

Fahrzeuge und Batterien

– Recycling als Bestandteil des Life Cycle Assessment der Fahrzeugindustrie –

Holger Lieberwirth, Thomas Krampitz und Michael Stegelmann

1.	Ökobilanzierung im Fahrzeugbau	295
2.	Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit neuartiger Leichtbaustrukturen im Produktentwicklungsprozess	296
3.	Integration des Recyclings in die Konstruktionssystematik	298
4.	Integration des Recyclings in die Ökobilanzierung.....	300
5.	Erweiterte Betrachtungen und Modellanpassung	302
5.1.	Gesetzliche Rahmenbedingungen	302
5.2.	Wirtschaftliche Bedeutung der Abfälle und Einfluss auf die Recyclingstrategie.....	303
5.3.	Grenzen des Recyclings.....	304
5.4.	Nachhaltiger Produktlebenszyklus.....	305
6.	Zusammenfassung	306
7.	Quellen	307

1. Ökobilanzierung im Fahrzeugbau

Die Methode der Ökobilanzierung, auch Life Cycle Assessment (LCA) genannt, soll Umweltaspekte und potentielle Umweltwirkungen aufzeigen – z.B. Nutzung von Ressourcen und Umweltauswirkungen von Emissionen – die mit der Produktion und Anwendung von Produkten oder Dienstleistungen im Zusammenhang stehen. Die Bilanzierung umfasst dabei ein- und ausgehende Stoffflüsse eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges. Der Lebensweg stellt die aufeinander folgenden und miteinander verbundenen Stufen eines Produktsystems von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung dar. Grundsätzlich können die bei einer Ökobilanz-Analyse gewonnenen Informationen als Teil eines weitaus umfassenderen Entscheidungsprozesses dienen [3].

Den Anspruch, ökologische Auswirkungen der Bestandteile eines Fahrzeugs von Anfang an zu berücksichtigen, verfolgt die BMW Group mit dem Instrument des Life Cycle Assessments (LCA) [1].

Die Fahrzeugindustrie nutzt das Instrument der Ökobilanzierung, um in bereits frühen Phasen der Produktentwicklung Einfluss auf die ressourceneffiziente Gestaltung von Strukturbauteilen zu nehmen [1]. Die steigende Komplexität von Fahrzeugen lässt dabei erwarten, dass aktuelle Trends der Fahrzeugindustrie, wie etwa die steigende Werkstoffvielfalt, die hohe Komplexität der Fertigungs- und Montageprozesse, der allgegenwärtige Kostendruck oder die Notwendigkeit einer ressourceneffizienten Fertigung, weiter zunehmen werden [2].

Der Systemleichtbau ist von der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) als eine Schlüsseltechnologie für Elektrofahrzeuge der Zukunft identifiziert worden. Dabei ist Leichtbau mittlerweile weit mehr als nur die Minimierung der Bauteilmasse. Gerade die zahlreichen Möglichkeiten zur Funktions- und Bauteilintegration in Verbindung mit ressourceneffizienten Fertigungsverfahren heben das enorme Potential von Leichtbautechnologien hervor [6]. Ein Beispiel für eine hybride Leichtbautür mit zahlreichen Funktionselementen ist in Bild 1 dargestellt.

Zum Verständnis komplexer Systeme empfiehlt sich die Zerlegung der gesamten Fertigung in Einzelschritte. Hierbei werden Teilprozesse in verschiedenen Detaillierungsebenen miteinander zu einer Prozesskette verknüpft, deren Zusammenhänge über eine virtuelle Modellierungsplattform dargestellt werden. Durch Einbindung von Prozesskettenanalysen sowohl in den Produktentwicklungs- als auch in den Fertigungsprozess ergibt sich ein wirkungsvolles Werkzeug, um die Komplexität zu strukturieren.

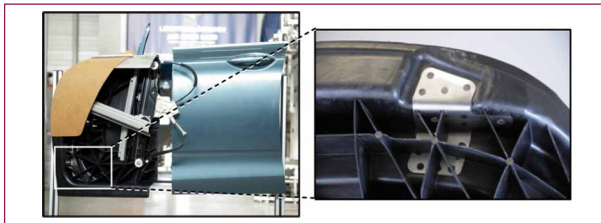


Bild 1:

Demonstrator aus dem Projekt HyPTuer (Hybride PKW-Tür)

Quelle: Gude, M. et al.: FOREL-Studie; Chancen und Herausforderungen im Ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität. TU Dresden Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Dresden, 2015. ISBN: 978-3-00-049681-3

Um Prozessschritte ökologisch zu bewerten und Energie- und Stoffkreisläufe zu verstehen, ist die Integration einer Ökobilanzierung in die Prozesskettenanalyse ebenfalls von entscheidender Bedeutung [6]. Inwieweit das Recycling im Lebenszyklus Berücksichtigung findet und welche Rahmenbedingungen zu beachten sind, wird im Folgenden näher erläutert.

2. Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit neuartiger Leichtbaustrukturen im Produktentwicklungsprozess

Von der NPE wurde das *Forschungs- und Technologiezentrum für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität* (FOREL) initiiert, welches entsprechende Forschungsprojekte systematisch koordiniert und den vorwettbewerblichen,

projektbezogenen Austausch aller beteiligten Partner fördert. Im Rahmen eines Technologiezentrums sollen die Entwicklungsergebnisse validiert und unterschiedliche Prozessketten langfristig zu einem umfassenden Netzwerk verknüpft werden.

Im Rahmen des FOREL-Koordinationsprojekts wurde 2014 unter Federführung des Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK, TU Dresden) gemeinsam mit dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF, Universität Paderborn), dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb, Technische Universität München) sowie dem Institut für Aufbereitungsmaschinen (IAM, Technische Universität Bergakademie Freiberg) eine Umfrage unter Entscheidern und Experten der Fahrzeugindustrie und Zulieferindustrie durchgeführt. Anhand von 240 Experteneinschätzungen wurden aktuelle Chancen und Herausforderungen von Leichtbautechnologien bezogen auf den Werkstoffeinsatz, die Fertigung, die Füge- und Trenntechnologie sowie das Recycling und die Prozesskettenanalyse identifiziert. Die Befragten wurden unter anderem gebeten, Fragen zur Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit in verschiedenen Entwicklungsphasen neuer Leichtbaustrukturen im Fahrzeugbau zu beantworten. Ausgehend von der Konzeptphase reicht die Produktentwicklungsphase über mehrere Teilschritte bis zur Produktnutzung. Aus den in Bild 2 dargestellten Antworten lassen sich folgende Aussagen ableiten:

Die Berücksichtigung einzelner Aspekte der Produktentwicklung findet in unterschiedlichen Entwicklungsphasen statt. In der Konzept- und Entwurfsphase sind die Kosten und die Struktureigenschaften hoch priorisiert. Die Recyclingfähigkeit rückt erst ab der Prototypen- und Serienentwicklung in den Vordergrund. Festzuhalten ist, dass insbesondere die Betrachtung der Recyclingfähigkeit zwar relativ breit über die Entwicklungsphase neuer Produkte verteilt ist, jedoch im Vergleich zu den Kosten und Struktureigenschaften erst später erfolgt [6].

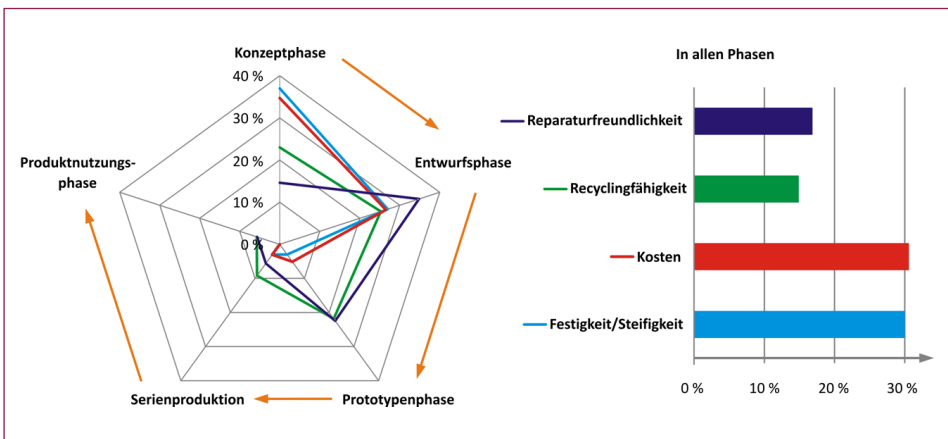


Bild 2: Prozentuale Auswertung der Antworten auf die Frage: Zu welchem Zeitpunkt der Produktentwicklung werden folgende Aspekte berücksichtigt? Antwortmöglichkeiten: Kosten, Struktureigenschaften, Reparaturfreundlichkeit und Recyclingfähigkeit; (a) Einzelphasen (b) Anteil der Befragten mit Berücksichtigung in allen Entwicklungsphasen

Quelle: Gude, M. et al.: FOREL-Studie; Chancen und Herausforderungen im Ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität. TU Dresden Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Dresden, 2015. ISBN: 978-3-00-049681-3

So ergibt sich das Potential zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit, wenn bereits in der Konzeptphase verstärkt Recyclingstrategien berücksichtigt und ein hoher Grad der stofflichen Verwertung verfolgt wird. Schon bei der Konstruktion sollten Daten zur Recyclingfähigkeit von Komponenten und deren Umweltwirksamkeit vorliegen, so dass nachhaltige Produkte entwickelt werden können.

3. Integration des Recyclings in die Konstruktionssystematik

Bei der Entwicklung neuer Produkte nimmt die werkstoffgerechte Konstruktion einen zentralen Bestandteil ein. Gerade bei der Kombination von Stahl, Leichtmetallen und Faserkunststoffverbunden (FKV) in Bauteilen müssen dabei die spezifischen Eigenschaften berücksichtigt und zudem die Verbindungs- und Fügestellen werkstoffgerecht ausgeführt werden. Das Recycling spielt dabei aktuell nur eine untergeordnete Rolle.

Eine Möglichkeit zur Integration von Recyclingaspekten in den Konstruktionsvorgang schlägt Reuter vor [12]. Über Auswahl des Werkstoffs oder Baugruppen werden mittels einer Datenbank mit hinterlegten werkstofflich- und baugruppenspezifischen Recyclingmodellen die Kosten an den Konstrukteur zurückgegeben, welche die entsprechende Recyclingraten, Energiebedarfe und usw. berücksichtigen. Jedes Recyclingmodell verfügt über mehrere Prozessschritte, die zu einer Prozesskette verknüpft sind. Für die Prozessschritte sind spezifische Energieverbräuche sowie weitere Kennzahlen hinterlegt. Die Kennzahlen werden mit Kosten und Umweltwirkungen oder weiteren unternehmerischen Kennzahlen untersetzt, bewertet und dem Konstrukteur bei der Auswahl eines Werkstoffes oder Bauteils zur Verfügung gestellt. Über den Vergleich verschiedener Alternativen kann eine optimierte Variante des zu erstellenden Bauteils generiert werden. Das Bild 3 zeigt schematisch die Einbindung des Recyclings in die Konstruktionsumgebung.

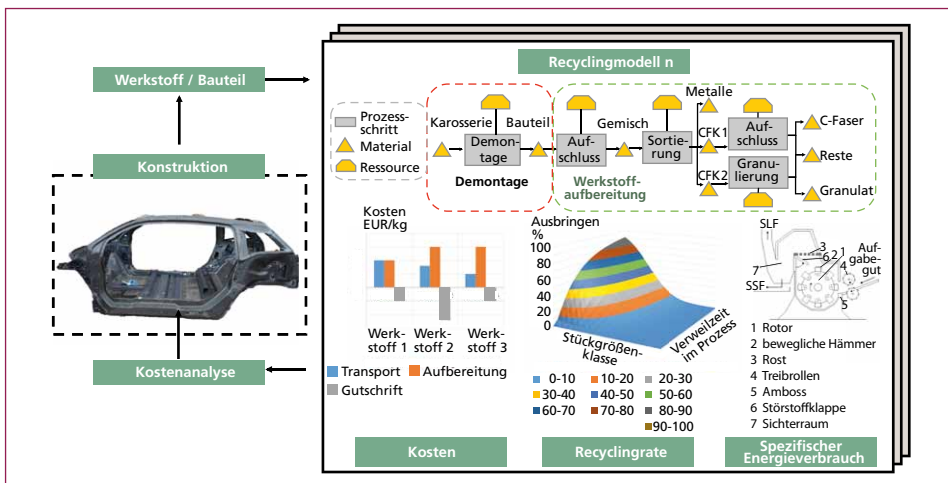


Bild 3: Schema zur Einbindung des Recyclings in die Konstruktionsumgebung

Quelle: Reuter, M.: The Niche of Metallurgy in Design for Sustainability. In: World of Metallurgy-Erzmetall; 62 Nr. 5. GDMB-Verlag, 2009

Zur verbesserten Integration des Recyclings sind weitere Daten zu Verbauungszustand und Menge der verbauten Komponenten oder Teilprodukte zu erfassen und analysieren. Die Produkte des Recyclings müssen entsprechend der Erfordernisse der Qualitätssicherung charakterisiert und anschließend katalogisiert werden, um wieder in die Werkstoffdatenbanken der Konstrukteure aufgenommen werden zu können. Metallische Werkstoffe wie Stahl sind ohne Eigenschaftsänderung durch das Recycling wieder einsetzbar. Recyclingprodukte aus Kunststoff oder anderen nichtmetallischen Werkstoffen unterliegen oft Eigenschaftsänderungen. Die geänderten Eigenschaften der Rezyklate bzw. daraus entwickelter Zwischenprodukte sind ebenfalls zu charakterisieren. Dazu sind in bestimmten Fällen sogar noch geeignete Messverfahren zu entwickeln und zertifizieren. Die Fahrzeugindustrie sieht nach Aussagen der FOREL-Studie in der Charakterisierung und Katalogisierung von Recyclingprodukten die größte Hemmschwelle zum Wiedereinsatz in der Fertigung [6, 10]. Hier besteht daher großer Handlungsbedarf.

Im Rahmen des Koordinationsprojektes FOREL erfolgten Aufschlussversuche zur Freilegung von Kohlenstofffasern aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK). Dabei mussten zur Prozesskennzeichnung die Produkte charakterisiert und für einen späteren Wiedereinsatz in der Fertigung neuer Bauteile katalogisiert werden. Folgende Erkenntnisse über die Produktcharakterisierung konnten erzielt werden:



Bild 4:

Produkte aus der CFK-Aufbereitung, links: CF-PA6-Granulat, rechts: C-Faser-Bündel

Für die Gewinnung von Kohlenstofffasern aus CFK-Strukturen können verschiedene Aufschlusstechnologien eingesetzt werden. Die Unterschiede zwischen den Technologien liegen in der Verfügbarkeit, dem Energieaufwand und vor allem der Qualität der Produkte. Die Kennzeichnung des Aufschlussenerfolges muss zwingend über die Charakterisierung der Produkte geschehen, wobei hierfür unterschiedliche Methoden bzgl. ihrer Eignung untersucht wurden. Der Wiedereinsatz der Recyclingfasern ist von der Qualität der Fasern abhängig, definiert wesentlich über Faserlänge, Matrixanhaftungen, Oberflächenschädigungen und verbliebener Schlichte. Die Produktqualität der zurückgewonnenen Kohlenstofffasern bestimmt Möglichkeiten des Wiedereinsatzes. Dabei gelten die Anforderungen der nachfolgenden Verarbeitungsprozesse als Mindestanforderung an die Recyclingprodukte. In Bild 4 sind ausgewählte Recyclingprodukte beispielhaft dargestellt.

Tabelle 1: Schematische Übersicht über die Systematisierung zwischen Produkteigenschaft und Weiterverarbeitung zu Zwischenprodukten *)

Fasermerkmal	Kriterium	Kurzfaserverstärkte Thermoplaste	Faserverstärkte Duroplaste	Hybridgarn	Faservlies	
	Technologie	Spritzgießen	Gelege	Zwirnen	Trockenverfahren	Nassverfahren
Faserlänge	< 5 mm	+	-	-	-	ab 4 mm
	5...10 mm	-	-	ab 6 mm	-	+
	>10 mm	-	Endlofaser	+	ab 20 mm	+
Matrixanhaftung	Einzelfaser ohne Anhaftungen	+ wie Neuware				
	Einzelfaser oder Faserbündel mit Restanhaftung	1, 2	1	2	-	1, 2
	Restverbund	1, 2	1	-	-	-
Oberflächenschädigung	ohne Schäden	+ wie Neuware				
	Fehlstellen	Reduktion der mechanischen Eigenschaften				
Schlichte	unbeschädigt	+ wie Neuware				
	keine	1	-	-	-	1
	erneuert		1			

¹ Verträglichkeit der Schlichte oder Restanhaftungen von Matrix mit neuem Einsatzfeld

² Eignung der Eigenschaften für Verarbeitungsverfahren

*) Angaben über Faserlängen sind Richtwerte, da abhängig vom Verfahren

Der Wiedereinsatz von Rezyklatfasern kann als Kurzfaser, mit weiteren Qualitätsanforderungen auch in Thermoplast-Granulat, und als Langfaser in Hybridgarnen oder bei der Vliesherstellung erfolgen. Aus den Produktqualitäten und den Wiedereinsatzmöglichkeiten spannt sich der in Tabelle 1 beispielhaft gezeigte Katalog auf. Darin zeigt sich, dass bei Erreichen von Neuwarequalität selbstverständlich viele Zwischenprodukte wie Garne, Vliese, Mahlgut und Kurzfaserprodukte hergestellt werden können. Bei minderwertiger Qualität, vor allem bei zu kurzen Fasern und Restanhaftungen, ist der Wiedereinsatz abhängig vom Verarbeitungsverfahren und vom Kunststoffsystem der Einbettung. Erst ein Katalog mit Angaben über Zustand und Eigenschaften der Recyclingprodukte ermöglicht deren anwendungsgerechte Auswahl und den qualifizierten Wiedereinsatz. Dies gilt selbstverständlich nicht nur für rezyklierte Kohlefasern sondern generell für Recyclingprodukte.

4. Integration des Recyclings in die Ökobilanzierung

Der Lebenszyklus eines Produktes unterteilt sich in mehrere Abschnitte, wobei das Recycling meist den letzten Lebensabschnitt (End-of-Life) darstellt und nicht bei jeder Analyse mitbetrachtet wird. Nach Finkbeiner hat das Recycling von Werkstoffen einen Einfluss auf die Ökobilanz. Über Substitution von Werkstoffen sowie energieeffiziente Recyclingtechnologien können sich Gutschriften für die Ökobilanz ergeben. Finkbeiner führt als Beispiel den Stoffkreislauf von Stahl an [5].

Unter Berücksichtigung einer Kreislaufwirtschaft ist das Recycling nicht nur der letzte Lebensabschnitt, sondern ein Bestandteil des Stoffkreislaufs, der Rohstoffe dem Kreislauf wieder zur Verfügung stellt.

Das Recycling kann daher auch als erster Zyklusschritt der Rohstoffversorgung betrachtet werden und besitzt eine Schnittstelle zur Herstellung neuer Produkte. Die Schnittstelle zum Wiedereinsatz von Recyclingprodukten sollte bei allen Produktentwicklungen zwingend mitbetrachtet werden. Zudem können auch Abfälle aus der Produktion oder aus der Nutzungsphase dem Recycling zugeordnet werden. Die Einbindung des Recyclings in das LCA führt daher zu einer komplexeren Prozessstruktur. Die Methodenentwicklung zur Einbindung der Recyclingphase in die Ökobilanzierung und deren Umweltwirkungen beschreibt Finkbeiner in seinen Arbeiten. Er empfiehlt eine gemeinsame Betrachtung von Primär- und Sekundärrouten [4, 5].

Die zunehmende Leichtbauweise in Multi-Material-Design und Elektrifizierung des Antriebstrangs von Fahrzeugen ermöglicht und erfordert die Anwendung neuer Werkstoffe (Metalllegierungen, FVK, Hybridwerkstoffe) sowie Baugruppen (Batterien, Elektromotor). Dies geht einher mit angepassten Fertigungsprozessen (Kombinationsverfahren) und führt zwangsläufig auch zu Produktionsresten [10]. Aus Sicht der Fahrzeugindustrie sind im Zusammenhang mit dem Recycling vor allem folgende Aspekte aus einer Ökobilanzierung von Relevanz:

- Ableitung einer wirtschaftlichen und ökologischen Recyclingstrategie (internes Recycling oder externe Verwertung) für Produktionsabfälle,
- Einhaltung von Verwertungsquoten bei der Aufbereitung von Altfahrzeugen [13],
- Verfügbarkeit und Absicherung der Preisstabilität produktionsrelevanter Rohstoffe,
- Wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen einer Substitution von Werkstoffen oder Bauteilen (Ersatz von Primär- durch Sekundärrohstoffe),
- Abschätzung von Umweltwirkungen für das Gesamtfahrzeug oder Teilstrukturen.

Die FOREL-Studie zeigt, dass die Bedeutung des Recyclings für Leichtbaustrukturen zunimmt [6]. Für die künftige Anwendung neuartiger Strukturkomponenten sind daher geeignete Recyclingstrategien für die Fahrzeugbauer und Zulieferer von hoher Bedeutung.

Dabei wird nicht nur deutlich, dass die Entwicklung neuer, insbesondere für Leichtbauwerkstoffe und -werkstoffkombinationen geeigneter Recyclingtechnologien zu forcieren ist, sondern auch, dass eine recyclinggerechte Bauteilentwicklung und Konstruktion stärker thematisiert werden muss. In diesem Zusammenhang sollen entsprechende Herausforderungen betrachtet und auf die Bedingungen für ein Recycling eingegangen werden.

5. Erweiterte Betrachtungen und Modellanpassung

Das Recycling findet innerhalb eines Systems mit definierten Grenzen, Einfluss- und Zielgrößen statt. Als Zielgrößen dienen Prozesskennzahlen, die für die anschließende Prüfung der Umweltwirkungen genutzt werden. Für die Kennzahlen können beispielsweise der spezifische Energieaufwand eines Prozessschrittes oder der kumulierte spezifische Energieaufwand einer Prozesskette relevant sein. Im Bereich kohlefaserverstärkter Kunststoffe ist aber auch der Aspekt der möglichst vollständigen Rückgewinnung der energetisch sehr aufwändig herzustellenden Kohlenstofffasern in hochwertiger Qualität von Bedeutung. Die Einflussgrößen auf das Recycling unterteilen sich in vier Bereiche mit einer Vielzahl von Unterpunkten, die schematisch wie in Bild 5 aufgeteilt werden können.

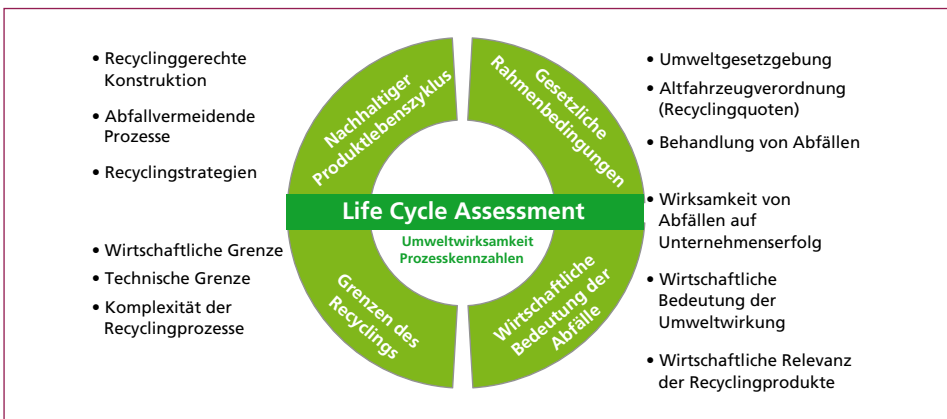


Bild 5: Einflussgrößen auf die Auswahl einer Recyclingstrategie und -technologie

5.1. Gesetzliche Rahmenbedingungen

In Deutschland gilt das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) [9]. Sobald der Abfallcharakter zu erkennen ist, sind Abfälle einer Behandlung zuzuführen, wobei für den Transport zur Anlage die Abfallverbringungsverordnung (VVA) bedeutsam wird. Die Zusammenführung der Abfälle ist für den wirtschaftlichen Betrieb der Abfallbehandlungsanlage erforderlich [14]. Für Recyclingunternehmen gehört die Logistik von Abfällen daher zum Tagesgeschäft und findet Berücksichtigung in der Ökobilanzierung.

Mit Zunahme der Leichtbaustrukturen in Fahrzeugen werden vermehrt hochpreisige Werkstoffe wie Aluminiumlegierungen, Vergütungsstähle oder FVK eingesetzt. Damit verbunden sind spezifische Wertsteigerungen der Produktionsabfälle, die einen signifikanten Anteil an den Produktionskosten ausmachen. Fahrzeughersteller sowie Zulieferer neigen dazu, einerseits Abfälle über Prozessanpassungen zu vermeiden oder diese andererseits intern zu recyceln, wie die FOREL-Studie zeigte [6]. Die Weiterverwendung von Produktionsresten an anderer Stelle oder die Aufbereitung zu Recyclingprodukten soll die Kosten des Materialeinsatzes senken.

Neben der Entwicklung adaptiver Recyclingtechnologien für Produktionsreste, stellt der wirtschaftliche Betrieb der Recyclinganlage eine große Herausforderung dar. Eine Möglichkeit der höheren Auslastung besteht in der Zusammenführung von Produktionsresten aus mehreren Standorten des Unternehmens in einer Recyclinganlage. Sobald dabei jedoch der Abfallcharakter zu erkennen ist, unterliegt der Transport der Abfallverbringungsverordnung. Falls für den wirtschaftlichen Betrieb der Anlage zudem externe Abfälle hinzugezogen werden sollen, stellen sich aufgrund der restriktiven Abfallgesetzgebung komplexe juristische Fragestellungen für den Betrieb der internen Recyclinganlage. Fahrzeughersteller oder Zulieferer sehen sich plötzlich veränderten Rahmenbedingungen gegenüber, die zu einer Anpassung der Recyclingstrategie oder anderen unternehmerischen Entscheidungen (Ausgründung, Lizenzvergabe, Entsorgung trotz vorhandener Recyclingtechnologie) führen. Vor allem hochpreisige Werkstoffe mit geringen Masseströmen sind hiervon betroffen, bei denen effektive Recyclingtechnologien durch die restriktive Abfallgesetzgebung beeinflusst werden. Für die Ökobilanzierung bedeutet dies, dass technologisch fortschrittliche Recyclingtechnologien zwar vorhanden sein können, aber aufgrund der Rahmenbedingungen entweder nicht zum Einsatz kommen oder durch ressourcenineffizientere Technologien ersetzt werden.

5.2. Wirtschaftliche Bedeutung der Abfälle und Einfluss auf die Recyclingstrategie

Die FOREL-Studie zeigte eine hohe wirtschaftliche Relevanz von Produktionsabfällen in der Fahrzeugindustrie. Die Fahrzeughersteller selbst stimmten mit 45 % und die Zulieferer mit 29 % der Frage nach einer wirtschaftlichen Relevanz von Produktionsabfällen zu [6].

Abfall entsteht allerdings erst bei einem Entledigungswillen des Verursachers für Produkte der Fertigung oder Zwischen- bzw. Nebenprodukte. Eine Übersicht über Produkte mit Zuordnung zu den Sachzielen im Unternehmen sowie deren Einfluss auf den Geschäftserfolg zeigt Bild 6. Abfälle sind kein Sachziel von Unternehmen und deren Entsorgung führt zur unmittelbaren Minderung des Unternehmenserfolges. Einsparungen von Abfällen und/oder Kostensenkung der Entsorgung sind daher erfolgsrelevant.

Nebenprodukte können beispielsweise Ersatzteile, Zwischenprodukte oder Stanzreste sein, die an anderer Stelle weiterverwendet werden. Kuppelprodukte entstehen zwangsläufig und können vermarktbare Produktionsreste (Kunststoffe) mit Erlösmöglichkeit sein. Eine strenge Unterteilung ist nicht möglich, weil Abfälle in Abhängigkeit von der Absatz- und Marktsituation zu Nebenprodukten und diese wiederum zu Hauptprodukten werden können. Wie Bild 6 zeigt, sind vor allem die Nicht-Sachziele stark von der Marktsituation der zugrunde liegenden Werkstoffe abhängig. Die Abfallentstehung ist daher maßgeblich mit dem Marktwert der anderen Produkte verbunden. Menge und stoffliche Zusammensetzung der Abfälle haben daher keinen stabilen Zustand und unterliegen Marktschwankungen bzw. -Entwicklungen.

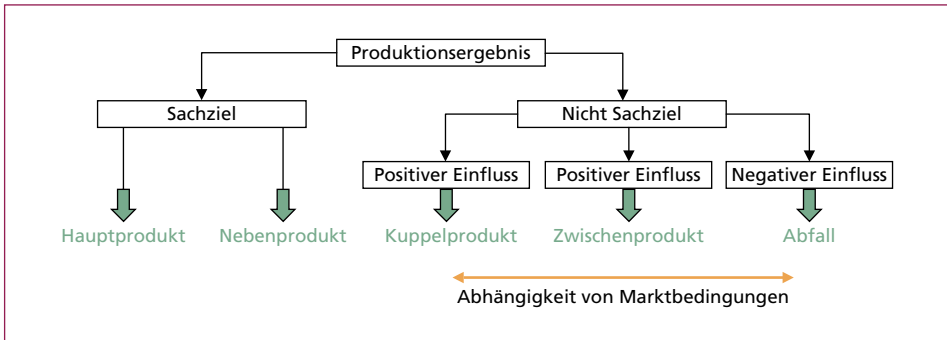


Bild 6: Mögliche Produktionsergebnisse und deren Einfluss auf den Geschäftserfolg

Quelle: Müller, H.: Industrielle Abfallbewältigung, Entscheidungsprobleme aus Betriebswirtschaftlicher Sicht. In: Dissertation, Band 38. Bochum: Gabler Verlag, 1990; ISBN 3-409-19940-3

Bei niedriger Erlössituation der Produkte steigt die Menge an nicht absatzfähigen Produkten und damit verbunden die Abfallmenge. Dies führt zwar zu einer steigenden Auslastung der Recyclinganlage, allerdings können niedrige Preise für Recyclingprodukte die Aufbereitung unwirtschaftlich machen. Bei steigender Erlössituation ist die Auslastung zwar niedriger, jedoch machen hohe Preise für die Recyclingprodukte die Aufbereitung wirtschaftlich. Investitionen in Recyclinganlagen sind für kleine Mengenströme daher stark von der Marktausrichtung des jeweiligen Unternehmens abhängig. Investitionen können je nach Marktsituation schnell unrentabel werden. Für die Ökobilanzierung ist die wirtschaftliche Betrachtung einzelner Prozesse in Abhängigkeit von der Marktsituation der Produkte wesentlich, um Recyclingrouten auszuwählen.

5.3. Grenzen des Recyclings

Die Wirtschaftlichkeitsgrenze ist überschritten, wenn die Erlöse der Recyclingprodukte mindestens die Kosten der Behandlung decken. Die Erlöse der Produkte sind stark marktabhängig und gehen damit als variable Größe in die Bilanzierung ein.

Die technische Grenze von Recyclingtechnologien betrifft hauptsächlich die Aufbereitung von Abfällen und spiegelt sich in der Aufbereitungs- und Trennqualität wieder. In Aufbereitungsanlagen werden über technologische Trenn- und Aufbereitungsprozesse aus dem Aufgabegut ein Konzentrat und ein Rückstand hergestellt, wobei beides Produkte der Aufbereitung sind. Kein Trennprozess ist ideal, so dass in jedem Fall in gewissem Umfang potentielle Wertstoffe verloren gehen.

Unter der Komplexität der Recyclingprozesse ist die netzartige Verknüpfung einzelner Teilprozesse zu verstehen, die zur Rückgewinnung absetzbarer Recyclingprodukte erforderlich wird. Aufgrund steigender Individualisierung, Integration von Elektronik, neuartigen Legierungen und Verbundwerkstoffen nimmt im Fahrzeugbau die Werkstoffvielfalt deutlich zu. Deren Trennung aus Abfallströmen macht zusätzliche oder komplexere Teilschritte erforderlich. Kempkes nimmt als Maß für die Komplexität

die Entropie eines Systems und beschreibt damit die Anzahl möglicher Zustände im Stoffgemisch. Für Shreddergut von Altfahrzeugen nimmt nach seinen Berechnungen die Entropie allein durch den komplexeren Werkstoffmix innerhalb von 30 Jahren um 22 % zu [7]. Zusätzliche Herausforderungen bestehen in der Zunahme potentieller Störstoffe in den Ausgangsstoffen bei gleichzeitig steigenden Qualitätsanforderungen an die Recyclingprodukte.

Für die Aufbereitung von Shreddergut oder ähnlichen Stoffgemischen sind Erweiterungen der Aufbereitungsanlagen zur Trennung komplexerer Abfallgemische oder Gewinnung zusätzlicher Komponenten mit kapitalintensiven Investitionen verbunden. Zur Anpassung an die gestiegene Komplexität schlägt Kempkes flexible Modifikationen in konventionellen Aufbereitungsanlagen vor, die einerseits schnelle Anpassungen an veränderliche Stoffströme und andererseits eine adaptive Aufbereitung entsprechend sich verändernder Anforderungen an Recyclingprodukt-Qualitäten erlaubt. Komplexere Verfahren werden somit ermöglicht. Allerdings sind auch hier wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen [7]. In den ökonomischen und ökologischen Bilanzierungen müssen zukünftig flexible Aufbereitungstechnologien aufgrund der volatilen Stoffflüsse berücksichtigt werden.

5.4. Nachhaltiger Produktlebenszyklus

Als nachhaltiger Produktlebenszyklus gelten Produkteigenschaften mit geringen Umweltwirkungen und guter Recyclingfähigkeit. Dazu wird sich von der Methodik des recyclinggerechten Designs von Produkten (Design for Recycling) bedient. Über Ökobilanzen lassen sich Fertigung, Konstruktion und Design von Produkten nachhaltig anpassen. Lösungsansätze für recyclinggerechte Leichtbaustrukturen beschreibt Zogg ausführlich und geht dabei auf Werkstoffe, Werkstoffkennzeichnung, Demontagefreundlichkeit und den Wiedereinsatz von Rezyklaten ein [15].

Für Altfahrzeuge gelten die Vorgaben der Altfahrzeugverordnung, wobei keine Rücknahme stillgelegter Altfahrzeuge, sondern die Behandlung über Schadstoffentfrachtung und Aufbereitung vorgeschrieben und beim Recycling Verwertungsquoten einzuhalten sind. Über das Recycling wird der Stoffkreislauf letztendlich geschlossen [13].

Allerdings wurden in Deutschland im Jahr 2013 nur etwa 500.300 Altfahrzeuge von etwa 3,3 Millionen endgültig stillgelegten Fahrzeugen dem Recycling zugeführt [8]. Damit entziehen sich große Mengen an Altfahrzeugen den geltenden restriktiven Recyclingvorgaben. Die stillgelegten Altfahrzeuge gehen zum Großteil in nichteuropäische Länder und werden der Aufarbeitung mit Wiedereinsatz der Fahrzeuge oder Komponenten unterzogen. Danach schließt sich im Allgemeinen eine weitere Nutzungsphase an. Dies führt zu einem komplexeren Stoffkreislauf, wobei aus der Aufarbeitung zusätzliche Abfälle entstehen können (Bild 7). Die zum bisherigen Stoffkreislauf hinzukommenden weiteren Schritte sind in Bild 7 rot hervorgehoben.

In das System gehen Energie (elektrischer Strom), Informationen (stoffliche Zusammensetzung) und Umweltwirkungen (Flächenbedarf) ein. Sie verlassen das System in umgewandelter Form. Abgegebene Umweltwirkungen können Emissionen (Lärm),

Bestandteile gemeinsam zu bilanzieren. Dazu bietet sich die Integration der LCA in die Prozesskettenmodellierung und -analyse an. So können verschiedene Prozess- und Produktvarianten einander direkt gegenübergestellt werden.

Wird zudem das Recycling neben der LCA in die Prozesskettenanalyse integriert, können bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung fundierte Aussagen zur Ressourceneffizienz von Produkt und Prozess getroffen werden. Entsprechende Informationen sind mit den im Konstruktionsprozess üblicherweise verfügbaren Vormaterial- und Baugruppeninformationen zu verknüpfen und dem Konstrukteur zur Verfügung zu stellen.

Die Integration von Recyclingprozessen in die Prozesskettenmodellierung gestaltet sich jedoch durch die vielseitige Vernetzung der Stoffflüsse sowie externer Einflüsse als komplex. Die größten Herausforderungen liegen in der Anpassung der virtuellen Prozessketten und Stoffflüsse an realitätsnahe Rahmenbedingungen sowie einer einheitlichen und präzisen Kennzeichnung von Prozessen mit Charakterisierung von Rezyklatwerkstoffen und Produkten. Werden die Komplexität jedoch bewältigt und die Stoffflüsse realitätsnah abgebildet, wird die Entwicklung ressourceneffizienter Leichtbaustrukturen nachhaltig unterstützt.

Förderhinweis

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept *Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen* (Förderkennzeichen 02PJ2760 – 02PJ2763) und mit Mitteln aus dem Energie- und Klimafonds gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

7. Quellen

- [1] BMW Group: Fahrzeugrecycling, Nachhaltigkeit im Fokus. Bayerische Motorenwerke AG, München, 2009
- [2] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung. Berlin: Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), 2014
- [3] DIN EN ISO 14040. Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS): s.n., 2006
- [4] Finkbeiner, M.: *Towards Life Cycle Sustainability*. Berlin: Springer Science + Business Media B.V., 2011. Bde. ISBN 978-94-007-1898-2
- [5] Finkbeiner, M.; Neugebauer, S.: *Der Multirecycling-Ansatz in der Ökobilanz von Stahl*. Konferenz *Stahl und Recycling*, Berlin, 2013
- [6] Gude, M. et al.: *FOREL-Studie; Chancen und Herausforderungen im Ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität*. TU Dresden Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Dresden, 2015. ISBN: 978-3-00-049681-3
- [7] Kempkes, P.: *Funktionswerkstoffe und Metallrecycling: Entropie und Dissipation in Schrotten*. Vortrag Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz, 16.–17. März 2015, Berlin, Deutschland

- [8] Kohlmeyer, R.: Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2013 gemäß der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG. Dessau-Roßlau; Bonn: UBA Umweltbundesamt; BMUB-Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau- und Reaktorsicherheit, 2015
- [9] Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) - Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, Fassung 2012, letzte Änderung 07.10.2013. s.l.: Bundesministerium der Justiz, 22.05.2013
- [10] Lieberwirth, H.; Krampitz, T.: Entwicklungstendenzen für den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen im Fahrzeug und Auswirkungen auf das Recycling. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 8. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015, S. 603-617; ISBN: 978-3-944310-20-6
- [11] Müller, H.: Industrielle Abfallbewältigung, Entscheidungsprobleme aus Betriebswirtschaftlicher Sicht. In: Dissertation, Band 38. Bochum: Gabler Verlag, 1990; ISBN 3-409-19940-3
- [12] Reuter, M.: The Niche of Metallurgy in Design for Sustainability. In: World of Metallurgy-Erzmetall; 62 Nr. 5. GDMB-Verlag, 2009
- [13] Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates über Altfahrzeuge. s.l.: zuletzt geändert 2011, 2000
- [14] Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV). s.l.: Überarbeitung 07/2006, 2001
- [15] Zogg, M.: Neue Wege zum Recycling faserverstärkter Kunststoffe. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich; ETH, 1997