
Umweltauswirkungen von Polylactid und Hanffasern

Environmental impacts of polylactides and hemp fibres

Bachelorarbeit
Laura Mathuni
Mai 2015



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Laura Mathuni

Matrikelnummer: 1714751

Studiengang: B.Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Thema : **Umweltauswirkungen von Polylactid und Hanffasern**
Environmental impacts of polylactides and hemp fibres

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Institut IWAR

Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft

Technische Universität Darmstadt

Betreuer: Prof. Dr. Liselotte Schebek
Mathias Genz, M.Sc.

Tag der Einreichung: 28.05.2015

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung

Inhaltsverzeichnis

1.....Motivation und Hintergrund der Aufgabenstellung	2
2.....Naturwissenschaftliche und technische Grundlagen	2
2.1. Polylactid (PLA)	3
3.2 Hanffasern	4
3.....Ökobilanzen, Life Cycle Assessment	5
3.1. Grundlagen einer Ökobilanz	5
3.1.1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	6
3.1.2. Sachbilanz	7
3.1.3. Wirkungsabschätzung	7
3.1.4. Auswertung	7
4.....Analyse verschiedener Ökobilanzen zu PLA	7
4.1. Ökobilanz von Danone Activia-Verpackungen aus Polystyrol und Polylactid: IFEU 2011	8
4.1.1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	8
4.1.2. Sachbilanz	9
4.1.3. Wirkungsabschätzung	9
4.1.4. Auswertung	10
4.2. Untersuchung der Umweltwirkung von Verpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen : Umweltbundesamt 2012	10
4.2.1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	10
4.2.2. Sachbilanz	11
4.2.3. Wirkungsabschätzung	11
4.2.4. Auswertung	12
4.3. Life Cycle Assessment of Polylactide (PLA), A comparison of food packaging made from NatureWorks® PLA and alternative materials: IFEU Heidelberg 2006	12
4.3.1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	12
4.3.2. Sachbilanz	13
4.3.3. Wirkungsabschätzung	14
4.3.4. Auswertung	16
4.4. Comparative LCA of 4 types of drinking cups used at events: Openbare Afvalstoffenmaatschappij voor het vlaamse gewest (OVAM)	16
4.4.1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	16
4.4.2. Sachbilanz	17
4.4.3. Wirkungsabschätzung	18
4.4.4. Auswertung	20
5.....Vergleich und Diskussion der Ökobilanzen aus 4.1 bis 4.4	20
5.1. Vergleich der Ergebnisse der Wirkungskategorien	20
5.2. Vergleich der Lebenswegabschnitte von PLA	21
5.2.1. Herstellung des Rohmaterials	22
5.2.2. Transportprozesse	23

5.2.3.	Recycling und Entsorgung	23
5.3.	Vergleich der Lebenswegabschnitte von PLA und konventionellen Kunststoffen	24
5.3.1.	Herstellung der Rohmaterialien	24
5.3.2.	Transportprozesse	25
5.3.3.	Recycling und Entsorgung	26
6.....	Analyse verschiedener wissenschaftlicher Artikel zu Hanffasern	26
6.1.	Carbon storage potential in natural fibre composites (2002)	26
6.2.	Hemp Fibres for Green Products – An assessment of life cycle studies on hemp fibre applications (2011)	28
6.3.	Life Cycle Analysis of field production of fibre hemp, the effect of production practices on environmental impacts (2004)	30
7.....	Vergleich und Diskussion der wissenschaftlichen Artikel aus 6.1 bis 6.3	32
7.1.	Energiebedarf	32
7.2.	Naturfaserverbundwerkstoffe	32
8.....	Materialsteckbriefe	33
9.....	Diskussion weiterer Aspekte zu Kunststoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe	34
9.1.	Flächenkonkurrenz	34
9.2.	Wasserbedarf	35
9.3.	Gentechnisch modifizierte Organismen	35
10....	Bewertung der Datenlage und der Datenqualität	35
10.1.	Polylactid	35
10.2.	Hanffasern	36
11....	Fazit und Ausblick	36
11.1.	PLA	36
11.2.	Hanffasern	37
12....	Anhang	39
	Abbildungsverzeichnis	39
	Abkürzungsverzeichnis	39
	Literaturverzeichnis	40
	Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß §22, Abs. 7 APB	41

1. Motivation und Hintergrund der Aufgabenstellung

Die bis auf unbestimmte Zeit wachsende Weltbevölkerung (Hauff, 1987) bringt einen stetig wachsenden Bedarf an Kunststoffen und ihren Folgeprodukten mit sich. In der heutigen Zeit wird ein Großteil dieses Bedarfs durch fossile Rohstoffe gedeckt (Michaeli, Haberstroh, & Schmachtenberg, 2002, S. 7 ff). Obwohl sich die Zeitspanne bis zum prognostizierten Ende des Ölvorkommens durch neue Techniken zur Förderung stetig verlängert, ist sich die Wissenschaft einig, dass dieses Vorkommen endlich ist. Auch Faktoren wie Klimawandel, eine Verringerung der Luftqualität für Mensch und Umwelt sowie steigende Abfallmengen treiben Innovationen zu Kunststoffen voran, die auf nachwachsenden Rohstoffen basieren oder biologisch abbaubar sind.

Eine Möbeldesignerin aus München suchte zur Herstellung eines ökologischen Möbelstücks nach geeigneten Werkstoffen. Bei ihrer Recherche stieß sie auf die Materialien Polylactid und Hanffasern. Sie wurde auf Unternehmen aufmerksam, die diese, aufgrund ihrer höheren Umweltverträglichkeit gegenüber konventionellen Kunststoffen, bereits in verschiedenen Anwendungsgebieten nutzten, so zum Beispiel für sich in der Erde zersetzende Urnen oder langlebige Koffer für Musikinstrumente.

Im Jahr 2008 stellte die Designerin einen Prototyp ihres entworfenen Sofas auf der „ökoRAUSCH“, einer Ausstellung für Produkte unter dem Motto „Design und Nachhaltigkeit“, aus (ökoRAUSCH - Festival für Nachhaltigkeit & Design, 2015). Die bewertende Jury argumentierte auf Grundlage einer vom Umweltbundesamt herausgegebenen Ökobilanz bezüglich Kunststoffen auf Basis natürlicher Rohstoffe und stufte die gewählten Biokunststoffe als „nicht von Vorteil gegenüber herkömmlichen Kunststoffen“ (Wiegand, 2015) ein.

Woraus die unterschiedlichen Meinungen von Industrie und Umweltbundesamt resultieren ist ein zu untersuchender Aspekt dieser Arbeit. Dazu werden Eigenschaften und Umwelteinflüsse der beiden Materialien Polylactid (PLA) und Hanffasern untersucht und die Frage gestellt, ob sie bei der Verwendung als Kunststoffe eine umweltverträgliche Alternative zu Stoffen auf Basis fossiler Rohstoffe darstellen können. Dazu wird eine Literaturrecherche durchgeführt, bei der verschiedene Ökobilanzen und wissenschaftliche Artikel verglichen werden.

Um einen Gesamtüberblick über die beiden Werkstoffe zu erhalten, wird ein tabellarischer, materialspezifischer Steckbrief entworfen. Darin sollen die Umweltauswirkungen während der Lebenswegabschnitte festgehalten und eine Entscheidung für oder gegen einen Werkstoff erleichtert und beschleunigt werden.

Abschließend werden die Qualität der verwendeten Daten sowie die getroffenen Aussagen bewertet.

2. Naturwissenschaftliche und technische Grundlagen

Kunststoffe sind hochmolekulare organische Verbindungen, die entweder durch Veränderung hochmolekularer Naturstoffe oder durch chemisches Aneinandersetzen niedermolekularer Grundbausteine, sogenannter Monomere, durch verschiedene chemische Reaktionen entstehen (Elsner, Eyerer, & Hirth, 2012, S. 1).

Die in der Arbeit behandelten Kunststoffe werden als Biokunststoffe bezeichnet. Der Begriff Biokunststoff ist nicht genormt und besitzt keine exakte Definition, deshalb wird er teilweise mit diversen Bedeutungen verwendet. Relevante Kriterien sind dabei die verwendeten Rohstoffe, die Fähigkeit zum biologischen Abbau bzw. zur Kompostierung unter bestimmten Bedingungen und das Verhältnis zwischen biologischen und petrochemischen Bestandteilen in einem Produkt. Anhand der ersten beiden Kriterien werden Biokunststoffe der Abbildung 1 entsprechend in folgende Gruppen eingeteilt:

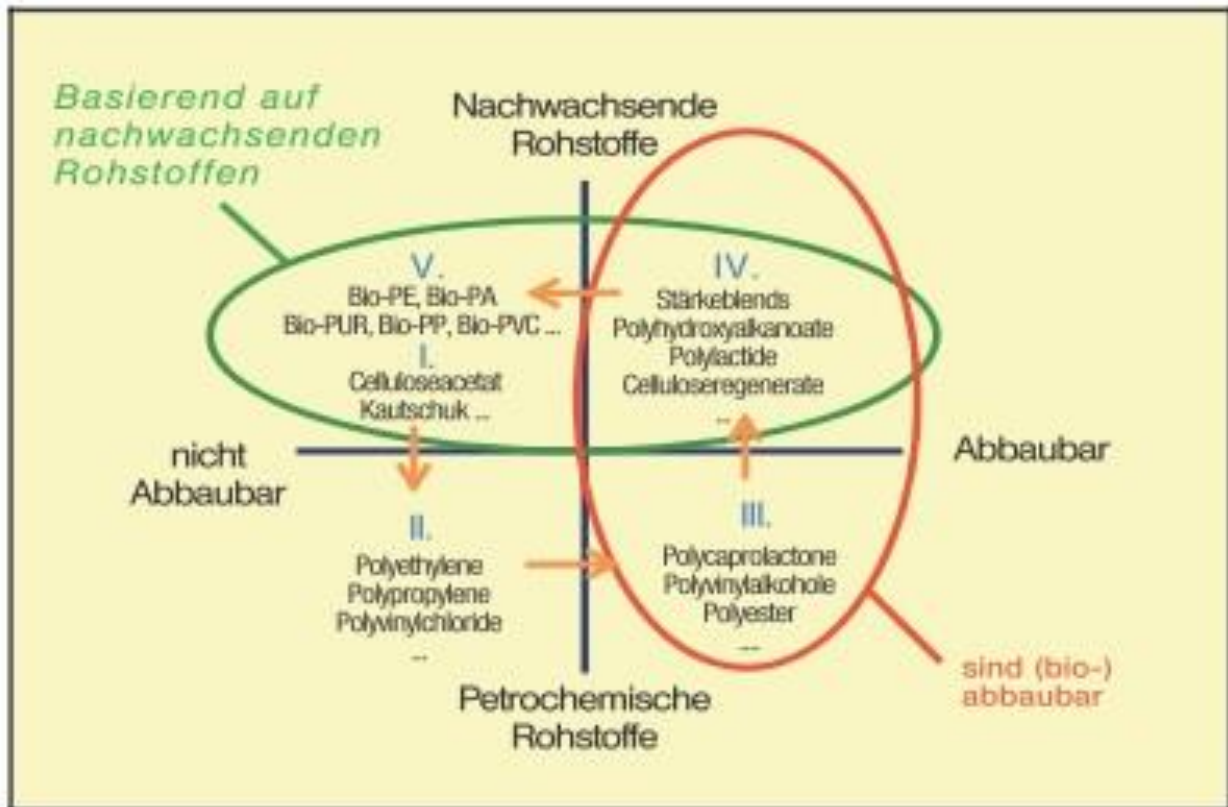


Abbildung 1: Historische Entwicklung von Biokunststoffen (Technische Biopolymere, 2009, S. 21)

Im linken unteren Quadranten sind die klassischen Kunststoffe aufgeführt. Sie sind nicht abbaubar und werden aus petrochemischen Rohstoffen gefertigt, bekannte Beispiele sind Polystyrol und Polypropylen (II.). Im rechten benachbarten Quadranten befinden sich Kunststoffe, die zwar aus petrochemischen Rohstoffen bestehen, unter bestimmten Bedingungen aber trotzdem biologisch abbaubar sind. In diese Kategorie fallen bestimmte Polyester (III.). Im oberen rechten Quadranten sind die Kunststoffe aufgetragen, die sowohl aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen als auch biologisch abbaubar sind. Ein Beispiel hierfür ist das in dieser Arbeit thematisierte Polylactid (IV.). Vervollständigt wird die Stoffgruppe der Biokunststoffe durch Kunststoffe, die aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen, aber nicht biologisch abbaubar sind. Dazu gehören zum Beispiel Bio-Propylen oder Kautschuk (I. und V.).

Zusätzlich ist in der Abbildung sichtbar, in welcher Reihenfolge die Stoffgruppen entdeckt wurden bzw. ihre Verwendung begann. Dabei stellt Gruppe I. die am längsten verwendeten Kunststoffe dar. Der erste wirtschaftlich bedeutende Rohstoff für die Herstellung eines Kunststoffs zur menschlichen Verwendung war Cellulose, dessen Verarbeitung im industriellen Stil in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts begann. Ab diesem Zeitpunkt wurden viele Anwendungsgebiete mit neu entdeckten Polymeren bedient. Darauf folgen in aufsteigender Reihenfolge die Gruppen II. bis V. Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe stellen folglich die jüngste/neuste Gruppe dar.

2.1. Polylactid (PLA)

Nachfolgend sind der chemische Aufbau des Stoffes Polylactid und Erläuterungen, wie er mit verschiedenen Verfahren hergestellt werden kann, beschrieben.

Polylactide sind Polymere bestehend aus dem Monomer Milchsäure und werden daher auch Polymilchsäuren genannt. Wegen der Estergruppe in ihrer Haupteinheit gehören sie zu den Polyestern. Aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften werden sie den Thermoplasten zugeordnet. Die unter IUPAC verwendete Bezeichnung für die Milchsäure lautet 2-Hydroxypropansäure. Das gängigste Verfahren zur Herstellung von Milchsäure beruht auf der Fermentation von Kohlenhydraten mit Hilfe von Mikroorganismen (Kaplan, 1998, S. 367). Gewonnen werden die benötigten Kohlenhydrate aus zucker- und stärkehaltigen Pflanzen wie zum Beispiel Zuckerrüben und -rohr, Mais oder Kartoffeln. Abhängig von der Form der Mikroorganismen und diversen physikalischen Parametern kann eingestellt werden, ob und in welchem Verhältnis L(+)- oder D(-)-Milchsäure entsteht. L(+)- und D(-)-Milchsäure haben die gleiche Strukturformel, sie sind Enantiomere (Endres & Siebert-Raths, 2009, S. 104). Der Unterschied zwischen ihnen liegt darin, dass sie aufgrund der unterschiedlichen Stellung der Hydroxylgruppe nicht deckungsgleich, sondern spiegelverkehrt sind. Beide Formen sind optisch aktiv, sogenannte links- und rechtsdrehende Moleküle, da sie die Polarisationsrichtung von Licht ändern. Bei einem racemischen Gemisch liegen beide Enantiomere in gleichem Verhältnis vor, was eine optische Inaktivität zur Folge hat (Auras & Loong-Tak Lim, 2010).

Über den Mechanismus einer Polykondensation kann aus Milchsäure Polylactid erzeugt werden, hierzu müssen zwei funktionelle Gruppen am Monomer vorhanden sein. Diese reagieren unter Abspaltung eines Nebenproduktes (Michaeli, Haberstroh, & Schmachtenberg, 2002, S. 35). Im Falle von Polylactid handelt es sich bei den funktionellen Gruppen um Hydroxylgruppen, die sich unter Abspaltung von Wasser zu einem Makromolekül verbinden.

Es werden drei Wege zur Erzeugung von Polylactid aus Milchsäure unterschieden, dazu gehören die direkte Polykondensation, die azeotrope Dehydratation und die ringöffnende Polymerisation. Bei der ringöffnenden Polymerisation können physikalische, mechanische und thermische Eigenschaften gezielt gesteuert werden, was dieses Verfahren in der Industrie etablierte (Mathers & Meier, 2011, S. 210).

Die drei Verfahren sind in Abbildung 2 graphisch erläutert:

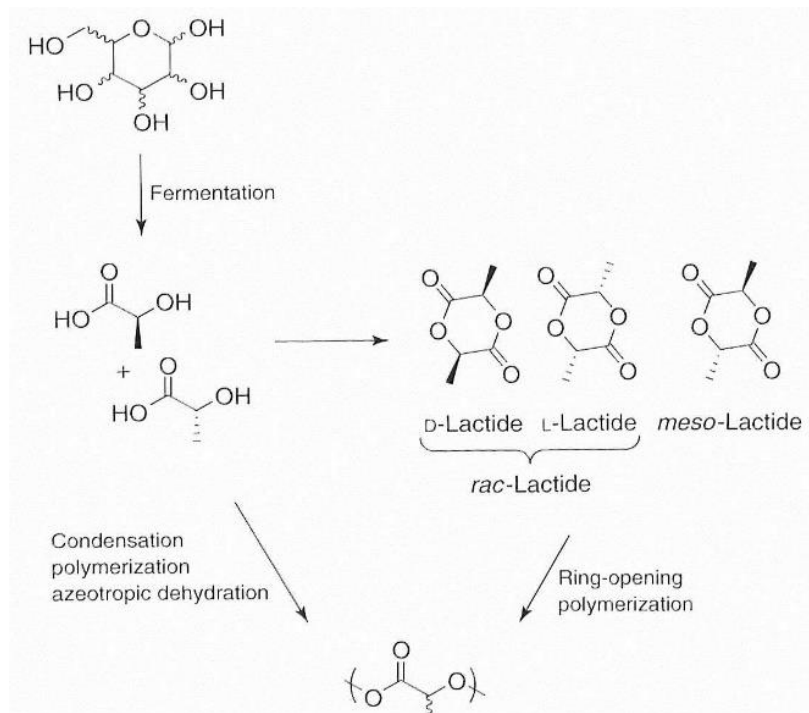


Abbildung 2: Schema zur Herstellung von Polylactid aus Milchsäure (Mathers & Meier, 2011, S. 203)

Kunststoffe aus Polylactid werden zurzeit hauptsächlich für kurzlebige Verpackungen für Lebensmittel oder auch als Abfalltüten verwendet (Detzel, Kauertz, & Derreza-Greeven, 2012). Es gibt jedoch auch Anwendungen im Bereich der Verbundwerkstoffe (Winter, 2015).

3.2 Hanffasern

Hanfpflanzen wachsen nahezu auf jedem Boden und bei jedem Klima (Herer & Bröckers, 1996). Abhängig davon und von weiteren Faktoren ist jedoch die Höhe, die die Pflanze erreicht. In Deutschland wächst sie bis zu zwei Meter, an anderen Orten bis zu sieben Meter hoch (Lampke, 2001).

Die verschiedenen Bestandteile der Hanfpflanze Schäben (engl.: hurds), Fasern (engl.: fibre) und Samen (engl.: seeds) sind für diverse Anwendungen einsetzbar, welche in Abbildung 3 aufgeführt sind:

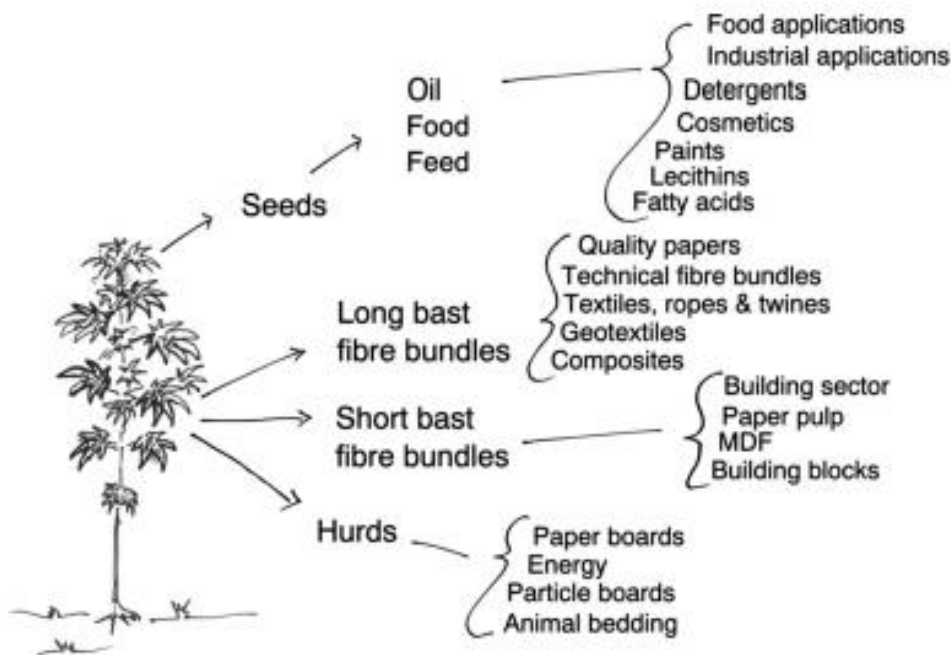


Abbildung 3: Anwendungsgebiete der Bestandteile einer Hanfpflanze (Müssig, 2010, S. 110)

Die Schäben können für Tierstreu und zur Energiegewinnung genutzt werden. Bei den Fasern wird zwischen kurz- und langkettigen Fasern unterschieden. Die kurzkettigen eignen sich zur Verwendung im Bausektor, beispielsweise als Dämmstoffe, wohingegen die langkettigen für Spezialpapiere, Textilien und Verbundwerkstoffe verwendet werden. In Verbundwerkstoffen dienen die Fasern zur Verstärkung einer Matrix aus Kunststoff. Aus den Samen kann Öl gewonnen werden, welches wiederum im Lebensmittelbereich oder in der Kosmetik Anwendung findet.

Die Fasern der Hanfpflanze bestehen zu 75 % aus Zellulose (Franck, 2005, S. 183). Zellulose ist ein Polymer, das aus dem Monomer Zellobiose besteht, welches wiederum aus zwei Glukosemolekülen besteht. Die Summenformel von Zellulose lautet $(C_6H_{10}O_5)_n$. Bei Glukose handelt es sich um einen Einfachzucker (Monosaccharid), bei Zellobiose um einen Zweifachzucker (Disaccharid) und bei Zellulose um einen Vielfachzucker (Polysaccharid), diese Zucker gehören zur Stoffgruppe der Kohlenhydrate. Bei der in Zellulose vorkommenden Glukose handelt es sich hauptsächlich um β -D-Glukopyranose, welches auch unter dem Namen Dextrose bzw. Traubenzucker bekannt ist (Endres & Siebert-Raths, 2009). Der chemische Aufbau des Zellobiosemoleküls ist in Abbildung dargestellt.

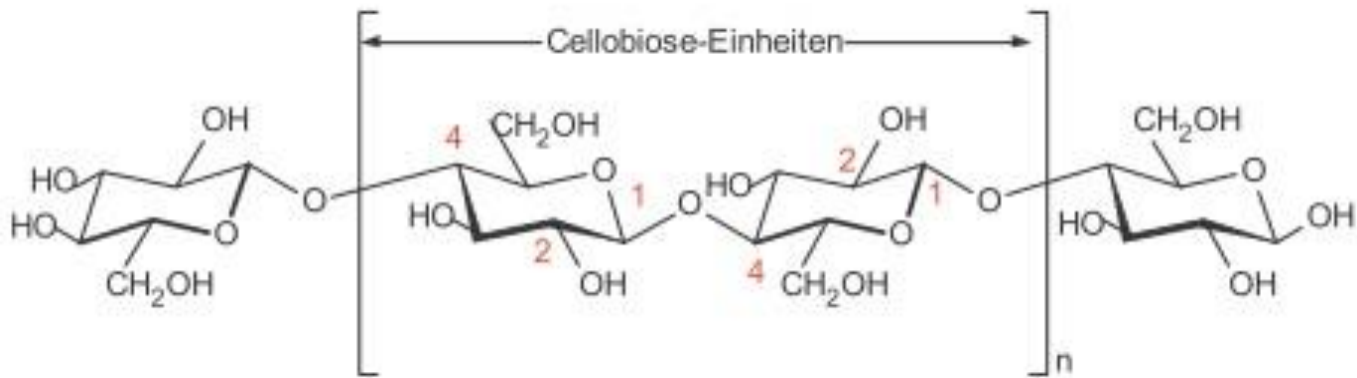


Abbildung 4: Mikrostruktureller Aufbau von Zellulose (Endres & Siebert-Raths, 2009, S. 139)

3. Ökobilanzen, Life Cycle Assessment

3.1. Grundlagen einer Ökobilanz

Die Vorgehensweise zur Erstellung einer Ökobilanz ist in DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 normiert und wird anhand der Richtlinien im Folgenden erläutert.

Die Intention einer Ökobilanz ist es, die Umweltauswirkungen eines Produktes über den gesamten Lebensweg zu erfassen und zu bewerten. Der Lebensweg beginnt bei der Rohstoffgewinnung bzw. -erzeugung, darauf folgen die Produktion, die Nutzung, gegebenenfalls ein Recycling und schließlich die Entsorgung. Ein Produkt kann sowohl eine erzeugte Ware, zum Beispiel ein Fahrrad, oder auch eine Dienstleistung, zum Beispiel ein Transport, darstellen.

Die Erstellung gliedert sich in vier Phasen. Die Reihenfolge ist dabei zunächst festgelegt, wobei im Laufe der Studie jederzeit ein Schritt zurück erfolgen kann, um Änderungen einzubringen. Es wird auch von einem iterativen Verfahren gesprochen. Zur graphischen Erläuterung dient Abbildung 4.

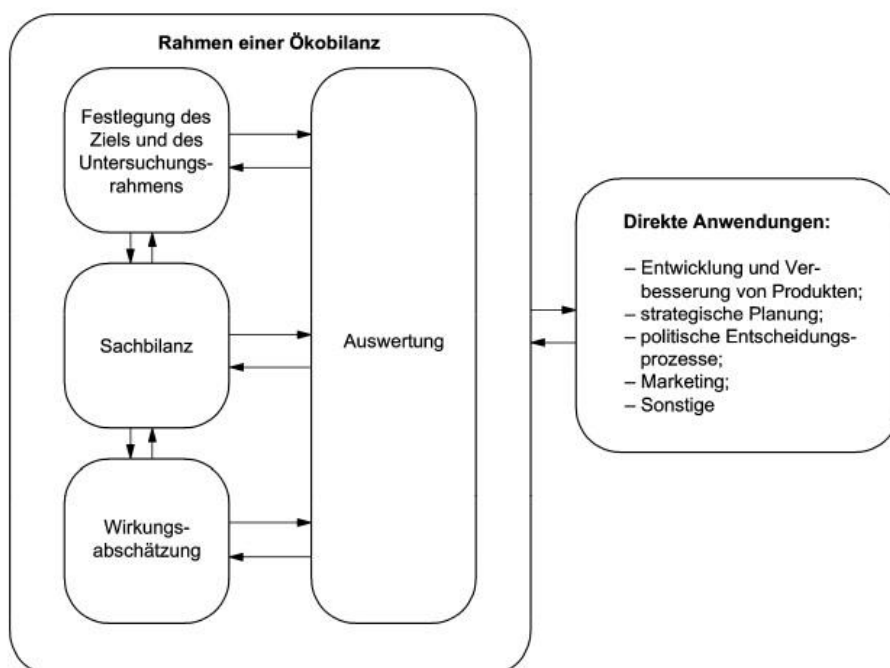


Abbildung 4: Bestandteile einer Ökobilanz (DIN EN ISO 14040:2006, S. 16)

3.1.1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Im ersten Schritt werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt. Darin werden „die beabsichtigte Anwendung, Gründe für die Durchführung der Studie und die angesprochene Zielgruppe“ aufgeführt. Im Untersuchungsrahmen sollten die Punkte

- zu untersuchendes Produktsystem und seine Funktionen
- funktionelle Einheit
- Systemgrenze
- Allokationsverfahren
- ausgewählte Wirkungskategorien
- Methode zur Wirkungsabschätzung
- Auswertung
- Anforderung an die Daten und ihre Qualität
- Annahmen und Einschränkungen
- Art der kritischen Prüfung sofern vorgesehen
- Art und Aufbau des Berichts

aufgeführt und ihre Wahl erklärt werden.

Abbildung 5 dient zur Veranschaulichung einiger zuvor genannten Begriffe.

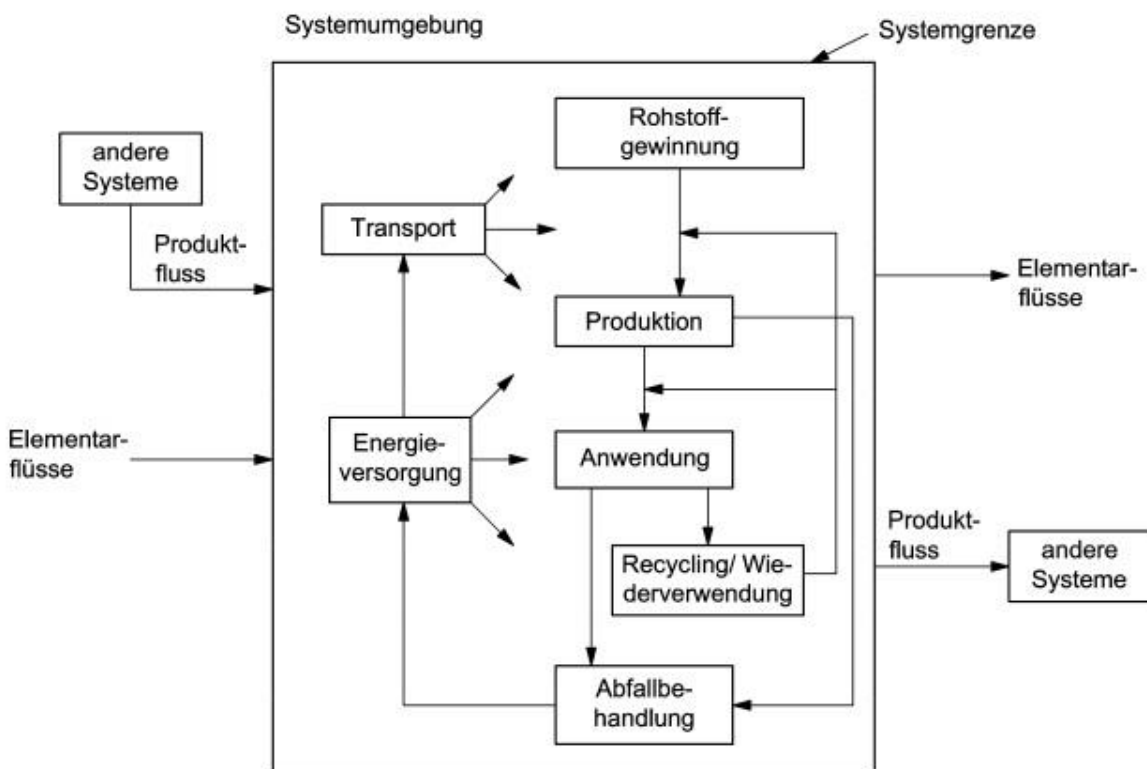


Abbildung 5: Beispiel eines Produktsystems für eine Ökobilanz (DIN EN ISO 14040:2006, S. 21)

Die Systemgrenze trennt Produktsystem und Systemumgebung voneinander. Die in das Produktsystem eintretenden Pfeile stellen die Inputflüsse in das System dar, wohingegen die das Produktsystem verlassenden Pfeile die Outputflüsse darstellen. Es wird zwischen Elementar- und Produktflüssen unterschieden. Bei einem Elementarfluss handelt es sich um einen „Stoff oder Energie, die der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen werden, bzw. die das System ohne Behandlung durch den Menschen verlassen und an die Umwelt abgegeben werden“ (S. 9). In einem Produktfluss werden Produkte einem System zu- oder abgeführt.

Die einzelnen Prozessmodule befinden sich innerhalb des Produktsystems und sind über Zwischenproduktflüsse miteinander verbunden.

Bei der funktionellen Einheit handelt es sich um den „quantifizierten Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“ (S.10), die Flüsse im Produktsystem müssen sich dementsprechend nicht auf „ein Stück Produkt“ beziehen. Ein Allokationsverfahren ist notwendig, wenn aus dem Produktsystem mehr als ein Produkt hervorgeht, da sich die Umweltauswirkungen dann nicht mehr nur auf ein Produkt beziehen. Dies kann der Fall sein, wenn ein Produkt an seinem Lebensende nicht entsorgt, sondern in ein anderes Produkt recycelt wird, es sind zwei Produktsysteme miteinander gekoppelt. Bei einem 50 % Ansatz werden die Umweltwirkungen der Herstellung der Rohstoffe, des Recyclings und der Entsorgung gleichmäßig zwischen den beiden Systemen aufgeteilt. Bei einem 0 bzw. 100 % Ansatz werden die Umweltwirkungen der Herstellung der Rohstoffe und des Recyclings dem einen System zugeordnet und die der Entsorgung dem anderen (Kauertz, Detzel, & Volz, 2011). Bei einer Wirkungskategorie handelt es sich um eine „Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können“ (S.13). Ein Beispiel hierfür ist die Zuordnung von emittierten Treibhausgasen zur Kategorie Klimawandel.

3.1.2. Sachbilanz

Im zweiten Schritt einer Ökobilanz, der Sachbilanz, folgen „Datenerhebungen und Berechnungsverfahren zur Quantifizierung von relevanten Input- und Outputströmen eines Produktsystems“ (S. 25).

3.1.3. Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Sachbilanz werden in der Wirkungsabschätzung mit gewählten Wirkungskategorien und –indikatoren verknüpft, um die daraus möglichen Umweltwirkungen zu erkennen. Auch kann in dieser Phase überprüft werden, ob die in der ersten Phase formulierten Ziele erreicht wurden oder ob eine Modifizierung des Ziels und Untersuchungsrahmens notwendig ist.

Zusätzlich können die Schritte Normierung, Ordnung und Gewichtung optional durchgeführt werden.

Um den Einfluss einzelner Parameter zu überprüfen, kann eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Dabei werden einzelne Parameter verändert und die Wirkung auf das Ergebnis in den Wirkungskategorien beobachtet.

Bei Verwendung von Ergebnissen der Sachbilanz als direkt messbare Größe und Zuordnung zu einer Wirkungskategorie, wie zum Beispiel CO₂-Äquivalente zur Kategorie Klimawandel, liegt eine midpoint-Analyse vor. In einem weiteren Schritt kann die Auswirkung dieser Ergebnisse auf sogenannte Wirkungsendpunkte, zum Beispiel die menschliche Gesundheit oder das Ökosystem, bemessen werden. In diesem Fall liegt eine endpoint-Analyse vor (Schebek, 2014).

3.1.4. Auswertung

Die letzte Phase einer Ökobilanz ist die Auswertung. Darin werden die „Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gemeinsam betrachtet“ (S. 31), die daraus gezogenen Schlussfolgerungen machen es möglich, Empfehlungen an die vorgesehenen Zielgruppen auszusprechen.

4. Analyse verschiedener Ökobilanzen zu PLA

Zur Abschätzung von Vor- und Nachteilen des Biokunststoffes PLA werden insgesamt vier Ökobilanzen untersucht. Es handelt sich hierbei um eine vom Umweltbundesamt im Jahr 2012 herausgegebene Studie, zwei wurden vom Institut für Umwelt und Energie in den Jahren 2006 und 2011 veröffentlicht und eine von der belgischen Institution OVAM im Jahr 2006. Bei den untersuchten Ökobilanzen handelt es sich um aktuelle Studien zum Vergleich von Produkten aus PLA und konventionellen Kunststoffen. Außerdem existieren neben

Ökobilanzen auch Teilbilanz-Studien. Diesen Studien fehlen bestimmte Aspekte einer vollständigen Ökobilanz, zum Beispiel führen sie nach der Sachbilanz keine Wirkungsabschätzung durch oder betrachten nur ausgewählte Lebenswegabschnitte eines Produkts. Aus diesem Grund werden sie nicht in die vergleichende Analyse dieser Arbeit einbezogen. Ein weiterer relevanter Aspekt der untersuchten Ökobilanzen stellt die sogenannte ISO-Konformitätserklärung dar. Damit legt sich der Verfasser verbindlich fest, dass er bei der Durchführung der Studie die in der DIN 14040 vorgeschriebenen Schritte befolgte. So werden Transparenz und Vergleichbarkeit gewährleistet.

Des Weiteren wird die Betrachtung einer Studie von PE Americas aus dem Jahr 2009 abgewogen. Da sich diese Studie jedoch ausschließlich auf die USA bezieht und für Deutschland untypisch eine Deponierung als Entsorgungsvariante wählt, wird auf eine Analyse verzichtet.

Zunächst sollen in Abschnitt 4.1 bis 4.4 die Inhalte und ermittelten Ergebnisse sowie Stärken und Schwächen jeder Studie erläutert werden. In Kapitel 5 findet ein Vergleich der Studien statt.

Als Quelle für das gesamte Kapitel dient die jeweils in der Überschrift genannte Ökobilanz, andere Quellen sind an betreffender Stelle gekennzeichnet.

4.1. Ökobilanz von Danone Activia-Verpackungen aus Polystyrol und Polylactid: IFEU 2011

4.1.1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Die Firma Danone GmbH Deutschland möchte mit der Verabschiedung einer Umwelt Charta einen Beitrag zum Umweltschutz leisten und im Zuge dessen einen ökologischen Vergleich von Joghurtbechern / Verpackungen aus Polylactid und Polystyrol anfertigen. Beim betrachteten Produktsystem handelt es sich lediglich um den Kunststoffbecher der Joghurtverpackung. Die Papierbanderole um den Becher, die Aluminiumplatte als Deckel sowie sekundäre und tertiäre Verpackungen sind nicht Teil der Untersuchung.

Die funktionelle Einheit umfasst „die Menge an Verpackungsmaterial, die zur Bereitstellung von 1.000 kg Produkt benötigt wird“ (Kauertz, Detzel, & Volz, 2011, S. 11). Ein Becher aus Polystyrol wiegt 4,05g, ein Becher aus Polylactid 3,90g. Es ist also mehr Polystyrol als Polylactid notwendig, um die funktionelle Einheit bereitzustellen. In der Ökobilanz wird der gesamte Lebensweg „von der Wiege bis zur Bahre“ untersucht, dazu gehören

- die Gewinnung der Rohstoffe,
- die Verarbeitung der Rohstoffe inklusive Zwischenschritte,
- die Transportprozesse und
- die Entsorgung.

Nicht in der Studie enthalten sind Faktoren wie die oben genannten Verpackungsergänzungen Papierbanderole und Aludeckel sowie die Herstellung des Füllguts, die Herstellung und Entsorgung von Infrastruktur und deren Unterhalt sowie Umwelteinwirkungen durch Unfälle.

Der geographische Rahmen beinhaltet Deutschland (Danone Standort in Ochsenfurt, Becherherstellung, Abfüllung, Entsorgung), die USA (Herstellung des PLA-Granulats) und Europa (Herstellung fossil basierter Polymere, Herstellung der vorgeformten Becher, Herstellung der Folien).

Es wurde zu drei Gruppen von Wirkungskategorien und Sachbilanzgrößen eine midpoint-Analyse durchgeführt:

- Ressourcenbezogene Kategorien
 - fossiler Ressourcenverbrauch
 - Naturraumbeanspruchung von Agrarfläche
- Emissionsbezogene Kategorien
 - Klimawandel
 - Sommersmog (POCP)

- Versauerung
 - terrestrische Eutrophierung
 - aquatische Eutrophierung
 - Humantoxizität: Feinstaub (PM10)
- Sachbilanzgrößen
 - kumulierter Energieaufwand (gesamt, nicht erneuerbar, erneuerbar)
 - kumulierter Prozesswasserverbrauch

Die Auswertung kann laut ISO 14044 die drei Elemente Normierung, Ordnung und Gewichtung beinhalten. Ist die Ökobilanz jedoch für die Öffentlichkeit zugänglich, verbietet die Norm eine Gewichtung, weshalb diese nicht durchgeführt wurde.

4.1.2. Sachbilanz

Tabelle 1 bietet eine Übersicht über die verwendeten Daten, ihr Erhebungsjahr und ihre Herkunft:

Tabelle 1: Verwendete Daten der Ökobilanz "Danone Activia-Verpackungen" (Kauertz, Detzel, & Volz, 2011)

Name des Datensatzes	Bezugsjahr	Quelle / Jahr der Veröffentlichung
PLA Herstellung	2009	NatureWorks 2010
Herstellung konventioneller Kunststoffe	1999	PlasticsEurope 2005
Verpackungsherstellung	2010	Erhebung von Verbrauchsdaten im Rahmen der Studie
Sortierung, Verwertung und Beseitigung gebrauchter Packstoffe	2002	Verwendung von vorliegenden Betriebsdaten verschiedener Anlagen in Deutschland
Energiebereitstellung in Europa	2007	IEA ¹ 2009
LKW Transporte	2010	HBEFA ² 3.1.
Schiffstransporte	2010	Ecotransit ³

4.1.3. Wirkungsabschätzung

Um die jeweilige Situation möglichst repräsentativ abzubilden, wird für jedes Produktsystem ein Basisszenario erstellt und bilanziert.

In dieser Studie wird eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Allokationsmethode (100% und 50%), der Gutschriftenvergabe hinsichtlich der Prozessabfälle (Wiederverwendung statt Verbrennung) und eine Kombination aus beiden Parametern durchgeführt. So entstehen sowohl für Polystyrol als auch für Polylactid insgesamt vier Szenarien.

Zusammenfassend werden folgende Prozessmodule der Produktsysteme während des Lebenswegs in den oben genannten Wirkungskategorien untersucht: Herstellung des Rohmaterials, Transport der Polymere, Verarbeitung

¹ International Energy Agency: Der Datensatz entspricht dem durchschnittlichen Energieträgermix 2007

² Handbook Emission Factors for Road Transport

³ Software zur ökologischen Bilanzierung von Transportwegen

zu Bechern, Transport der Becher zu Danone und Befüllung dieser, Verwertung der Becher und Prozessabfälle, Beseitigung und Gutschriften (Lebenszyklus 1 und 2, Sekundärmaterial).

Die Systemlasten und Gutschriften der einzelnen Prozessmodule werden für jedes Szenario in jeder Wirkungskategorie summiert und als Säule in einem Diagramm dargestellt. Es gibt pro Wirkungskategorie 8 Nettoergebnisse.

Es fällt auf, dass, unabhängig von der Wirkungskategorie und des Materials, mit Abstand die meisten Emissionen während der Herstellung des Rohmaterials entstehen. Das nächst bedeutende Prozessmodul stellt die Herstellung der Becher bzw. der Folie dar, bei den PLA-Bechern fällt zudem der Transport der Polymere zum Verarbeiter (USA – Europa) ins Gewicht. Die Gutschriften führen dazu, dass es in der Kategorie „aquatische Eutrophierung“ bei Bechern aus Polystyrol zu einer negativen Emission kommt.

4.1.4. Auswertung

Ein Vergleich der Systeme zeigt, dass Verpackungen aus Polystyrol in den Kategorien Naturraumbeanspruchung: Forstfläche, Versauerung, terrestrische und aquatische Eutrophierung, Humantoxizität, KEA⁴ gesamt und erneuerbar sowie kumulierter Prozesswasserverbrauch weniger Emissionen erzeugen als Verpackungen aus Polylactid. In den übrigen Kategorien fossiler Ressourcenverbrauch, Klimawandel, Sommersmog und KEA nicht erneuerbar erzeugen die Verpackungen aus Polylactid weniger Emissionen als solche aus Polystyrol.

Die Sensitivitätsanalyse bezüglich des Basisszenarios erzeugt in bis auf der Wirkungskategorie „KEA gesamt“ keine Umkehrung in den Ergebnissen. Im Basisszenario und im „Gutschriftenzenario“ weist das PS-System eine niedrigere benötigte Energiemenge auf als das PLA-System. Bei den Sensitivitäten des Allokationsfaktors und des Allokationsfaktors der Sensitivität der Gutschriftenvergabe weist das System der Becher aus PLA eine niedrigere benötigte Energiemenge auf als das PS-System.

4.2. Untersuchung der Umweltwirkung von Verpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen : Umweltbundesamt 2012

In Deutschland waren Verpackungen und Einweggetränkerverpackungen, die „aus biologisch abbaubaren Werkstoffen hergestellt sind und deren sämtliche Bestandteile gemäß einer herstellerunabhängigen Zertifizierung nach anerkannten Prüfnormen kompostierbar sind“ und von denen „ein möglichst hoher Anteil der Verwertung zugeführt wird“ bis zum 31. Dezember 2012 von §§6 und 7 der Verpackungsverordnung ausgenommen. Hersteller von solchen Verpackungen waren weder an die „Pflicht zur Gewährleistung der flächendeckenden Rücknahme von Verkaufsverpackungen, die beim privaten Endverbraucher anfallen“ (§6) noch die „Rücknahmepflichten für Verkaufsverpackungen, die nicht beim privaten Endverbraucher anfallen“ (§7) gebunden.

Mit der befristeten Erleichterung sollten die finanziellen Nachteile wenigstens teilweise ausgeglichen und der Markt der noch nicht etablierten Werkstoffe unterstützt werden.

4.2.1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Da die Ausnahmeregelung im Jahr der Veröffentlichung dieser Studie auslief, sollen anhand der Ergebnisse die bestehenden Regelungen überprüft und Handlungsempfehlungen für die Zukunft ausgesprochen werden. Eine weitere Intention der Studie ist es, die aktuelle Markt- und Entsorgungssituation von biologisch abbaubaren Kunststoffen in Deutschland im Jahr 2009 zu erfassen, zusätzlich dazu soll die zukünftige Entsorgungssituation für die Jahre 2010-2015 prognostiziert werden. Für eine ökologische Bewertung sollen bereits bestehende Ökobilanzen zu biologisch abbaubaren Kunststoffen ausgewertet und mit denen konventioneller Kunststoffe verglichen werden. Dies geschieht über den gesamten Lebensweg der Produkte.

⁴ Kumulierter Energieaufwand

In der ersten Gegenüberstellung werden Umweltauswirkungen einer Polyethylen-Folie aus fossilen Rohstoffen mit denen aus biologischen Rohstoffen verglichen. Ebenso werden gefertigte Klappschalen aus Polystyrol mit denen aus Polylactid auf ihre Umweltauswirkungen untersucht und gegenüber gestellt. Da die Aufgabenstellung der Thesis nicht den Stoff Polyethylen umfasst, werden nur die Klappschalen erörtert.

Bei der funktionellen Einheit handelt es sich um 1000 Klappschalen mit einer Masse von 15g pro Klappschale.

In einer midpoint-Analyse werden die Sachdaten folgenden Wirkungskategorien und Sachbilanzgrößen zugeordnet:

- Klimawandel
- fossile Ressourcen
- Sommersmog
- Versauerungspotential
- terrestrische Eutrophierung
- aquatische Eutrophierung
- Humantoxizität: Feinstaub (PM10)
- Naturraumbedarf: Ackerland
- Primärenergiebedarf (KEA), gesamt
- kumulierter Prozesswasserverbrauch

4.2.2. Sachbilanz

Die Ergebnisse dieser Studie basieren auf einer Auswertung von insgesamt 85 Ökobilanzen, Studien und Fachartikeln. Sie werden zunächst einer Basisanalyse unterzogen. In einer vertiefenden Untersuchung werden 19 Studien aufgrund ihrer Relevanz für das Forschungsvorhaben des Umweltbundesamts detaillierter ausgewertet.

Detailliertere Informationen zum Vorgehen bei der Literaturrecherche sowie zu einbezogenen Datensätzen finden sich in Anhang V der Studie. Dieser konnte in der durchgeführten Analyse leider nicht berücksichtigt werden.

4.2.3. Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung werden folgende Produktsysteme in den verschiedenen Wirkungskategorien untersucht:

- Anbau der Feldfrüchte
- Transport und Verarbeitung der Biomasse
- Herstellung und Polymerisierung der Milchsäure / Produktion des Polystyrols
- Herstellung der Klappschalen
- Verwertung und Beseitigung
- Nutzung von Sekundärmaterialien und –energie aus den Verwertungs- und Beseitigungsprozessen

Insgesamt ergeben sich 5 Szenarien:

1. Klappschalen aus PLA, gewonnen aus Zuckerrüben mit einem Stand der Technik 2012 (Status quo)
2. Klappschalen aus PLA, gewonnen aus Zuckerrüben mit einem Stand der Technik in der Zukunft
3. Klappschalen aus PLA, gewonnen aus Lignozellulose mit einem Stand der Technik 2012 (Status quo)
4. Klappschalen aus PLA, gewonnen aus Lignozellulose mit einem Stand der Technik in der Zukunft
5. Klappschalen aus Polystyrol

Beim Stand der Technik in der Zukunft werden verbesserte Techniken für die Zuckerherstellung aus Lignozellulose und für die Milchsäureproduktion angenommen.

Die Systemlasten und Gutschriften der einzelnen Produktsysteme wurden für jedes Szenario in jeder Wirkungskategorie summiert und als Säule in einem Diagramm dargestellt. Es gibt pro Wirkungskategorie 5 Nettoergebnisse.

Es fällt auf, dass, unabhängig von der Wirkungskategorie und des Materials (PS/PLA), mit Abstand die meisten Emissionen während der Herstellung des Rohmaterials entstehen. Bei der Differenzierung der verschiedenen Abschnitte der Herstellung von PLA wird deutlich, dass der größte Einzelbetrag der Milchsäureherstellung zugeschrieben werden kann. Wird zur Herstellung von PLA Lignozellulose verwendet, lässt sich ein allgemeiner Vorteil gegenüber der Verwendung von Zuckerrüben feststellen. Der Grund hierfür ist, dass Lignozellulose als Abfallstoff betrachtet wird und so keine Emissionen für die Produktsysteme Transport und Anbau der Biomasse anfallen.

Ein direkter Vergleich der Szenarien zeigt, dass in den Kategorien Klimawandel, fossiler Ressourcenverbrauch und Sommersmog die Klappschalen aus PLA weniger Emissionen erzeugen als jene aus PS. Gleiches gilt für beiden Zukunftsszenarien in der Kategorie Humantoxizität sowie für das Zukunftsszenario der Lignozellulose für die Kategorie Versauerungspotential.

Daraus ergibt sich, dass in den Kategorien terrestrische Eutrophierung und aquatische Eutrophierung die Klappschalen aus PS weniger Emissionen erzeugen als diese aus PLA. Gleiches gilt für beide Szenarien mit Betrachtung des heutigen Stands der Technik (1. Und 3.) in der Kategorie Humantoxizität sowie für Szenarien 1-3 in der Kategorie Versauerungspotential.

4.2.4. Auswertung

Bei Betrachtung der Status quo Szenarien lassen sich keine Vor- oder Nachteile des Kunststoffes aus PLA ableiten. Vorteile ergeben sich bei der Betrachtung der Zukunftsszenarien, für die die Prozessdaten zu gegebenem Zeitpunkt jedoch erhoben und bestätigt werden müssen.

4.3. Life Cycle Assessment of Polylactide (PLA), A comparison of food packaging made from NatureWorks® PLA and alternative materials: IFEU Heidelberg 2006

4.3.1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Die Firma NatureWorks möchte Informationen darüber gewinnen, wie die Umweltauswirkungen von Verpackungen aus eigens produziertem PLA bezogen auf Deutschland ausfallen. Bei der in dieser Studie betrachteten Verpackung handelt es sich um eine mit einem Deckel verschließbare Klappschale mit einem Volumen von 500ml, sie stellt das Produktsystem dar. Zum Zeitpunkt der Studie (2004-2006) wurden diese Schalen hauptsächlich aus den Materialien Polypropylen (PP), Polystyrol (OPS), und Polyethylenterephthalat (PET) hergestellt.

In dieser Studie sollen die Emissionen der vier Produktsysteme verglichen werden. Bei der funktionellen Einheit handelt es sich um 1000 Klappschalen. Dabei ist zu beachten, dass die Masse pro Klappschale vom verwendeten Material abhängt.

Bei der durchgeführten Studie wird der gesamte Lebensweg „von der Wiege bis zur Bahre“ der unterschiedlichen Klappschalen betrachtet. Das beinhaltet im Wesentlichen folgende Schritte:

- Produktion der Polymere
- Transport der Polymere zur Fabrik
- Herstellung der Schalen
- Recycling
- Entsorgung

Ausgeschlossen wurden jene Komponenten, die für alle Materialien identisch sind und so nicht ins Gewicht fallen, wie zum Beispiel die Herstellung der Lebensmittel, für die die Klappschalen bestimmt sind oder die Herstellung der benötigten Infrastruktur.

Der geographische Rahmen beinhaltet hauptsächlich Deutschland, die konventionellen Kunststoffe werden jedoch in verschiedenen Ländern in Europa hergestellt, die Produktion des Rohstoffes PLA findet in den USA statt.

Folgende acht Wirkungskategorien

- Verbrauch von fossilen Ressourcen,
- Klimawandel,
- Versauerung,
- terrestrische Eutrophierung,
- aquatische Eutrophierung,
- Sommersmog,
- Humantoxizität: PM10,

und folgende vier Sachbilanzgrößen

- Agrarlandnutzung
- kumulierter Energieaufwand, gesamt,
- kumulierter Energieaufwand, erneuerbar und
- kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar

werden untersucht. Es handelt sich hierbei um eine midpoint-Analyse.

4.3.2. Sachbilanz

Tabelle 2 bietet eine Übersicht über die verwendeten Daten, ihr Erhebungsjahr und ihre Herkunft:

Tabelle 2: Verwendete Daten der Ökobilanz "A comparison of food packaging" (Detzel & Krüger, 2006)

Name des Datensatzes	Bezugsjahr	Quelle / Jahr der Veröffentlichung
PLA Herstellung	2005	NatureWorks 2006
Herstellung konventioneller Kunststoffe	1999/2002	PlasticsEurope 2005 Petcore ⁵ (nur PET)
Herstellung der Klappschalen aus konventionellen Kunststoffen	2005	Vitembal ⁶
Sammlung und Sortierung der genutzten Klappschalen	2003/2004	Duales System Deutschland 2004 UBA 2001 ⁷
Recycling konventioneller Kunststoffe		Duales System Deutschland IFEU 2004 ⁸ Heyde 1999 ⁹

⁵ PET containers recycling Europe

⁶ Deutscher Verpackungshersteller

⁷ Umweltbundesamt: Grundlagen für eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Verwertung von Verkaufsverpackungen; Berlin, Juli 2001

⁸ Life Cycle Assessment of one-way PET systems with Expanded System Boundaries. Final report prepared by IFEU for Petcore; Brussels, August 2004

⁹ Recycling and Recovery of Plastics from Packagings in Domestic Waste. LCA-Type Analysis of Different Strategies. Eco-Informa Press, Vol. 5, 1999

Recycling von PLA		Klauss IFEU NatureWorks	2004 ¹⁰ 1999 ¹¹
LKW Transport	2003	HBEFA	
Schienentransport	1995-1999	Borken Annahmen der Autoren	1999 ¹²
Schifftransport		Borken 1999	
Energiebereitstellung	2003	VDEW 2003 ¹³	

Bei Erhebung der Daten zu konventionellen Kunststoffen wurden zwischen 7 (PET) und 28 (PP) Produktionsanlagen betrachtet. Für PET wurde im Auftrag von Petcore zusätzlich Daten vom Institut für Energie- und Umweltforschung erhoben. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse erfolgte eine Untersuchung bezüglich des Einflusses der zwei Datensätze für PET.

Die Firma NatureWorks erhob dabei die verwendeten Daten zur Herstellung von Polylactid. Hierbei wurde ausschließlich das eigene Werk der Firma NatureWorks betrachtet, da es zu dieser Zeit keinen anderen Hersteller von großen Mengen PLA gab (140.000 t/a). Die Datensätze umfassen den Rahmen „von der Wiege bis zum Werkstor“.

Aufgrund mangelnder Informationen trafen die Autoren bezüglich der Länge der Transportstrecken Annahmen.

4.3.3. Wirkungsabschätzung

Um die jeweilige Situation möglichst repräsentativ abzubilden, wird für jedes Produktsystem ein Basisszenario erstellt und bilanziert, in der Ökobilanz werden diese Szenarien mit PLA 5, PS, PP und PET bezeichnet. Unter PLA 5 wird der Stand der Technik bezüglich PLA im Jahr 2005 verstanden. Die Schritte des Lebenswegs bestehen aus der Produktion des Kunststoffs, dem Transport der Pellets, der Produktion der Klappschalen, dem Recycling und der Entsorgung.

In einer Sensitivitätsanalyse werden Parameter des Basisszenarios verändert und die Wirkung auf das Ergebnis beobachtet. In dieser Studie wird eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Parameter

- Verwendung erneuerbarer Energien im Jahr 2006: PLA6,
- Verwendung erneuerbarer Energien und eines verbesserten Fermentationsprozesses: PLA / NG („next generation“),
- Möglichkeiten des Recyclings der Altprodukte aus PLA, jeweils für PLA 5, PLA 6 und PLA / NG,
 - Kompostierung,
 - Vergärung,
 - chemisches Recycling und
 - Verbrennung im Zementwerk (nur für PLA 5)
- Verwendung der bereitgestellten Daten von Petcore für PET und
- Durchführung einer 50 % Allokation für jedes Basisszenario

durchgeführt.

Die Systemlasten und Gutschriften der einzelnen Produktsysteme werden für alle Szenarien in jeder Wirkungskategorie summiert. Die Darstellung erfolgt sowohl als Prozentzahl, bei der die Emissionen der Lebenswegabschnitte pro Wirkungskategorie angegeben werden und als Summe 100 ergeben als auch in Form eines Säulendiagramms.

¹⁰ Degradation of Biologically Degradable packaging items in Home or Backyard Composting Systems; Weimar, 2004

¹¹ Waste Management Routes for PS and PLA in Germany. Internal Study commissioned by Cargill Dow Polymers, August 1999

¹² Basisdaten für ökologische Bilanzierungen: Einsatz mobiler Maschinen in Transport, Landwirtschaft und Bergbau. Braunschweig/Wiesbaden

¹³ Verband der Elektrizitätswirtschaft; Verwendung des deutschen Strommixes aus dem Jahr 2003

Bei Betrachtung der Basisszenarien fällt auf, dass, unabhängig von der Wirkungskategorie und des Materials, mit Abstand die meisten Auswirkungen auf die Umwelt während der Herstellung der Rohmaterialien entstehen. Während der Lebenswegabschnitte Recycling und Entsorgung entstehen zudem für alle Materialien signifikante Emissionen in der Wirkungskategorie Klimawandel.

Für das Material PLA entstehen die Emissionen der Wirkungskategorie „krebserregende Stoffe“ im Wesentlichen während den Lebenswegabschnitten Produktion der Schalen, Recycling und Transport. Letzterer macht einen nicht zu vernachlässigen Anteil der Emissionen in der Kategorie Versauerung aus.

Für das Material PS machen die Emissionen der Wirkungskategorien terrestrische Eutrophierung und Humantoxizität in den Lebenswegabschnitten Recycling und Entsorgung einen ebenso nicht zu vernachlässigen Anteil aus.

Für das Material PP entstehen neben den oben genannten Emissionen außerdem entscheidende Anteile der Wirkungskategorie krebserregende Stoffe in den Lebenswegabschnitten Produktion der Schalen und Entsorgung. PLA zeigt Vorteile gegenüber allen Materialien in den Wirkungskategorien Verbrauch von fossilen Ressourcen, Klimawandel, Sommersmog und krebserregende Stoffe. Im Gegensatz dazu zeigen alle Materialien weniger Emissionen in der Wirkungskategorie terrestrische Eutrophierung. In den anderen Kategorien zeigt sich kein klarer Vor- oder Nachteil weder für den Biokunststoff noch für konventionellen Kunststoffe.

Die Betrachtung der Sachbilanzgrößen Agrarlandnutzung und kumulierter Primärenergiebedarf erneuerbarer Energien zeigt, dass für die konventionellen Kunststoffe weder Agrarland noch erneuerbare Energien verwendet werden. Der gesamte kumulierte Primärenergiebedarf ist für die Klappschalen aus PET am höchsten (1,2 GJ/FU) und für die aus PS am niedrigsten (0,75 GJ/FU), PP und PLA liegen dazwischen.

Beim Vergleich der drei Varianten PLA5, PLA6 und PLA / NG zeigen die zukünftigen Szenarien in allen Wirkungskategorien einen Vorteil gegenüber PLA aus dem Jahr 2005, ausgenommen Humantoxizität durch krebserregende Stoffe und aquatische Eutrophierung. Der Bedarf an Agrarland bleibt konstant, wohingegen sich der Gesamtbedarf an Primärenergie deutlich verringert.

Beim Vergleich der Recyclingoptionen Kompostierung, Vergärung und chemisches Recycling mit dem Stoff PLA aus dem Jahr 2005 zeigen alle Optionen höhere Emissionen in den Wirkungskategorien Verbrauch fossiler Ressourcen und Humantoxizität durch krebserregende Stoffe. In den übrigen Kategorien zeigen kompostiertes bzw. vergärtes PLA Nachteile und chemisch recyceltes PLA Vorteile gegenüber dem Basisszenario.

Bei Betrachtung der Sachbilanzgrößen zeigt sich, dass chemisches Recycling den Bedarf an Agrarland etwa halbiert, auch der Gesamtbedarf an Primärenergie ist für dieses Szenario am geringsten.

Diese Ergebnisse lassen sich fast ausnahmslos auf den Vergleich zwischen PLA 6 und den Recyclingoptionen übertragen. Eine Ausnahme besteht darin, dass das chemische Recycling auch in der Wirkungskategorie Humantoxizität durch krebserregende Stoffe die niedrigsten Emissionen hervorbringt, außerdem zeigt PLA 6 generell deutlich niedrigere Emissionen als PLA 5.

Auch das Szenario PLA / NG zeigt verglichen mit PLA 5 nahezu die gleichen Verhältnisse der Szenarien untereinander in den Wirkungskategorien und Sachbilanzgrößen, außer dass die Emissionen in der Kategorie Klimawandel vom variierten Basisszenario, Vergärung und chemisches Recycling etwa gleich sind. Des Weiteren zeigen die Szenarien mit PLA der nächsten Generation deutlich niedrigere Emissionen als PLA aus dem Jahr 2005.

In einer Sensitivitätsanalyse wurde untersucht, welche Auswirkungen die Behandlung des Prozessabfalls mit sich bringt. Dabei wurde das Basisszenario, in dem der Prozessabfall in einer Müllverbrennungsanlage thermisch verwertet wird, mit dem Szenario, in dem der Prozessabfall Kohle in einem Zementwerk ersetzt und dem Szenario, in dem der Prozessabfall chemisch recycelt wird, verglichen. In den Wirkungskategorien Verbrauch fossiler Ressourcen, Klimawandel, Sommersmog und Humantoxizität durch krebserregende Stoffe zeigt PLA einen Vorteil gegenüber allen drei Materialien in allen Sensitivitäten. In der Kategorie terrestrische Eutrophierung zeigt PLA einen Nachteil gegenüber den anderen Stoffen und in den übrigen Kategorien Versauerung, Humantoxizität

durch Feinstaub und aquatische Eutrophierung überwiegen die Nachteile deutlich. Der Gesamtbedarf an Primärenergie ist für Schalen aus PET am höchsten, die anderen Szenarien liegen im Mittel mit etwa 0,3 GJ / FU darunter. Ein eindeutiger Vorteil für ein Szenario kann aus der Auswertung nicht abgeleitet werden.

Für das Produktsystem PET stehen zwei Datensätze zur Verfügung. Es werden die Daten des Basisszenarios von PlasticsEurope und der Datensatz von Petcore mit PLA 5 verglichen. In den Wirkungskategorien Verbrauch fossiler Ressourcen, Klimawandel und Humantoxizität durch krebserregende Stoffe zeigt PLA einen Vorteil gegenüber beiden PET Systemen. In den Kategorien terrestrische Eutrophierung und aquatische Eutrophierung weisen die Klappschalen aus PLA einen Nachteil gegenüber denen aus PET auf. In den übrigen Kategorien hängen Vor- bzw. Nachteile vom betrachteten Datensatz ab. Die Unterschiede der Daten zwischen den beiden PET Systemen ist besonders in den Kategorien Sommersmog, Versauerung, terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität durch krebserregende Stoffe sowie Feinstaub und aquatische Eutrophierung hoch. Der Gesamtbedarf an Primärenergie ist jedoch für beide PET Systeme annähernd identisch.

Für jedes Basisszenario wurde neben der 100% Allokation auch eine 50% Allokation durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass die Allokationsmethode in diesem Fall einen nicht nennenswerten Einfluss auf die Emissionen der verschiedenen Produktsysteme hat.

4.3.4. Auswertung

PLA zeigt gegenüber den drei konventionellen Kunststoffen PP, PS und PET sowohl Vor- als auch Nachteile. Bei Betrachtung von allen Wirkungskategorien ist es nicht möglich, einen eindeutigen Gewinner, im Sinne von geringen Emissionen, zu nennen.

Da sich PLA zum Zeitpunkt der Studie noch nicht auf dem deutschen Markt befindet, ist es schwierig, bestimmte Faktoren abzuschätzen, wie zum Beispiel den Weg des Recyclings. Dass es sich bei PLA um ein auf dem Markt neues Material handelt, kann jedoch auch als Vorteil gesehen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass Innovationen in Zukunft zu Verbesserungen der einzelnen Lebensabschnitte führen und sich somit die Umweltauswirkungen reduzieren lassen.

4.4. Comparative LCA of 4 types of drinking cups used at events: Openbare Afvalstoffenmaatschappij voor het vlaamse gewest (OVAM)

4.4.1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Bei der Institution OVAM handelt es sich um die öffentliche Entsorgungseinrichtung der Region Flandern in Belgien. Mit dieser Studie sollen aktuelle und umfassende Informationen bezüglich der umweltrelevanten Aspekte der Produktsysteme gewonnen werden. Bei den Produktsystemen handelt es sich um Trinkbecher aus verschiedenen Materialien:

- Mehrwegbecher aus Polycarbonat (PC)
- Einwegbecher aus Polypropylen (PP)
- Einwegbecher aus Pappe, mit Polyethylen beschichtet (PE)
- Einwegbecher aus Polylactid (PLA)

Bei der durchgeführten Studie wird der komplette Lebensweg „von der Wiege bis zur Bahre“ der unterschiedlichen Becher betrachtet. Die Lebenswege der Becher aus den verschiedenen Materialien enthalten folgende Abschnitte:

- Produktion der Becher
- Verschiedene Transport- und Lagerschritte, inklusive Verpackung
- Nutzung während der Veranstaltung

- Reinigung der genutzten Becher während der Veranstaltung (nur für Mehrwegbecher aus PC)
- Entsorgung und Recycling der Becher und des Verpackungsmaterials

Die Becher sollen sowohl bei kleinen (2000-5000 Besucher) als auch bei großen (mehr als 30.000 Besucher) Veranstaltungen genutzt werden. Bei der funktionellen Einheit handelt es sich um „die Menge an Bechern für die Bereitstellung von 100 Litern Bier oder alkoholfreie Getränke bei kleinen und großen Veranstaltungen“. Das Volumen der Becher beträgt 25 cl, die funktionelle Einheit umfasst entsprechend einen Umfang von 400 Bechern. Betrachtet werden hierbei die Produktion der Becher, die Nutzung während der Veranstaltung und die anschließende Entsorgung. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Situation in Flandern in den Jahren 2004 und 2005.

Folgende Wirkungskategorien werden betrachtet:

- Humantoxizität durch krebserregende Stoffe
- Humantoxizität durch organische Stoffe
- Humantoxizität durch anorganische Stoffe
- Klimawandel
- Ozonschicht
- Ökotoxische Emissionen
- Versauerung / Eutrophierung
- Entnahme von mineralischen Rohstoffen
- Entnahme von fossilen Brennstoffen

Im Gegensatz zu den anderen Ökobilanzen werden in dieser Studie andere Einheiten für die Emissionen in den Wirkungskategorien verwendet, das ist auf die hier verwendete Methode Eco-Indicator 99 zurückzuführen. Wurden die Emissionen in den zuvor beschriebenen Ökobilanzen vorwiegend in für die Wirkungskategorie entscheidende stoffliche Verbindungen angegeben (zB: Klimawandel CO₂), wird in dieser Ökobilanz für die ersten fünf der oben genannten Wirkungskategorien die Einheit „Disability-Adjusted Life Year“ (DALY) verwendet. Dabei handelt es sich um ein Maß für Lebensqualität. Liegt ein hoher Wert vor, spricht dies für eine geringe Lebensqualität. Die Kategorien ökotoxische Emissionen und Versauerung/Eutrophierung werden nach der Artenvielfalt im Ökosystem bewertet. Die Einheiten PAF/m²*yr für ökotoxische Emissionen und PDF/m²*yr für Versauerung / Eutrophierung geben den Schaden an, den die Spezies in einem Ökosystem erfahren und der sich durch Verschwinden oder Bedrohung der Arten äußert. Hierbei handelt es sich dementsprechend um eine endpoint-Analyse.

Die Kategorien Entnahme von mineralischen Rohstoffen und fossilen Brennstoffen werden in Megajoule (MJ) angegeben.

4.4.2. Sachbilanz

Tabelle 3 bietet eine Übersicht über die verwendeten Daten, ihr Erhebungsjahr und ihre Herkunft:

Tabelle 3: Verwendete Daten der Ökobilanz (Spirinckx & Geerken, 2006)

Name des Datensatzes	Bezugsjahr	Quelle / Jahr der Veröffentlichung
Herstellung konventioneller Kunststoffe	PC: 1992-1996 PP / PE: 2000-2005	PlasticsEurope
Herstellung der Kartonage	2000-2005	KCL-Database ¹⁴

¹⁴ Datenbank für den skandinavischen Raum

Herstellung der Becher	2000-2005	EcoInvent2000 ¹⁵ Daten vom jeweiligen Hersteller
Verpackung der Becher vor dem Transport	2004-2005	Prozess: unternehmensspezifische Daten Material: PlasticsEurope, EcoInvent2000
Transportprozesse von Kunststoffen/Becher	2000-2005	EcoInvent2000
Transportstrecken von Kunststoffen/Becher	2000-2005	PlasticsEurope Angaben von Veranstaltern der Events Annahmen der Autoren
Wiederverwendung der Becher aus PC	2000-2005	Literaturangaben: Vergleich mit Angaben von Veranstaltern der Events
Recycling & Entsorgung	2004-2005	Technologie: Angaben verschiedener Betreiber VITO ¹⁶

4.4.3. Wirkungsabschätzung

Um die jeweilige Situation möglichst repräsentativ abzubilden, wurde für jedes Produktsystem ein Basisszenario erstellt und bilanziert. Die unter 4.1.1 genannten Prozessmodule der Basisszenarien wurden wie folgt einer Sensitivitätsanalyse unterzogen:

- Best-case- und worst-case-Szenario der Umlaufraten eines Bechers während einer Veranstaltung (PC)
- Reinigung der wiederverwendeten Becher per Hand oder Maschine mit unterschiedlichen Mengen an Wasser und Reinigungsmittel (PC)
- Variation der Transportwege unter bestimmten Annahmen
- in Zukunft verbesserter Produktionsprozess (PLA)
- Annahme einer Produktionsstätte des PLA Granulats in Europa statt den USA (PLA)
- Verringerung des Gewichts eines Bechers (PLA)
- Verschiedene End-of-life Szenarien
 - thermische Verwertung in einer öffentlichen MVA oder in einem Zementwerk (PP und PE)
 - thermische Verwertung in einer öffentlichen MVA, Kompostierung oder anaerobe Vergärung (PLA)

Aufgrund der gewählten Einheiten in dieser Studie sieht die graphische Darstellung der Ergebnisse anders aus als die der zuvor betrachteten Studien. Zunächst sind die verschiedenen Prozessmodule und ihr prozentualer Anteil an den Umweltauswirkungen in den Wirkungskategorien aufgetragen. Jede Säule beträgt 100 % und ist farblich in die Anteile der Lebenswegabschnitte unterteilt.

Hierbei fällt auf, dass unabhängig von Produktsystem, Wirkungskategorie und Veranstaltungsgröße die Herstellung des Ausgangsmaterials für die Becher einen großen Anteil der Umweltauswirkungen ausmacht. Der Transport der fertigen Becher zum Lieferant der Veranstaltung beträgt in den Basisszenarien 850 km und zeigt sich ebenso deutlich in allen Ergebnissen. Die Becher aus PP und Kartonage werden für große Veranstaltungen zu jeweils 50% in der öffentlichen MVA und in einem Zementwerk thermisch verwertet. Dies zeigt für das Material PP hohe und für das Material Kartonage mäßige Gutschriften in den Kategorien fossile Brennstoffe,

¹⁵ Global ausgerichtete Datenbank, welche Prozessdaten über den Lebensweg von Produkten bereitstellt

¹⁶ Europäische Organisation, die im Bereich nachhaltiger Entwicklung tätig ist

Ozonschicht und Humantoxizität durch krebserregende Stoffe. Insbesondere unterscheidet sich dieser Entsorgungsweg zu den kleinen Veranstaltungen, bei denen der gesamte Abfall in einer öffentlichen MVA verwertet wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Abfall in einem Zementwerk fossile Brennstoffe ersetzt.

In einer zweiten graphischen Darstellung werden die vier Produktsysteme in den neun Wirkungskategorien direkt miteinander verglichen. Das Produktsystem, das die höchsten Umweltauswirkungen in einer Kategorie aufweist, wird gleich 100% gesetzt, die anderen liegen sodann zwischen 0 und 100%. Beim Vergleich der kleinen Veranstaltung weist das System aus mit PE beschichteter Kartonage in den fünf Kategorien mineralische Rohstoffe, Ökotoxizität, Ozonschicht, Humantoxizität durch anorganische Stoffe und Humantoxizität durch krebserregende Stoffe die höchsten Emissionen auf. Die Becher aus PP weisen in den Kategorien fossile Brennstoffe und Klimawandel die höchsten Auswirkungen auf Mensch und Umwelt auf, Versauerung / Eutrophierung und Humantoxizität durch organische Stoffe werden von den Bechern aus PLA dominiert. Um die einzelnen Kategorien untereinander vergleichen zu können, muss aufgrund der unterschiedlichen Einheiten eine Normierung vorgenommen werden. Danach dominiert die Kategorie fossile Brennstoffe eindeutig, wobei das System PP die höchsten und das System aus PC die niedrigsten Emissionen aufweist. Humantoxizität durch anorganische Stoffe und Klimawandel folgen.

Der Vergleich der großen Veranstaltungen unterscheidet sich geringfügig von dem der kleinen Veranstaltungen. In der Kategorie Ozonschicht weist nun das System aus PC die höchsten Emissionen auf, in der Kategorie Klimawandel die Becher aus PLA. Die Normierung zeigt ähnliche Ergebnisse wie bei den kleinen Veranstaltungen, der Abstand zwischen den Produktsystemen in der Kategorie fossile Brennstoffe reduziert sich jedoch.

Die ersten variierten Parameter in der Sensitivitätsanalyse beziehen sich auf die Wiederverwendung der Becher aus PC während einer Veranstaltung. Es wird zwischen der benötigten Wasser- und Seifenmenge sowie zwischen verschiedenen Umlaufraten eines Bechers unterschieden. Hierbei fällt auf, dass sich das Szenario in dem doppelt so viel Wasser und Seife verwendet werden, kaum vom Basisszenario unterscheidet. Als entscheidend stellt sich heraus, wie oft ein Becher genutzt werden kann, bevor er aussortiert wird. Das best-case-Szenario zeigt für kleine Veranstaltungen in sieben von neun Wirkungskategorien die geringsten Emissionen, wohingegen das worst-case-Szenario in sechs von neun Wirkungskategorien die höchsten Emissionen aufweist. Ähnliches zeigt sich für große Veranstaltungen, hier weist das worst-case-Szenario in sogar acht von neun Wirkungskategorien die höchsten Umweltauswirkungen auf.

In der nächsten Sensitivitätsanalyse wird der Parameter Abfallbehandlung der Becher aus PP variiert. Im Basisszenario wird der Abfall zur Hälfte jeweils in einer öffentlichen MVA und in einer Zementanlage thermisch verwertet. Diese Ergebnisse werden mit denen der Szenarien verglichen, in denen entweder der gesamte Abfall in einer MVA oder einer Zementanlage verbrannt wird. In den Wirkungskategorien mineralische Rohstoffe, Versauerung / Eutrophierung, Humantoxizität durch anorganische und organische Stoffe weisen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse keinen Unterschied zum Basisszenario auf. In den übrigen Kategorien führt die Verwertung in einer MVA zu wesentlich höheren und die Verwertung in einem Zementwerk zu wesentlich niedrigeren Emissionen. Das ist darauf zurückzuführen, dass in einem Zementwerk statt Abfall fossile Brennstoffe benötigt werden würden und diese so eingespart werden.

In der Sensitivitätsanalyse bezüglich PLA wird ein Zukunftsszenario für das Jahr 2008 des relativ neuen Stoffes betrachtet. Hierbei wird angenommen, dass ein verbesserter Fermentationsprozess angewendet wird, dass die Masse pro Becher um ein Gramm reduziert werden kann, ohne dass sich das negativ auf wichtige Eigenschaften auswirkt, dass das Granulat nicht in den USA sondern in Europa hergestellt wird und dass die Becher nicht wie im Basisszenario kompostiert, sondern zu 90% in einer anaeroben Vergärung verwertet werden. Die Emissionen in den verschiedenen Wirkungskategorien verringern sich mäßig bis enorm, so hat PLA für beide Veranstaltungsgrößen in keiner Wirkungskategorie mehr die höchsten Emissionen. Für große Veranstaltungen weist das Zukunftsszenario in fünf von neun Wirkungskategorien die niedrigsten Emissionen auf, in den übrigen Kategorien und auch bei Betrachtung der kleinen Veranstaltung wird es zumeist von einem Produktsystem leicht unterschritten.

In einer weiteren Sensitivitätsanalyse bezüglich PLA werden die Möglichkeiten der Verwertung des Abfalls miteinander verglichen. Hierbei fällt auf, dass unabhängig von Wirkungskategorie und Veranstaltungsgröße kaum ein Unterschied zwischen den Emissionen bei der Verwertung zu 50% MVA-50% Kompostierung, 100% MVA und 100% Kompostierung auftritt.

4.4.4. Auswertung

Keines der Systeme zeigt einen eindeutigen Vor- oder Nachteil im Vergleich mit den anderen Systemen. Die Einheiten der Wirkungskategorien sind nicht identisch und so sehen sich die Autoren nicht in der Lage, diese untereinander zu vergleichen.

Bei Betrachtung der einzelnen Lebenswegabschnitte kann jedoch abschließend formuliert werden, dass in den vier Produktsystemen die höchsten Auswirkungen auf Mensch und Umwelt während der Produktion der Becher entstehen. Beim Produktsystem der Mehrwegbecher haben die Transportprozesse zudem einen nennenswerten Einfluss auf die Gesamtauswirkungen.

5. Vergleich und Diskussion der Ökobilanzen aus 4.1 bis 4.4

Um ein umfassendes Bild des Stoffes Polylactid zu erhalten, werden nun die oben beschriebenen Ökobilanzen verglichen. Es wird hierbei aufgezeigt, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu finden sind und wie sie sich begründen lassen.

Zunächst ist festzuhalten, dass es sich bei den untersuchten Produkten ohne Ausnahme um Leichtverpackungen handelt, deren Lebensdauer kurz ist. Verglichen werden die Produkte aus PLA mit Produkten aus konventionellen Kunststoffen, die den gleichen Zweck erfüllen.

Die für PLA bereitgestellten Daten stammen ausschließlich von der Firma NatureWorks. NatureWorks war der erste Großproduzent des Stoffes und stellte als erste Firma ihre Daten öffentlich zur Verfügung. In jeder Studie ist angemerkt, dass sich die Daten bezüglich PLA deshalb auch nur auf PLA der Firma NatureWorks beziehen und nicht ohne weiteres auf andere Hersteller und Verfahren übertragen werden können. Die verwendeten Daten zu den konventionellen Kunststoffen stammen von der europäischen Kunststoffvereinigung PlasticsEurope und werden einzig in der Studie von OVAM durch Daten aus der Datenbank EcoInvent ergänzt. Unterschiede gibt es je nach Erscheinungsjahr der Studie und im Zeitraum der Erhebung der Daten.

5.1. Vergleich der Ergebnisse der Wirkungskategorien

In Tabelle 4 werden die Ergebnisse der verschiedenen Wirkungskategorien der Ökobilanzen aufgezeigt.

Tabelle 4: Vergleich der Wirkungskategorien in den vier untersuchten Ökobilanzen (Ergebnisse aus den untersuchten Studien, Tabelle eigene Darstellung)

Wirkungskategorien und Sachbilanzgrößen	Danone (5.1)		UBA (5.2)			IFEU 2006 (5.3)					OVAM (5.4)					Untersuchungshäufigkeit einer WK	Favorit der WK
	PS	PLA	PS	PLA	PLA _{Zukunft}	PS	PP	PET	PLA	PLA _{Zukunft}	PC	PP	Kartonage	PLA	PLA _{Zukunft}		
fossile Energieträger		■		■	■				■						■	4	PLA
Versauerung	■		■				■					■				4	konventionell
terrestrische Eutrophierung	■		■				■					■				3	konventionell
aquatische Eutrophierung	■					■						■				3	konventionell
Klimawandel		■		■	■				■						■	4	PLA
Sommersmog		■		■	■				■							3	PLA
Humantoxizität Feinstaub	■			■	■		■									3	eher konventionell
Primärenergiebedarf	■	■		■	■					■						3	eher PLA
Naturraumbeanspruchung	■		■			■	■	■								3	konventionell
Humantoxizität durch krebserregende Stoffe									■		■					2	nicht eindeutig
Humantoxizität durch organische Stoffe															■	1	PLA
Humantoxizität durch anorganische Stoffe															■	1	PLA
Ökotoxizität											■	■				1	konventionell
mineralische Rohstoffe												■				1	konventionell
Prozesswasserverbrauch	■		■													1	konventionell
Ozonschicht												■				1	konventionell

Vertikal sind die in den Ökobilanzen vorkommenden Wirkungskategorien und Sachbilanzgrößen aufgetragen. Horizontal sind die Ökobilanzen in ihre unterschiedlichen Produktsysteme unterteilt. Außerdem sind die Häufigkeit einer Wirkungskategorie bzw. Sachbilanzgröße in den vier Studien und ob PLA oder ein konventioneller Kunststoff grundsätzlich in dieser Kategorie Vorteile zeigt, in den letzten beiden Spalten aufgetragen. Wenn in der Studie ein Zukunftsszenario für PLA betrachtet wurde, ist dieses Szenario als separate Spalte aufgeführt. Das Produktsystem bzw. Szenario pro Ökobilanz mit den niedrigsten Umweltauswirkungen ist grün markiert. In der letzten Spalte ist festgehalten, ob pro Kategorie die grünen Felder der konventionellen oder biologischen Kunststoffe überwiegen. Die Kategorien, die in nur einer Ökobilanz verwendet wurden, lassen keinen Vergleich zu, sind aber der Vollständigkeit halber aufgeführt. Für die Studie von OVAM ist zu beachten, dass es lediglich eine einzelne Kategorie für Versauerung / Eutrophierung gab, weswegen das Feld zusammengefasst ist.

Es zeigt sich, dass in den drei- und viermal verwendeten Kategorien jeder Ökobilanz bis auf Humantoxizität durch Feinstaub eindeutig herauskommt, ob PLA oder konventioneller Kunststoff in dieser Kategorie weniger Umweltauswirkungen verursacht. Für die konventionellen Kunststoffe gilt das für fünf von neun, für PLA dementsprechend für vier von neun Kategorien. Da die Herkunft der Daten sowohl für die biologischen als auch für die konventionellen Kunststoffe gleich ist, fällt es schwer zu beurteilen, ob das der Grund für die eindeutigen Ergebnisse ist oder ob für andere Datensätze ähnliche Ergebnisse zu erwarten wären.

5.2. Vergleich der Lebenswegabschnitte von PLA

Im Folgenden werden die Umweltauswirkungen der verschiedenen Lebenswegabschnitte von PLA aus den unterschiedlichen Studien gegenüber gestellt. Dabei werden die Lebenswegabschnitte in Herstellung des Rohmaterials, Transportprozesse sowie Recycling und Entsorgung zusammengefasst.

5.2.1. Herstellung des Rohmaterials

Zu Beginn werden die Rohmaterialien der verschiedenen Verpackungen hergestellt. In den Studien des IFEU und von OVAM stellt dies den ersten Lebenswegabschnitt dar. In der Studie des Umweltbundesamtes ist dieser Abschnitt zusätzlich in die fünf Abschnitte Anbau der Feldfrüchte, Transport der Biomasse, Verarbeitung der Biomasse, Milchsäureproduktion und Polymerisierung unterteilt.

In allen Basisszenarien der Studien von IFEU und Umweltbundesamt fällt gleichermaßen auf, dass die Herstellung der PLA-Pellets die höchsten Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zeigt. In den Kategorien aquatische Eutrophierung und Naturraumbeanspruchung ist die Herstellung der Rohmaterialien sogar für die gesamten Umweltauswirkungen verantwortlich. Differenziert nach den fünf Phasen in der Studie des Umweltbundesamtes entstehen die gesamten Auswirkungen beim Anbau der Feldfrüchte. In den Kategorien fossiler Ressourcenverbrauch, Versauerung, terrestrische und aquatische Eutrophierung, Sommersmog, Humantoxizität durch Feinstaub und Primärenergiebedarf macht die Herstellung der Rohstoffe mindestens die Hälfte und bis zu 80% der Auswirkungen auf Mensch und Umwelt aus. Obwohl sich die Wirkungskategorien der Studie von OVAM kaum mit denen der anderen drei Studien decken, ist festzuhalten, dass die Herstellung der Rohstoffe ebenso mindestens die Hälfte der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit ausmacht. Ausgenommen hiervon sind die Kategorien Ozonschicht und Humantoxizität durch krebserregende Stoffe, hier verursacht die Rohstoffherstellung etwa 30-40% der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.

Bei Betrachtung der Zukunftsszenarien der Studie des Umweltbundesamtes wird eine verbesserte Technik der Milchsäureherstellung angenommen. Folglich sinkt Beitrag dieses Abschnitts beträchtlich. Die Herstellung der Rohmaterialien bewirkt zwar immer noch den Großteil der Umweltauswirkungen, diese nehmen insgesamt jedoch stark ab und können in der Zukunft unter denen der konventionellen Kunststoffe liegen. Abbildung 6 soll dies anhand der Wirkungskategorie Humantoxizität durch Feinstaub beispielhaft verdeutlichen:

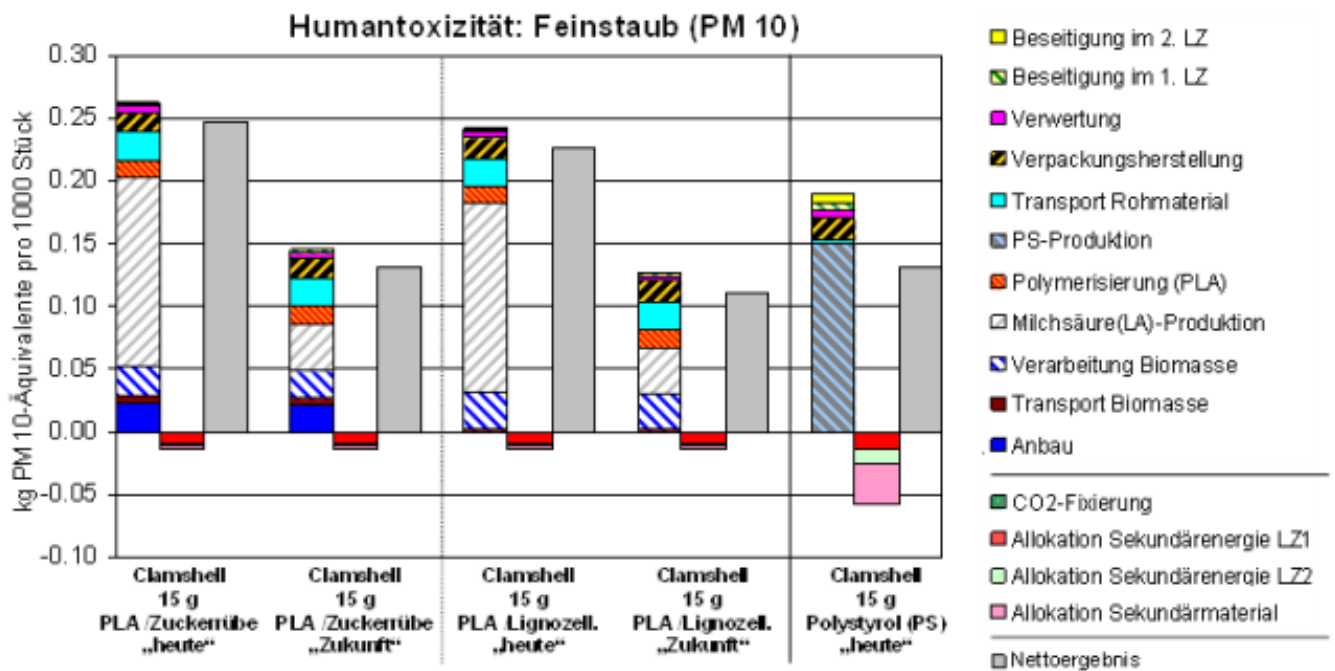


Abbildung 6: Ökobilanzieller Vergleich von Klappschalen aus PLA und PS in der Wirkungskategorie Humantoxizität: Feinstaub (PM 10) (Detzel, Kauertz, & Derreza-Greeven, 2012, S. 53)

Die Verwendung von erneuerbaren Energien in PLA 6 und ein zusätzlich verbesserter Fermentationsprozess in PLA / NG führen zu einem ähnlichen Ergebnis in der Studie des IFEU. Der Anteil der Kunststoffherstellung dominiert weiterhin, die Umweltauswirkungen insgesamt verringern sich jedoch deutlich.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Herstellung der Rohmaterialien bezüglich der Umweltauswirkungen den intensivsten Lebenswegabschnitt darstellt. Gleichzeitig können die Emissionen und Auswirkungen auf Mensch und Umwelt durch effizientere Technik in der Zukunft stark verringert werden.

5.2.2. Transportprozesse

Der Transportprozess zeigt in der Studie des Umweltbundesamtes lediglich in den Kategorien Versauerung und terrestrische Eutrophierung einen Anteil von etwa 10% an den gesamten Emissionen. In den Studien des IFEU liegt der Anteil in diesen Kategorien bei 20-30%, hinzu kommen etwa 15% in der Kategorie Humantoxizität durch Feinstaub. In der Studie von OVAM sind die Transportprozesse für einen höheren Anteil der Auswirkungen auf Mensch und Umwelt verantwortlich. In jeder Wirkungskategorie beträgt der Anteil etwa 20-50 %.

OVAM nimmt einen Transportweg von 8000 km für die PLA-Pellets von den USA nach Deutschland an, in den anderen Studien ist keine konkrete Transportstrecke angegeben. Ob die unterschiedlichen Anteile aus Verwendung verschiedener Transportstrecken oder verschiedener Einheiten resultieren, ist nicht bekannt. Logisch erscheint jedoch, dass umso kürzer die Transportstrecken sind, desto geringer fallen die Emissionen aus.

5.2.3. Recycling und Entsorgung

Die Umweltauswirkungen der Lebenswegabschnitte Recycling und Entsorgung zeigen sich in der Kategorie Klimawandel am deutlichsten. Der Grund dafür ist die Verbrennung in einer Müllverbrennungsanlage und die dabei entstehenden Treibhausgase. Da eine MVA die Wärme entweder direkt abführt oder in elektrische Energie umwandelt, werden Primärrohstoffe wie Kohle eingespart, die ohne den Abfall zur Energieumwandlung genutzt worden wären. So entstehen Gutschriften auf die Nettoergebnisse.

In der Studie des IFEU aus dem Jahr 2006 werden die Szenarien von Polylactid aus dem Jahr 2005, 2006 und der nächsten Generation mit den Recyclingmethoden Kompostierung, Vergärung und chemisches Recycling kombiniert. Hierbei fällt auf, dass chemisches Recycling in den meisten Kategorien Vorteile gegenüber den anderen Varianten zeigt. Das ist darauf zurückzuführen, dass sich der Kunststoff im Gegensatz zu Kompostierung und Vergärung nicht zersetzt, sondern zu Milchsäure zurückgeführt wird. Es entsteht Primärrohstoff, für den die Schritte Anbau der Feldfrüchte sowie Transport und Verarbeitung der Biomasse nicht durchgeführt werden müssen. Damit ein chemisches Recycling stattfinden kann, muss jedoch eine sortenreine Fraktion aus PLA vorliegen und Anlagen dazu vorhanden sein. Dies stellt ein weiteres Potential zur Verringerung der Umweltauswirkungen in der Zukunft dar.

Des Weiteren ist anzumerken, dass die Kompostierung häufig leicht und manchmal deutlich erhöhte Umweltauswirkungen im Gegensatz zu den anderen Entsorgungsvarianten aufzeigt. Das ist darauf zurückzuführen, dass sich PLA in einem Kompost in die Bestandteile Kohlenstoffdioxid und Wasser zersetzt, welches direkt in die Umwelt entlassen wird.

In der Studie von OVAM erweist sich die Anzahl von Wiederverwendungen des Bechers aus Polycarbonat als ein Faktor, der einen bedeutenden Einfluss auf die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt hat. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 7 im vierten und fünften Balken von links, bei denen es sich um das best- und worst-case-Szenario bezüglich der Umlaufraten handelt. Das worst-case-Szenario übertrifft in sechs von neun Kategorien die übrigen Szenarien. Die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt des best-case-Szenarios weisen dagegen oftmals nur noch die Hälfte der Auswirkungen des Basisszenarios auf. Es ist davon auszugehen, dass bei mehrmaliger Verwendung von Bechern aus PLA die Auswirkungen ebenfalls verringert werden könnten, da sowohl Primärrohstoffe als auch Transportprozesse eingespart werden.

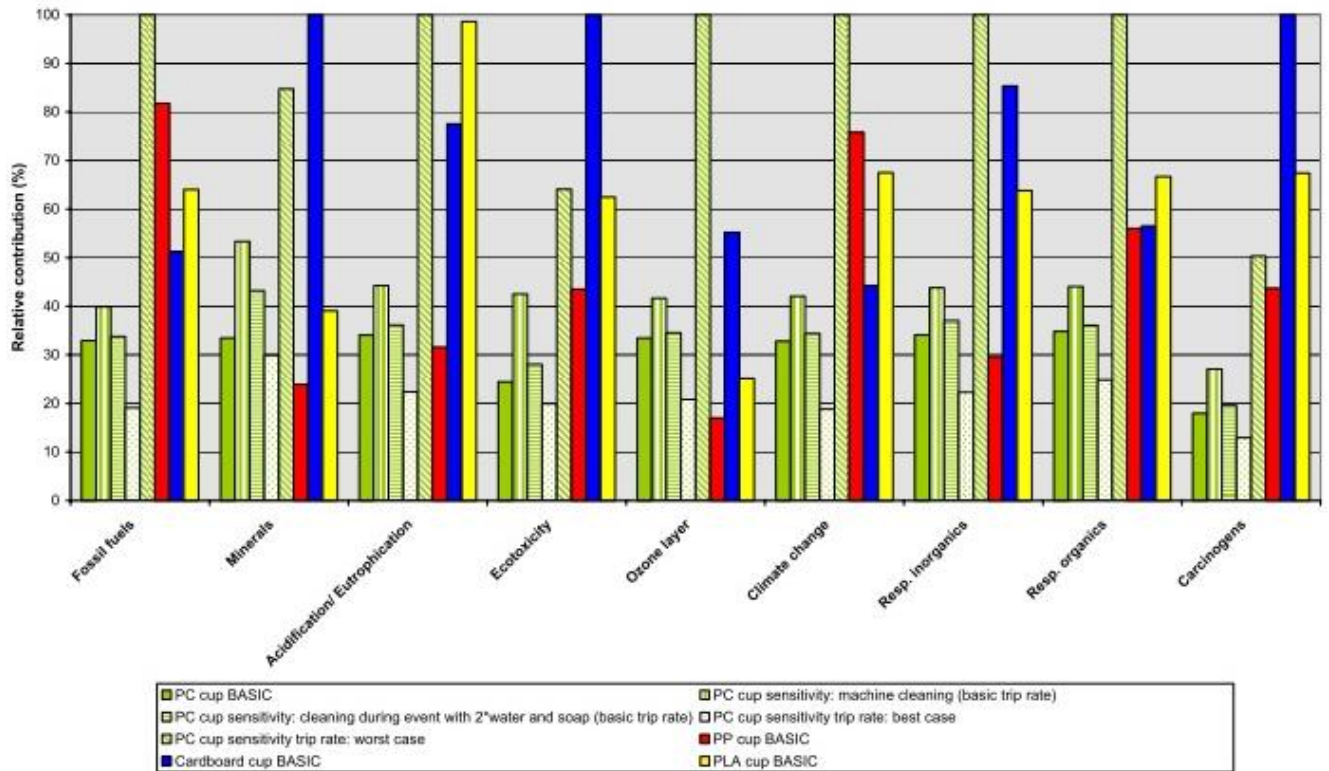


Abbildung 7: Vergleich der Becher aus vier Materialien und der Sensitivitäten bzgl. der Reinigung und Umlaufrate der Becher aus PC (Spirinckx & Geerken, 2006, S. 67)

5.3. Vergleich der Lebenswegabschnitte von PLA und konventionellen Kunststoffen

Im Folgenden werden die Umweltauswirkungen von PLA und konventionelle Kunststoffen in den verschiedenen Lebenswegabschnitten pro Wirkungskategorie gegenüber gestellt. Wie in 5.2 werden die Lebenswegabschnitte in Herstellung der Rohmaterialien, Transportprozesse sowie Recycling und Entsorgung zusammengefasst.

Auf einen Vergleich von absoluten Größen unter den verschiedenen Studien wird aufgrund der unterschiedlichen funktionellen Einheiten verzichtet. Stattdessen werden die Unterschiede in Prozent oder Vielfachen angegeben. Aufgrund der endpoint-Analyse der Studie von OVAM wird diese Studie im Vergleich von absoluten Beträgen der Wirkungsindikatoren nicht berücksichtigt.

Bei Betrachtung der verschiedenen Wirkungskategorien und Sachbilanzgrößen fällt zunächst auf, dass sich die Verhältnisse der Umweltauswirkungen der Lebenswegabschnitte von PLA und konventionellen Kunststoffen ähneln, die Beträge aber sehr unterschiedlich ausfallen.

5.3.1. Herstellung der Rohmaterialien

In den Kategorien fossiler Ressourcenverbrauch, Sommersmog, Versauerung, terrestrische und aquatische Eutrophierung, Humantoxizität durch Feinstaub und gesamter Primärenergiebedarf stellt die Herstellung der Rohmaterialien den größten Verursacher der Umweltauswirkungen dar.

Fossiler Ressourcenverbrauch [in kg ROE pro FU]

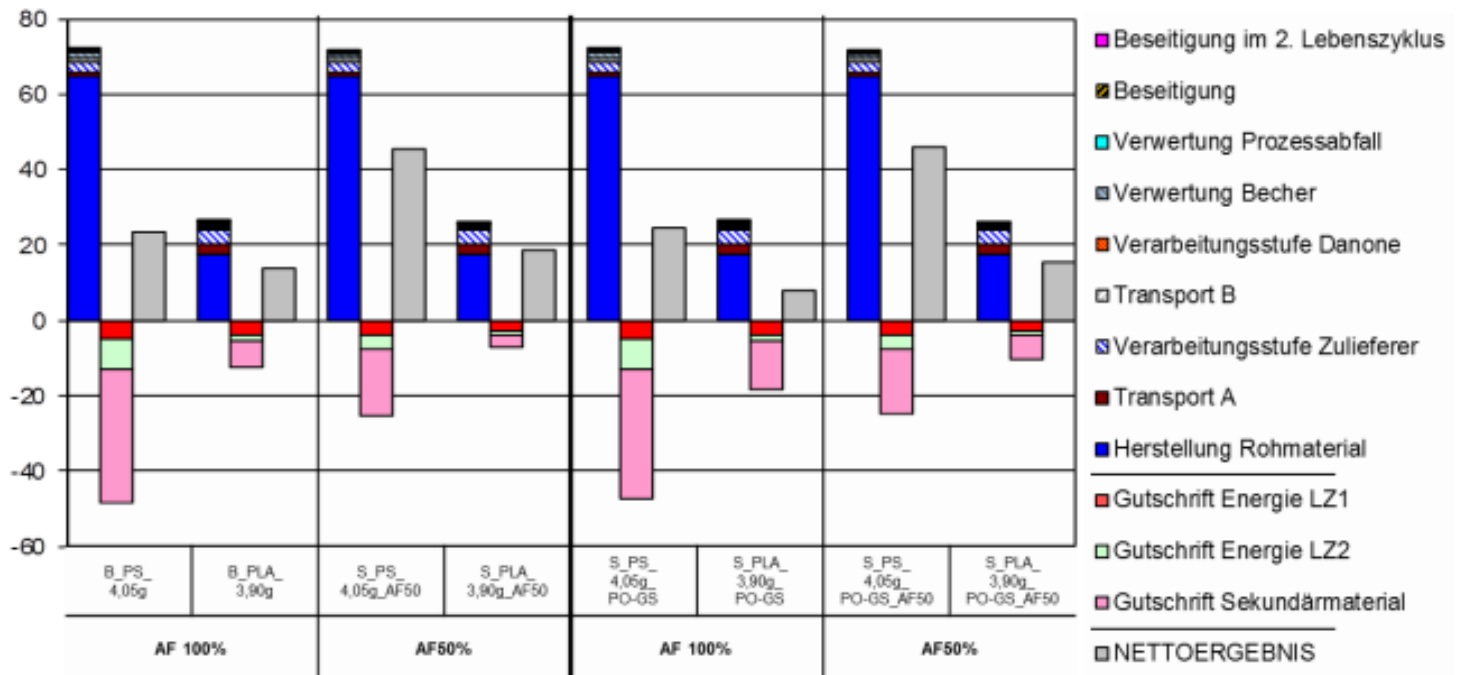


Abbildung 8: Ergebnisse für die Wirkungskategorie Fossiler Ressourcenverbrauch von Joghurtbechern (Kauertz, Detzel, & Volz, 2011, S. 48)

Abbildung 8 zeigt, dass in der Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch die Herstellung des Rohmaterials sowohl bei PLA als auch bei konventionellen Kunststoffen etwa 80 % der gesamten Auswirkungen ausmacht. Der absolute Betrag der Rohöläquivalente der konventionellen Kunststoffe ist jedoch etwa dreimal so hoch wie der der biologischen Kunststoffe.

Eine Ausnahme bildet die Kategorie Klimawandel, dort macht die Herstellung der Rohstoffe etwa 50% der Auswirkungen aus, nähere Erläuterungen folgen in Abschnitt 5.3.3.

5.3.2. Transportprozesse

Wie bereits in 5.2.2 beschrieben, wirkt sich der Transportprozess in den Bilanzen von IFEU und Umweltbundesamt bezogen auf PLA eher gering, jedoch nicht gänzlich vernachlässigbar, aus. Für die Umweltauswirkungen der konventionellen Kunststoffe ist der Transportprozess in jeder Kategorie vernachlässigbar. In der Studie von OVAM zeigt der Transportprozess sowohl bei Bechern aus Polylactid als auch bei Bechern aus konventionellen Kunststoffen einen Beitrag von 20-50%, in den Kategorien Humantoxizität durch krebserregende und organische Stoffe sowie Ozonschicht sind die Beiträge besonders hoch.

Eine eigene Annahme für dieses Ergebnis ist, dass die gering gemessenen Mengen an Emissionen mittels der midpoint-Analyse eine hohe Wirkung auf den Menschen haben und sich somit der Beitrag bei der endpoint-Analyse erhöht.

5.3.3. Recycling und Entsorgung

Wie bereits in 5.2.3 erwähnt, zeigt sich für PLA die Wirkung von Recycling und Entsorgung am deutlichsten in der Kategorie Klimawandel. Gleiches gilt für die Kunststoffverpackungen aus konventionellen Rohstoffen, was ebenfalls auf die thermische Verwertung zurückzuführen ist.

Abbildung 8 kann entnommen werden, dass sich die Gutschriften, die während einer thermischen Verwertung entstehen, positiv auf das Nettoergebnis auswirken. Die Gutschriften der konventionellen Kunststoffe sind etwa dreimal so hoch wie die der biologischen Kunststoffe. Dies ist auf den etwa doppelt so hohen Heizwert von konventionellen Kunststoffen im Vergleich zu PLA zurückzuführen (Kauertz, Detzel, & Volz, 2011, S. 42) und auf die Verwendung als Sekundärmaterial. Nichtsdestotrotz sind die Nettoergebnisse von PLA geringer als die der konventionellen Kunststoffe.

6. Analyse verschiedener wissenschaftlicher Artikel zu Hanffasern

Im Gegensatz zu Kunststoffen aus Polylactid war es nicht möglich, Ökobilanzen auszuwerten, die den Lebensweg von Hanffasern bilanzieren. Deshalb werden an dieser Stelle diverse wissenschaftliche Artikel analysiert, die vorhandene Ökobilanzen zusammenfassen.

6.1. Carbon storage potential in natural fibre composites (2002)

Dieser Artikel wurde von Muhammed Pervaiz und Mohini M. Sain von der Universität in Toronto im Jahr 2002 veröffentlicht. Es werden Faserverbundwerkstoffe mit Hanf- als auch mit Glasfasern auf ihre mechanischen und ökologischen Eigenschaften untersucht. Die aus Naturfaserverbundwerkstoff gefertigten Bauteile sollen glasfaserverstärkte Bauteile in der Automobilbranche ersetzen. Es finden unter anderem Berechnungen für die Einsparung von CO₂ und Energie statt, der geographische Rahmen ist Kanada bzw. Nordamerika.

Einen Vorteil von der Verwendung nachwachsender statt fossiler Rohstoffe stellt die Bindung von Kohlenstoffdioxid in Bauteilen mit Naturfasern dar, dies wird auch CO₂-Sequestrierung genannt. Um zu wachsen betreibt eine Pflanze Photosynthese, dazu benötigt sie, neben Licht und Wasser, Kohlenstoffdioxid. Diese Stoffe wandelt sie in die für sie notwendigen Kohlenhydrate um, Sauerstoff wird als Produkt freigegeben. Das verwendete Kohlenstoffdioxid ist in der Pflanze „gespeichert“ und wird erst frei, wenn sich die Pflanzenbestandteile zersetzen (Pflanzenforschung, 2015).

Mit Hilfe von Daten vom Ministerium für Landwirtschaft und Lebensmittel, Ontario, Kanada wird angenommen, dass pro Tonne Naturfaserverbundwerkstoff etwa 325 kg Kohlenstoff und 1,2 t Kohlenstoffdioxid gebunden werden.

Die naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffe werden im Folgenden mit NMT (natural fiber mat thermoplastics) und die glasfaserverstärkten Verbundwerkstoffe mit GMT (glass fibre mat thermoplastics) bezeichnet.

In Tabelle 5 sind die Energieaufwände für jeweils eine Tonne Verbundwerkstoff NMT und GMT während ihrer Herstellung und Entsorgung gegenüber gestellt. Die Daten zur Berechnung der in der Tabelle angegebenen Werte stammen größtenteils aus einer Ökobilanz von Corbiere-Nicollier et. al. aus dem Jahr 2001, dem Ministerium für Energie der USA und dem Ministerium für Landwirtschaft und Lebensmittel in Kanada.

Tabelle 5: Energieaufwand für eine Tonne Verbundwerkstoff verstärkt mit Hanf- und Glasfasern (Pervaiz & Sain, 2002, S. 335)

Quantity (1 metric ton)	NMT (65% fiber)	MJ	GMT (30% fiber)	MJ
(a) Materials				
	Hemp cultivation	1340	Glass fiber production	14 500
	PP production	35 350	PP production	70 700
	Total	36 690	Total	85 200
(b) Production				
	Composite	11 200	Composite	11 200
(c) Incineration				
<i>PP incineration</i>				
	Energy required	117	Energy required	234
	Energy released	-7630	Energy released	-15 260
<i>Hemp fiber incineration</i>				
	Energy required	1108	Energy required	516
	Energy released	-10 650		
	Net	-17 055	Net	-14 510
(d) Balance				
	Gross energy required	49 115	Gross energy required	97 150
	Energy released	-18 222	Energy released	-15 260
	Net energy required	30 800	Net energy required	81 890

Der Lebensweg der Materialien gliedert sich in drei Schritte, die Herstellung der Rohstoffe (a), die Produktion der Verbundwerkstoffe (b) und die Entsorgung mittels thermischer Verwertung (c). In (d) sind Energiebedarf und bereitgestellte Energie der drei Schritte zusammengefasst.

Der Faseranteil des Naturfaserverbundwerkstoffs beträgt 65%, der des glasfaserverstärkten Verbundwerkstoffs 30%. Somit befinden sich in NMT 35% Polypropylen und in GMT 70% Polypropylen.

Die Herstellung der Hanffasern benötigt mit 1340 MJ/t deutlich weniger Energie als die Herstellung der Glasfasern mit 14.500 MJ/t. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass der Energieaufwand der Faseraufbereitung von Hanf nicht berücksichtigt wurde. Die Produktion von PP benötigt prinzipiell bei beiden Materialien die gleiche Energiemenge, da GMT aber einen deutlich höheren Anteil an PP enthält, ist der Energieaufwand höher. In der Produktion des Verbundwerkstoffes benötigen beide Materialien die gleiche Menge an Energie. Bei der Verbrennung macht sich der hohe Anteil an PP in GMT mit einer größeren Menge an bereitgestellter Energie als bei NMT bemerkbar. Da Glas nicht thermisch verwertet werden kann und Hanf in diesem Schritt etwa 10.000 MJ/t Energie bereitstellt, überwiegt die Menge an freigesetzter Energie von NMT insgesamt mit 17.055 MJ/t leicht gegenüber der von GMT mit 14.510 MJ/t. Insgesamt ergibt sich ein Energiebedarf von 30.800 MJ/t für NMT und 81.890 MJ/t für GMT, der glasfaserverstärkte Verbundwerkstoff ist also fast dreimal so energieintensiv wie der naturfaserverstärkte Verbundwerkstoff. Das ist hauptsächlich auf die Reduzierung des Anteils an Polypropylen zurückzuführen.

Die Verwendung von Hanf- statt Glasfasern bewirkt aufgrund der geringeren Dichte von Hanffasern eine Reduktion der Masse des Autos. Für ein einzelnes Teil aus NMT stellt die Verringerung der Masse gegenüber eines Teils aus GMT 21 % dar, was die Masse des gesamten Autos um 0,54% senkt. Das würde auf Nordamerika eine Ersparnis von über 4 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid pro Jahr bedeuten.

6.2. Hemp Fibres for Green Products – An assessment of life cycle studies on hemp fibre applications (2011)

Bei diesem Artikel handelt es sich um die Zusammenfassung einer Ökobilanz über technische Anwendungen mit der Verwendung von Hanffasern. Herausgeber ist das nova-Institut, bei den Verfassern handelt es sich um Michael Carus und Juliane Haufe.

In der Studie werden der Primärenergiebedarf und die Auswirkungen auf den Klimawandel von insgesamt 19 technischen Anwendungen bilanziert.

Dabei ist in Abbildung 9 zunächst der Primärenergieaufwand für die Herstellung einer Tonne Hanffasern im Vergleich mit nicht erneuerbaren Stoffen aufgezeigt.

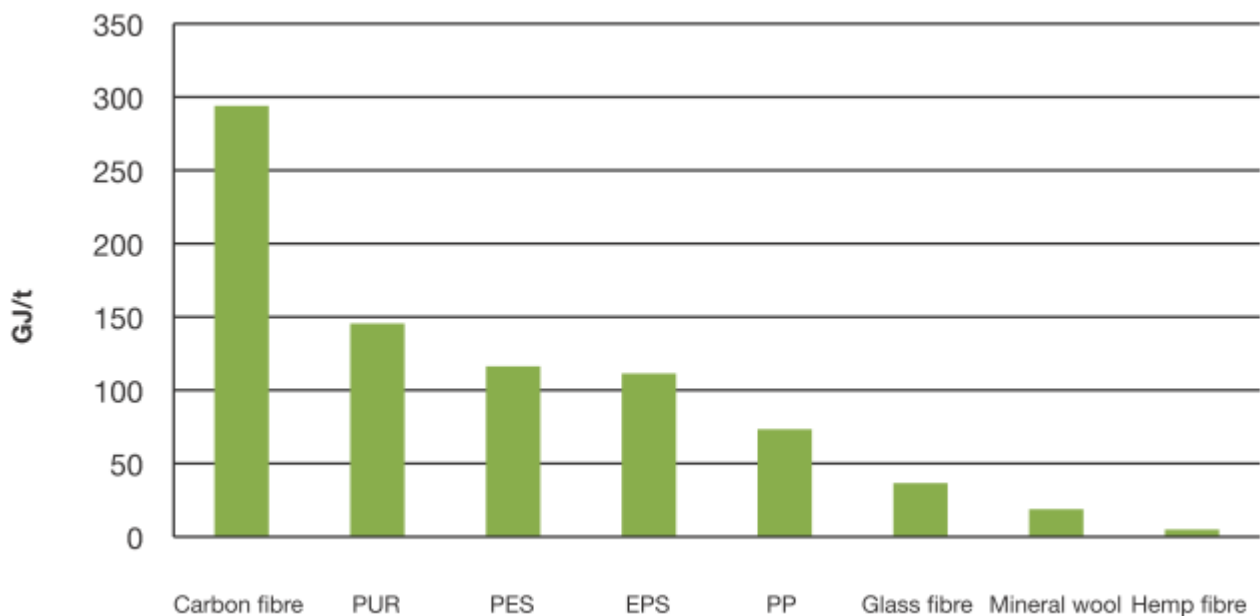


Abbildung 9: Primärenergiebedarf in der Herstellung verschiedener Materialien (Haufe & Carus, 2011, S. 6)

Es fällt auf, dass die Produktion von Hanffasern mit 5 GJ/t im Vergleich zu den anderen Materialien Carbonfasern, Polyurethan, Polyester, Polystyrol, Polypropylen, Glasfaser und Glaswolle nur einen Bruchteil an Primärenergie benötigt. Dabei machen Transportprozesse 0,8 GJ/t, Behandlung der Fasern 0,94 GJ/t, Verwendung von Landmaschinen 1,28 GJ/t und Düngung 1,95 GJ/t aus.

Des Weiteren wird der Energieaufwand zur Herstellung einer Türinnenverkleidung mit einem Verbundwerkstoff aus Epoxidharz und Hanffasern in die verschiedenen Herstellungsschritte

- Düngung und Samenherstellung,
- Hanfanbau,
- Behandlung der Fasern,
- Herstellung von Epoxidharz und Härtungsmittel,
- Produktion des Bauteils und
- Transport

aufgeteilt. Dabei fällt auf, dass 77,5% des Energieaufwandes der Herstellung des Epoxidharzes und dem Härtungsmittel zukommen, 17,2 % sind für die Produktion des Bauteils verantwortlich. Die anderen Schritte verursachen weniger als 2% des Energieaufwandes des Bauteils.

In den betrachteten Studien werden unterschiedliche technische Anwendungen bilanziert, unter anderem Vlies, Verbundwerkstoffe, Dämmstoffe für Gebäude, Textilien und Kraftstoffe. Abbildung 10 bietet einen Überblick über das Potential an Treibhausgaseinsparung in CO₂-Äquivalenten pro Hektar und Jahr bei Verwendung von Hanffasern statt fossilen Komponenten.

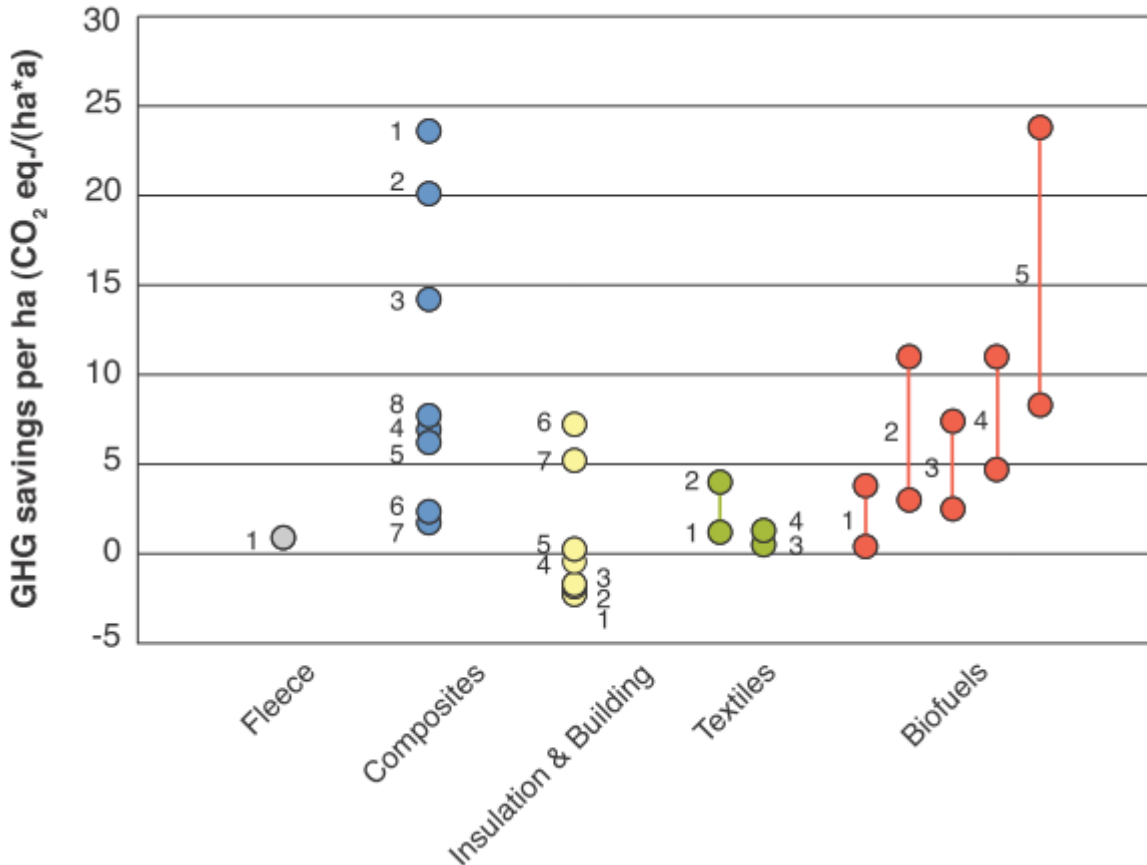


Abbildung 10: Einsparung von Treibhausgasen bei Verwendung von Hanffasern statt fossilen Materialien (Haufe & Carus, 2011, S. 15)

Die Ziffern stehen für die untersuchten Studien, bleiben hier aber unberücksichtigt.

Es fällt auf, dass bei jeder betrachteten technischen Anwendung ein positives Einsparpotential vorhanden ist. Eine Ausnahme bildet die Verwendung als Dämmstoff, hier bilanzieren vier von sieben Studien einen zusätzlichen Ausstoß an CO₂-Äquivalenten bei der Verwendung von Hanffasern.

Bei den Verbundwerk- und Kraftstoffen ist anzumerken, dass die Spanne vom niedrigsten bis zum höchsten Einsparpotential immens ist. Der Grund dafür sind die unterschiedlich gewählten Allokationsmethoden und Systemgrenzen in den Studien.

Weitere Möglichkeiten zur Einsparung von Energie und Treibhausgasen sehen die Autoren bei der Verringerung von fossilen Brennstoffen zur Herstellung von Verbundwerk- und Dämmstoffen und bei der Verwendung von organischem statt synthetischem Dünger. Zudem stehe die Technologie in Bezug auf die technische Verwendung von Hanffasern noch am Anfang und es könne davon ausgegangen werden, dass zukünftige Innovationen weitere Vorteile für die natürlichen Fasern bringen. Diese seien jedoch in weiteren Ökobilanzen, vorzugsweise über den gesamten Lebensweg, auf Umweltauswirkungen zu prüfen.

6.3. Life Cycle Analysis of field production of fibre hemp, the effect of production practices on environmental impacts (2004)

Dieser wissenschaftliche Artikel wurde von Hayo M.G. van der Werf im Jahr 2007 veröffentlicht und stellt eine Zusammenfassung einer von ihm verfassten Ökobilanz dar.

Die Studie bilanziert die Feldarbeit von Hanf und sieben weiteren Pflanzen. Dazu gehören die Pflanze der Sonnenblume, des Raps, der Erbse, des Weizens, des Mais, der Kartoffel und der Zuckerrübe. Es werden die Umweltauswirkungen während den Prozessmodulen Anbau, Ernte, Transport und Bearbeitung der Ernte untersucht und den Wirkungskategorien

- Eutrophierung,
- Klimawandel,
- Versauerung,
- terrestrische Ökotoxizität,
- Energiebedarf und
- Naturraumbeanspruchung

zugeordnet.

Die verwendeten Daten in dieser Studie zum Verbrauch von Ressourcen und einhergehender Emissionen während der Produktion und des Transports von Dünger und Landmaschinen entstammen der Schweizer Datenbank für Landwirtschaft aus dem Jahr 2001. Die Daten zum Energiebedarf wurden einer Datenbank des Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) entnommen und beziehen sich auf das Jahr 1996. Die Daten zu den Einträgen während des Anbaus und der Ernte wurden Studien und Gesprächen mit Experten entnommen. Bei den Daten zur Ausbeute pro Hektar handelt es sich um Durchschnittswerte aus den Jahren 1996-2000.

Der geographische Rahmen der Studie beinhaltet den Anbau in Frankreich.

In Tabelle 6 sind die Einträge auf das Feld und die Ernteerträge der untersuchten Pflanzen aufgeführt.

Tabelle 6: Benötigte Ressourcen zur Bewirtschaftung eines Hektars bei landwirtschaftlicher Nutzung verschiedener Pflanzen in kg/ha (van der Werf, 2004, S. 15)

	Hemp	Sunflower	Rape seed	Pea	Wheat	Maize	Potato	Sugar beet
N (ammonium nitrate)	75	85	110	0	130	100	170	220
P ₂ O ₅ (triple superphosphate)	38	32	41	46	64	51	80	101
K ₂ O (potassium chloride)	113	21	30	95	90	30	293	180
CaO	333	167	167	333	333	333	0	333
Seed for sowing	55	5	2.5	200	120	20	2,000	2.5
Pesticide (active ingredient)	0	1.0	2.9	3.2	2.9	3.5	5.5	3.7
Diesel	65	79	81	87	101	91	165	137
Natural gas (for grain drying)	0	0	0	0	0	167	0	0
Agricultural machinery	16.4	23.0	23.3	26.9	28.7	21.3	29.0	34.2
Grain dry matter yield	–	2,100	2,970	4,110	5,910	6,440	–	–
Stem/straw dry matter yield	6,720	–	–	1,410	3,870	–	–	–
Sugar/tuber dry matter yield	–	–	–	–	–	–	10,000	11,540

In der linken Spalte werden die verschiedenen Inputs während der Bewirtschaftung eines Hektars aufgeführt. Dazu gehören verschiedene Pflanzenschutzmittel sowie Kraftstoff für die Landmaschinen und die Bearbeitung der Ernte. Die unteren drei Zeilen geben die Erträge der Ernte wieder.

Es fällt auf, dass Hanf und Sonnenblumen im Vergleich zu den anderen Pflanzenarten niedrige Einträge benötigen. Die Ausbeute von Hanf liegt dabei im Mittel der übrigen Pflanzen, Sonnenblumen am unteren Ende. Kartoffeln und Zuckerrüben benötigen hohe Einträge, weisen zudem aber auch eine hohe Ausbeute auf. Die übrigen Pflanzen erfahren einen mittleren Eintrag, daraus resultiert eine mittlere bis niedrige Ausbeute.

Die Umweltauswirkungen in den verschiedenen Wirkungskategorien sind im Gegensatz zu den Ökobilanzen von PLA nicht in einem Balkendiagramm, sondern in einer Tabelle aufgezeigt.

Tabelle 7: Umweltauswirkungen von der Produktion verschiedener Pflanzen pro Hektar (van der Werf, 2004, S. 17)

Impact category	Unit	Hemp	Sunflower	Rape seed	Pea	Wheat	Maize	Potato	Sugar beet
Eutrophication	kg PO ₄ -eq.	20.5	20.2	20.6	34.4	21.9	21.0	23.8	24.1
Climate change	kg CO ₂ -eq.	2,330	2,300	2,700	2,890	3,370	3,280	4,120	4,900
Acidification	kg SO ₂ -eq.	9.8	10.8	12.8	8.3	16.3	13.6	22.4	24.5
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB-eq.	2.3	1.8	2.5	0.1	4.0	3.0	4.9	6.7
Energy use	MJ	11,400	11,900	13,800	11,800	18,100	23,000	25,600	26,300
Land use	m ² .year	10,200	10,000	10,000	10,500	10,200	10,100	10,400	10,200

In der Kategorie Eutrophierung, Klimawandel und Energiebedarf zeigen Hanf und Sonnenblumen die niedrigsten Umweltauswirkungen. In der Kategorie Eutrophierung übertreffen die Umweltauswirkungen von Erbsen deutlich die von Hanf, in der Kategorie Klimawandel zeigen Kartoffeln und Zuckerrüben die höchsten Emissionen. In der Kategorie Versauerung zeigen Erbsen und Hanf die niedrigsten, Kartoffeln und Zuckerrüben die höchsten

Emissionen. In der Kategorie terrestrische Ökotoxizität weisen Erbsen mit Abstand die geringsten Emissionen auf, wohingegen Zuckerrüben die anderen Produktsysteme deutlich übertreffen. Hanf liegt in dieser Kategorie im unteren Drittel. In der Kategorie Energiebedarf benötigt Hanf die geringste Menge an Energie zur Bearbeitung von einem Hektar, Kartoffeln und Zuckerrüben benötigen etwa zweieinhalbfache Emissionen.

Die Zuordnung der Emissionen von Hanf zu den Prozessmodulen Herstellung des Düngers, Herstellung der Pestizide, Herstellung der Maschinen, Herstellung und Verbrauch von Kraftstoff sowie eingetragene Emissionen auf das Feld folgt im weiteren Verlauf der Studie.

Die Eutrophierung wird zu etwa 95% den Emissionen auf das Feld zugeschrieben, die anderen Prozesse sind hierbei vernachlässigbar. Auch im Klimawandel zeigt sich dieser Prozess mit 41% am stärksten, darauf folgen die Herstellung von Stickstoff- und Calciumoxiddünger. Die Herstellung und der Verbrauch von Kraftstoffe macht sich in der Kategorie Klimawandel mit 10% der Emissionen bemerkbar. In der Kategorie Versauerung tragen die Prozesse Einträge in das Feld und Herstellung und Verbrauch von Kraftstoff jeweils zu etwa 30 % sowie die Herstellung von Maschinen sowie Stickstoff- und Phosphordünger zu etwa 10 % zu den gesamten Emissionen bei. Für den Energiebedarf sind hauptsächlich die Prozesse Herstellung und Verbrauch von Kraftstoffen, Herstellung von Stickstoffdünger sowie die Herstellung von Maschinen verantwortlich.

7. Vergleich und Diskussion der wissenschaftlichen Artikel aus 6.1 bis 6.3

Im Folgenden werden die Ergebnisse der drei vorgestellten wissenschaftlichen Artikel verglichen. Ein Vergleich der Lebenswegabschnitte, wie er in Kapitel 5 für PLA erfolgte, ist nicht möglich, da sie nicht in gleicher Aufteilung betrachtet wurden. Die Tatsache, dass die in den Zusammenfassungen analysierten Produkte mehrere technische Anwendungen bedienen, erschwert den Vergleich zusätzlich.

7.1. Energiebedarf

Der Energiebedarf wird in jedem zuvor beschriebenen Artikel bilanziert. Da er sich auf unterschiedliche funktionelle Einheiten bezieht, können keine absoluten Beträge verglichen werden. Es fällt jedoch auf, dass der Energiebedarf in Zusammenhang mit Hanf und im Vergleich zu anderen Stoffen gering ausfällt. Beim Lebensweg von einer Tonne Produkt aus 6.1 betrug der Energieaufwand des naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffes etwa ein Drittel gegenüber dem glasfaserverstärkten Verbundwerkstoff. In Abbildung 9 ist erkennbar, dass die Produktion von Hanffasern nur einen Bruchteil der Energie benötigt, die zur Herstellung von anderen Fasern für Verbundwerkstoffe aufgewendet werden muss. Der Energievergleich aus 6.3 zeigt, dass bestimmte Pflanzen im Vergleich etwa die gleiche Menge an Energie benötigen wie Hanf. Mais, Kartoffeln und Zuckerrüben hingegen benötigen deutlich mehr Energie.

7.2. Naturfaserverbundwerkstoffe

In 6.1 wird die technische Anwendung von Hanffasern als Verbundwerkstoff betrachtet und zeigt Vorteile gegenüber den konventionellen Verbundwerkstoffen. In Abbildung 10 weist das Treibhausgaseinsparpotential der Verbundwerkstoffe trotz großer Unsicherheiten im Mittel noch immer ein höheres Einsparpotential als die übrigen betrachteten Anwendungen auf.

Der höchste Energiebedarf der in 6.1 betrachteten Türinnenverkleidung fällt bei der Herstellung der aus konventionellen Kunststoffen hergestellten Matrix an. Daraus lässt sich schließen, dass durch die Verwendung eines höheren Anteils an Naturfasern im Produkt der Energiebedarf weiter gesenkt werden könnte.

8. Materialsteckbriefe

Die Materialsteckbriefe dienen dazu, die Umweltauswirkungen während den Lebenswegabschnitten der Materialien zusammenzufassen und einen Überblick zu gewährleisten.

Tabelle 8: Materialsteckbrief: PLA und konventionelle Kunststoffe

Lebenswegabschnitte	Polylactid	Umweltauswirkungen der Materialien	konventioneller Kunststoff
Herstellung der Rohstoffe		In der Herstellung der Rohstoffe entstehen auf beiden Seiten die meisten Umweltauswirkungen, es sind jedoch keine Unterschiede festzustellen.	
Fertigung der Produkte		Bei identischer Nutzung ergeben sich keine unterschiedlichen Umweltauswirkungen.	
Nutzung		Bei identischer Nutzung ergeben sich keine unterschiedlichen Umweltauswirkungen.	
Recycling	wertstoffliches Recycling chemisches Recycling	Bei wertstofflichem Recycling entstehen geringe Umweltauswirkungen, aber auch Gutschriften für das Sekundärmaterial. Bei chemischem Recycling wird Primärrohstoff von hoher Qualität hergestellt, es ist jedoch der Stand der Technik zu beachten.	wertstoffliches Recycling
Entsorgung	thermische Verwertung Kompostierung Vergärung	Thermische Verwertung erzeugt mittlere Umweltauswirkungen sowie Gutschriften, die vom Heizwert des Produkts abhängen. Kompostierung und Vergärung bringen mittlere Umweltauswirkungen, aber keine bis geringe Gutschriften mit sich.	thermische Verwertung

Tabelle 8 zeigt den Materialsteckbrief zum Vergleich von PLA und Hanffasern. In der linken Spalte sind die Lebenswegabschnitte aufgelistet. In den Spalten unter den genannten Stoffen befinden sich verschiedene Möglichkeiten wie der Lebensabschnitt theoretisch gestaltet sein kann. Hierbei ist zu beachten, was der aktuelle Stand der Technik an Varianten ermöglicht. Unter Umweltauswirkungen der Materialien sind die Informationen und Erkenntnisse der Kapitel 4 und 5 zusammengetragen.

Die Inhalte des Steckbriefes beziehen sich auf die aus den analysierten Ökobilanzen gewonnenen Informationen und Produktsysteme. Die Informationen können nicht ohne weiteres auf beliebige Produkte übertragen werden.

Tabelle 9: Materialsteckbrief zu Faserverbundwerkstoffen

Lebenswegabschnitte	Hanffaserverstärkter Verbundwerkstoff	Umweltauswirkungen der Materialien	Glasfaserverstärkter Verbundwerkstoff
Herstellung der Rohstoffe		Zur Herstellung der Hanffasern ist ein niedrigerer Energieaufwand nötig als für konventionellen Fasern.	
Fertigung der Produkte		Bei identischer Nutzung ergeben sich keine unterschiedlichen Umweltauswirkungen.	
Nutzung		Die geringere Dichte der Naturfaserverbundwerkstoffe senkt die Umweltauswirkungen gegenüber den Glasfaserverbundwerkstoffen. Außerdem ist während der Nutzung CO ₂ im Bauteil des Naturfaserverbundwerkstoffe gebunden.	
Recycling	nicht möglich	Die Verbundenheit der Fasern mit der verwendeten Matrix machen ein Recycling nicht möglich.	nicht möglich
Entsorgung	thermische Verwertung	Bei thermischer Verwertung von Hanffasern wird das gebundene CO ₂ frei, Glasfasern sind nicht thermisch verwertbar. Die Höhe der Gutschriften aus der konventionellen Matrix hängen vom Anteil im Bauteil ab.	thermische Verwertung

Tabelle 9 zeigt den Materialsteckbrief zum Vergleich von Verbundwerkstoffe mit Hanf- und Glasfasern. Da aus Hanf verschiedene Produkte hergestellt werden können, die sich aber in ihren Lebenswegabschnitten unterscheiden, wird ein naturfaserverstärkter Verbundwerkstoff für die Betrachtung herangezogen. Diese Anwendungen sind in der Industrie bereits etabliert. Ein weiterer Grund dafür ist, dass in der Zusammenfassung der Ökobilanz aus 6.2 der Energieaufwand aller Lebenswegabschnitte bilanziert wurde.

Der Aufbau von Tabelle 9 gleicht Tabelle 8.

Die Inhalte des Steckbriefes beziehen sich auf die Informationen aus (Haufe & Carus, 2011) und auf Faserverbundwerkstoffe mit einer Matrix aus konventionellen Kunststoffen. Sie sind nicht ohne weiteres auf andere technische Anwendungen, die aus Hanffasern hergestellt werden, übertragbar.

9. Diskussion weiterer Aspekte zu Kunststoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe

Die Herstellung von Kunststoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe in großem Stil stellt technisch gesehen keine große Herausforderung dar. Es gibt jedoch neben den umweltrelevanten Aspekten auch soziale, gesellschaftliche, technische und ökonomische Aspekte, die zusätzlich zu den Ökobilanzen dringend erörtert werden müssen.

9.1. Flächenkonkurrenz

Für die Rohmaterialgewinnung für Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe werden Pflanzen benötigt, die auf einer Fläche angebaut werden müssen. Da agrar- bzw. forstwirtschaftliche Fläche nicht unbegrenzt zur Verfügung steht, muss sie als Ressource betrachtet werden. Wird bisher landschaftlich ungenutzte Fläche für Agrarnutzung kultiviert, findet ein Eingriff in die Natur statt. Dieser Eingriff wirkt sich auf die Biodiversität und die Kohlenstoffspeicherbedingungen auf dieser Fläche aus. Entscheidend ist außerdem die Konkurrenz zwischen Pflanzen für energetische und stoffliche Zwecke und Pflanzen für Nahrungsmittel auf eben dieser Fläche.

9.2. Wasserbedarf

Um eine ertragreiche Ernte der Nutzpflanzen zu sichern, bedürfen die meisten Arten von Pflanzen neben dem lokalen Niederschlag einer Bewässerung. Hier ist nicht allein die Menge an benötigtem Wasser von Bedeutung, sondern auch ob sich das Anbaugebiet in Zonen der Erde mit Wasserknappheit befindet. Unter dieser Bedingung kann eine Konkurrenz zwischen Wasser als Nahrungs- bzw. Futtermittel und als industriell benötigte Ressource entstehen.

9.3. Gentechnisch modifizierte Organismen

In keiner der betrachteten Studien wird darauf eingegangen, ob die Pflanzen, die zur Herstellung des Rohmaterials benötigt werden, gentechnisch verändert sind, um zum Beispiel eine Resistenz gegen Schädlinge zu entwickeln.

Die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt werden bezüglich des Anbaus von Lebensmittel- und Futterpflanzen in Politik und Wissenschaft diskutiert. Wünschenswert ist hier eine Aufnahme in die Diskussion über industriell genutzte Pflanzen.

10. Bewertung der Datenlage und der Datenqualität

Die Qualität der in dieser Thesis getroffenen Aussagen steht unmittelbar mit der aktuellen Datenlage und ihrer Qualität in Zusammenhang. Im Folgenden findet eine kurze Bewertung statt.

10.1. Polylactid

Polylactid konnte sich mittlerweile in der Industrie etablieren und wird als Alternative zu konventionellen Kunststoffen verwendet. Dementsprechend gibt es eine große Vielfalt an Fachliteratur und Ökobilanzen, das Umweltbundesamt gibt in Anhang V seiner Studie 85 verschiedene Studien und Artikel zu diesem Stoff an. Diese Literatur ist für Interessierte über das Internet zu erreichen und einzusehen.

Um in dieser Arbeit ein aktuelles und umfangreiches Bild des Stoffes Polylactid zu repräsentieren, werden für die Analyse der Ökobilanzen diese ausgewählt, die den gesamten Lebensweg der Produkte betrachten und deren Veröffentlichung bzw. Datenerhebung in möglichst naher Vergangenheit liegen. Die betrachteten Studien stammen aus den Jahren 2006, 2011 und 2012. Die Erhebung der Daten liegt dabei teilweise mehr als zehn Jahre zurück, dies gilt insbesondere für die Prozessdaten zur Herstellung der konventionellen Kunststoffe sowie für die Datensätze bezüglich des Transports, Recyclings und der Entsorgung.

Die Autoren der Studien sehen die mangelnde Aktualität der Datensätze zu den konventionellen Kunststoffen wenig kritisch, da es sich um etablierte und bereits optimierte Verfahren handelt, bei denen in einem Zeitraum von zehn Jahren kaum Fortschritte zu erwarten sind.

Laut der Studie des Umweltbundesamtes kann die Lage der Daten bezüglich Recycling und Entsorgung von Biokunststoffen in Deutschland bisher nur als lückenhaft bezeichnet werden, da keine Unterscheidung zwischen konventionellen und biologischen Kunststoffen getroffen wird. Die verschiedenen Recyclingoptionen beruhen somit auf Annahmen oder Testreihen, die in der öffentlichen Entsorgung in Deutschland in dieser Form bisher nicht stattfinden.

Die Erhebung der Prozessdaten zur Herstellung von Polylactid liegt im Zeitraum der Erstellung der Studien.

Neben der Aktualität als relevantes Kriterium der Datenqualität, muss auch die Herkunft der Datensätze betrachtet werden. Die Prozessdaten zu Herstellung von Polylactid, Herstellung der Verpackungen sowie zu Recycling und Entsorgung werden von den jeweiligen Betreibern der Anlagen zur Verfügung gestellt.

Hierbei muss beachtet werden, dass eventuelle wirtschaftliche Interessen die Darstellung der Daten beeinflussen könnten. Dem kann mit einer unabhängigen Prüfung oder Datensätzen von verschiedenen Anlagen zum Vergleich entgegen gewirkt werden. Insbesondere im Falle der Herstellung des Polylactids wären Datensätze von anderen Herstellern als NatureWorks für eine unabhängige Bewertung hilfreich.

Die Daten zur Herstellung der konventionellen Kunststoffe werden in den Studien vom Verband europäischer Kunststoffhersteller bereitgestellt. Auch hier sind bei der Darstellung der Daten wirtschaftliche Interessen nicht auszuschließen, es werden jedoch Datensätze verschiedener Anlagen verwertet, was die Qualität steigert.

Abschließend kann die Datenlage als umfangreich und die zugehörige Qualität als gut beurteilt werden. Verbesserungspotential besteht in der Vielfalt bezüglich der Herkunft der Daten zur Herstellung von PLA und zur Entsorgungssituation in Deutschland.

10.2. Hanffasern

Hanffasern werden heutzutage ebenfalls in der Industrie, vor allem im Fahrzeugbau, eingesetzt. Laut eines Berichts der European Industrial Hemp Association existieren zum Lebensweg von industriellen Hanfprodukten mehrere Ökobilanzen aus den letzten 15 Jahren. Damit wäre eine Aktualität des Datenmaterials gegeben, auf die Studien konnte zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit jedoch nicht zugegriffen werden, im besten Fall war eine Zusammenfassung öffentlich erhältlich. Dementsprechend können die durchgeführten Schritte in den Ökobilanzen nicht im Detail analysiert und nachvollzogen werden, wie es bei Polylactid erfolgte.

Die Quellen zu den verwendeten Daten in den Ökobilanzen sind in den Zusammenfassungen nur kurz erläutert und beziehen sich hauptsächlich auf bereits vorhandene Studien oder Datensätze von Institutionen wie dem Ministerium für Landwirtschaft.

Im Vergleich zur Datenlage von Polylactid erweist sich die zu industriell genutzten Hanffasern als dürftig und verbesserungswürdig.

11. Fazit und Ausblick

Die Intention dieser Arbeit ist es zu erörtern, woraus die unterschiedlichen Meinungen in Bezug auf Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen resultieren und ob die vermeintlich umweltfreundlichen Biokunststoffe eine umweltverträgliche Alternative zu konventionellen Kunststoffen darstellen können.

11.1. PLA

Wie bereits in den Auswertungen der unterschiedlichen Studien erklärt, kann in einem Vergleich der Wirkungskategorien kein eindeutiger Vor- oder Nachteil für Kunststoffe aus Polylactid oder konventionellen Rohstoffen bilanziert werden. Die Anzahl der Wirkungskategorien, in denen Polylactid einen Vorteil gegenüber konventionellen Kunststoffen aufweist, gleicht der Anzahl der umgekehrten Situation. Bei Betrachtung der einzelnen Lebenswegabschnitte und verschiedener Szenarien bzw. Sensitivitäten können jedoch präzisere Aussagen getroffen werden.

In der Herstellung der Rohmaterialien von biologischen und konventionellen Kunststoffen entstehen in fast ausschließlich jeder Wirkungskategorie die höchsten Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Da es sich bei PLA jedoch um einen in der Industrie relativ neuen Werkstoff handelt, kann davon ausgegangen werden, dass zukünftige Technologien die Umweltauswirkungen verringern und sich eventuell ein Vorteil für PLA entwickelt.

Die Transportprozesse wirken sich weniger stark auf die Umweltauswirkungen aus. Zurzeit verursachen konventionelle Kunststoffe während dieses Lebenswegabschnitts jedoch weniger Emissionen als biologische Kunststoffe aus PLA. Der Grund dafür liegt vor allem darin, dass der Großteil des auf dem Markt verfügbaren PLAs in den USA hergestellt wird und so eine längere Transportstrecke zurücklegt als ein konventioneller

Kunststoff aus Europa. Bei einer zukünftigen Herstellung von PLA in Europa könnten sich die Umweltauswirkungen reduzieren und auf ein Niveau der konventionellen Kunststoffe fallen. Dazu müssen jedoch entsprechende Produktionsanlagen in Europa existieren.

Zwei entscheidende Lebenswegabschnitte der betrachteten Kunststoffe stellen das Recycling und die Entsorgung dar, da sie neben den verwendeten Rohstoffen unterschiedlich ausfallen können. Beide Kunststoffe können thermisch verwertet werden und so fossile Rohstoffe ersetzen. Des Weiteren können sie am Ende ihres Lebens als Sekundärrohstoff zu anderen Produkten verarbeitet werden. Bei erneutem Einschmelzen und Formen sinkt jedoch die Qualität des Kunststoffes, es sind nur wenige dieser Schritte möglich. Biokunststoffe besitzen zudem die Fähigkeit zum biologischen Abbau in Form von Kompostierung oder Vergärung sowie zum chemischen Recycling. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zeigen, dass beim biologischen Abbau deutlich mehr Umweltauswirkungen entstehen als beim chemischen Recycling, wofür der Kunststoff jedoch in einer sortenreinen Fraktion vorliegen muss, um reine Milchsäure zu erhalten. Dazu existieren aktuell keine Sortieranlagen, eine Entwicklung in der Zukunft ist jedoch möglich. Eine Kompostierung scheint für Produkte des alltäglichen Lebens wie Verpackungen ungeeignet, da der Kunststoff nicht unter den Voraussetzungen von Abfällen aus der Biotonne kompostiert. Zudem entstehen als Produkte Wasser und Kohlenstoffdioxid, es können keine Primärrohstoffe eingespart werden. Für eine in der Einleitung erwähnte sich in der Erde zersetzende Urne, kann die Fähigkeit zur biologischen Abbaubarkeit jedoch durchaus einen Vorteil darstellen, da sich nach einiger Zeit kein Fremdkörper mehr im Boden befindet.

Bezogen auf das ökologische Möbelstück kann Polylactid unter bestimmten Bedingungen eine umweltverträgliche Alternative darstellen. Es wird angenommen, dass obwohl es sich nicht um eine Verpackung wie in den untersuchten Studien handelt, die Umweltauswirkungen im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen in der Herstellung der Rohmaterialien und der Produktfertigung ähnlich ausfallen. Bei einem Möbelstück handelt es sich in der Regel um ein langlebiges Produkt, es wird also über einen längeren Zeitraum über die verwendeten Pflanzen Kohlenstoffdioxid im Kunststoff gebunden. Weitere Vorteile entstünden durch der Herstellung von PLA in Europa und der Möglichkeit einer sortenreinen Entsorgung.

Der Forschungsbedarf zu PLA liegt darin, in aktuellen Studien die prognostizierten Szenarien aus vorangegangenen Studien zu überprüfen sowie gegebenenfalls erneuerten Technologien zu bilanzieren und zu diskutieren. Für ein umfassenderes Ergebnis wäre es wünschenswert, die in Kapitel 9 erwähnten Aspekte ebenfalls in den Ökobilanzen aufzuzeigen und Produkte, die keine Verpackungen sind, zu bilanzieren.

11.2. Hanffasern

Die betrachteten Ergebnisse zur Verwendung von Hanffasern zeigen in der Herstellung der Rohstoffe für eine technische Anwendung in Form eines Verbundwerkstoffes oder als reine Faser einen Vorteil gegenüber der Herstellung von konventionellen Materialien. Der Energiebedarf fällt dabei deutlich niedriger aus. In der Produktion gibt es keinen Unterschied zwischen der Herstellung eines Bauteils aus naturfaserverstärkten oder glasfaserverstärkten Verbundwerkstoffen. Bei der Entsorgung mittels thermischer Verwertung zeigt sich ein kleiner Vorteil der Naturfasern gegenüber den Glasfasern. Dies ist jedoch maßgeblich vom Anteil an konventionellem Kunststoff in der verbindenden Matrix abhängig.

Des Weiteren ist ein Einsparpotential bezüglich Treibhausgasen bei der Verwendung von Hanffasern statt konventionellen Fasern gegeben. Das Einsparpotential fällt für die Verbundwerkstoffe besonders hoch aus, ist aber auch für Textilien, Vliese und Dämmstoffe auf Basis von Hanffasern vorhanden.

Zu Umweltauswirkungen in weiteren Wirkungskategorien kann keine Auskunft erfolgen, da kein Material diesbezüglich ausgewertet wurde.

Bezogen auf das Möbelstück lässt die theoretisch vorhandene Datenlage präzisere Vergleiche zwischen den in den Ökobilanzen untersuchten Produkten und dem Möbelstück zu. Bei den in den Studien untersuchten Produkten handelt es sich um Verbundwerkstoffe und Vliese, diese Anwendung ließe sich besser auf ein Möbelstück übertragen, als die in den Studien zu PLA untersuchten Verpackungen. So kann der Ersatz von konventionellen

Werkstoffen durch auf nachwachsenden Rohstoffen basierenden Werkstoffen durchaus eine umweltverträgliche Alternative bezüglich dem Energiebedarf und der Emission von Treibhausgasen darstellen.

Forschungsbedarf auf dem Gebiet der technisch genutzten Hanffasern besteht dahingehend, dass Datenbanken zu den verschiedenen Prozessmodulen, die bei der Hanfnutzung einhergehen, mit entsprechenden Daten bestückt werden und einsehbar sind. Damit sollte es möglich sein, ein differenzierteres Bild nach Lebenswegabschnitten zu erhalten.

Als ein weiteres Ziel für die Zukunft kann formuliert werden, dass in Verbundwerkstoffen der Anteil an Naturfasern erhöht wird, ohne dass sich das negativ auf physikalische Eigenschaften auswirkt. So sinken der Bedarf an konventionellen Kunststoffen sowie die Masse eines Bauteils und es können weitere Emissionseinsparungen verzeichnet werden.

12. Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Historische Entwicklung von Biokunststoffen (Technische Biopolymere, 2009, S. 21)	2
Abbildung 2: Schema zur Herstellung von Polylactid aus Milchsäure (Mathers & Meier, 2011, S. 203).....	3
Abbildung 3: Anwendungsgebiete der Bestandteile einer Hanfpflanze (Müssig, 2010, S. 110)	4
Abbildung 4: Bestandteile einer Ökobilanz (DIN EN ISO 14040:2006, S. 16).....	5
Abbildung 5: Beispiel eines Produktsystems für eine Ökobilanz (DIN EN ISO 14040:2006, S. 21).....	6
Abbildung 6: Ökobilanzieller Vergleich von Klappschalen aus PLA und PS in der Wirkungskategorie Humantoxizität: Feinstaub (PM 10) (Detzel, Kauertz, & Derreza-Greeven, 2012, S. 53).....	22
Abbildung 7: Vergleich der Becher aus vier Materialien und der Sensitivitäten bzgl. der Reinigung und Umlauftrate der Becher aus PC (Spirinckx & Geerken, 2006, S. 67)	24
Abbildung 8: Ergebnisse für die Wirkungskategorie Fossiler Ressourcenverbrauch von Joghurtbechern (Kauertz, Detzel, & Volz, 2011, S. 48)	25
Abbildung 9: Primärenergiebedarf in der Herstellung verschiedener Materialien (Haufe & Carus, 2011, S. 6).....	28
Abbildung 10: Einsparung von Treibhausgasen bei Verwendung von Hanffasern statt fossilen Materialien (Haufe & Carus, 2011, S. 15)	29
Tabelle 1: Verwendete Daten der Ökobilanz "Danone Activia-Verpackungen" (Kauertz, Detzel, & Volz, 2011).....	9
Tabelle 2: Verwendete Daten der Ökobilanz "A comparison of food packaging" (Detzel & Krüger, 2006)	13
Tabelle 3: Verwendete Daten der Ökobilanz (Spirinckx & Geerken, 2006).....	17
Tabelle 4: Vergleich der Wirkungskategorien in den vier untersuchten Ökobilanzen (Ergebnisse aus den untersuchten Studien, Tabelle eigene Darstellung)	21
Tabelle 5: Energieaufwand für eine Tonne Verbundwerkstoff verstärkt mit Hanf- und Glasfasern (Pervaiz & Sain, 2002, S. 335)	27
Tabelle 6: Benötigte Ressourcen zur Bewirtschaftung eines Hektars bei landwirtschaftlicher Nutzung verschiedener Pflanzen in kg/ha (van der Werf, 2004, S. 15)	31
Tabelle 7: Umweltauswirkungen von der Produktion verschiedener Pflanzen pro Hektar (van der Werf, 2004, S. 17).....	31
Tabelle 8: Materialsteckbrief: PLA und konventionelle Kunststoffe	33
Tabelle 9: Materialsteckbrief zu Faserverbundwerkstoffen	34

Abkürzungsverzeichnis

FFS	Form, Fill and Seal
FU	functional unit: funktionelle Einheit
GJ	Gigajoule
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
KEA	kumulierter Energieaufwand
Kg	Kilogramm
MJ	Megajoule
MVA	Müllverbrennungsanlage
PAF	Potentially Affected Fraction
PC	Polycarbonat
PDF	Potentially Disappeared Fraction
PET	Polyethylenterephthalat
PLA	Polylactid acid
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
ff	nach einer Seitenzahl: und folgende Seiten

Hrsg.	Herausgeber
PISA	Programme for International Student Assessment
S.	Seite
t	Tonne (1000 kg)
vgl.	vergleiche
WK	Wirkungskategorie

Literaturverzeichnis

- Abgerufen am 28. 05 2015 von <https://vito.be/en/about-vito>
- Auras, & Loong-Tak Lim. (2010). *Poly(lactid acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications*. John Wiley & Sons, Inc. .
- Detzel, & Krüger. (2006). *Life Cycle Assessment of Polylactid (PLA): A comparison of food packaging made from NatureWorks PLA and alternative materials*. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH.
- Detzel, Kauertz, & Derreza-Greeven. (2012). *Untersuchung der Umweltwirkungen von Verpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen*. Umweltbundesamt.
- Elsner, Eyerer, & Hirth. (2012). *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*. Wiley-VCH.
- Endres, & Siebert-Raths. (2009). *Technische Biopolymere: Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften*.
- Franck. (2005). *Bast and other plant fibres*. Woodhead Publishing.
- Haufe, & Carus. (2011). *Hemp Fibres for Green Products – An assessment of life cycle studies on hemp fibre applications*. (n.-I. GmbH, Hrsg.) Hürth.
- Hauff, V. (Hrsg.). (1987). *Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung*. Eggenkamp Verlag.
- Herer, & Bröckers. (1996). *Die Wiederentdeckung der Nutzpflanze Hanf Cannabis Marihuana*. München: Wilhelm Heyne Verlag.
- Kaplan. (1998). *Biopolymers from Renewable Resources*.
- Kauertz, Detzel, & Volz. (2011). *Ökobilanz von Danone Activia-Verpackungen aus Polystyrol und Polylactid*. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH.
- Lampke. (2001). *Beitrag zur Charakterisierung naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe mit hochpolymerer Matrix*. Chemnitz.
- Mathers, & Meier. (2011). *Green Polymerization Methods: Renewable Starting Materials, Catalysis and Waste Reduction*.
- Michaeli, Haberstroh, & Schmachtenberg. (2002). *Werkstoffkunde Kunststoffe*.
- Müssig. (2010). *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. John Wiley & Sons Ltd.
- ökoRAUSCH - Festival für Nachhaltigkeit & Design. (25. 05 2015). Von www.oekorausch.de abgerufen
- Pervaiz, & Sain. (2002). *Carbon storage potential in natural fiber composites*. Toronto.
- Pflanzenforschung. (25. 05 2015). Von URL: <http://www.pflanzenforschung.de/de/themen/lexikon/photosynthese-285> abgerufen
- Schebek. (2014). *Vorlesung Life Cycle Assessment und Stoffstromanalyse, Einheit 8, Wirkungsabschätzung II*.
- Spirinckx, & Geerken. (2006). *Comparative LCA of 4 types of drinking cups used at events*. Openbare Afvalstoffenmaatschappij voor het Vlaamse Gewest.
- van der Werf. (2004). 6.3. *Life Cycle Analysis of field production of fibre hemp, the effect of production practices on environmental*. Rennes: Kluwer Academic Publishers.
- van der Werf, & Turunen. (2007). 6.2. *Hemp Fibres for Green Products – An assessment of life cycle studies on hemp fibre applications*. Rennes.
- Winter, J. (25. 05 2015). *Jakob Winter - Hersteller für Spezialkoffer*. Von <http://www.jakob-winter.de/> abgerufen

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß §22, Abs. 7 APB

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher Form oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den _____

Unterschrift