



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG



Bericht zur Sammlung und Auswertung von Produktökobilanzen

Systemisches Monitoring und Modellierung der Bioökonomie (Symobio);
D 5.3.1

Auftraggeber Bundesministerium für Bildung und Forschung

Projekträger Projekträger Jülich

Autoren Andreas Detzel, Susanne Köppen

Heidelberg, Juni 2018



Inhalt

Tabellenverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
1 Einleitung und Zielsetzung	5
1.1 Hintergrund	5
1.2 Ziel und Untersuchungsrahmen	5
2 Vorgehensweise	7
2.1 Begriffsbestimmungen	7
2.2 Die Ökobilanz im Kontext des Symbio-Projekts	7
2.3 Auswahl und Erfassung der Produktökobilanzen	9
2.3.1 Allgemeines	9
2.3.2 Auswahl der Produktbereiche	9
2.3.3 Recherchestrategie	9
2.4 Evaluationsmatrix	10
3 Auswertung	16
3.1 Allgemeines	16
3.2 Energetisch genutzte Biomasse	16
3.3 Stofflich genutzte Biomasse	22
3.3.1 Ökobilanzen zu Papier	22
3.3.2 Ökobilanzen zu Lebensmitteln	24
3.3.3 Ökobilanzen zu Biokunststoffen	26
3.3.4 Ökobilanzen zu Bioraffinerien	28
4 Fazit und Ausblick	32
5 Literaturverzeichnis	36

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: DEFINITIONEN DER KATEGORIEN IN DER EVALUATIONSMATRIX	13
TABELLE 2: ABGEDECKTE ROHSTOFFE UND PRODUKTE IM PRODUKTBEREICH BIOENERGIE	20
TABELLE 3: ABGEDECKTE ROHSTOFFE UND PRODUKTE IM PRODUKTBEREICH BIORAFFINERIEEN	29
TABELLE 4: FUNKTIONELLE EINHEITEN UND ZIELGRUPPEN IM PRODUKTBEREICH BIORAFFINERIEEN	30

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ERFASSTE PRODUKTBEREICHE IN DER LITERATURANALYSE	9
ABBILDUNG 2: GLIEDERUNG DER EVALUATIONSMATRIX – BIBLIOGRAPHISCHE DATEN.....	11
ABBILDUNG 3: GLIEDERUNG DER EVALUATIONSMATRIX – UNTERSUCHUNGSRAHMEN / ALLGEMEINE ASPEKTE	11
ABBILDUNG 4: GLIEDERUNG DER EVALUATIONSMATRIX – UNTERSUCHUNGSRAHMEN / SPEZIELLE ASPEKTE	12
ABBILDUNG 5: ANZAHL DER UNTERSUCHTEN STUDIEN IN DEN EINZELNEN PRODUKTBEREICHEN	16
ABBILDUNG 6: AUFTEILUNG DES PRODUKTBEREICHS BIOENERGIE.....	17
ABBILDUNG 7: AUFTEILUNG DER INTERESSENSGRUPPE IM PRODUKTBEREICH BIOENERGIE.....	17
ABBILDUNG 8: VERTEILUNG DER WIRKUNGSKATEGORIEN IM PRODUKTBEREICH BIOENERGIE	21
ABBILDUNG 9: VERTEILUNG DER SYMBIO-FUßABDRÜCKE IM PRODUKTBEREICH BIOENERGIE	22

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Hintergrund

Die globalen Belastungsgrenzen werden zunehmend strapaziert und nach Ansicht einiger renommierter Wissenschaftler (Rockström et al. 2009) sind in den folgenden vier Bereichen die Grenzen bereits überschritten: Biodiversitätsverlust, Klimawandel, Beeinträchtigung des Stickstoffkreislaufs sowie Landnutzung. Somit kommt der effizienten Nutzung nachwachsender Rohstoffe eine immer größere Bedeutung zu. Hier bietet die Bioökonomie die Chance, einen Beitrag zur Lösung dieser Probleme zu leisten.

Im Jahr 2013 wurde von der deutschen Bundesregierung die „Politikstrategie Bioökonomie“ verabschiedet (BMEL 2014). Die Bioökonomie verfolgt die Vision einer am natürlichen Stoffkreislauf orientierten, nachhaltigen bio-basierten Wirtschaft. Sie soll als Grundlage dienen für die Sicherung der globalen Ernährung, die Versorgung mit Energieträgern ebenso wie mit nachwachsenden Rohstoffen für die Industrie. Es geht um einen gesamtgesellschaftlichen Strukturwandel, der ökonomisches Wachstum und ökologische Verträglichkeit miteinander verknüpft und gleichzeitig soziale Belange nicht außer Acht lässt.

Ein solcher tiefgreifender Wandel geht jedoch mit zahlreichen Problemen und Herausforderungen einher. Die Politikstrategie formuliert ein Bündel an Zielen und Leitgedanken, deren erfolgreiche Umsetzung eines übergreifenden Monitorings bedarf. Die Etablierung eines solchen Monitoringsystems ist das Ziel der Bundesregierung zur Sicherstellung einer informierten politischen und öffentlichen Debatte. Es soll den Weg hin zu einer nachhaltigen Bioökonomie ermöglichen sowie rechtzeitig Wechselwirkungen und potenzielle Zielkonflikte erkennen und lösen.

Vor diesem Hintergrund soll das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützte Forschungsvorhaben Symbio (Systemisches Monitoring und Modellierung der Bioökonomie) die wissenschaftlichen Grundlagen für ein systemisches Monitoring und für die Modellierung der Bioökonomie in Deutschland entwickeln. Es soll ein integrierter Modellierungsansatz entwickelt werden, mit dem Umweltbilanzen erstellt und die sozioökonomische Leistungsfähigkeit der Bioökonomie analysiert werden können. Innerhalb des Vorhabens beschäftigt sich das Arbeitspaket 5 damit, die Nutzungsmöglichkeiten und Erweiterungsoptionen der in Zertifizierungsverfahren und bei der Produktökobilanzierung erhobenen Daten und Indikatoren für ein Monitoring zu prüfen.

1.2 Ziel und Untersuchungsrahmen

Das Ziel des Arbeitspakets 5.3 (Produktökobilanzen) ist die Einschätzung, welche Rolle die Produktökobilanz als Instrument und Entscheidungshilfe auf dem Gebiet der Bioökonomie übernehmen kann. Des Weiteren wird untersucht, welche methodischen Ansätze und Erkenntnisse aus der Produktökobilanzierung für das Monitoring der Bioökonomie nutzbar gemacht werden können.

Die Kernarbeit ist eine umfassende Recherche, Systematisierung und Auswertung von Produktökobilanzen, deren Bearbeitung in zwei Schritten erfolgt. Der erste Schritt ist Gegenstand dieses Berichts. Er bietet eine systematische

Zusammenschau der recherchierten Ökobilanzen zu ausgewählten Produktgruppen, die in Form einer separaten Excel-Datei zur Verfügung gestellt werden. Im vorliegenden Bericht erfolgt eine erste Auswertung mit einem Fokus auf den folgenden Elementen:

- Welches sind die Zielsetzungen und Adressaten der Studien, d.h. welche Rolle spielt die Ökobilanz als Entscheidungshilfe?
- Welches sind die Systemcharakteristika der Produktökobilanzen (z.B. Systemgrenzen, erfasste Biomassen, Funktionelle Einheit)?
- Welche Wirkungskategorien werden in den Studien berücksichtigt, insbesondere im Hinblick auf die Symbio-Fußabdrücke?

Diese Analysen dienen der Vorbereitung zum zweiten Untersuchungsschritt, der in einem separaten Bericht behandelt werden wird. Dort sollen ausgewählte methodische Aspekte der Ökobilanzen genauer untersucht werden. Dies wird vor allem im Hinblick auf die im Rahmen von Symbio bilanzierten Fußabdrücke geschehen vor dem Hintergrund einer möglichen Verknüpfung beider Ebenen (der Produktebene der Ökobilanz mit der Modellebene in Symbio).

2 Vorgehensweise

Der Fokus der Literaturanalyse lag gemäß dem Projektantrag auf Produktökobilanzen. Das avisierte Symbio-Modell fußt auf dem Ansatz der Stoffstromanalyse. Zum besseren Verständnis sollen zunächst diese Begrifflichkeiten erläutert werden.

2.1 Begriffsbestimmungen

Life Cycle Assessment (LCA), dt. Ökobilanz (auch als Lebenszyklusanalyse bezeichnet), „ist eine über die Normen ISO EN 14040 und 14044 definierte Methode, um Umweltaspekte und -wirkungen von Produktsystemen zu analysieren. Die Ökobilanz zählt somit zu den Methoden der Systemanalyse. Gegenstand einer Ökobilanz ist ein Produkt, ein Prozess, eine Dienstleistung oder – in der allgemeinsten Formulierung – eine menschliche (ökonomische) Tätigkeit.“ (Klöpffer und Grahl 2007)

„Die *Ökobilanz* ist eine stoffstromintegrierte Betrachtung: Alle Stoffströme, die mit dem betrachteten System verbunden sind, sind zu berücksichtigen. Dazu zählen Rohstoffeinsätze und Emissionen aus Vor- und Entsorgungsprozessen, aus der Energieerzeugung, aus Transporten und anderen Prozessen.“¹

„Die *Stoffstromanalyse* (Synonyme: Stoffflussanalyse, Materialflussanalyse) ist ein systemanalytisches Verfahren zur Erfassung von Stoff- und Materialströmen, die mit bestimmten Produkten, Verfahren, Dienstleistungen oder ganzen Bedürfnisfeldern (z.B. Bauen und Wohnen, Mobilität, Ernährung) verbunden sind. Im Gegensatz zur Ökobilanz ist die Stoffstromanalyse nicht international genormt. Deshalb existieren zahlreiche Methoden, die je nach Fragestellung, Erkenntnisinteresse und Untersuchungssystem sehr unterschiedlich sein können.“²

Methodische Abgrenzung: Aufgrund ihrer methodischen Nähe zueinander ist es nicht immer möglich, zwischen Ökobilanzen und Stoffstromanalysen eindeutig zu unterscheiden. Vereinfacht gesagt stehen bei Stoffstromanalysen eher die Mengen und Wege der Stoff-, Material-, und Energieflüsse eines Systems im Vordergrund, während bei Ökobilanzen auch die mit diesen Flüssen verbundenen Umweltwirkungen betrachtet und bewertet werden.

2.2 Die Ökobilanz im Kontext des Symbio-Projekts

Das Monitoring der Bioökonomie wird im Symbio-Projekt anhand der folgenden vier Indikatoren erfolgen:

1. Fußabdruck der Nutzung von landwirtschaftlichen Flächen
2. Forstfußabdruck
3. Wasserfußabdruck
4. Klimafußabdruck (Emission von Treibhausgasen)

¹ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz>

² <https://www.umweltbundesamt.de/stoffstromanalyse>

Zur Ermittlung der Fußabdrücke wird ein Modellierungssystem entwickelt, das in erster Linie auf einem Stoffstrommodell beruht, in das Daten aus Input-Output-Datenbasen, ökonometrischen Modellen und Modellen für die Land- und Wassernutzung eingespeist werden. Solche Fußabdrücke sind aber auch Bestandteil des sogenannten Umweltwirkungsprofils von Produkten als Ergebnis der Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen. Der Unterschied besteht darin, dass ein Umweltwirkungsprofil üblicherweise deutlich mehr Umweltaspekte umfasst.

Sowohl in der Produktökobilanz als auch im Modellierungsansatz des Symbio-Projekts ist eine Rahmensetzung bzgl. der zu berücksichtigenden Stoffströme über die Festlegung einer Systemgrenze sowie die Skalierung der Stoffflüsse über die Definition der Bezugsgröße erforderlich. In der Produktökobilanz ist dies über die ISO Normenserie vorgegeben. So wird dort die Systemgrenze als Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Prozessmodule Teil eines Produktsystems sind, definiert (ISO 14040). Bei einer vollständigen Ökobilanz geht die Modellierung von der Entnahme der für die Herstellung des Produkts benötigten Ressourcen aus der Umwelt bis zur Entsorgung nach Produktgebrauch oder bis zu einem Punkt, wo Koppelprodukte, Nebenprodukte oder Abfall zur Verwertung die Systemgrenze überschreiten, also das Produktsystem verlassen (Klöpffer und Grahl 2007). Bezugsgröße ist die funktionelle Einheit, die als quantifizierter Nutzen eines Produktsystems definiert ist.

Der Produktbezug wird im Symbio-Projekt auch als Mikroebene, der Bezug auf übergeordnete Stoffströme, wie z.B. den gesamten Holzverbrauch in Deutschland, als Makroebene bezeichnet. Die beiden Ansätze sind daher in gewisser Hinsicht komplementär. Während auf der Makroebene beispielsweise Informationen zu volkswirtschaftlichen Systemen erhalten werden (Bsp. Umweltökonomische Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamts), liefert die Mikroebene granulare Informationen zu den Treibern der Umweltwirkungen (und damit auch Ansatzpunkte für Optimierungen) oder auch Entscheidungsgrundlagen für produktpolitische Maßnahmen.

In den Arbeitspaketen 5.3 und 5.4 gilt es daher zu untersuchen, inwiefern methodische Ansätze und Erkenntnisse aus der Produktökobilanzierung (Mikroebene) für das Monitoring der Bioökonomie (Makroebene) hilfreich sein und nutzbar gemacht werden können. Dazu wurden Produktökobilanzen in ausgewählten Bereichen / für ausgewählte Produktgruppen recherchiert und anhand einer einheitlichen Kriterienstruktur aufbereitet. Dies wird in den Kapiteln 2.3 (Auswahl) und 2.4 (Evaluationsmatrix) weiter ausgeführt.

Der Begleitkreis des Projekts regte im Zuge des Projekttreffens im März 2018 an, zusätzlich zu den Produktökobilanzen exemplarisch solche Studien zu berücksichtigen, in denen die Ökobilanzmethode für die Bewertung übergeordneter Stoffströme angewendet wird. Wie im Abschnitt zu den Begriffsbestimmungen bereits angedeutet, ist eine solche Methodenkombination nicht ungewöhnlich. Beispielsweise findet sich schon in der im Auftrag des Umweltbundesamts im Jahr 2000 veröffentlichten Ökobilanz graphischer Papiere (UBA 2000). In neueren Studien werden zunehmend Aspekte wie die Kaskadennutzung von biogenen Rohstoffen (Fehrenbach 2017, Mehra et al. 2018) oder die Ermittlung von prioritären Nutzungspfaden von Biomasse im Kontext nationaler Umweltziele (Mehra et al. 2018) untersucht.

Im vorliegenden Bericht steht die Recherche und Strukturierung von Produktökobilanzen im Vordergrund. In einem weiteren noch folgenden Bericht werden spezifische methodische Aspekte der Produktökobilanzen sowie der genannten Ökobilanzen mit Stoffstrombezug herausgearbeitet und hinsichtlich der Symbio-Fragestellungen bewertet.

2.3 Auswahl und Erfassung der Produktökobilanzen



2.3.1 Allgemeines

Im Rahmen der Literaturanalyse wurden zunächst alle relevanten wissenschaftlichen Quellen nach für die Projektfragestellung relevanten Studien durchsucht. Die ausgewählten Ökobilanzen wurden anschließend in einer Excel-Datei zusammengestellt und entsprechend einem vorgegebenen Kriterienraster ausgewertet. Diese „Evaluationsmatrix“ ist ein wesentlicher Bestandteil des vorliegenden Berichts (im Sinne des Deliverable 5.3.1, MS 5.3.1, 5.3.2) und wird in den folgenden Berichtsteilen noch näher erläutert. Ein Referenzierung aller erfassten Studien findet sich zudem im Literaturverzeichnis des vorliegenden Berichts. Die Excel-Datei mit sämtlichen erfassten Studien wird als separate Datei mitgeliefert.

2.3.2 Auswahl der Produktbereiche

Das Ziel der Literaturanalyse war es, eine möglichst weite Bandbreite an Anwendungsbereichen und Produkten im Bereich der Bioökonomie zu erfassen. Den Ausgangspunkt bildeten zunächst die beiden Themenkomplexe „energetische“ und „stoffliche“ Biomassenutzung, die sich wiederum aufgliedern in die verschiedenen Untergruppen. Die erfassten Produktbereiche sind in Abbildung 1 dargestellt.

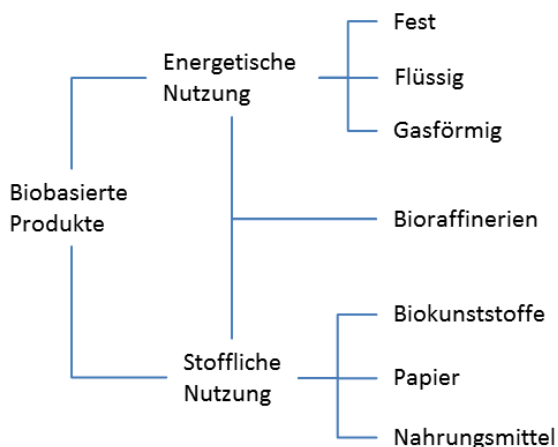


Abbildung 1: Erfasste Produktbereiche in der Literaturanalyse

2.3.3 Recherchestrategie

Die Basis der Literaturrecherche bildeten zunächst alle Studien, die bereits in den Datenbanken des ifeu vorhanden waren. Dieser Fundus wurde ergänzt durch eine Stichwortsuche, wobei die Literaturverzeichnisse einzelner Studien wiederum als Ausgangspunkt für weitere Recherchen nach Studien oder Autoren dienten. Bei der Recherche wurden sowohl Bibliotheksdatenbanken, Online-Literaturdatenbanken als auch allgemeine Suchdienste herangezogen.

Ergänzt wurde diese allgemeine Suche durch eine gezielte Suche bei relevanten Institutionen, wie etwa Ministerien, Forschungsinstituten, Lobbygruppen oder Verbänden. Damit sollte sichergestellt werden, dass eine große Bandbreite unterschiedlicher Interessensgruppen mit erfasst wird.

Bereits während der Recherche erfolgte eine grobe Sichtung der Studien und eine erste Auswahl, bzw. Eingrenzung. Die folgenden Kriterien wurden dafür angelegt:

- **Studienumfang:** Es wurden nur vollständige Ökobilanzen von einzelnen Produkten oder Produktgruppen erfasst. Das bedeutet, dass andere Literaturrecherchen oder unvollständige Ökobilanzen (etwa solche, die lediglich die Inventarerstellung umfassen) nicht mit aufgenommen wurden.
- **Aktualität:** Es wurden möglichst nur solche Studien erfasst, die in 2005 oder später durchgeführt wurden. Diese Grenze rührt daher, dass der ISO-Standard in 2005 grundlegend überarbeitet wurde und somit eine gemeinsame Basis der Studien gewährleistet werden kann.
- **Geographischer Bezug:** Entsprechend des Projektziels der Erstellung eines Monitoringsystems für die deutsche Bioökonomie standen Studien, die in Deutschland durchgeführt wurden, an oberster Priorität. Der deutsche Bezug gilt für den Auftraggeber (Institut, Ministerium, Unternehmen), nicht jedoch für die Herkunft der Biomasse, um auch importierte Biomasse abzudecken. Daneben wurden auch europäische Studien herangezogen, während der Rest der Welt nicht berücksichtigt wurde.
- **Qualität:** Die ISO-Konformität war kein zwingendes Auswahlkriterium, da so bestimmte Stakeholder nicht erfasst werden (bspw. Lobbygruppen).

Die auf diesem Weg ausgewählten Studien wurden in Zotero, einer Literaturdatenbank, eingepflegt und gleichzeitig in der Excel-basierten Evaluationsmatrix erfasst und ausgewertet.

2.4 Evaluationsmatrix

Die Auswertung der Studien erfolgte mit Hilfe einer Evaluationsmatrix in Excel. Diese untergliedert sich zunächst in die Bereiche Bioenergie, Biokunststoffe, Papier, Nahrungsmittel und Bioraffinerien, für die jeweils ein separates Excel-Blatt angelegt wurde. Auf den einzelnen Blättern wurde eine Spalte je Untersuchungskriterium angelegt. Grob lassen sich diese Kriterien in drei Gruppen unterteilen: Bibliographische Angaben (s. Abbildung 2), Untersuchungsrahmen – Allgemeine Aspekte (s. Abbildung 3) sowie Untersuchungsrahmen – Spezielle Aspekte (Abbildung 4).

Bibliographical Data					
Erscheinungsjahr	Titel	Autoren	Land des Autoren	Auftraggeber	Herausgeber / Bearbeiter
Year of Publication	Title	Authors	Country of the Authors	External Contracting Authority (when left empty, see Herausgeber)	Editor/publisher (or location of main author)
2013	Life Cycle Assessment of EU Oilseed Crushing and Vegetable Oil Refining	Schneider et al.	DE	Fediol	Technische Universität Berlin, Ch...
2005	Biomethan im Energiesystem: ökologische und ökonomische Bewertung	Dunkelberg et al.	DE	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie	Institut für ökologische Wirtschaft...
2006	Ökobilanzen zu BTL: Eine ökologische Einschätzung	Reinhardt et al.	DE	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Bau	ifeu - Institut für Energie - und Umw...
2007	Behandlungsalternativen für klimarelevante Stoffströme	Fehrenbach et al.	DE	Umweltbundesamt (UBA)	ifeu - Institut für Energie - und Umw...
2007	Ökobilanz von Energieprodukten: Bewertung der landwirtschaftlichen Biogasproduktion	Kägi et al.	CH	CH Bundesamt für Energie	Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement
2007	Sozial-ökologische Bewertung der stationären energetischen Nutzung von Biomasse	Pastowski et al.	DE	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Bau	Wuppertal Institut für Klima, Umw...
2007	Regenwald für Biodiesel? - Ökologische Auswirkungen der energetischen Nutzung	Reinhardt et al.	DE	WWF Deutschland	WWF Deutschland
2007	Energy crops in Ireland: Quantifying the potential life-cycle greenhouse gas emissions	Styles et al.	IRL	Irish Environmental Protection Agency	Department of Botany, School of Botany
2007	Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen	Zah et al.	CH	CH Bundesamt für Energie	Empa Abteilung Technologie und Produktion
2008	Comparative analyses of forest fuels in a life cycle perspective with a focus on wood chips	Eriksson	SWE	n/a	Ecotechnology, Department of Energy and Environment
2008	Ökobilanz von Energieprodukten: Life Cycle Assessment of Biomass-to-Energy	Jungbluth et al.	CH	CH Bundesamt für Energie	ESU-services Ltd., fair consulting
2008	Bioenergie aus Getreide und Zuckerrübe: Energie- und Treibhausgasbilanz	Rettenmaier et al.	DE	Verband Landwirtschaftliche Energie	ifeu - Institut für Energie - und Umw...

Abbildung 2: Gliederung der Evaluationsmatrix – bibliographische Daten

Scope								
General aspects								
Untersuchungsziel	Zielgruppe	Anwendung der Studie	Interessengruppe			Produkte	Anwendung des Produkts	ISO Critical review ja / nein
Research Aims	Target	Application of Study	Politik	Wirtschaft	Wissenschaft	Final product	Application of product	Critical review yes/no
Improving LCA methods in order to	policy makers	better inform relevant	x			ethanol, biogas	transport, electricity	no
presents a LCA case study for	policy makers	The aim is to support	x			biogas	electricity, heat	yes
the objective of this study is	policy makers	unclear	x			direct combustion	electricity	no
Its aim was to assess – by	The main target group	decision base regard	x			energy carrier for combustion	electricity, heat	no
evaluates the contribution	policy makers	unclear	x			direct combustion, biogas	electricity, heat	no
Optimal use of regionally available	policy makers	decision basis for policy	x			direct combustion, biogas	electricity, heat	no
development of recommendations	communities	Development and implementation	x			1) firewood, wood chips	electricity, heat	no
comparison of different biogas	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie	identify the best biogas	x			biogas, biomethane	electricity, heat	no
determine, whether electricity	ministry	determine, whether electricity	x			biogas	electricity	no
compares different technologies	unclear	unclear	x			biogas, direct combustion	electricity, heat	no
Comparison of different technologies	unclear	unclear	x			direct combustion	electricity and heat	no
analyse the resource efficiency	Environmental ministry	support the environmental	x			various products (cascading)	electricity, heat	no

Abbildung 3: Gliederung der Evaluationsmatrix – Untersuchungsrahmen / allgemeine Aspekte

Scope						
Special Aspects						
Rohstoffe	Herkunft der Rohstoffe	Umgang mit Nebenprodukten	Geographischer Bezug d. Studie	Lebensphasen	Wirkungskategorien	Funktionale Einheit
<i>Raw Material</i>	<i>Geographical origin of the raw material</i>	<i>Allocation or credit with byproducts</i>	<i>Geographic region of study</i>	<i>Process steps</i>	<i>Impact Categories</i>	<i>Functional Unit</i>
maize	Agro-climatic zone	credit	different areas	cradle to gate	net energy gain (NEG), energy return on energy invested	1 joule energy carrier
maize, sorghum, triticale	IT	allocation	IT	cradle to grave	gross energy requirement, non renewable energy	1 MJ electricity / heat
poplar, Ethiopian mustard	ESP	no co-products	ESP	cradle to grave	acidification, global warming, human toxicity	1 kWh
triticale, willow, miscanthus	EU	credit	EU	cradle to grave	Use of fossil fuels, Greenhouse effect, acidification, eutrophication, greenhouse effect	1 MJ heat, 1 kWh electricity, 1 kg waste
household waste, waste	DE	credit	DE	cradle to grave (stage 1)	Greenhouse effect, fossil energy resource depletion	47,38 million tonnes waste in 1 year
organic waste	CH	credit	CH	cradle to grave (stage 1)	Greenhouse effect (GWP), cumulated energy demand	1 kg organic waste
1) forest residues, SRC, 2)	DE	credit	DE	cradle to grave	acidification, eutrophication, greenhouse effect	1 kWh electricity / heat
maize, cow manure	DE	credit	DE	cradle to gate; cradle to grave	greenhouse effect	1 NM ³ biogas, 1 MJ energy carrier
manure, organic waste	CH	credit	CH	cradle to grave	eco-indicator 99: depletion of material resources	1 m ³ digestion chamber (bio-digestion)
organic waste	CH	credit	CH	cradle to gate	eco-indicator 95: use of renewable energy	1 kg waste
domestic waste, household waste	DE	credit	DE	cradle to grave	greenhouse effect, use of fossil resources	Average impact per inhabitant
wood, cellulosic material	DE	allocation	DE	n/a	resource use, greenhouse effect, acidification	various (depending on scenario)

Abbildung 4: Gliederung der Evaluationsmatrix – Untersuchungsrahmen / spezielle Aspekte

Ein zentrales Ziel dieses Berichts ist die Auswertung des Erkenntnisinteresses der Studien. Hiermit soll die Frage beantwortet werden, wer Produktökobilanzen für welchen Zweck einsetzt. Dafür wurden in der Evaluierungsmatrix die folgenden Kategorien angelegt: Auftraggeber, Herausgeber, Untersuchungsziel, Zielgruppe, Anwendung der Studie sowie eine Einordnung der Interessensgruppen. Kurze Erläuterung zu den einzelnen Kategorien finden sich in Tabelle 1. An dieser Stelle lediglich ein paar ausführlichere Erläuterungen zur Einordnung der Interessensgruppen. Wo möglich, bezieht sich die Unterteilung auf den Auftrag-, bzw. Geldgeber. In vielen Fällen (insbesondere in wissenschaftlichen Artikeln) ist dieser jedoch nicht klar erkennbar, so dass dort die Institution des Hauptautors zugrunde gelegt wurde. Gerade bei Zeitschriftenartikeln sind dies meist wissenschaftliche Einrichtungen.

Nicht alle Kriterien konnten in allen Studien wiedergefunden werden oder Recherchekriterien waren nicht anwendbar. In diesem Fall wurden die Lücken mit einem n/a (not applicable / nicht anwendbar) kenntlich gemacht. Dies betraf beispielsweise die Zielgruppen oder genauen Anwendungsbereiche der Studien oder auch der Auftraggeber.

Tabelle 1: Definitionen der Kategorien in der Evaluationsmatrix

Abschnitt	Deutsch	English	Definition
Bibliographic data	Erscheinungsjahr	Year of Publication	
	Titel	Title	
	Autoren	Authors	
	Land des Autoren	Country of the Authors	Bei mehreren Autoren aus unterschiedlichen Ländern: Land des Hauptautors
	Auftraggeber	External Contracting Authority	Institution, die die Studie beauftragt und / oder finanziell unterstützt hat
Scope: General Aspects	Herausgeber	Editor/Publisher (or location of main author)	Institution, die die Studie durchgeführt hat oder – bei einem wissenschaftlichen Artikel, die die Studie veröffentlicht hat
	Untersuchungsziel	Research aims	“Was wurde in der Studie untersucht?”
	Zielgruppe	Target of study	“An wen richten sich die Ergebnisse der Studie?”
	Anwendung der Studie	Application of study	“Wozu sollen die Ergebnisse der Studie verwendet werden?”
	Interessensgruppe	Stakeholders	Hier erfolgt eine Einteilung der Interessensgruppe in <ul style="list-style-type: none"> • Politisch (z.B. Ministerien, nachgelagerte Bundesämter, EU-Kommission) • Wirtschaftlich (z.B. Unternehmen, Lobbygruppen, Verbände) • Wissenschaftlich (Universitäten, Forschungsinstitute)
	Produkte	Final product	Bezieht sich dies auf Art des Bioenergieträgers (z.B. Ethanol, Holzpellets), des Biokunststoffs (z.B. PLA, PET), des Papiers (z.B. Druck- oder Schreibpapier) oder des Nahrungsmittels (z.B. Käse, Wurst). Im Bereich Bioplastik erfolgt eine weitere Unterteilung danach, ob es als Verpackung oder nicht verwendet werden kann; bei den Nahrungsmitteln wird außerdem die Nahrungsmittelkategorie genannt (z.B. Milchprodukte, Obst)
	Anwendung des Produkts	Application of Product	Bezieht sich auf das oben genannte Endprodukt (z.B. Einsatz des Bioenergieträgers im Strom- oder Transportsektor oder Verwendung des Bioplastiks als Besteck oder Polymer)
ISO Critical Review: Ja/Nein	ISO Critical Review: yes / no	Bezieht sich auf einen Review-Prozess durch ein ISO-Gremium	
Scope: Special Aspects	Rohstoffe	Raw Material	Entweder eine Anbaubiomasse (z.B. Mais, Zuckerrohr) oder ein Rest- oder Abfallstoff (z.B. Biomüll, Zellstoff, Altholz)
	Herkunftsland der Rohstoffe	Geographical origin of the raw material	Relevant bei importierten Biomassen

Umgang mit Nebenprodukten	By-product allocation or credit	Falls Nebenprodukte anfallen, wird spezifiziert, wie diese behandelt werden (durch Allokation oder Vergabe einer Gutschrift); falls keine anfallen, wird dies kenntlich gemacht.
Geographischer Bezug d. Studie	Geographic region of study	Das Land, in dem die Studienergebnisse angewendet werden sollen
Wirkungskategorien	Impact Categories	
Lebensphasen	Process steps	Definiert, welche Lebenswegabschnitte betrachtet werden (z.B. cradle-to-grave oder cradle-to-gate)
Funktionelle Einheit	Funtional Unit	quantifizierter Nutzen eines Produktsystems

3 Auswertung

3.1 Allgemeines

Im Rahmen der Literaturanalyse wurden insgesamt 192 Studien als relevant erachtet und ausgewertet. Die Aufteilung auf die einzelnen Produktgruppen ist in Abbildung 5 dargestellt.

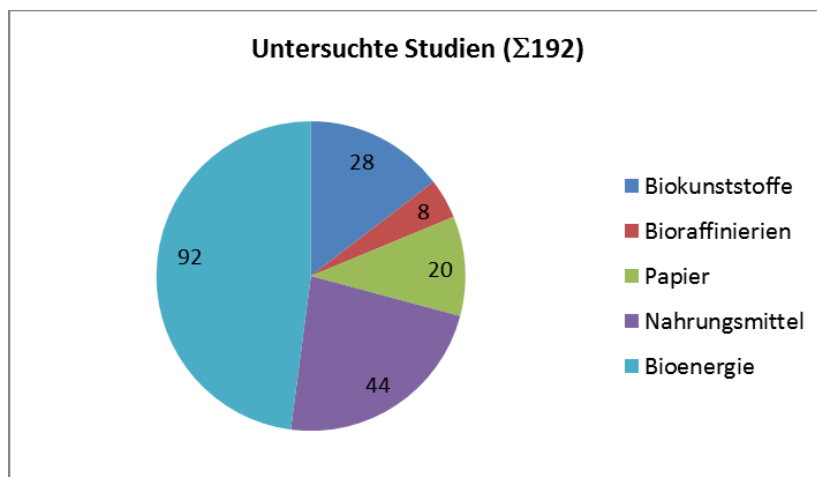


Abbildung 5: Anzahl der untersuchten Studien in den einzelnen Produktbereichen

Die Anzahl der Studien verteilt sich unterschiedlich auf die einzelnen Produktgruppen, was einen Hinweis auf die ökobilanzielle Arbeit in den einzelnen Bereichen liefert. Die Bereiche Bioenergie und Nahrungsmittel bieten in sich eine hohe Diversität und beinhalten deswegen die größte Anzahl der Studien. Am anderen Ende steht der Bereich Bioraffinerien, in dem erst seit vergleichsweise kurzer Zeit geforscht wird und wo die Anzahl der Veröffentlichungen noch vergleichsweise gering ist.

Die Auswertung in den folgenden Kapiteln erfolgt getrennt nach energetisch und stofflich genutzter Biomasse, wobei die Produktgruppe der stofflich genutzten Biomasse aufgrund noch einmal unterteilt wird.

3.2 Energetisch genutzte Biomasse

Insgesamt wurden im Produktbereich Bioenergie 98 Einzelstudien ausgewertet. Diese lassen sich weiter unterteilen in die Unterkategorien „fest“, „flüssig“ und „gasförmig“ (s. Abbildung 6). Da oft mehrere Bioenergieträger in einer Studie untersucht werden sind in den drei Unterkategorien Mehrfachnennungen derselben Studie möglich.

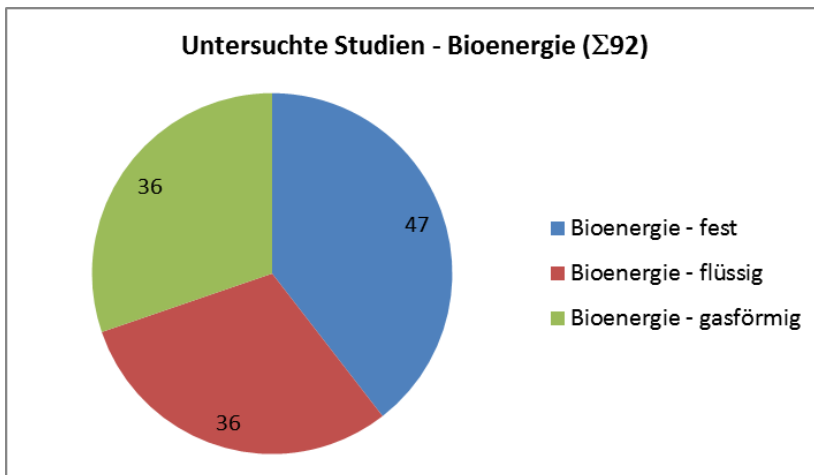


Abbildung 6: Aufteilung des Produktbereichs Bioenergie

Die Zielgruppe der Studien wird in den allermeisten Veröffentlichungen nicht explizit genannt, weswegen eine Zuordnung meist anhand der Auftraggeber erfolgte (s. Abbildung 7).

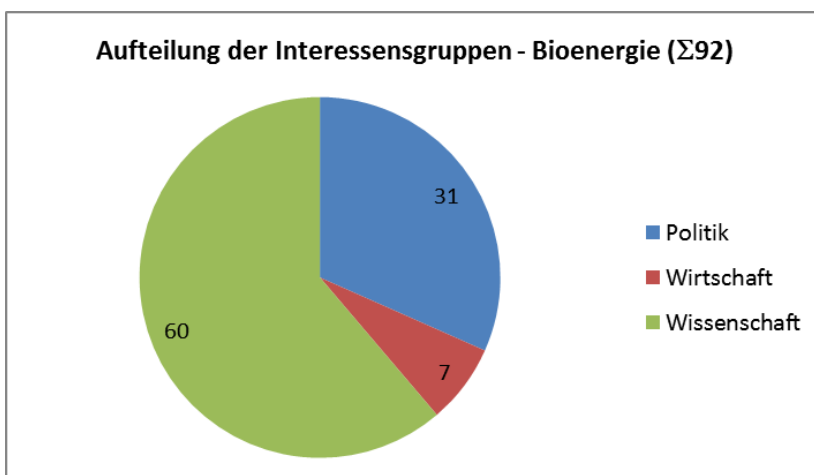


Abbildung 7: Aufteilung der Interessensgruppe im Produktbereich Bioenergie

Den weitaus größten Anteil haben Auftraggeber, die der Wissenschaft zuzuordnen sind. Dies sind vor allem Universitäten und Forschungsinstitute, wobei die Studien meist in Form von wissenschaftlichen Artikeln veröffentlicht wurden. An zweiter Stelle stehen Auftraggeber aus der Politik, etwa Ministerien und deren nachgelagerte Institutionen (in Deutschland beispielsweise das Umweltbundesamt). Die Abgrenzung zwischen Politik und Wissenschaft ist im Einzelfall allerdings nicht ganz eindeutig. Die Einteilung geschah, wo möglich, anhand des Auftraggebers. Wo dieser nicht genannt ist, wurde der Herausgeber herangezogen. In vielen wissenschaftlichen Artikeln ist allerdings der Auftraggeber nicht genannt, so dass diese der Wissenschaft zugeordnet wurden. Es ist jedoch durchaus möglich, dass der Inhalt vieler dieser Artikel aus Projekten entstammt, die letztendlich einer politischen Institution zuzuordnen ist.

Die Wirtschaft als Auftraggeber ist nur wenig vertreten, was aber nur begrenzte Rückschlüsse auf die dortige ökobilanzielle Tätigkeit zulässt. Da Unternehmensdaten meist als vertraulich behandelt werden, dürfen beauftragte Studien meist nicht veröffentlicht werden oder sie werden von vornherein intern durchgeführt.

Insgesamt ähneln sich die Fragestellungen der Studien sehr stark und unabhängig von der Interessensgruppe werden die folgenden Punkte am häufigsten genannt:

- **Abschätzung der Umweltwirkung eines Produkts:** Dies ist oft die Ausgangsfragestellung, bzw. bei den älteren / ersten Produktökobilanzen die Hauptfragestellung. Es wird untersucht, welche Auswirkung ein Bioenergieträger (zu Beginn waren dies meist Biokraftstoffe) hinsichtlich bestimmter Umweltwirkungskategorien ausübt.
- **Vergleich biogen versus fossil:** Die Hauptmotivation für die Nutzung von Bioenergie ist das Ersetzen von fossilen Energieträgern. Dementsprechend beinhalten fast alle Studien einen Vergleich eines biogenen mit einem fossilen Einzelprodukt (z.B. Biokraftstoff versus fossiler Treibstoff) oder einen Vergleich auf Systemebene (biobasierter Strom versus fossilem Strom).
- **Vergleich verschiedener Produkte / Systeme untereinander:** Dieser Vergleich findet vor dem Hintergrund einer möglichst effizienten Nutzung von Ressourcen statt. Im Detail finden sich hier die folgenden Vergleiche:
 - Vergleich verschiedener biogener Produkte: ähnliche Bioenergieträger (z.B. Biokraftstoffe, wie Biodiesel, reines Pflanzenöl, Ethanol, Kraftstoffe zweiter Generation) oder Energieträger zur Verbrennung (z.B. Holzhackschnitzel, Holzpellets, Energiegräser).
 - Vergleich unterschiedlicher Rohstoffe: Auswirkung der Rohstoffauswahl bei einem definierten Endprodukt auswirkt (z.B. unterschiedliche Ölpflanzen für die Herstellung von Biodiesel; verschiedene Substrate für Biogas).
 - Energetische versus stoffliche Nutzung: Frage nach der besten Verwendung eines Rohstoffes, allerdings erweitert um seine stoffliche Nutzung.
 - Vergleich verschiedener Technologiepfade: Herstellung eines Endproduktes aus derselben Biomasse auf unterschiedlichen Wegen (z.B. unterschiedliche Synthesepfade zu Biokraftstoffen zweiter Generation)
- **Verbesserung des Prozessverständnisses / Optimierungspotenziale:** Gerade bei neueren Produkten besteht die Frage, wie der Produktionsprozess aus Umweltsicht am effizientesten gestaltet werden kann. Oft geht es hier um Verbesserungen im Anbausystem, um die Wahl des Energieträgers im Produktionsprozess oder die optimale Nutzung von Nebenprodukten.

Zusätzlich zu den aufgelisteten Fragestellungen zeigen sich tendenziell zusätzliche Fragestellungen, bzw. sonstige Untersuchungsaspekte, die hauptsächlich bei Studien mit politischen Auftraggebern zu finden sind:

- **Geographischer Bezugsraum:** dieser scheint bei politisch motivierten Studien etwas weiter gefasst zu sein. So werden häufiger Szenarien auf Länder-, nationaler, oder EU-Ebene miteinander verglichen (z.B. unterschiedliche Stromsysteme oder die optimale Biomassenutzung auf regionaler Ebene).
- **Erschaffung einer Datenbasis f. Zukunftsprojektionen:** Untersuchung neuer Kraftstoffe, Ableitung von Emissionsfaktoren
- **Anzahl der untersuchten Energieträger:** es werden tendenziell mehrere Energieträger, bzw. ganze Gruppen untersucht mit der Frage nach der optimalen Biomassenutzung. Wenn es um einzelne Produkte geht, sind dies eher neuere Produkte (z.B. Kraftstoffe 2. Generation) oder sich in der öffentlichen Diskussion als problematisch herausstellenden Produkte (z.B. Palmöl).

In der Wissenschaft hingegen finden sich, zusätzlich zu den oben aufgelisteten Fragestellungen, eher methodisch geprägte Fragestellungen, die dem besseren Methodenverständnis oder der Methodenentwicklung dienen sollen.

Der Anwendungsbereich der Studien wird lediglich bei politisch motivierten Studien genannt (wenn auch nicht immer), während er bei wissenschaftlichen meist nicht erkennbar ist. Die Ergebnisse sollen zumeist der Information und Unterstützung von politischen Entscheidungsträgern dienen. Dies betrifft sowohl die regionale / kommunale, nationale als auch europäische Ebene. Im Speziellen sollen die Studien beispielsweise bei folgenden Fragestellungen unterstützen:

- Politikinformation: welche Produkt (-linien) sind am besten
 - Wissenserweiterung für neue Kraftstoffe (2. Generation) oder Technologien, Priorisierung verschiedener Nutzungsoptionen oder Technologien für den Ausbau, Entscheidungsfindung bezüglich der Herkunft von Biomasse geht (z.B. importiert vs. lokal)
 - Versorgung v. Entscheidungsträgern mit einfach zu nutzenden Emissionsfaktoren
- Politikentwicklung: welche zukünftigen Pfade könnten entstehen, wie sind ihre potenziellen Auswirkungen und wie kann die Politik begleiten
 - Entwicklung künftiger Energieversorgungsstrategien (kommunal, regional), Unterstützung des ökologisch optimierten Ausbau des Energiesystems, Entwicklung v. Abfallmanagementstrategien, Entscheidungsbasis für Gestaltung von Steuersystemen
 - Erschließung zusätzlicher Biomassepotenziale zum Ausbau biobasierter Technologien
 - Nachhaltigere Gestaltung einzelner Bioenergietechnologien durch Einführung ökoogischer Minimalstandards (Palmöl)
 - Abschätzung des potenziellen Beitrags einzelner Bioenergiepfade zum Umweltschutz allgemein

Wenn in wissenschaftlich motivierten Studien ein Anwendungsgebiet definiert wird, dann umfasst dies meist Einzelaspekte. So geht es beispielsweise um die Erweiterung der Datenbasis für künftige Ökobilanzen, um die Optimierung einzelner Biomassepfade, die wissenschaftliche Begleitung von Technologieentwicklungen oder die Methodenentwicklung (sowohl der Ökobilanz als auch der Nachhaltigkeitsbewertung insgesamt).

Tabelle 2 zeigt einen Überblick darüber, welche Rohstoffe und Produkte mit den Bioenergie-Studien abgedeckt werden. Die meisten untersuchten Rohstoffe stammen aus Deutschland oder dem europäischen Ausland. Gerade bei den Biokraftstoffen werden jedoch auch Rohstoffe aus Übersee betrachtet (z.B. Palmöl aus Asien).

Tabelle 2: Abgedeckte Rohstoffe und Produkte im Produktbereich Bioenergie

	Rohstoff	Produkt
Transport		
Flüssig	Mais, Getreide, Zuckerrübe, Zuckerrohr, Cassava, Kartoffeln	Ethanol
	Rapsöl, Sonnenblumenöl, Soja, Palmöl, Jatropha, Mikroalgen, Altspeiseöl	Biodiesel, reines Pflanzenöl
Strom und / oder Wärme		
Flüssig	Rapsöl, Sonnenblumenöl, Soja, Palmöl	reines Pflanzenöl
Gasförmig	Mais, Getreide, Gülle, Haushaltsabfälle, Grünschnitt, Industrieabfälle / -nebenprodukte, Zwischenfrüchte, Melasse, Glycerin	Biogas, Biomethan
	Kurzumtriebsplantagen (Pappel, Weide), Waldrestholz, Stroh, Energiegräser	Synthesegas
Fest	Energiegräser (Miscanthus, Pfahlrohr, Rutenhirse)	Direktverbrennung, Pellets
	Kurzumtriebsplantagen (Pappel, Weide), Waldrestholz	Holzhackschnitzel, Holzpellets
	Stroh, Sägenebenprodukte	Direktverbrennung, Pellets
	Haushaltsabfälle, Altholz	Direktverbrennung

Die Wahl der funktionellen Einheit hängt von der Art der Fragestellung ab. Geht es um eine optimale Nutzung von Ressourcen (sei es Land oder die Ausgangsbiomasse), findet der Vergleich auf Flächenebene (Hektar) oder dem Gewicht der Biomasse statt. Sollen verschiedene Energieträger verglichen werden, geschieht dies anhand einer energetischen Einheit (kWh oder MJ). Die allermeisten Studien beinhalten den kompletten Lebensweg bis hin zur Nutzung als Energieträger („cradle-to-grave“). Nur wenige Studien enden bei der Produktion der Biomasse („cradle-to-gate“).

Abbildung 8 zeigt einen Überblick über die Wirkungskategorien in den untersuchten Studien.

Am häufigsten sind die Kategorien Klimawandel, Eutrophierung, Energie und Versauerung. Unter die Kategorie Eutrophierung fallen sowohl terrestrische als auch aquatische Eutrophierung und die Kategorie Energie umfasst ebenfalls eine große Bandbreite an Unterkategorien (z.B. nicht erneuerbare Energie, fossile Energie). Letzteres gilt auch für den Ressourcenverbrauch und Toxizität. Grundsätzlich unterscheiden sich die in den Studien herangezogenen Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle teilweise stark.

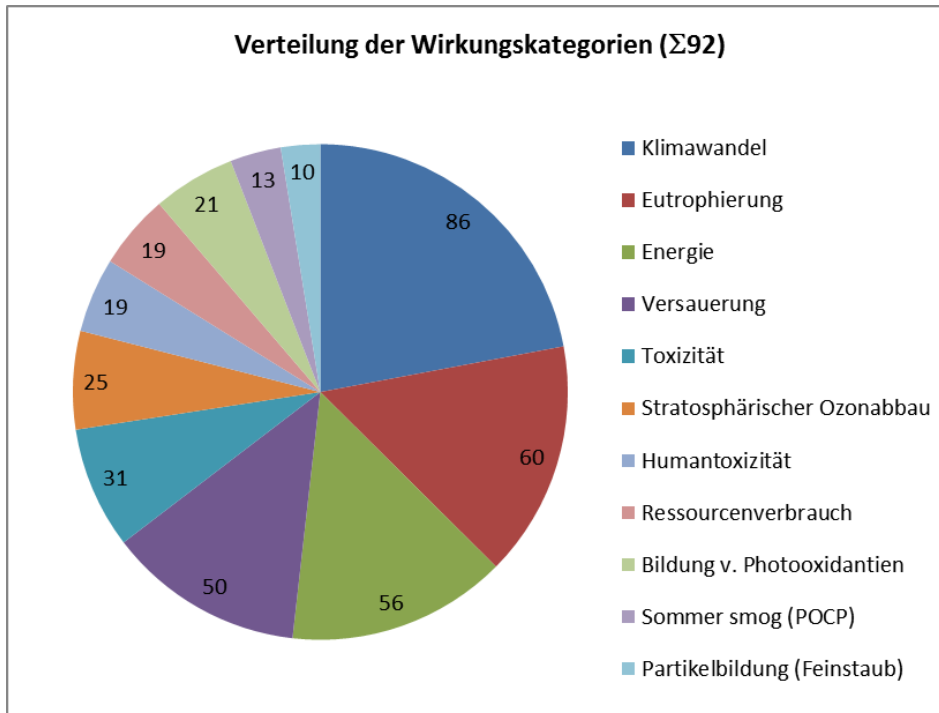


Abbildung 8: Verteilung der Wirkungskategorien im Produktbereich Bioenergie

Abbildung 9 zeigt die Abdeckung der Symbio-Fußabdrücke in den Studien und zeigt eine sehr ungleichmäßige Verteilung. Während der Klimawandel Gegenstand fast aller Studien ist, werden die Kategorien Land und Wasser in nur wenigen Studien betrachtet. Unter den 18 Studien mit Flächeninanspruchnahme fallen auch vier, die Landnutzungsänderungen mit betrachteten. Die Kategorie Wasser wurde aufgeteilt in Quantität und Qualität. Letztere beinhaltet die aquatische (sowohl Frischwasser als auch marine) Eutrophierung.

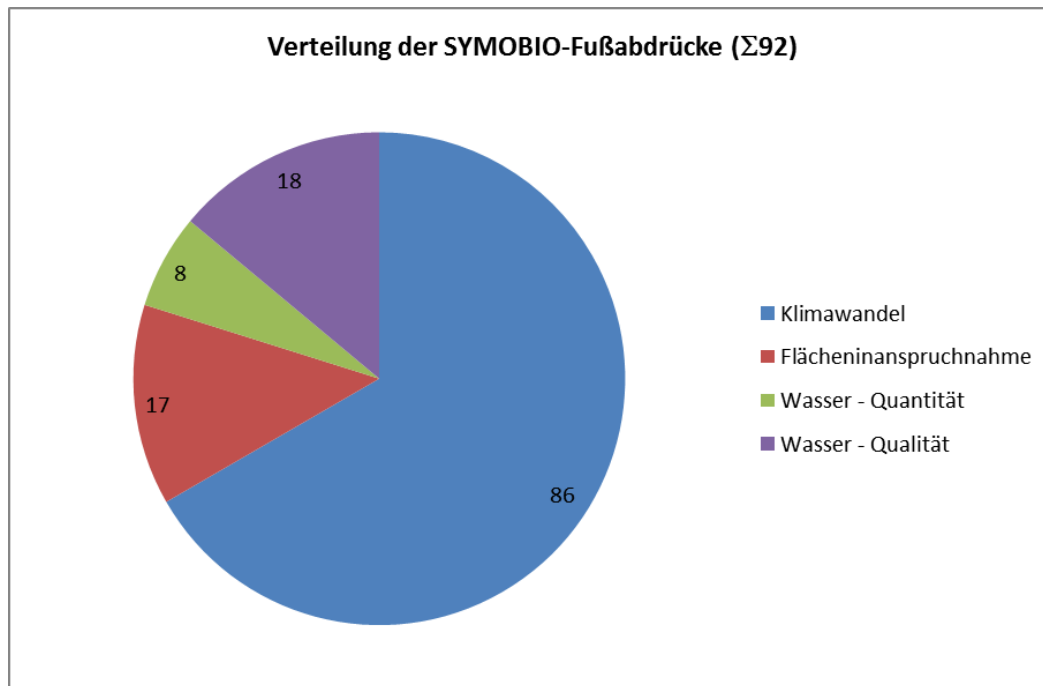


Abbildung 9: Verteilung der Symbio-Fußabdrücke im Produktbereich Bioenergie

3.3 Stofflich genutzte Biomasse

3.3.1 Ökobilanzen zu Papier

Es wurden 20 Studien in die Auswahlmatrix eingearbeitet.

Drei der Studien haben die Bilanzierung von Prozessoptimierungen in der Papierherstellung zum Gegenstand. Es handelt sich dabei um Forschungsprojekte mit Finanzierung durch die öffentliche Hand, die sich in erster Linie an die Papierindustrie richten.

Vier der Studien bewerten verschiedene Entsorgungsoptionen von Altpapier; zum einen klassische Paarungen wie stoffliche Verwertung versus Verbrennung, aber auch innovative Wege wie die Herstellung von Ethanol aus Altpapier. Sie sind im Wesentlichen universitär angesiedelt und dienen einem wissenschaftlichen Erkenntnisinteresse.

Sieben der Studien beschäftigen sich mit der Frage, ob Papierprodukte aus ökologischer Sicht eher aus Frischfaserpapier oder aus Altpapier hergestellt werden sollten. Die Fragestellung wird sowohl auf grafische Papiere als auch Hygiene- und Packpapiere angewendet. Die Studien wurden teilweise von der öffentlichen Hand, teilweise von der Industrie beauftragt und richten sich – soweit erkennbar – vorwiegend direkt oder indirekt an die Politik bzw. dienen einem allgemeinen (d.h. letztlich an den Markt bzw. den Verbraucher gerichteten) Erkenntnisinteresse.

In drei der Studien werden Papierprodukte mit Produkten aus anderen Materialien verglichen. Auftraggeber sind hier dezidierte Interessensgruppen, z.B. Hersteller bzw. deren Industrieverband, die ihr eigenes Produkt mit einer Produktalternative vergleichen wollen, oder Endnutzer, die an entsprechenden Entscheidungsgrundlagen interessiert sind.

In zwei der Studien wird der nationale (Norwegen und Dänemark) Faser- und Papierstoffstrom ökobilanziell bewertet. Ziel ist es dabei, den nationalen Umweltbeitrag des jeweiligen Stoffstroms im Status Quo sowie im Abgleich zu ausgewählten Alternativ- bzw. Verbesserungsoptionen zu analysieren. Zielgruppen dieser Studien sind daher in gleichem Maße Politik und Industrie.

Als Herkunft für den biogenen Rohstoff wird in den ausgewählten Studien überwiegend eine nordische Holzgewinnung angenommen. Im Falle von Eucalyptusholz wird eine spanische oder portugiesische Holzgewinnung bilanziert. Dabei endet bei einem Teil der Studien der Bilanzraum mit dem Faseraufschluss am Ausgangstor der Zellstofffabrik.

Als funktionelle Einheit der betrachteten Studien dient zumeist eine definierte Masse an Papierprodukt (typischerweise 1kg oder 1t), bei den stoffstromorientierten Studien die Verbrauchsmenge an Papier (als Masseneinheit) bzw. Holz (spezifiziert über eine Volumeneinheit) für die Papierherstellung in einem definierten Land in einem definierten Jahr.

Einen Überblick über die in den recherchierten Papier-Ökobilanzen betrachteten Umweltwirkungen gibt die nachfolgende Aufzählung:

- Klimawandel
 - In 19 Studien als CO₂-Äquivalente enthalten
 - In einer Studie wurde nur CO₂ berücksichtigt
- Flächeninanspruchnahme
 - In 6 Studien enthalten
 - In einer der 6 Studien, betrachtet auch Landnutzungsänderung (dLUC)
- Versauerung
 - In 10 Studien enthalten
- Eutrophierung
 - In 11 Studien als enthalten;
 - Teilweise in Frischwasser Eutrophierung und terrestrische Eutrophierung differenziert
- Stratosphärischer Ozonabbau
 - In 6 Studien enthalten

- Ionisierende Strahlung
 - In 1 Studie enthalten
- Partikelbildung (Feinstaub)
 - In 1 Studie enthalten
- Ressourcenverbrauch
 - In 13 Studien enthalten;
 - im Einzelnen jedoch unterschiedliche Ressourcenkategorien und Charakterisierungsmethoden
- Wassernutzung
 - In der Wirkungsabschätzung 1 Studie enthalten
- Toxizität
 - In 6 Studien enthalten
 - Dabei Differenzierung zwischen Humantoxizität und Frischwasser-Toxizität

Die meisten Studien betrachten somit die Umweltwirkungen bzgl. Klimawandel und Ressourcenverbrauch. Häufig werden auch Versauerung, Eutrophierung und etwas abgestuft Toxizität, Stratosphärischer Ozonabbau und Flächeninanspruchnahme einbezogen. Die dafür herangezogenen Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle können sich jedoch je nach Studie stark unterscheiden.

3.3.2 Ökobilanzen zu Lebensmitteln

Es wurden 44 Studien in die Auswertungsmatrix eingearbeitet. Bei der Fülle an Ökobilanzen zum Thema Lebensmittel ging es nicht darum, möglichst viele Studien zu recherchieren, sondern zum einen das aktuell viel diskutierte und mit Blick auf die zukünftige Nahrungssicherung mitentscheidende Thema Eiweißversorgung und zum anderen die mit der Bereitstellung von Lebensmittel verbundene Varianz (Haltungsbedingungen, Biomasse-Herkunft, Transportwege, zeitliche Variabilität von Beständen oder jahreszeitliche Abhängigkeiten, frische Lebensmittel versus vorverarbeitete Lebensmittel, etc.) zu erfassen.

Daher findet sich in der Excel-Matrix auch ein relativ großer Anteil (26 Studien) an Ökobilanzen zu Fleisch bzw. Milchprodukten und Fisch bzw. Meeresfrüchten sowie solche, die sich mit Fleischalternativen beschäftigen. Wie in Produktökobilanzen häufig zu finden, geht es auch in fast jeder der Studien darum, die Produktionssysteme besser zu verstehen und die Treiber für die untersuchten Umweltwirkungen sowie die darauf bezogenen Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren.

Bezüglich der Bereitstellung von Fischprodukten für die menschliche Ernährung wurden Umweltbilanzen z.B. unterschiedlicher Fangtechniken, geringerer bzw. höherer Verarbeitungsstufen oder die Auswirkung der Dynamik von Fischbeständen im Verlauf mehrerer Jahre betrachtet. Eine Studie untersuchte unter Anwendung einer konsequenten Modellierung die Frage, wie eine wachsende Nachfrage nach Fisch über Aquakultur (Forellen) nachhaltig bedient werden könne. In den Ökobilanzen zur Erzeugung von Fleisch wurden u.a. Szenarien zur Fütterungseffizienz oder zur Auswirkung verschiedener Tierhaltungssysteme untersucht. In mehreren Studien werden übergreifend Fisch, Fleisch und Milch basierte Lebensmittel verglichen. Dabei wird herausgestellt, dass für jede dieser Produktgruppen große Ergebnisbandbreiten zu finden sind, insbesondere bei den Studien zu Rindfleisch und Milchprodukten sowie Fischen aus Wildfang.

Die restlichen Studien in der Auswertematrix umfassen folgende Produktgruppen: Getreideprodukte, Obst/Gemüse, Tee, Wein/Bier. Besondere Aspekte, die hier betrachtet wurden, sind: regionale Unterschiede beim Frischwasserverbrauch, regionale Erzeugung versus Importe, saisonaler Konsum versus ganzjähriger Konsum. Eine Studie untersucht die zusätzliche Flächennutzung bzw. die durch Lebensmittelkonsum bewirkte Flächenumnutzung am Beispiel Weizenkonsum in Dänemark, USA, Brasilien und China.

Als Funktionelle Einheit wird bei festen Lebensmitteln in der Regel ein Massebezug, bei flüssigen Lebensmitteln teilweise auch ein Volumenbezug verwendet. In wenigen Fällen kommt ein Portionsbezug zur Anwendung. Sofern der Fokus auf dem Vergleich unterschiedlicher Proteinquellen liegt, wird neben dem Massebezug in der Regel auch eine definierte Proteinmenge (teilweise unter Berücksichtigung der jeweiligen Proteinverdaulichkeit) sowie ggf. ein definierter kalorischer Wert als Bezug gesetzt.

Die Zielgruppen der Studien sind je nach Untersuchungsziel höchst verschieden. Am häufigsten genannt werden die Verbraucher, aber auch die Lebensmittelindustrie, aus deren Kreis auch eine Reihe der Studien beauftragt wurde. Studien mit Fragestellungen bzgl. des Einflusses von Regionalität oder Saisonalität richten sich auch an den Lebensmittelhandel.

Einen Überblick über die in den recherchierten Papier-Ökobilanzen betrachteten Umweltwirkungen gibt die nachfolgende Aufzählung:

- Klimawandel
 - In 36 Studien berücksichtigt
 - In einigen Studien, insbesondere solche mit Fokus auf Logistik („Food Miles“) oder Wasserverbrauch, nicht berücksichtigt
- Flächeninanspruchnahme
 - In 16 Studien enthalten
- Versauerung
 - In 25 Studien enthalten
- Eutrophierung
 - In 24 Studien als enthalten;
 - Teilweise in Frischwasser Eutrophierung (3 Studien), Marine Eutrophierung (2 Studien) und terrestrische Eutrophierung (1 Studien) differenziert
- Bodennahe Ozonbildung
 - In 11 Studien betrachtet
- Stratosphärischer Ozonabbau
 - In 11 Studien enthalten
- Ionisierende Strahlung
 - In 1 Studie enthalten
- Partikelbildung (inkl. Respiratorische Effekte)
 - In 3 Studie enthalten

- Ressourcenverbrauch
 - Abiotische Ressourcen: In 10 Studien enthalten;
 - Verbrauch energetischer Ressourcen: in 18 Studien betrachtet
 - Im Quervergleich der Studien insgesamt heterogene Handhabung der Ressourcenkategorien und Charakterisierungsmethoden
- Wassernutzung/Wasserverbrauch
 - In 6 Studien enthalten
- Toxizität
 - Humantoxizität in 11 Studien enthalten
 - Ökotoxizität in 4 Studien betrachtet
 - Frischwasser-Ökotoxizität in 3 Studien betrachtet
 - Marine Ökotoxizität in 1 Studie ausgewertet

Die meisten Studien betrachten somit die Umweltwirkungen bzgl. Klimawandel, Versauerung, Eutrophierung und energetischer Ressourcenverbrauch. Auch der Aspekt Toxizität findet sich relativ häufig. Die Flächeninanspruchnahme wird in beinahe der Hälfte der Studien betrachtet. Die Wassernutzung als Umweltindikator wird vor allem dann in die Wirkungsabschätzung der Studien einbezogen, wenn die jeweiligen Studien explizit den Wasserfußabdruck der Lebensmittelerzeugung im Fokus haben.

Auch hier ist zu beobachten, dass die herangezogenen Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle sich je nach Studie stark unterscheiden.

3.3.3 Ökobilanzen zu Biokunststoffen

Es wurden 28 Studien in die Auswertungsmatrix eingearbeitet.

In neun der Studien geht es darum, ein Grundverständnis für die mit der Herstellung von biobasierten Polymeren verbundenen Umweltwirkungen und deren wesentlichen Treiber zu bekommen. Unter anderem wird dabei untersucht, wie sich verschiedene methodische Ansätze zur Allokation von Nebenprodukten oder die Verwendung unterschiedlicher Biomasserohstoffen auf die Ökopprofile der biobasierten Polymere auswirken. In einer der Studien wurde explizit eine sogenannte „ex-ante“ Betrachtung durchgeführt. D.h. basierend auf ingenieurtechnischen Daten und Planungsdaten wurde das zu erwartende Umweltprofil abgeschätzt. Aber auch in den anderen sieben Studien kamen implizit und je nach betrachtetem Biokunststoff Planungs- oder Proxydaten zur Anwendung.

Als funktionelle Einheit dieser Studien dient zumeist eine definierte Masse an Polymer (typischerweise 1kg oder 1t). In der Regel findet in diesen Studien auch eine Gegenüberstellung zu fossilen Polymeren statt, steht aber nicht Zentrum der Fragestellung. Die Auftraggeber dieser Studien sind Hersteller oder Anwender von Biopolymeren.

Sechs der ausgewählten Studien sind konzipiert wie die zuvor beschriebenen, jedoch endet ihr Systemraum nicht bei der Polymerproduktion (cradle-to-gate) sondern bezieht die Herstellung und die Entsorgung von Endprodukten mit ein. Im Zentrum steht auch hier wieder die Bilanzierung von Optimierungsoptionen und der Verwendung alternativer Biomasserohstoffe. Auch bei diesen Studien findet ergänzend ein Vergleich der betrachteten Produkte aus Biokunststoffen mit konventionellen Produktalternativen statt. Als funktionelle Einheit dieser Studien dient

entweder eine definierte Masse an Produkt (typischerweise 1kg oder 1t) oder bei Kunststofffolien eine definierte Fläche.

Elf der ausgewählten Studien sind vorrangig auf den Vergleich von Produkten aus biobasierten bzw. bioabbaubaren Kunststoffen im Vergleich zu Produkten aus fossil basierten Kunststoffen ausgerichtet. Bei den Produkten handelt es sich überwiegend um Verpackungen. In der Regel ist dabei der komplette Lebensweg von der Biomassegewinnung bis zur Entsorgung im Systemraum umfasst. Bei der Entsorgung setzten einige Studien den Fokus auf die Bioabbaubarkeit der Biokunststoffe und der Analyse des damit erzielbaren Nutzens. Mit den Vergleichsstudien sollen zumeist die Vor- und Nachteile der einzelnen Produktsysteme ermittelt werden und eine wissenschaftlich basierte Entscheidungsgrundlagen für Politik und Industrie sowie im weiteren die interessierte Öffentlichkeit gegeben werden. Als funktionelle Einheit dieser Studien dient häufig eine definierte Anzahl von Produkteinheiten (z.B. 1000 Klappschalen). Die Auftraggeber kommen hier zumeist aus dem Kreis der Industrie.

In knapp der Hälfte der Studien war Polylactid einer der untersuchten Biokunststoffe. Im Weiteren sind biobasiertes Polyethylen, Polyethylenfuranoat, Polyhydroxybutyrate und bioabbaubare Polyester Gegenstand der ausgewählten Ökobilanzen.

Als biogener Rohstoff wird in den ausgewählten Studien überwiegend Mais (Herkunft: USA, Brasilien sowie China) sowie Zuckerrohr (Herkunft: Brasilien bzw. Indien) verwendet. Bei den bioabbaubaren Kunststoffen bzw. Kunststoffprodukten besteht häufig ein Teil aus Stärke (Biomasse: Kartoffeln und Mais). In einer Studie werden biobasierte Produkte aus Ölpflanzen (Raps, Ölpalme, Sojabohne) mit solchen aus Zuckerpflanzen verglichen. Dort wo Lignozellulose als biogener Rohstoff betrachtet wird, stammt diese in den untersuchten Studien aus Bagasse, Hanf oder Miscanthus.

Die Angaben zur geographischen Herkunft der biogenen Rohstoffe in den untersuchten Studien sind mit wenigen Ausnahmen sehr unspezifisch.

Einen Überblick über die in den recherchierten Biokunststoff-Ökobilanzen betrachteten Umweltwirkungen gibt die nachfolgende Aufzählung:

- Klimawandel
 - Grundsätzlich in allen Studien berücksichtigt
- Flächeninanspruchnahme
 - In 7 Studien enthalten
- Versauerung
 - In 18 Studien enthalten
- Eutrophierung
 - In 18 Studien als enthalten;
 - Teilweise in Frischwasser Eutrophierung (1 Studie), Aquatische Eutrophierung (2 Studien) und terrestrische Eutrophierung (3 Studien) differenziert
- Bodennahe Ozonbildung
 - In 13 Studien betrachtet
- Stratosphärischer Ozonabbau

- In 8 Studien enthalten
- Ionisierende Strahlung
 - In 4 Studie enthalten
- Partikelbildung (inkl. Respiratorische Effekte)
 - In 4 Studie enthalten
- Ressourcenverbrauch
 - Abiotische Ressourcen: In 7 Studien enthalten;
 - Non-renewable primary energy consumption: in 9 Studien betrachtet
 - Im Quervergleich der Studien insgesamt heterogene Handhabung der Ressourcenkategorien und Charakterisierungsmethoden
- Wassernutzung
 - In 3 Studien enthalten
- Toxizität
 - Humantoxizität in 11 Studien enthalten
 - Ökotoxizität in 4 Studien betrachtet
 - Frischwasser-Ökotoxizität in 3 Studien betrachtet
 - Marine Ökotoxizität in 1 Studie ausgewertet

Die meisten Studien betrachten somit die Umweltwirkungen bzgl. Klimawandel, Versauerung, Eutrophierung und Ressourcenverbrauch. Auch der Aspekt Toxizität findet sich relativ häufig.

3.3.4 Ökobilanzen zu Bioraffinerien

Bioraffinerien sind Anlagen, in denen Biomasse über eine räumlich integrierte Kopplung von mechanischen und physiko-chemischen Verfahren zu verschiedenen Produkten verarbeitet wird. Häufig handelt es sich bei der Produktpalette um eine Mischung von stofflich und energetisch nutzbaren Produkten. Es wurden 7 Studien zu Bioraffinerien in die Auswertematrix eingearbeitet.

Tabelle 3 gibt einen Überblick zu den eingesetzten Rohstoffen, die im Wesentlichen auch Technik und Typ der Bioraffinerie mitdefinieren. Zudem wird in der Tabelle das jeweilige modellierte Produktspektrum aufgelistet.

Tabelle 3: Abgedeckte Rohstoffe und Produkte im Produktbereich Bioraffinerien

Raffinerie-Typus (BR)	Biomasse-Rohstoff	Produkt-Output
Algen BR	Makro-Algen (Seetang)	- Bioethanol - Proteine - Dünger
Organosolv-Lignozellulose BR	Buchenholz	- Glucose - Lignin - Xylose
Lignozellulose BR	Leere Fruchtstände	- Bioethanol - Dampf u. Strom - C5 Syrup (als Futtermittel für Rinder)
Im Wesentlichen eine Zuckermühle mit verstärkter stofflicher Nutzung von Nebenprodukten	Zuckerrohr	- 1st und 2nd Generation Ethanol - Zucker - Molasse (als Futtermittel) - Strom
Im Wesentlichen ein Zellstoffwerk mit verstärkter stofflicher Nutzung von Nebenprodukten	Holz	- Papierzellstoff - Methanol - Lignin-basierter Brennstoff - Prozessabwärme
Lignozellulose BR	Schaltgras (Switchgrass)	- Bioethanol - Bioenergie - Biochemikalien (Phenole)
Lignozellulose BR	Ernterückstände (Mais- und Weizenstroh)	- Bioethanol - Bioenergie - Biochemikalien (Phenole)

Der Schwerpunkt liegt auf der Nutzung von Lignozellulose. Dabei werden zum einen schon lang etablierte Verfahren wie Zellstoffherstellung aus Holz oder Bioethanolgewinnung aus Zuckerrohr so weiterentwickelt, dass möglichst viele Teilströme zu marktfähigen Produkten aufbereitet werden können. Zum anderen geht es um die Verwertung traditionell nicht weiter aufbereiteter Reststoffe. Die Algenbioraffinerie wiederum ist ein Beispiel für die Erschließung neuartiger Biomasserohstoffe.

Die gewählten funktionellen Einheiten sind entweder auf den Biomasseinput bezogen oder auf das Hauptprodukt des jeweiligen Raffinerieprozesses (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Funktionelle Einheiten und Zielgruppen im Produktbereich Bioraffinerien

Raffinerie-Typus (BR)	Funktionelle Einheit	Kontext / Zielgruppe
Algen BR	1 ha of sea under cultivation	Industrie (Anlagenhersteller, Betreiber)
Organosolv-Lignozellulose BR	50t/h Holz (trocken) Input	Wissenschaft, Industrie
Lignozellulose BR	1t leere Fruchtstände	Industriepartner im Projekt
Zuckermühle	- Well-to-Tank (WtT) LCA: 1 ton of sugarcane - Tank-to-Wheel (WtW): 1 km of car	Zuckermühle
Zellstoffwerk	1 Tonne Zellstoff	Kontext: Initiiert von der „Schwedischen Agentur für Innovative Systeme“
Lignozellulose BR	477 kt dry (entspricht der Jahreskapazität der Anlage)	In erster Linie wissenschaftliches Erkenntnisinteresse
Lignozellulose BR	477 kt dry (entspricht der Jahreskapazität der Anlage)	In erster Linie wissenschaftliches Erkenntnisinteresse

Die betrachteten Studien beziehen sich auf Bioraffinerieprozesse, die sich zum Zeitpunkt der Studiendurchführung noch in Entwicklung befanden. Die Studien sind daher so angelegt, dass sie zunächst ein wissenschaftliches Erkenntnisinteresse bedienen, aber auch als Informationsgrundlage für politische Entscheidungsträger und die involvierte Industrie gedacht sind. Auffällig ist, dass viele der Studien mit Schätz- und Proxydaten arbeiten, die aus vergleichbaren Verfahrensschritten, ingenieurtechnischen Abschätzungen oder Messungen in Pilotanlagen abgeleitet wurden.

Einen Überblick über die betrachteten Umweltwirkungen gibt die nachfolgende Aufzählung:

- Klimagase
 - In 6 Studien berücksichtigt
- Flächeninanspruchnahme
 - In 3 Studien enthalten
- Versauerung
 - In 3 Studien enthalten
- Eutrophierung
 - In 3 Studien als enthalten;
- Bodennahe Ozonbildung
 - In 2 Studien betrachtet
- Stratosphärischer Ozonabbau

- In 2 Studien enthalten
- Ressourcenverbrauch
 - Verbrauch energetischer Ressourcen: in 3 Studien betrachtet
- Toxizität
 - Humantoxizität in 4 Studien enthalten
 - Terrestrische Ökotoxizität in 2 Studien betrachtet
 - Frischwasser-Ökotoxizität in 3 Studien betrachtet
 - Marine Ökotoxizität in 2 Studie ausgewertet

4 Fazit und Ausblick

Dieser Bericht ist der erste von zwei geplanten Berichten im Arbeitspaket 5.3 (Produktökobilanzen). Das Ziel des Arbeitspakets insgesamt ist die Einschätzung der Rolle von Produktökobilanzen als Instrument und Entscheidungshilfe auf dem Gebiet der Bioökonomie sowie des Potenzials für eine Verwendung innerhalb eines systemischen Monitoringsystems im Sinne des Symbio-Projekts.

Die Kernarbeit in dem vorliegenden Bericht war eine Literaturrecherche zu Produktökobilanzen, die auf dem Gebiet der Bioökonomie zur Verfügung stehen. Insgesamt wurden 192 Studien zu den Produktbereichen Bioenergie, Biokunststoffe, Nahrungsmittel, Papier und Bioraffinerien erfasst. Es erfolgte eine Charakterisierung sowie erste Auswertung der erfassten Literatur anhand einer Excel-basierten Evaluationsmatrix (diese wird als separate Datei mitgeliefert). Dabei standen die folgenden Fragestellungen im Fokus:

- Welche Interessensgruppe nutzt die Ökobilanz für welchen Zweck?
- Welches sind die Systemcharakteristika der einzelnen Studien?
- Welche Umweltwirkungskategorien werden abgedeckt, insbesondere hinsichtlich der in Symbio behandelten Fußabdrücke und wo bestehen potenzielle Anknüpfungspunkte zum Symbio-Modell?

Diese Auswertung soll in einem zweiten Bericht vertieft werden, insbesondere vor dem Hintergrund, dass die eingangs angesprochene Rückkopplung zwischen der Vorgehensweise in Ökobilanzen und dem Modellierungsansatz in Symbio verschiedene Ebenen betrifft. Dementsprechend wird im Anschluss an die Beantwortung obiger Fragen ein kurzer Ausblick gegeben auf die Fragestellungen, die im Zuge der weiteren Arbeit beantwortet werden sollen.

Auswertung der Interessensgruppen

Eine Auswertung der Verwendung von Produktökobilanzen als Entscheidungshilfe für unterschiedliche Akteure in der Bioökonomie gestaltete sich als schwierig. Da die direkten Zielgruppen und Anwendungsbereiche meist nicht explizit genannt werden, erfolgte eine Einteilung anhand der Auftraggeber. Dies erwies sich jedoch bei wissenschaftlich publizierten Artikeln oft als schwierig. Wo eine Einordnung möglich war, dominieren Wirtschaft und Politik als Initiatoren von Produktökobilanzen. Zwar führen auch Wirtschaftsakteure Ökobilanzen durch, deren Ergebnisse werden jedoch oft nicht publiziert. Lediglich im Bereich Biokunststoffe ist die Wirtschaft stärker nach außen hin sichtbar, die es hier oft um die Bewerbung und Rechtfertigung neuer Produkte geht.

Hinsichtlich der Fragestellungen lassen sich keine eindeutigen Unterschiede zwischen den verschiedenen Interessensgruppen feststellen. Unabhängig vom Auftraggeber steht die Einschätzung von Umweltauswirkungen einzelner Produkte im Vordergrund. Darauf aufbauend geht es um den Vergleich verschiedener Produkte oder Systeme (etwa fossil versus bio oder unterschiedliche biogene Pfade untereinander), um die effizienteste Nutzung einer bestimmten Ressource zu erkennen oder den umweltverträglichsten Pfad hin zu alternativen Systemen. Innerhalb der Biomassepfade werden meist verschiedene Sensitivitätsanalysen, bzw. Variantenrechnungen durchgeführt, um Zusammenhänge besser zu verstehen und die Produktketten oder Systeme zu optimieren. Klassische Beispiele sind hier der Einsatz unterschiedlicher Energieträger in den Verarbeitungsprozessen, verschiedene Verarbeitungszustände (bei Lebensmitteln), regionale versus überregionale Vertriebe oder

unterschiedliche Entsorgungsstrategien. Damit steht ein großer Wissensfundus von Einzelaspekten, Treibern und relevanten Stellschrauben in Produktlebenswegen oder ganzen biomassebasierten Systemen zur Verfügung.

Charakteristika der Ökobilanzen

Mit der Literaturrecherche wurde eine große Bandbreite an stofflichen und energetischen Biomassepfaden abgedeckt und in Form einer Excel-Matrix charakterisiert. Das weite Feld der Bioökonomie spiegelt sich in der großen Diversität der Systemcharakteristika wider. Dies beginnt bei der Erfassung der eingesetzten Biomasse, die sowohl diverse Anbaubiomasse, Reststoffe als auch innovative Rohstoffe wie etwa Algen umfasst. Die Vielfalt der Fragestellungen resultiert in einer Vielfalt an funktionellen Einheiten, Systemgrenzen und anderen methodischen Aspekten, für die auf die beigelegte Excel-Matrix verwiesen wird.

Erfasste Wirkungskategorien / Symbio-Fußabdrücke

Insgesamt werden die Symbio-Fußabdrücke in recht unterschiedlichem Maße von den untersuchten Studien abgedeckt.

- Klima-Fußabdruck: Erwartungsgemäß wird die Wirkungskategorie Klimawandel in quasi allen betrachteten Ökobilanzen berücksichtigt. Bezüglich der Wirkungsabschätzungsmethode (Wirkungsindikator, Charakterisierung) ist keine besondere Rückkopplung der Ökobilanzmethode in Richtung „Symbio-Methode“ ersichtlich.
- Land-Fußabdruck: Die Flächennutzung wird in den meisten betrachteten Ökobilanzstudien nur auf der Sachbilanzebene mitgeführt und nur in relativ wenigen Studien im Zuge der Wirkungsabschätzung betrachtet. Das liegt unter anderem daran, dass sich erst in jüngerer Zeit international breiter akzeptierte Methodenansätze herausbilden. Relevante Literaturstellen hierzu sind Sala et al. (2016), European Commission (2017), Fehrenbach et al. (2015).
Die genannten Literaturstellen werden im nächsten Bericht innerhalb des AP 5.3 genauer auf die dort vorgeschlagenen methodischen Ansätze analysiert und auf ihre Relevanz bzw. Anwendbarkeit für die Symbio-Modellierung geprüft. Ein wichtiger Aspekt wird hierbei hier die Berücksichtigung von Biodiversität bei der Erstellung eines Land-Fußabdrucks sein.
- Wasser-Fußabdruck: Wie die Flächennutzung wird auch die Wasser-Inanspruchnahme in den meisten betrachteten Ökobilanzstudien auf der Sachbilanzebene mitgeführt. Eine Einbeziehung in die Wirkungsabschätzung erfolgt nur in relativ wenigen Studien. Dies erfolgt dann häufig über die Betrachtung des „Blue Water Footprints“ und „Green Water Footprints“, sowie unter Einbeziehung von Knappheitsfaktoren. Die regionale Granularität ist dabei häufig recht grob gerastert. Auch hier zeichnet sich mit der Publikation von Boulay et al. (2018) erst in jüngster Zeit eine international akzeptierte Konsensmethode (AWARE-Methode) ab. Die AWARE-Methode wird im nächsten Bericht genauer auf ihre Relevanz bzw. Anwendbarkeit für die Symbio-Modellierung geprüft. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei auch die Praktikabilität zur Berücksichtigung regionaler Gegebenheiten bezüglich der Datenverfügbarkeit und Rückverfolgbarkeit von Biomasseströmen zum Ort der Erzeugung.
- Forst-Fußabdruck: Holz als Biomasserohstoff spielt in den hier betrachteten Ökobilanzen naturgemäß vor allem in den Papier-Ökobilanzen eine wichtige Rolle. Üblicherweise wird in diesen Studien der Holzbedarf bezogen auf die funktionelle Einheit dargestellt. Wie beim Landfußabdruck stellt sich hier die Frage nach der Bewertung der ökologischen Relevanz einer solchen zunächst auf der Sachbilanz ermittelten Biomassenutzung. Die aktuelle Methodendiskussion schließt die Frage der ökologischen Qualität der Forstwirtschaft bzw. unterschiedlicher

Formen derselben mit ein. Auch hier soll die Frage nach Biodiversität und Forstnutzung und ihre Relevanz für die Bemessung eines Forst-Fußabdrucks im nächsten Bericht näher betrachtet werden.

Mögliche Fragestellungen der betrachteten Ökobilanzen bzw. der aktuellen ökobilanziellen Methodenentwicklungen im Wirkfeld der Bioökonomie

Beim Monitoring der Bioökonomie geht es zum einen um eine ökologische Zustandsbeschreibung der Bioökonomie (im Zeitverlauf) anhand der vier definierten Fußabdrücke um Fehlentwicklungen zu vermeiden. Zum anderen sollen aber auch Weichenstellungen ermöglicht werden, um eine richtungssichere und zukunftsorientierte Ausrichtung der Bioökonomie zu garantieren. Dazu ist eine entsprechende Parametrisierung des Modells erforderlich. Aspekte der untersuchten Ökobilanzen, die auch für die Makroebene relevant sein könnten, werden im Folgenden kurz angesprochen.

- Land Use Change: Es versteht sich von selbst, dass mit dem Biomassekonsum der deutschen Bioökonomie ein Bedarf an forstlicher oder landwirtschaftlicher Nutzfläche verbunden ist, die potenziell zur Flächenkonkurrenz und zu Landnutzungsänderungen führen können. Die betrachteten Ökobilanzen sowie die aktuellen ökobilanziellen Methodenentwicklungen sollen auf orientierende Merkposten für die Symbio-Modellierung analysiert werden.
- Produkt-/Systeminnovationen: In vielen der betrachteten Ökobilanzen geht es u.a. darum, Optimierungsoptionen für einzelne Produktsysteme zu identifizieren, und zwar nicht nur für schon bestehende Produktlinien oder -gruppen, sondern auch ex-ante, also in der Frühphase der Produktentwicklung. Ein häufiges Problem ist hierbei die Datenverfügbarkeit. Da auch in Symbio „Prognose-Szenarien“ geplant sind, wäre es interessant zu sehen, ob Lösungsansätze der Ökobilanzen auch für Symbio nützlich sein könnten.
- Verbraucherverhalten, Konsumgewohnheiten, Bedienung wachsender Nachfrage: Konsum von und Nachfrage nach biobasierten Produkten und Energieträgern werden die Entwicklung der Bioökonomie vermutlich maßgeblich mitbestimmen. In einigen der betrachteten Ökobilanzen wurden die ökologischen Auswirkungen von Konsummustern oder von veränderten Nachfragesituationen betrachtet. Auch hier könnten Querbezüge zu Fragen bspw. des ökologischen Nutzens der Bioökonomie und den Anforderungen an ein Bioökonomiemonitoring bestehen.
- Logistik / Saisonalität: Besonders im Bereich der Nahrungsmittelbereitstellung wurde mehrfach der Einfluss von Logistik (regionale versus überregionale Bereitstellung) oder des Konsums saisonal verfügbarer Lebensmittel im Vergleich zur ganzjährigen Konsum aus der globalen Bereitstellung untersucht. Beide Aspekte hängen nicht nur eng miteinander zusammen, sondern sind auch Teil der im vorigen Absatz angesprochenen Themen. Hier stellt sich die Frage, ob dies auch im Rahmen eines Bioökomiemonitorings berücksichtigt werden sollte/könnte.
- Variabilität Biomasse basierter Systeme: Die Variabilität Biomasse basierter Systeme drückt sich nicht nur durch eine natürliche Fluktuation (z.B. Populationsdynamik natürlicher Bestände etwa bei Fischen) sondern auch über anthropogen geprägter Randbedingungen (z.B. Art der Viehhaltung, Fütterungskonzepte, etc.). So können die in Ökobilanzen gemessenen Umweltwirkungsprofile des Fleischkonsums extrem voneinander abweichen. Auch hier stellt sich die Frage, ob dies auch im Rahmen eines Bioökomiemonitorings berücksichtigt werden sollte/könnte.

Die Anwendung von Ökobilanzen auf Stoffstrommodelle

Die in der Einleitung schon genannten Studien Fehrenbach (2017), Mehra et al. (2018) und Tonini et al. (2017) werden im nächsten Bericht bezüglich des aktuellen Stands der Ökobilanzpraxis zur Verknüpfung des Ökobilanzansatzes mit der Stoffstrommodellierung analysiert. Hierbei geht es darum zu verstehen, wie sich diese Ansätze aus methodischer, konzeptioneller oder datenseitiger Sicht von der Symbio-Modellierung abgrenzen lassen und welchen Beitrag sie gegebenenfalls im Kontext eines Bioökonomiemonitorings leisten könnten.

5 Literaturverzeichnis

- Boulay, A.M., Bare, J., Benini, L. et al. (2018): The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *Int J Life Cycle Assess*, Vol. 23, 368-378.
- Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung (BMEL) (2014): Nationale Politikstrategie Bioökonomie. Berlin, 79.
- European Commission (2017): PEFCR Guidance document, - Guidance for the 14 development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3, December 15.
- Fehrenbach, H., B. Grahl, J. Giegrich, M. Busch (2015): Hemeroby as an impact category indicator for the integration of land use into LCA. *Int J Life Cycle Assess*, Vol. 20, 1511-1527.
- Fehrenbach, H., Köppen, S., Kauertz, B., Detzel, A., Wellenreuther, F., Breitmayer, E., Essel, R., Carus, M., Bienge, K., von Geibler, J. (2017): Biomassekaskaden - Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse. UBA-Texte 53/2017.
- Klöpffer, W. und Grahl, B. (2007): Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf: Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf .
- Mehra, J., Vadenboa, C., Steubing, B., Hellweg, S. (2018): Environmentally optimal wood use in Switzerland— Investigating the relevance of material cascades. *Resources, Conservation & Recycling* 131.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S. I. I., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., Wit, C. A. De, Hughes, T., Leeuw, S. Van Der, Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J. (2009): Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Science*, Vol. 14, No.2.
- Sala, S, Benini L, Castellani, V, Vidal Legaz, B, Pant, R. (2016): Environmental Footprint – Update of Life Cycle Impact Assessment methods; draft for TAB (status: May 2, 2016), Retrieved on 8 November 2016 at http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/JRC_DRAFT_EFLCIA_resources_water_landuse.pdf
- Tonini, D., Vadenbo, C., Fruergaard Astrup, T. (2017): Priority of domestic biomass resources for energy: Importance of national environmental targets in a climate perspective. *Energy* 124 (2017).
- Umweltbundesamt (UBA)(Hrsg.) (2000): Ökobilanzen für graphische Papiere, Berlin. UBA-Texte 22/2000.

In der Literaturrecherche ausgewertete Literatur - Stoffliche Nutzung

- Albrecht, S., Brandstetter, P., Beck, T., Fullana-i-Palmer, P., Grönman, K., Baitz, M., ... Fischer, M. (2013). An extended life cycle analysis of packaging systems for fruit and vegetable transport in Europe. *Int J Life Cycle Assess*, 19.
- Almeida, C., Vaz, S., Cabral, H., & Ziegler, F. (2014). Environmental assessment of sardine (*Sardina pilchardus*) purse seine fishery in Portugal with LCA methodology including biological impact categories. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(2), 297–306.
- Arntzen, H., Bredhal, A., Bökenkamp, G., Degel, M., Gschnell, F., Haake, F., ... Rauh, M. (n.d.). Ökobilanz Verpackungspapier vom Wald bis zum Rohverpackungspapier.

- Avadí, A., Fréon, P., & Quispe, I. (2014). Environmental assessment of Peruvian anchoveta food products: is less refined better? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(6), 1276–1293.
- AVNIR. (2015). PEF Supporting Study Intermediate Uncoated Woodfree Graphic Paper. AVNIR.
- Basset-Mens, C., Werf, H. M. G. van der, Durand, P., & Leterme, P. (2006). Implications of Uncertainty and Variability in the Life Cycle Assessment of Pig Production Systems(7 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(5), 298–304.
- Belboom, S., & Léonard, A. (2016). Does biobased polymer achieve better environmental impacts than fossil polymer? Comparison of fossil HDPE and biobased HDPE produced from sugar beet and wheat. *Biomass and Bioenergy*, 85, 159–167.
- Blanke, M. M., & Burdick, B. (2005). Food (Miles) for Thought-Energy Balance for Locally-Grown versus Imported Apple Fruit. *Environmental Science and Pollution Research*, 12(3), 125–127.
- Blengini, G. A., Brizio, E., Cibrario, M., & Genon, G. (2011). LCA of bioenergy chains in Piedmont (Italy): A case study to support public decision makers towards sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, 57(Supplement C), 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.003>
- Bos, H. L., Meesters, K. P. H., Conijn, S. G., Corré, W. J., & Patel, M. K. (2016). Comparing biobased products from oil crops versus sugar crops with regard to non-renewable energy use, GHG emissions and land use. *Industrial Crops and Products*, 84, 366–374.
- Broekema, R., & Kramer, G. (2014). LCA of Dutch Semi-Skimmed Milk and Semi-Mature Cheese (p. 69). Gouda, The Netherlands: Blonk Consultants.
- Buchspies, B., Tölle, S. J., & Jungbluth, N. (2011). Life Cycle Assessment of High-Sea Fish and Salmon Aquaculture (Practical training report). Uster: ESU-services Ltd.
- Cherubini, F., & Jungmeier, G. (2010). LCA of a biorefinery concept producing bioethanol, bioenergy, and chemicals from switchgrass. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(1), 53–66.
- Cherubini, F., & Ulgiati, S. (2010). Crop residues as raw materials for biorefinery systems – A LCA case study. *Applied Energy*, 87(1), 47–57.
- Cichorowski, G., Joa, B., Hottenroth, H., & Schmidt, M. (2015). Scenario analysis of life cycle greenhouse gas emissions of Darjeeling tea. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(4), 426–439. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0840-0>
- Cok, B., Tsiropoulos, I., Roes, A. L., & Patel, M. K. (2014). Succinic acid production derived from carbohydrates: An energy and greenhouse gas assessment of a platform chemical toward a bio-based economy. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8(1), 16–29.
- Cordella, M., Bauer, I., Schulz, M., & Wolf, O. (2015). Evolution of disposable baby diapers in Europe: life cycle assessment of environmental impacts and identification of key areas of improvement. *Journal of Cleaner Production*, 95, 322–331.
- Cordella, M., Tugnoli, A., Spadoni, G., Santarelli, F., & Zangrando, T. (2008). LCA of an Italian lager beer. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2), 133–139.
- Dahlgren, L., & Stripple, H. (2016). A comparative LCA study of various concepts for shopping bags and cement sacks. IVL Swedish Environmental Research Institute.
- Da Silva Vieira, R., Canaveira, P., Da Simões, A., & Domingos, T. (2010). Industrial hemp or eucalyptus paper? An environmental comparison using life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assess*, 15, 368–375.
- Davis, J., & Sonesson, U. (2008). Life cycle assessment of integrated food chains—a Swedish case study of two chicken meals. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(7), 574–584.
- Detzel, A., & Krüger, M. (2006). Life Cycle Assessment of Polylactide (PLA). A comparison of food packaging made from NatureWorks® PLA and alternative materials. ifeu-Institut.

- Dias, A. C., Arroja, L., & Capela, I. (2007). Life cycle assessment of printing and writing paper produced in Portugal. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(7), 521–528. <https://doi.org/10.1065/lca2006.08.266>
- ~~Dinkel, F. (2004). Ökologischer Vergleich: Einweg-Mehrwegbecher. *Carbotech*, 19.~~
- Doublet, G., Jungbluth, N., Stucki, M., & Schori, S. (2013). Life cycle assessment of Romanian beef and dairy products (Deliverable: D2.1 No. Project no. 288974) (p. 60). Switzerland: ESU Services.
- Eberle, U., & Möller, M. (n.d.). Life Cycle Analysis of hand-drying systems (Technical Report) (p. 137). Ökoinstitut.
- Eerhart, A. J. J. E., Faaij, A. P. C., & Patel, M. K. (2012). Replacing fossil based PET with biobased PEF; process analysis, energy and GHG balance. *Energy & Environmental Science*, 5(4), 6407–6422.
- Elbehri, A., Azapagic, A., Cheserek, B., Raes, D., Kiprono, P., & Ambasa, C. (2015). Kenya's Tea Sector Under Climate Change. Rome, Italy: FAO.
- Ellingsen, H., & Aanonsen, S. A. (2006). Environmental Impacts of Wild Caught Cod and Farmed Salmon - A Comparison with Chicken (7 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(1), 60–65.
- Espinoza-Orias, N., Stichnothe, H., & Azapagic, A. (2011). The carbon footprint of bread. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(4), 351–365.
- Garraín, D., Vidal, R., Martínez, P., Franco, V., & Cebrián-Tarrasón, D. (2007). LCA of biodegradable multilayer film from biopolymers. Presented at the LCM 2007.
- Gazulla, C., Raugei, M., & Fullana-i-Palmer, P. (2010). Taking a life cycle look at crianza wine production in Spain: where are the bottlenecks? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(4), 330–337.
- Gemechu, E. D., Butnar, I., Gomà-Camps, J., Pons, A., & Castells, F. (2013). A comparison of the GHG emissions caused by manufacturing tissue paper from virgin pulp or recycled waste paper.
- Ghose, A., & Chinga-Carrasco, G. (2013). Environmental aspects of Norwegian production of pulp fibres and printing paper. *Journal of Cleaner Production*, 57, 293–301.
- Gironi, F., & Piemonte, V. (2011). Life cycle assessment of polylactic acid and polyethylene terephthalate bottles for drinking water. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 30(3), 459–468.
- Gnansounou, E., Vaskan, P., & Pachón, E. R. (2015). Comparative techno-economic assessment and LCA of selected integrated sugarcane-based biorefineries. *Bioresource Technology*, 196, 364–375.
- González-García, S., Castanheira, É. G., Dias, A. C., & Arroja, L. (2013). Environmental life cycle assessment of a dairy product: the yoghurt. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(4), 796–811.
- González-García, S., Hospido, A., Moreira, M. T., Romero, J., & Feijoo, G. (2009). Environmental impact assessment of total chlorine free pulp from *Eucalyptus globulus* in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 17(11), 1010–1016.
- Groot, W. J., & Borén, T. (2010). Life cycle assessment of the manufacture of lactide and PLA biopolymers from sugarcane in Thailand. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), 970–984.
- Hanssen, O. J., Rukke, E.-O., Saugen, B., Kolstad, J., Hafrom, P., von Krogh, L., ... Wigum, K. S. (2007). The environmental effectiveness of the beverage sector in Norway in a Factor 10 perspective. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(4), 257–265.
- Hedal Kløverpris, J., Baltzer, K., & Nielsen, P. H. (2010). Life cycle inventory modelling of land use induced by crop consumption: Part 2: Example of wheat consumption in Brazil, China, Denmark and the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(1), 90–103.
- Hermann, B. G. (2010). Opportunities for biomaterials economic, environmental and policy aspects along their life cycle. Universiteit Utrecht.
- Hermann, B. G., Blok, K., & Patel, M. K. (2010). Twisting biomaterials around your little finger: environmental impacts of bio-based wrappings. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(4), 346–358.

- Hospido, A., Milà i Canals, L., McLaren, S., Truninger, M., Edwards-Jones, G., & Clift, R. (2009). The role of seasonality in lettuce consumption: a case study of environmental and social aspects. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(5), 381–391.
- James, K. (2012). An investigation of the relationship between recycling paper and card and greenhouse gas emissions from land use change. *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 44–55.
- Jensen, J. K., & Arlbjørn, J. S. (2014). Product carbon footprint of rye bread. *Journal of Cleaner Production*, 82, 45–57.
- La Rosa, A. D., Recca, G., Summerscales, J., Latteri, A., Cozzo, G., & Cicala, G. (2014). Bio-based versus traditional polymer composites. A life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*, 74, 135–144.
- Laure, S., Leschinsky, M., Fröhling, M., Schultmann, F., & Unkelback, G. (2014). Assessment of an organosolv lignocellulose biorefinery concept based on a material flow analysis of a pilot plant.
- Laurijssen, J., Marsidi, M., Westenbroek, A., Worrell, E., & Faaij, A. (2010). Paper and biomass for energy? The impact of paper recycling on energy and CO₂ emissions. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1208–1218.
- Leon, J., Aliaga, C., Boulougouris, G., Hortal, M., & Marti, J. L. (2015). Quantifying GHG emissions savings potential in magazine paper production: a case study on supercalendered and light-weight coated papers. *Journal of Cleaner Production*, 103, 301–308.
- Liptow, C., & Tillman, A.-M. (2009). Comparative life cycle assessment of polyethylene based on sugarcane and crude oil. Division of Environmental Systems Analysis, Chalmers University of Technology.
- Liu, R. (2006, May 15). *Ökobilanzieller Vergleich der Herstellung von Biopolymer aus nachwachsenden Rohstoffen* (Diplomarbeit). Technischen Universität Berlin, Berlin.
- Manda, B. M. K., Blok, K., & Patel, M. K. (2012). Innovations in papermaking: An LCA of printing and writing paper from conventional and high yield pulp. *Science of The Total Environment*, 439, 307–320.
- Masternak-Janus, A., & Rybaczewska-Błazejowska, M. (2015). Life Cycle Analysis of Tissue Paper Manufacturing From Virgin Pulp or Recycled Waste Paper. *Management and Production Engineering Review*, 6(3).
- Mattila, T., Leskinen, P., Soimakallio, S., & Sironen, S. (2012). Uncertainty in environmentally conscious decision making: beer or wine? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(6), 696–705.
- Maupu, P., Berthoud, A., Négri, O., Leguereau, B., Gely, B., & Poupart, A. (2012). Traceability of environmental information all along the cereal industry: From the wheat field to the bakery. In *Proceedings 2nd LCA Conference* (Vol. 6, p. 7).
- Meneses, M., Pasqualino, J., & Castells, F. (2012). Environmental assessment of the milk life cycle: The effect of packaging selection and the variability of milk production data. *Journal of Environmental Management*, 107, 76–83.
- Merrild, H., Damgaard, A., & Christensen, T. H. (2008). Life cycle assessment of waste paper management: The importance of technology data and system boundaries in assessing recycling and incineration. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(12), 1391–1398.
- Milà i Canals, L., Chapagain, A., Orr, S., Chenoweth, J., Anton, A., & Clift, R. (2010). Assessing freshwater use impacts in LCA, part 2: case study of broccoli production in the UK and Spain. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(6), 598–607.
- Murphy, R. J., Davis, G., & Payne, M. (2008). Life Cycle Assessment (LCA) of Biopolymers for single-use Carrier Bags. National Non-Food Crops Centre (NNFCC).
- Nielsen, N. I., Jørgensen, M., & Bahrndorff, S. (2011). Greenhouse Gas Emission from the Danish Broiler Production estimated via LCA Methodology.
- Nielsen, P. H., Dalgaard, R., Korsbak, A., & Pettersson, D. (2008). Environmental assessment of digestibility improvement factors applied in animal production: Use of Ronozyme® WX CT xylanase in Danish pig production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(1), 49–56.

- Nijdam, D., Rood, T., & Westhoek, H. (2012). The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. *Food Policy*, 37(6), 760–770.
- Nilsson, K., Flysjö, A., Davis, J., Sim, S., Unger, N., & Bell, S. (2010). Comparative life cycle assessment of margarine and butter consumed in the UK, Germany and France. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), 916–926.
- Nouri, S. (2006). *Environmental Assessment of Emerging Technologies: The Case of Polymers* (Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering). Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Novamont. (2010). *Environmental Product Declaration- MATER-BI CF05S* (p. 8).
- Novamont, S. p. A. (n.d.). *Environmental Product Declaration Mater-bi NF Type biodegradable plastic pellets for films*.
- O'Brien, D., Brennan, P., Humphreys, J., Ruane, E., & Shalloo, L. (2014). An appraisal of carbon footprint of milk from commercial grass-based dairy farms in Ireland according to a certified life cycle assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(8), 1469–1481.
- Oguntade, D. A. E., Thylmann, D., & Deimling, S. (2014). Post-Harvest Losses of Rice in Nigeria and their Ecological Footprint. *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*.
- Penati, C. A., Tamburini, A., Bava, L., Zucali, M., & Sandrucci, A. (2013). Environmental impact of cow milk production in the central Italian Alps using Life Cycle Assessment. *Italian Journal of Animal Science*, 12(4), e96.
- Pietrini, M., Roes, L., Patel, M. K., & Chiellini, E. (2007). Comparative Life Cycle Studies on Poly(3-hydroxybutyrate)-Based Composites as Potential Replacement for Conventional Petrochemical Plastics. *Biomacromolecules*, 8, 2210–2218.
- Ramos, S., Vázquez-Rowe, I., Artetxe, I., Moreira, M. T., Feijoo, G., & Zufía, J. (2011). Environmental assessment of the Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) season in the Basque Country. Increasing the timeline delimitation in fishery LCA studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(7), 599–610.
- Razza, F., Fieschi, M., Degli Innocenti, F., & Bastioli, C. (n.d.). *Compostable Cutlery and Waste Management: An LCA Approach*. *Waste Management*, 29(4), (10).
- Röös, E., Sundberg, C., & Hansson, P.-A. (2010). Uncertainties in the carbon footprint of food products: a case study on table potatoes. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(5), 478–488.
- Rougoor, C., Elferink, E., Lap, T., & Balkema, A. (2015). *LCA of Dutch pork Assessment of three pork production systems in the Netherlands*.
- Samuel-Fitwi, B., Schroeder, J. P., & Schulz, C. (2013). System delimitation in life cycle assessment (LCA) of aquaculture: striving for valid and comprehensive environmental assessment using rainbow trout farming as a case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3), 577–589.
- Sandin, G., Røyne, F., Berlin, J., Peters, G. M., & Svanström, M. (2015). Allocation in LCAs of biorefinery products: implications for results and decision-making. *Journal of Cleaner Production*, 93, 213–221.
- Schmidt, J. H., Holm, P., Merrild, A., & Christensen, P. (2007). Life cycle assessment of the waste hierarchy – A Danish case study on waste paper. *Waste Management*, 27(11), 1519–1530.
- Seghetta, M., Hou, X., Bastianoni, S., Bjerre, A.-B., & Thomsen, M. (2016). Life cycle assessment of macroalgal biorefinery for the production of ethanol, proteins and fertilizers – A step towards a regenerative bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1158–1169.
- Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2010). Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 260–274.
- Shonfield, P. (2013). *LCA of Paper and Polymer Bank Notes*. PE International.

- Sim, S., Barry, M., Clift, R., & Cowell, S. J. (2007). The relative importance of transport in determining an appropriate sustainability strategy for food sourcing: A case study of fresh produce supply chains. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(6), 422–431.
- Simon, B., Amor, M. B., & Földényi, R. (2016). Life cycle impact assessment of beverage packaging systems: focus on the collection of post-consumer bottles. *Journal of Cleaner Production*, 112, 238–248.
- Skals, P. B., Krabek, A., Nielsen, P. H., & Wenzel, H. (2008). Environmental Assessment of Enzyme Assisted Processing in Pulp and Paper Industry. *Int J LCA*, 13(2), 124 – 132.
- Smetana, S., Mathys, A., Knoch, A., & Heinz, V. (2015). Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(9), 1254–1267. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0931-6>
- Sommerhuber, P. F., Wenker, J. L., Rüter, S., & Krause, A. (2017). Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 235–248.
- Strid Eriksson, I., Elmquist, H., Stern, S., & Nybrant, T. (2005). Environmental Systems Analysis of Pig Production - The Impact of Feed Choice (12 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(2), 143–154.
- Svanes, E., & Aronsson, A. K. S. (2013). Carbon footprint of a Cavendish banana supply chain. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(8), 1450–1464.
- Svanes, E., Vold, M., & Hanssen, O. J. (2011). Environmental assessment of cod (*Gadus morhua*) from autoline fisheries. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(7), 611–624.
- Tecchio, P., Freni, P., De Benedetti, B., & Fenouillot, F. (2016). Ex-ante Life Cycle Assessment approach developed for a case study on bio-based polybutylene succinate. *Journal of Cleaner Production*, 112, 316–325.
- Thrane, M. (2006). LCA of Danish Fish Products. New methods and insights (9 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(1), 66–74.
- Tsiropoulos, I., Faaij, A. P. C., Lundquist, L., Schenker, U., Briois, J. F., & Patel, M. K. (2015). Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol. *Journal of Cleaner Production*, 90, 114–127.
- Uihlein, A., Ehrenberger, S., & Schebek, L. (2008). Utilisation options of renewable resources: a life cycle assessment of selected products. *Journal of Cleaner Production*, 16(12), 1306–1320.
- Vaskan, P., Pachón, E. R., & Gnansounou, E. (2018). Techno-economic and life-cycle assessments of biorefineries based on palm empty fruit bunches in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3655–3668.
- Vink, E. T. H., & Davies, S. (2015). Life Cycle Inventory and Impact Assessment Data for 2014 Ingeo TM Polylactide Production. *Industrial Biotechnology*, 11(3), 167–180.
- Wallman, M., Cederberg, C., & Sonesson, U. (2011). Life Cycle Assessment of Swedish Lamb Production (No. 831). Swedish Institute for Food and Biotechnology.
- Wang, L., Templer, R., & Murphy, R. J. (2012a). A Life Cycle Assessment (LCA) comparison of three management options for waste papers: Bioethanol production, recycling and incineration with energy recovery. *Bioresource Technology*, 120, 89–98.
- Wang, L., Templer, R., & Murphy, R. J. (2012b). Environmental sustainability of bioethanol production from waste papers: sensitivity to the system boundary. *Energy & Environmental Science*, 5, 8281.
- Wellenreuther, F., Kunze, S., Detzel, A., Kauertz, B., Krüger, M., & Reinhardt, J. (2009). Life Cycle Assessment of Waste Bags (Final Report). Heidelberg: IFEU GmbH, Heidelberg.
- Williams, A. G., Audsley, E., & Sandars, D. L. (2010). Environmental burdens of producing bread wheat, oilseed rape and potatoes in England and Wales using simulation and system modelling. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(8), 855–868.
- Ziegler, F., Eichelsheim, J. L., Emanuelsson, A., Flysjö, A., Ndiaye, V., & Thrane, M. (2009). Life Cycle Assessment of southern pink shrimp products from Senegal (An environmental comparison between artisanal fisheries in

the Casamance region and a trawl fishery based in Dakar. No. 789). Swedish Institute for Food and Biotechnology.

Ziegler, F., & Valentinsson, D. (2008). Environmental life cycle assessment of Norway lobster (*Nephrops norvegicus*) caught along the Swedish west coast by creels and conventional trawls—LCA methodology with case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(6), 487–497.

In der Literaturrecherche ausgewertete Literatur – Energetische Nutzung

Adesanya, V. O., Cadena, E., Scott, S. A., & Smith, A. G. (2014). Life cycle assessment on microalgal biodiesel production using a hybrid cultivation system. *Bioresource Technology*, 163(Supplement C), 343–355.

Arodudu, O. T., Helming, K., Voinov, A., & Wiggering, H. (2017). Integrating agronomic factors into energy efficiency assessment of agro-bioenergy production – A case study of ethanol and biogas production from maize feedstock. *Applied Energy*, 198(Supplement C), 426–439.

Arodudu, O., Voinov, A., & van Duren, I. (2013). Assessing bioenergy potential in rural areas – A NEG-EROEI approach. *Biomass and Bioenergy*, 58, 350–364.

Blengini, G.A., Brizio, E., Cibrario, M., Genon, G. (2011). LCA of bioenergy chains in Piedmont (Italy): A case study to support public decision makers towards sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 36–47.

Brander, M. (2017). Comparative analysis of attributional corporate greenhouse gas accounting, consequential life cycle assessment, and project/policy level accounting: A bioenergy case study. *Journal of Cleaner Production*, 167(Supplement C), 1401–1414.

Butnar, I., Rodrigo, J., Gasol, C. M., & Castells, F. (2010). Life-cycle assessment of electricity from biomass: Case studies of two biocrops in Spain. *Biomass and Bioenergy*, 34(12), 1780–1788.

Carnevale, E., & Lombardi, L. (2015). Comparison of Different Possibilities for Biogas Use by Life Cycle Assessment. *Energy Procedia*, 81(Supplement C), 215–226.

Collet, P., Lardon, L., Hélias, A., Bricout, S., Lombaert-Valot, I., Perrier, B., ... Bernard, O. (2014). Biodiesel from microalgae – Life cycle assessment and recommendations for potential improvements. *Renewable Energy*, 71(Supplement C), 525–533.

De Menna, F., Vittuari, M., & Molari, G. (2015). Impact evaluation of integrated food-bioenergy systems: A comparative LCA of peach nectar. *Biomass and Bioenergy*, 73(Supplement C), 48–61.

Dehoust, G., Schüler, D., Vogt, R., & Giegrich, J. (2010). Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz (p. 143). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Dinkel, F., Zschokke, M., & Schleiss, K. (2012). *Ökobilanzen zur Biomasseverwertung* (p. 82). Basel (CH): Carbotech AG.

Dressler, D., Loewen, A., & Nelles, M. (2012). Life cycle assessment of the supply and use of bioenergy: impact of regional factors on biogas production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(9), 1104–1115.

Dunkelberg, E., & Aretz, A. (2013). *Ökobilanzen technischer Optionen zur Bioenergiebereitstellung und -nutzung* (p. 92). Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung Berlin.

Dunkelberg, E., Salecki, S., Weiß, J., Rothe, S., & Böning, G. (2015). Biomethan im Energiesystem: ökologische und ökonomische Bewertung von Aufbereitungsverfahren und Nutzungsoptionen (p. 114). Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW).

Eriksson, L. N. (2008). Comparative analyses of forest fuels in a life cycle perspective with a focus on transport systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1190–1197.

Escobar, N., Ribal, J., Clemente, G., & Sanjuán, N. (2014). Consequential LCA of two alternative systems for biodiesel consumption in Spain, considering uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 79(Supplement C), 61–73.

- Fazio, S., & Monti, A. (2011). Life cycle assessment of different bioenergy production systems including perennial and annual crops. *Biomass and Bioenergy*, 35(12), 4868–4878.
- Fehrenbach, H., Giegrich, J., & Möhler, S. (2007). Behandlungsalternativen für klimarelevante Stoffströme (No. UBA Texte 39/07) (p. 111). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Fehrenbach, H., Köppen, S., Kauertz, B., Wellenreuther, F., Baur, F., Wern, B., & Breitmayer, E. (2017). Biomassekaskaden - Mehr Ressourceneffizienz durch Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis (p. 112). Dessau -Roßlau: Umweltbundesamt.
- Felten, D., Fröba, N., Fries, J., & Emmerling, C. (2013). Energy balances and greenhouse gas-mitigation potentials of bioenergy cropping systems (*Miscanthus*, rapeseed, and maize) based on farming conditions in Western Germany. *Renewable Energy*, 55(Supplement C), 160–174.
- Franke, B., Reinhardt, G., Malavelle, J., Faaij, A., van Eijck, J., van der Hilst, F., ... Fritsche, U. (2012). Global assessments and guidelines for sustainable liquid biofuel production in developing countries (p. 195). Heidelberg, Paris, Utrecht, Darmstadt: ifeu - Institut für Energie - und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- Gärtner, S., Hienz, G., Keller, H., & Müller-Lindenlauf, M. (2013). Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz – Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich (p. 110). Heidelberg: IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- Goglio, P., & Owende, P. M. O. (2009). A screening LCA of short rotation coppice willow (*Salix* sp.) feedstock production system for small-scale electricity generation. *Biosystems Engineering*, 103(3), 389–394.
- González-García, S., Iribarren, D., Susmozas, A., Dufour, J., & Murphy, R. J. (2012). Life cycle assessment of two alternative bioenergy systems involving *Salix* spp. biomass: Bioethanol production and power generation. *Applied Energy*, 95, 111–122.
- González-García, S., Moreira, M. T., Dias, A. C., & Mola-Yudego, B. (2014). Cradle-to-gate life cycle assessment of forest operations in Europe: environmental and energy profiles. *Journal of Cleaner Production*, 66(Supplement C), 188–198.
- Hayer, F., Scharfy, D., Gaillard, G., Anspach, V., & Vögeli, G. A. (2011). Ökobilanzierung des Anbaues von Zwischenkulturen zur Biogasproduktion (p. 85). Bern: Bundesamt für Energie.
- Hennig, C., & Gawor, M. (2012). Bioenergy production and use: Comparative analysis of the economic and environmental effects. *Energy Conversion and Management*, 63(Supplement C), 130–137.
- Iqbal, Y., Gauder, M., Claupein, W., Graeff-Hönninger, S., & Lewandowski, I. (2015). Yield and quality development comparison between *Miscanthus* and switchgrass over a period of 10 years. *Energy*, 89(Supplement C), 268–276.
- Itten, R., Stucki, M., & Jungbluth, N. (2011). Life cycle assessment of burning different solid biomass substrates (p. 60). Bern: Bundesamt für Energie.
- Jungbluth, N., Büsser, S., Frischknecht, R., & Tuchschnid, M. (2008). Ökobilanz von Energieprodukten: life cycle assessment of biomass-to-liquid fuels (p. 35). Uster: ESU-services GmbH.
- Kägi, T., Knuche, R. F., Nemecek, T., & Gaillard, G. (2007). Ökobilanz von Energieprodukten: Bewertung der landwirtschaftlichen Biomasse-Produktion (p. 20). Bern, Reckenholz, Tänikon: Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement (EVD), Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART).
- Klein, D., Wolf, C., Schulz, C., & Weber-Blaschke, G. (2016). Environmental impacts of various biomass supply chains for the provision of raw wood in Bavaria, Germany, with focus on climate change. *Science of The Total Environment*, 539(Supplement C), 45–60.
- Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J.-P., & Bernard, O. (2009). Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. *Environmental Science & Technology*, 43(17), 6475–6481.
- Lozanovski, A., Lindner, J. P., & Bos, U. (2014). Environmental evaluation and comparison of selected industrial scale biomethane production facilities across Europe. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(11), 1823–1832.

- Maga, D. (2017). Life cycle assessment of biomethane produced from microalgae grown in municipal waste water. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 7(1), 1–10.
- Menten, F., Tchung-Ming, S., Lorne, D., & Bouvart, F. (2015). Lessons from the use of a long-term energy model for consequential life cycle assessment: The BTL case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43(Supplement C), 942–960.
- Meyer, B., Krzack, S., Stahlschmidt, R., & Boblenz, K. (2010). Ermittlung spezifizierter Kosten und ökologischer Auswirkungen der Erzeugung von BtL-Kraftstoffen und Biogas (p. 297). Freiberg: TU Bergakademie Freiberg Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen.
- Monari, C., Righi, S., & Olsen, S. I. (2016). Greenhouse gas emissions and energy balance of biodiesel production from microalgae cultivated in photobioreactors in Denmark: a life-cycle modeling. *Journal of Cleaner Production*, 112(Part 5), 4084–4092.
- Monti, A., Fazio, S., & Venturi, G. (2009). Cradle-to-farm gate life cycle assessment in perennial energy crops. *European Journal of Agronomy*, 31(2), 77–84.
- Muñoz, I., Flury, K., Jungbluth, N., Rigarlsford, G., i Canals, L. M., & King, H. (2014). Life cycle assessment of bio-based ethanol produced from different agricultural feedstocks. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1), 109–119.
- Murphy, F., Devlin, G., & McDonnell, K. (2013). Miscanthus production and processing in Ireland: An analysis of energy requirements and environmental impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23(Supplement C), 412–420.
- Murphy, F., Sosa, A., McDonnell, K., & Devlin, G. (2016). Life cycle assessment of biomass-to-energy systems in Ireland modelled with biomass supply chain optimisation based on greenhouse gas emission reduction. *Energy*, 109(Supplement C), 1040–1055.
- Nguyen, T. L. T., & Hermansen, J. E. (2015). Life cycle environmental performance of miscanthus gasification versus other technologies for electricity production. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 9(Supplement C), 81–94.
- Nguyen, T. L. T., Hermansen, J. E., & Mogensen, L. (2013). Environmental performance of crop residues as an energy source for electricity production: The case of wheat straw in Denmark. *Applied Energy*, 104(Supplement C), 633–641.
- Nguyen, T. L. T., Hermansen, J. E., & Nielsen, R. G. (2013). Environmental assessment of gasification technology for biomass conversion to energy in comparison with other alternatives: the case of wheat straw. *Journal of Cleaner Production*, 53(Supplement C), 138–148.
- O’Keeffe, S., Majer, S., Drache, C., Franko, U., & Thrän, D. (2017). Modelling biodiesel production within a regional context – A comparison with RED Benchmark. *Renewable Energy*, 108(Supplement C), 355–370.
- O’Keeffe, S., Wochele-Marx, S., & Thrän, D. (2016). RELCA: a Regional Life Cycle inventory for Assessing bioenergy systems within a region. *Energy, Sustainability and Society*, 6(1), 12.
- Oetjen-Dehne, R., Dehne, I., Buschow, N., Dehous, G., & Möck, A. (2015). Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (No. UBA Texte 18/2015) (p. 277). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Ortiz, C. A., Hammar, T., Ahlgren, S., Hansson, P.-A., & Stendahl, J. (2016). Time-dependent global warming impact of tree stump bioenergy in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 371(Supplement C), 5–14.
- Pacetti, T., Lombardi, L., & Federici, G. (2015). Water–energy nexus: a case of biogas production from energy crops evaluated by water footprint and life cycle assessment (LCA) methods. *Journal of Cleaner Production*, 101(Supplement C), 278–291.
- Parajuli, R., Sperling, K., & Dalgaard, T. (2015). Environmental performance of Miscanthus as a fuel alternative for district heat production. *Biomass and Bioenergy*, 72(Supplement C), 104–116.

- Pastowski, A., Fishedick, M., Arnold, K., Bienge, K., von Geibler, J., Merten, F., ... Münch, J. (2007). Sozial-ökologische Bewertung der stationären energetischen Nutzung von importierten Biokraftstoffen am Beispiel von Palmöl: Endbericht (p. 235). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.
- Peter, C., Specka, X., Aurbacher, J., Kornatz, P., Herrmann, C., Heiermann, M., ... Nendel, C. (2017). The MiLA tool: Modeling greenhouse gas emissions and cumulative energy demand of energy crop cultivation in rotation. *Agricultural Systems*, 152(Supplement C), 67–79.
- Rehl, T., Lansche, J., & Müller, J. (2012). Life cycle assessment of energy generation from biogas - Attributional vs. consequential approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3766–3775.
- Reinhardt, G. A., & von Falkenstein, E. (2011). Environmental assessment of biofuels for transport and the aspects of land use Competition. *Biomass and Bioenergy*, 35(6), 2315–2322.
- Reinhardt, G., Gärtner, S., Patyk, A., & Rettenmaier, N. (2006). Ökobilanzen zu BTL: Eine ökologische Einschätzung (p. 108). Heidelberg: IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- Reinhardt, G., Rettenmaier, N., Gärtner, S., & Pastowski, A. (2007). Regenwald für Biodiesel? Ökologische Auswirkungen der energetischen Nutzung von Palmöl (p. 56). Frankfurt am Main: WWF Deutschland.
- Rettenmaier, N., Köppen, S., Gärtner, S. O., & Reinhardt, G. A. (2010). Life cycle assessment of selected future energy crops for Europe. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(6), 620–636.
- Rettenmaier, N., Köppen, S., Gärtner, S., & Reinhardt, G. (2008). Screening life cycle assessment of hydrotreated jatropa oil (p. 34). Heidelberg: IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- Rettenmaier, N., Münch, J., Gärtner, S., & Reinhardt, G. (2009). Ökologische Bewertung neuer Logistikkonzepte für Biobrennstoffe - Teilvorhaben 7 im Verbundvorhaben BioLog: Entwicklung, Erprobung und Demonstration neuer Logistikkonzepte für Biobrennstoffe (p. 46). Heidelberg: IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- Rettenmaier, N., Reinhardt, G., Gärtner, S., & Münch, J. (2008). Bioenergie aus Getreide und Zuckerrübe: Energie- und Treibhausgasbilanzen (p. 61). Heidelberg: IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- Ripa, M., Fiorentino, G., Giani, H., Clausen, A., & Ulgiati, S. (2017). Refuse recovered biomass fuel from municipal solid waste. A life cycle assessment. *Applied Energy*, 186(Part 2), 211–225.
- Röder, M., Whittaker, C., & Thornley, P. (2015). How certain are greenhouse gas reductions from bioenergy? Life cycle assessment and uncertainty analysis of wood pellet-to-electricity supply chains from forest residues. *Biomass and Bioenergy*, 79(Supplement C), 50–63.
- Roedl, A. (2010). Production and energetic utilization of wood from short rotation coppice—a life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(6), 567–578.
- Rösch, C., Skarka, J., Raab, K., & Stelzer, V. (2009). Energy production from grassland – Assessing the sustainability of different process chains under German conditions. *Biomass and Bioenergy*, 33(4), 689–700.
- Sastre, C. M., Carrasco, J., Barro, R., González-Arechavala, Y., Maletta, E., Santos, A. M., & Ciria, P. (2016). Improving bioenergy sustainability evaluations by using soil nitrogen balance coupled with life cycle assessment: A case study for electricity generated from rye biomass. *Applied Energy*, 179(Supplement C), 847–863.
- Schmidt, J. H. (2010). Comparative life cycle assessment of rapeseed oil and palm oil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(2), 183–197.
- Schmidt, T., Fernando, A. L., Monti, A., & Rettenmaier, N. (2015). Life cycle assessment of bioenergy and bio-based products from perennial grasses cultivated on marginal land in the Mediterranean region. *BioEnergy Research*, 8(4), 1548–1561.
- Schneider, L., & Finkbeiner, M. (2013). Life cycle assessment of EU oilseed crushing and vegetable oil refining (p. 59). Berlin: Technische Universität Berlin.

- Schweier, J., Molina-Herrera, S., Ghirardo, A., Grote, R., Díaz-Pinés, E., Kreuzwieser, J., ... Becker, G. (2017). Environmental impacts of bioenergy wood production from poplar short-rotation coppice grown at a marginal agricultural site in Germany. *GCB Bioenergy*, 9(7), 1207–1221.
- Schweier, J., Schnitzler, J.-P., & Becker, G. (2016). Selected environmental impacts of the technical production of wood chips from poplar short rotation coppice on marginal land. *Biomass and Bioenergy*, 85(Supplement C), 235–242.
- Sebastián, F., Royo, J., & Gómez, M. (2011). Cofiring versus biomass-fired power plants: GHG (Greenhouse Gases) emissions savings comparison by means of LCA (Life Cycle Assessment) methodology. *Energy*, 36(4), 2029–2037.
- Shimako, A. H., Tiruta-Barna, L., Pigné, Y., Benetto, E., Navarrete Gutiérrez, T., Guiraud, P., & Ahmadi, A. (2016). Environmental assessment of bioenergy production from microalgae based systems. *Journal of Cleaner Production*, 139(Supplement C), 51–60.
- Shirvani, T., Yan, X., Inderwildi, O. R., Edwards, P. P., & King, D. A. (2011). Life cycle energy and greenhouse gas analysis for algae-derived biodiesel. *Energy & Environmental Science*, 4(10), 3773.
- Steubing, B., Zah, R., & Ludwig, C. (2011). Life cycle assessment of SNG from wood for heating, electricity, and transportation. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2950–2960.
- Stichnothe, H., & Schuchardt, F. (2010). Comparison of different treatment options for palm oil production waste on a life cycle basis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), 907–915.
- Stucki, M., Jungbluth, N., & Leuenberger, M. (2011). Life cycle assessment of biogas production from different substrates (p. 84). Uster: ESU-services Ltd.
- Styles, D., & Jones, M. B. (2007). Energy crops in Ireland: quantifying the potential life-cycle greenhouse gas reductions of energy-crop electricity. *Biomass and Bioenergy*, 31(11), 759–772.
- Styles, D., Börjesson, P., D’Hertefeldt, T., Birkhofer, K., Dauber, J., Adams, P., ... Rosenqvist, H. (2016). Climate regulation, energy provisioning and water purification: Quantifying ecosystem service delivery of bioenergy willow grown on riparian buffer zones using life cycle assessment. *Ambio*, 45(8), 872–884.
- Styles, D., Gibbons, J., Williams, A. P., Dauber, J., Stichnothe, H., Urban, B., ... Jones, D. L. (2015). Consequential life cycle assessment of biogas, biofuel and biomass energy options within an arable crop rotation. *GCB Bioenergy*, 7(6), 1305–1320.
- Styles, D., Gibbons, J., Williams, A. P., Stichnothe, H., Chadwick, D. R., & Healey, J. R. (2015). Cattle feed or bioenergy? Consequential life cycle assessment of biogas feedstock options on dairy farms. *GCB Bioenergy*, 7(5), 1034–1049.
- Tonini, D., & Astrup, T. (2012). LCA of biomass-based energy systems: A case study for Denmark. *Applied Energy*, 99(Supplement C), 234–246.
- Tonini, D., Hamelin, L., Alvarado-Morales, M., & Astrup, T. F. (2016). GHG emission factors for bioelectricity, biomethane, and bioethanol quantified for 24 biomass substrates with consequential life-cycle assessment. *Bioresource Technology*, 208(Supplement C), 123–133.
- Voinov, A., Arodudu, O., van Duren, I., Morales, J., & Qin, L. (2015). Estimating the potential of roadside vegetation for bioenergy production. *Journal of Cleaner Production*, 102(Supplement C), 213–225.
- Wagner, M., & Lewandowski, I. (2017). Relevance of environmental impact categories for perennial biomass production. *GCB Bioenergy*, 9(1), 215–228.
- Wagner, M., Kiesel, A., Hastings, A., Iqbal, Y., & Lewandowski, I. (2017). Novel miscanthus germplasm-based value chains: a life cycle assessment. *Frontiers in Plant Science*, 8.
- Weiser, C., Zeller, V., Reinicke, F., Wagner, B., Majer, S., Vetter, A., & Thraen, D. (2014). Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany. *Applied Energy*, 114(Supplement C), 749–762.

- Welfle, A., Gilbert, P., Thornley, P., & Stephenson, A. (2017). Generating low-carbon heat from biomass: Life cycle assessment of bioenergy scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 149(Supplement C), 448–460.
- Whiting, A., & Azapagic, A. (2014). Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion. *Energy*, 70(Supplement C), 181–193.
- Wolf, C., Klein, D., Richter, K., & Weber-Blaschke, G. (2016). Environmental effects of shifts in a regional heating mix through variations in the utilization of solid biofuels. *Journal of Environmental Management*, 177(Supplement C), 177–191.
- Wulf, C., & Kaltschmitt, M. (2012). Life cycle assessment of hydrogen supply chain with special attention on hydrogen refuelling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(21), 16711–16721.
- Zah, R., Böni, H., Gauch, M., Hischer, R., Lehmann, M., & Wäger, P. (2007). *Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen* (p. 206). St. Gallen: Empa Abteilung Technologie und Gesellschaft.