Strategic Working Group (SCAR). European Union, 2014. Retrieved: March 03, 2015. http://ec.europa.eu/research/bioeconomy/pdf/where-next-for-european-bioeconomy-report-0809102014_en.pdf .

Transkript (2015): Zoff um Kreislaufwirtschaft: Brüssel kippt Gesetz. In: Itranskript Nr. 3 | 21. Jahrgang 2015

trenntwende (2015): Bioplastik - Fragen und Antworten. <http://www.trenntwende.de/themenspezial/klimaschutz-aus-der-tonne/bioplastik/index.html> . Eingesehen am 26. März 2015

Vetere, M. (2014): Ingeo in context of cascading use. Vortrag im Rahmen des Workshops „Cascading use of Biomass – from theory to practice. 01.04.2014, Brüssel.

Kapitel 5 – AP4

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.

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

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 .

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

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 .

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> .

- 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, Chiaramonti 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](http://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/>
- 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 Integrated sustainability assessment of SUPRABIO biorefineries 2014-10-31.pdf](http://www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/IFEU_&Brunel_2014_IntegratedsustainabilityassessmentofSUPRABIObiorefineries_2014-10-31.pdf)
- 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
- 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, et al. 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_Integrated assessment_2014-03-31.pdf](http://www.biocore-europe.org/file/BIOCORE_D7_6_Integrated_assessment_2014-03-31.pdf) .
- Rettenmaier, N., et al.: 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/>
- BIOLYFE - Second generation bioethanol process: demonstration scale for the step of lignocellulosic hydrolysis and fermentation. CHEMTEX Italia srl (Italy) in cooperation with NOVOZYMES A/S (Denmark), Italian National Agency for new technology, Energy and Environment (ENEA, Italy), Lunds Universitet (Sweden), INBICON A/S (Denmark), AGRICONSULTING S.p.A. (Italy), WIP (Germany), Institut für Umweltstudien - Weibel & Ness GmbH (Germany), subcontract IFEU; supported by the European Commission, 2013
- 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
- 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. (vzvb), 2010

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

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); Projekt durchgeführt durch ifeu/Integrah/Öko-Institut; Abschluss 2016

Kapitel 6 – AP5

Schrägle, R. (2015): Schadstoffe in Spanplatten - Status quo vor dem Hintergrund von Kaskadennutzung und Altholzeinsatz. Holz-Zentralblatt Nummer 3. 16. Januar 2015

Kapitel 7 – AP6

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.

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

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.

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

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.

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>.

IfBB (2014): Institute for Bioplastics and Biocomposites an der Hochschule Hannover (IfBB) (Stand 2014): Market Statistics. Online: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/index.php?site=Statistics&nav=5-0-0-0-0> , abgerufen am 19.10.2016.

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](http://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/>

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_IntegratedsustainabilityassessmentofSUPRABIObiorefineries2014-10-31.pdf

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

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, Himmeler H, Keller H, Kretschmer W, Müller-Lindenlauf M, et al. 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_Integrated_assessment_2014-03-31.pdf .

Rettenmaier, N., et al.: 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/>

BIOLYFE - Second generation bioethanol process: demonstration scale for the step of lignocellulosic hydrolysis and fermentation. CHEMTEX Italia srl (Italy) in cooperation with NOVOZYMES A/S (Denmark), Italian National Agency for new technology, Energy and Environment (ENEA, Italy), Lunds Universitet (Sweden), INBICON A/S (Denmark), AGRICONSULTING S.p.A. (Italy), WIP (Germany), Institut für Umweltstudien - Weibel & Ness GmbH (Germany), subcontract IFEU; supported by the European Commission, 2013

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

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

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

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/Integrall/Öko-Institut

ANHANG

Tabelle A-1: Übersicht der ausgewählten Kaskadennutzungen, deren Kaskadenpfad, Produkte, Biomassen und betroffene Märkte

[blau hinterlegt: im Rahmen der Arbeitspakete 1, 2 und 3 analysierte Kaskaden, rote Schrift: im Rahmen von AP4 ökobilanziell bewertet]

Nr.	Name	Aufgangsstoffe	Kaskadenpfad	Zielprodukte	Kaskaden	Biomasse	Märkte
1	Holzskaskade 1	Holz → Vollholzprodukt	→ Spanplatte → recycelte Spanplatte → Energie	Span- und Faserplatten	mehrstufig	Holz	Altholz (Forstwirtschaft)
2	Holzskaskade 2	Mais/Gülle + Holz → Biogas & Gärprodukte	→ Laminat → Energie	Laminat	einstufig (Sonderfall)	Lignozellulosehaltig (u.a. Gärprodukte)	Reststoffe (Landwirtschaft)
3	Papierkaskade	Holz → Zellstoff/Holzstoff → Papier	→ recyceltes Papier → Pappe → recycelte Pappe → Energie	Papier	mehrstufig	Holz	Altpapier (Forstwirtschaft)
4	Faserkaskade 1	Holz → Zellulosefasern → Textilien	→ Textilrecycling → Energie	Textilien	mehrstufig	Holz	Forstwirtschaft
5	Faserkaskade 2	Baumwolle → Textilien	→ Textilrecycling → Energie	Dämmstoffe	mehrstufig	Baumwolle	Naturfasern / Textil (Landwirtschaft)
6	Faserkaskade 3	Non-Food Milch → Kaseinfasern	→ Textilien (→ wiederholte Nutzung?) → Energie	Textilien	einstufig (Sonderfall)	Milch	Milchwirtschaft
7	Polymerkaskade 1	Mais → PLA-Verpackung	→ Recycling Folie → Energie	Verpackungs- material	mehrstufig	Mais	Stärke / Zucker (Landwirtschaft)
8	Polymerkaskade 2	Zuckerrohr → BioPET-Flasche	→ Recycling → Textil → Energie	PET-Flaschen	mehrstufig	Zuckerrohr	Zucker (Landwirtschaft)
9	Polymerkaskade 3	Pflanzenöl → PU	→ PU-Recycling → Energie	Polyurethane	einstufig	Ölpflanzen	Ölpflanzen (Landwirtschaft)
10	Chemiekaskade 1	Holz → Zellstoff	→ Nebenprodukt: Tallöl → u.a. Chemikalie → Anwendung	Chemikalien, Adhäsive	einstufig (Sonderfall)	Tallöl (Zellstoffin- dustrie)	Tallöl (Forstwirtschaft)
11	Chemiekaskade 2	Schlachtabfälle →	Nebenprodukt: Tierische Fette → Chemikalie → Anwendung	Fettsäuren, Glycerin	einstufig (Sonderfall)	Tierische Fette	Fette (Viehhaltung)
12	Chemiekaskade 3	Raps → Epichlorhydrin → Epoxidharz	→ u.a. Windflügel, Anstriche, Klebstoffe → Energie /Recycling?	Harze	einstufig	Ölpflanzen	Ölpflanzen (Landwirtschaft)
13	Chemiekaskade 4	Holz / Holzprodukte	Holzbasierte Bioraffinerie → Cellulose → u.a. Construction Materials	Cellulose, Bioethanol, Biochemikalien	Bioraffinerie	Holz	Altholz (Forstwirtschaft) Bioabfall: Grüngut
14	Graskaskade	Gras	→ Composite → Recycling	Komposite	Bioraffinerie	Gras	Grünland