

# Optimierung des ökologischen Fußabdrucks neuer Werkstoffe in einer Kreislaufwirtschaft – Herausforderungen und Lösungen für karbonfaserverstärkte Kunststoffe und Solarmodule –

Karsten Wambach, Wolfgang Rommel und Sandra Kerner

1.	Ökologische Bewertung .....	262
1.1.	Ökologischer Fußabdruck .....	262
1.2.	Lebenszyklen und Ökoeffizienzmethode.....	263
1.3.	Product Environmental Footprint .....	265
1.4.	Weitere Randbedingungen .....	265
1.5.	Living Lab.....	266
2.	Beispiele: Karbonfaserverstärkte Kunststoffe und Photovoltaik.....	267
3.	Karbonfaserverstärkter Kunststoff.....	268
3.1.	Grundlagen .....	268
3.2.	Abfallaufkommen und Verwertung.....	271
3.3.	Ansatzpunkte zur Verbesserung .....	273
4.	Solarmodule.....	274
4.1.	Grundlagen .....	274
4.2.	Bisherige Umweltauswirkungen.....	275
4.3.	End-of-Life.....	278
5.	Zusammenfassung .....	279
6.	Literatur .....	280

Bei der Entwicklung neuer Massenprodukte müssen in einem modernen industriellen Umfeld schon in der Planungs- und der Entwicklungsphase mögliche Auswirkungen der neuen Produkte auf die Gesellschaft, die Ressourcen wie Rohstoffe und Energie und die Umwelt mit einbezogen werden. Dies dient der Sicherung eines langfristigen betriebs- und volkswirtschaftlichen Erfolges und bezieht die komplette Wertschöpfungskette, die Anwendung der Produkte und ihrer Verwertung am Ende mit ein. Auf europäischer Ebene ist es erklärtes Ziel eine lebenszyklusbasierte Betrachtung von

Produkten durchzuführen und einen entsprechenden Rechtsrahmen dafür zu schaffen. Als Beispiele sind die Öko-Design Richtlinie, der Product Environmental Footprint (PEF), die Environmental Product Declaration (EPD) usw. zu nennen. Neben den Umweltauswirkungen in der Erzeugung werden auch zunehmend die Nutzungsphase und die Entsorgung mit untersucht.

Das Instrument der Lebenszyklenanalyse wird zunehmend auch schon in der Produktentwicklung genutzt. Flankiert werden diese Bestrebungen durch die Chemikaliengesetzgebung (REACH), das Produkthaftungsgesetz sowie Gesetze und Verordnungen zur Behandlung von Abfällen.

Insbesondere bei Massenprodukten ist das öffentliche Interesse hoch und es werden weltweite Standardisierungs- und Stewardship-Programme durchgeführt.

In den hier gewählten Beispielen soll möglichst der gesamte Lebensweg von karbonfaserverstärkten Kunststoffen und Solarmodulen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Umwelt erfasst und Potentiale für Optimierungsmöglichkeiten erkannt und ausgeschöpft werden.

Bifa ist seit mehreren Jahren in der Untersuchung von modernen Produktionsprozessen, der Nutzungsanalyse und der Verwertung von Photovoltaikmodulen (PV) und von karbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) tätig. In den Forschungsprojekten zur Photovoltaik und zum Recycling von (CFK) werden beim bifa Umweltinstitut dazu Methoden wie Lebenszyklenanalyse (LCA), Ökoeffizienz und Living Lab eingesetzt. Ein wesentliches Ziel ist es, dabei schon in der Forschungs- und Entwicklungsphase von neuen Verfahren und Produkten die möglichen Umweltauswirkungen abzuschätzen, mögliche Kosten zu analysieren und gleichzeitig eine hohe Wirtschaftlichkeit der gesamten Prozesse zu erreichen. Dabei werden Fragen zur Auswahl und Verfügbarkeit von neuen Materialien, die voraussichtlichen Umweltauswirkungen bei Gewinnung, Verarbeitung, Nutzung und Abfallbehandlung analysiert sowie Einsparungs- und Substitutionsmöglichkeiten insbesondere von knappen, kritischen sowie toxischen Materialien untersucht. Für Nebenprodukte und Abfälle werden darüber hinaus bereits Nutzungsmöglichkeiten auch in anderen Industrien identifiziert. Dies geschieht insbesondere durch die sorgfältige Analyse des Ausgangszustandes, Definition von Benchmarkprozessen, Soll-/Ist-Vergleiche, Stakeholderdialoge sowie Workshops und Bemusterungen.

Die Vorteile dieser Vorgehensweise finden sich in optimierten Material- und Energieverbräuchen in der Produktion bei gleichzeitig minimierter Umweltbelastung und einer Minderung von langfristigen Auswirkungen bei Massenproduktionen durch Einbeziehung aller Akteure der Wertschöpfungskette bis hin zum Nutzer und der Kreislaufwirtschaft.

## 1. Ökologische Bewertung

### 1.1. Ökologischer Fußabdruck

Das Instrument des ökologischen Fußabdruckes in den 1990er Jahren von Prof. William Rees und Dr. Mathis Wackernagel entwickelt und wird inzwischen zur Bewertung von Nachhaltigkeit verwendet. Dadurch ist es möglich, Länder und Lebensstile aufgrund

ihres Ressourcenverbrauchs miteinander zu vergleichen. Dafür wird zunächst die Maßeinheit des *globalen Hektars* eingeführt. Dieser beschreibt die durchschnittliche biologische Produktivität der Welt pro Hektar [27].

Konkret misst der ökologische Fußabdruck die Summe des anthropogenen Verbrauchs biotischer Ressourcen in sechs Kategorien. Diese sind Kohlenstoff, Ackerland, bebautes Land, Weideland, bewaldetes Land und Fischgründe. Allerdings weist diese Betrachtungsweise einige Schwächen auf, so dass je nach Anwendungsfall weitere Methoden zur Anwendung gelangen. Obwohl der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck die Auswirkungen eines Produktes oder Prozesses in einer prägnanten, vergleichbaren Zahl zusammenfasst, werden häufig mehr Umweltauswirkungen verursacht, als so dargestellt werden können.

## 1.2. Lebenszyklen und Ökoeffizienzmethode

Ein wirkungsvolles und bereits etabliertes Instrument ist die Lebenszyklusanalyse. Es handelt sich um einen ganzheitlichen Ansatz, welcher eine Betrachtung des Produktes von seiner Konzeption bis nach dem Ende seines Lebens ermöglicht. Eine beispielhafte Einteilung in Kategorien an Umweltauswirkungen lautet wie folgt: Abiotischer Abbau, Versauerung, Ökotoxizität, globale Erwärmung, Eutrophierung, Verminderung der Ozonschicht, photochemische Oxidation und Energieverbrauch [41]. Kritikpunkt an der Lebenszyklusanalyse ist, dass die Analyse nur so gut sein kann, wie die jeweils vorhandenen Daten. Andererseits kann sie auch als Leitfaden dienen, die benötigten Daten zu erheben. Das zweite mächtige Werkzeug neben der Erfassung der Umweltauswirkungen ist die Sensitivitätsanalyse in der Ökobilanz. Die frühzeitige Einbeziehung von Ökobilanzen in die gesamte Wertschöpfungskette beinhaltet dabei

- Entwicklung,
- Design,
- Ressourcenverfügbarkeit, Abbau,
- Umwelt und ressourcenschonende Produktionsprozesse,
- Sichere und umweltfreundliche Nutzung,
- Minimierung toxischer Materialien,
- Langlebige Produkte,
- Reparaturfähigkeit, Weiterverwendbarkeit,
- Recyclingfähigkeit ,
- Erweiterte Produzentenverantwortung, Stewardship-Programme.

Die Erstellung einer Ökobilanz nach ISO14040 erlaubt eine Bewertung der verschiedenen Umwelteinflüsse und einen Vergleich von verschiedenen Produkten und Verfahren (Bild 1). Werden ökonomische Daten mit einbezogen lassen sich das gemeinsame – ökologische und wirtschaftliche – Optimum identifizieren sowie die besten Verfahrensweisen und Prozesse ermitteln (Bild 2).

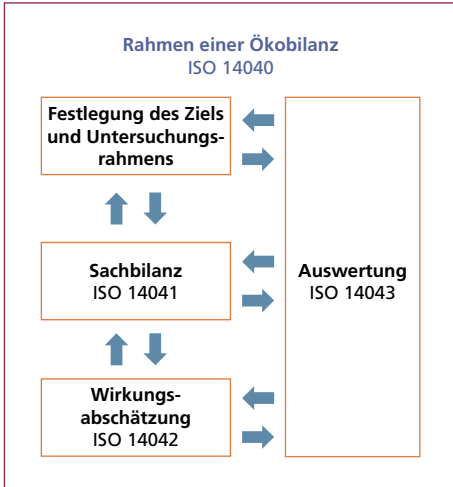


Bild 1: Schematische Darstellung einer Ökobilanz nach ISO 14040

Seit 2012 ist die Ökoeffizienzanalyse in der DIN EN ISO 14045 mit Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien festgeschrieben. Im Gegensatz zu anderen Umweltanalysen bietet die Ökoeffizienzmethode die Möglichkeit, ein Produkt oder Verfahren nicht nur nach ökologischen, sondern auch nach ökonomischen Faktoren beurteilen zu können [28]. Ursprünglich von BASF entwickelt kam die Ökoeffizienzanalyse in vier verschiedenen Bereichen zur Anwendung. Sie bietet eine Entscheidungshilfe, um zwischen zukünftigen Produktalternativen wählen zu können.

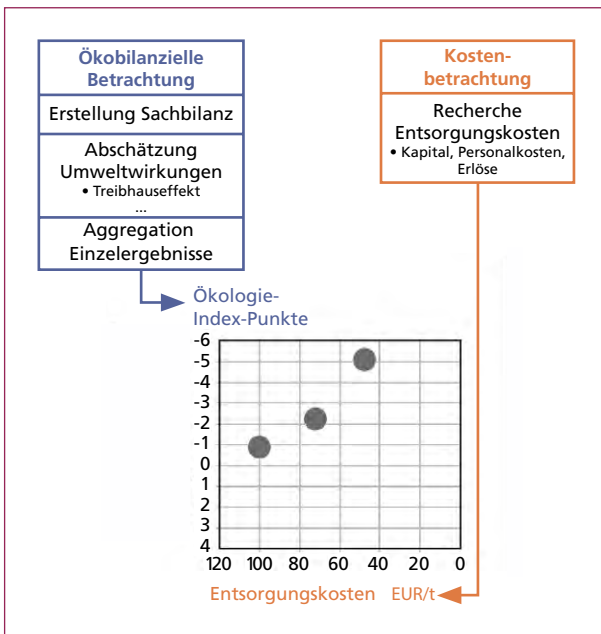


Bild 2:

Zusammenführung von Ökobilanz und Kostenbetrachtung zum Ökoeffizienz-Portfolio

Investitionen werden in die Produkte getätigt, welche ökonomisch und ökologisch vorteilhaft erscheinen, während andere aus dem Portfolio gestrichen werden. Gleiche Aspekte treffen auch in der Forschung und der Produktentwicklung zu. An dieser Stelle wird bereits vor Produktion des Produktes der gesamte Lebenszyklus inklusive End-of-Life berücksichtigt. Die Ökoeffizienzanalyse ermöglicht die Darstellung von Zusammenhängen von Produktion, Nutzung, und Lebensende.

Dadurch ergibt sich eine Diskussionsgrundlage. Letztlich ist die Ökoeffizienzmethode auch hinsichtlich des Marketings geeignet, um die Sicht auf Produkte darzustellen und Entscheidungen fundiert begründen zu können [3].

### 1.3. Product Environmental Footprint

Mit der Einführung des *Product Environmental Footprints* (PEF) wird künftig eine neue Modellierungsmethode der Umwelteinflüsse der mit einem Produkt verbundenen Material- und Energieflüsse, der Emissionen und Abfallmengen über den gesamten Lebenszyklus bereitgestellt.

Die EU-Kommission stellt dazu eine Anleitung bereit, wie der PEF zu berechnen ist und wie abhängig von der jeweiligen Spezifik einer Produktkategorie die methodischen Voraussetzungen erarbeitet werden können – Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs). Das Verfahren befindet sich gegenwärtig in der Pilotierung.

Ähnlich dem LCA verfolgt auch der PEF einen Ansatz, der auf dem gesamten Lebenszyklus basiert. Zwar stützt er sich auf bekannte und bewährte standardisierte (ISO) Methoden, doch deckt er alle relevanten Umweltinformationen über Produkte innerhalb der gleichen Kategorie ab. Ausgehend von einer Produktkategorie werden die grundlegenden Regeln eines PEFs in den sogenannten PEFCRs (Product Environmental Footprint Category Rules) für jede Kategorie einzeln spezifiziert. Durch diese methodischen Leitlinien soll gewährleistet werden, dass die relevantesten Umwelteinflüsse des Produktes auch die stärkste Gewichtung erfahren. Des Weiteren sollen sie zur Konsistenz und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse beitragen. Bevor ein neuer PEF aufgesetzt wird, erfolgt stets eine umfassende Recherche, ob bereits anderweitig PCRs (product category rule) zur Verfügung stehen, und inwieweit diese angewendet werden können [14].

Beim PEF handelt es sich um ein unabhängiges Dokument mit dem Ziel, die potentiellen Umweltauswirkungen umfassend entlang des Lebenszyklus des Produktes innerhalb einer Kategorie darzustellen [35].

### 1.4. Weitere Randbedingungen

Für die Photovoltaik werden darüber hinaus eine ganze Reihe weiterer Standards entwickelt, die bis hin zu freiwilligen Selbstverpflichtungen wie die Teilnahme am Carbon Disclosure Project, der Silicon Valley Toxics Coalition Scorecard (SVTC) oder sogenannten Product-Stewardship-Programmen (BAN/NSF, SVTC) von Bedeutung sind. Auf EU-Ebene ist die Ökodesign-Richtlinie, 2009/125/EG, mit zu berücksichtigen. Auch das EcoLabel kommt teilweise zur Anwendung.

Die Abfallsammlung und das Recycling in diesem Beispiel zur Photovoltaik ist in Europa über die WEEE Richtlinie 2012/19/EU geregelt, die Detailausgestaltungen sind hier in der Überarbeitung der Normen EN50625, EN50614, VDI 2343 und LAGA M31 sowie M518/EN.

## 1.5. Living Lab

Bei bifa werden gegenwärtig die Instrumente der Lebenszyklenanalyse in Kombination mit der Methode des *Living Lab* kombiniert, bei der die entsprechenden Nutzer (Stakeholder) schon in die Forschungsprozesse frühzeitig mit einbezogen werden. Das Living Lab ist damit eine Forschungsmethode zur Entwicklung neuer Produkte, Anwendungen oder Dienstleistungen unter der frühzeitigen Einbeziehung von beispielsweise Verbrauchern, Mitarbeitern, Produzenten, Lieferanten, Handwerker, Entsorger usw. Es besteht im Wesentlichen aus einem 4-stufigen Kreislaufsystem mit den Phasen nach Bild 3.

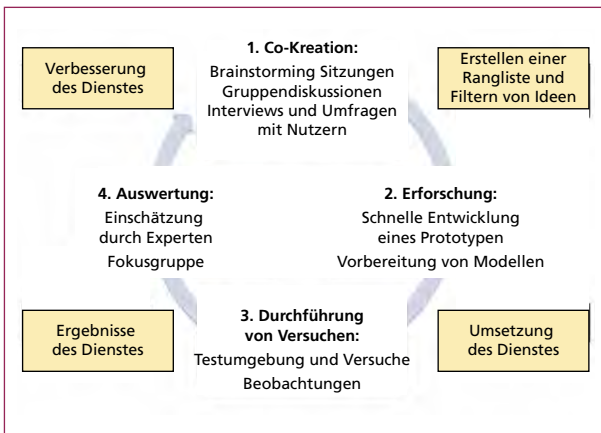


Bild 3:

Ablauf des Living Lab Prozesses

Obwohl der Grundgedanke des Living Lab aus den 90er Jahren stammt, ist das Konzept in seiner gegenwärtigen Form erst seit wenigen Jahren zur Anwendung und Verbreitung gekommen. Das europäische Netzwerk der Living Labs wurde im Jahr 2010 gegründet [12]. Im Wesentlichen formen die Stakeholder Public-Private-People-Partnerschaften in virtuellen Räumen. Ziel ist es, im Normalfall neue Produkte oder Lösungen mit innovativem Charakter zu erarbeiten. Zu Beginn steht der sogenannte Prozess der Ko-Kreation. Er wird begünstigt durch die Zusammensetzung der Teilnehmer, die bevorzugt aus allen relevanten Bereichen stammen und offen diskutieren. In der darauffolgenden Explorationsphase werden konkrete Szenarien und Anwendungen erarbeitet. In der Experimentalphase werden die zuvor entwickelten Konzepte in die Praxis umgesetzt und Daten gesammelt. In der letzten Phase, der Evaluation, werden die gesammelten Daten analysiert und beurteilt. Im Vergleich zu herkömmlicher Forschung handelt es sich beim Living Lab um eine Realweltumgebung innerhalb derer viele Stakeholder unterschiedlicher Hintergründe als Ko-Innovatoren miteinander interagieren. Sie berücksichtigen dabei auch die verschiedenen technischen, sozialen oder politischen Ansprüche. Anders als bei herkömmlichen Laboren werden nicht nur Tests durchgeführt um Ergebnisse analysieren zu können, sondern es wird gemeinsam auf ein Ergebnis hingearbeitet [21]. Falls die Umsetzung der einzelnen Abschnitte passend ist, wird der Prozess des Living Labs beendet. Falls nicht, startet der 4-Schritt Zyklus erneut.

## 2. Beispiele: Karbonfaserverstärkte Kunststoffe und Photovoltaik

Die Klimaveränderungen aufgrund von  $\text{CO}_2$ -Emissionen führen weltweit zu einer Reduzierung der Nutzung fossiler Brennstoffe. Insbesondere Im Mobilitätsbereich sollen durch moderne saubere Motoren, Einsparung von Gewicht und die Umstellung auf elektrische Antriebe die Emissionen signifikant verringert werden. Nach dem FIA-Bericht verursacht der private Autoverkehr nahezu 40 % der  $\text{CO}_2$ -Emissionen [15]. Ab 2020 dürfen die Emissionen von PKWs nur noch bis 95 g  $\text{CO}_2$ /km betragen. Dazu müssen im Mittel etwa 2 % der Flottenemissionen eines Herstellers pro Jahr reduziert werden. Dies erfordert neben der konsequenten Verbesserung der bestehenden Techniken auch disruptive neue Technologien wie E-Mobilität. Aufgrund der bestehenden beschränkten Reichweite von Elektro-PKW ist die Einsparung von Energie u.a. durch konsequenten Leichtbau notwendig. Eine Möglichkeit dies zu erreichen ist die Substitution von schweren Metallteilen durch kohlenfaserverstärkten Kunststoffen, die hohe Festigkeit und Leichtigkeit vereinen in Kombination mit der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen.

Bei beiden genannten Beispielen (CFK und PV) handelt es sich um Verbundmaterial. In vielen Anwendungen ermöglicht CFK Gewichtseinsparungen und verringert damit den Energieverbrauch bzw. Treibstoffverbrauch zum Beispiel im Mobilitätssektor. In der Photovoltaikindustrie wird anstelle der Energieeinsparung Energie erzeugt. Da auch hier fossile Brennstoffe substituiert werden, erfolgt letztendlich ebenfalls eine Verringerung der Emissionen.

Ein Beispiel für ein gemeinsames Anwendungsfeld der beiden Technologien ist die Elektromobilität. Das zusätzliche Gewicht der Batterie kann durch die Verwendung von CFK im Automobil leicht ausgeglichen werden ohne Kompromisse bei Stabilität oder Sicherheit eingehen zu müssen. Durch eine moderne Leichtbauweise ist eine deutliche Gewichtseinsparung zu erreichen, welche wiederum auch die Reichweite des Fahrzeuges verlängert. Um die trotz allem verursachten Emissionen weiter und nachhaltiger zu verringern, ist es nötig auch die primäre Stromerzeugung von fossilen Brennstoffen durch Einsatz regenerativer Energien wie PV zu lösen.

Eine Möglichkeit, welche auch im ökologischen Fußabdruck bereits mit einbezogen wird, ist das Messen von emittierten  $\text{CO}_2$ -Äquivalenten. Stichwort ist hier der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck. Treibhausgasemissionen dienen als Anhaltspunkt für Umweltbeanspruchung, obwohl der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck nicht den Anspruch erhebt dergleichen zu messen. Stattdessen wird eine Möglichkeit dargestellt, das GWP, Global Warming Potential einzuschätzen. Dieses wiederum ist definiert als das Maß eines Strahlungseffektes einer beliebigen Substanz im Vergleich zu einer anderen über eine beliebige Zeitspanne bei einer spontanen Freisetzung dieser in die Erdatmosphäre. Als Referenzgas dient meist  $\text{CO}_2$  [26]. Beispielsweise hat Methan ( $\text{CH}_4$ ) über einen Zeithorizont von 100 Jahren ein Global Warming Potential, welches dem von 25 kg  $\text{CO}_2$  entspricht [19].

## 3. Karbonfaserverstärkter Kunststoff

### 3.1. Grundlagen

#### Verwendete Materialien

Vereinfacht besteht ein karbonfaserverstärkter Kunststoff aus den Karbonfasern und einer Matrix. Der Ausgangsstoff der Karbonfasern ist oft Polyacrylnitril (PAN) [10]. Die drei Haupttypen von Matrixpolymeren sind Polyesterharz, Epoxidharz und Polypropylen. Hinzu kommen Füllmaterialien, Katalysatoren und Erstarrungsbeschleuniger. Füllmaterialien werden dazu verwendet die Eigenschaften weiter zu beeinflussen oder einen Anteil an Polymer in der Matrix einzusparen. Die bekanntesten sind *Alumina Trihydrate* (ATH), welches den Vorteil mit sich bringt brandhemmend zu sein, und Calcium-Carbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), welches eine Verbesserung der Steifheit verursacht.

Tabelle 1: Beispiel für ein CFK-Material mit möglichen Zusätzen

Material	CFK Prozent
PAN-Faser	etwa 50
Epoxidharz	etwa 50
<b>Eventuell Zusätze</b>	
Pech	
Metalle (Gewebe und Inlays)	
Glasfasern	
Nanomaterialien	

Katalysatoren und Erstarrungsbeschleuniger verändern nicht die Eigenschaften der fertigen Matrix sondern nehmen auf die Bearbeitungszeit und Temperatur Einfluss [1]. Je nachdem, welche weiteren Eigenschaften gewünscht sind, können der Matrix zahlreiche weitere Chemikalien hinzugefügt werden [42]. Üblicherweise sind die Karbonfasern mit einem Überzug (Schlichte) behandelt, welcher einen besseren Verbund mit der Matrix herbeiführen soll [45].

#### Verarbeitung und Produktion

Die Materialien und die Art der Verarbeitung hängen stark von der angestrebten Anwendung ab. Ausgangsprodukte für die Produktion der Karbonfasern sind PAN, Pechharz oder Reyon. Durch Oxidation und Pyrolyse erfolgt eine Karbonisierung. Durch Graphitisieren und Dehnen erhalten die Fasern einen Durchmesser von 9 bis 17 mm bei einem Anteil von mindestens 90 % Karbon. Je nach Temperaturbehandlung können den Fasern verschiedene Eigenschaften bezüglich ihrer Elastizität oder Zugfestigkeit verliehen werden [31]. Die Produktion von 1 kg primärer Karbonfaser benötigt eine Energie von etwa 700 MJ [23]. Zur Weiterverarbeitung werden die Fasern beispielsweise verwoben und zugeschnitten.

Sogenannte Thermosets werden für Bauteile verwendet, welche großen Kräften ausgesetzt sind. Hauptsächlich werden sie in der Luft- und Raumfahrt, in der Automobilbranche oder für Rotorblätter von Windkraftanlagen eingesetzt. Typisch sind der meist sehr hohe Anteil an Fasern und eine hohe thermische Resistenz. Ein Nachteil hierbei ist die bisher noch relativ hohe Rate an Ausschussmaterial.

Thermoplastics werden bei geringeren Leistungsanforderungen verwendet. Sie gelten als sehr leicht handhabbar und bieten eine größere Anzahl an Verarbeitungsmöglichkeiten [5]. Für Massenproduktionen werden das Formpressen, Injektionsformen oder Harzinjektionsverfahren (RTM) häufig verwendet. Dabei wird das Matrixmaterial in



eine bereits mit Fasern gefüllte Form – wobei die Anordnung der Fasern frei wählbar ist – eingespritzt. Für Kleinserien unter 1.000 Stück wird gerne auch auf das Handlaminierungsverfahren zurückgegriffen [5, 32].

Auf den Prozess des Formens und Zusammensetzens entfallen etwa fünfzig Prozent der Kosten, Arbeit, Maschinen und Werkzeuge inbegriffen. Die andere Hälfte wird durch die Materialkosten gestellt. Davon entfällt das Meiste, fast neunzig Prozent auf das Carbonfaserhalbzeug (Bild 4). Die übrigen etwa zehn Prozent an Kosten entfallen auf die Matrix. Beim Carbonfaserhalbzeug macht der Precursor die Hälfte der Kosten aus [10].

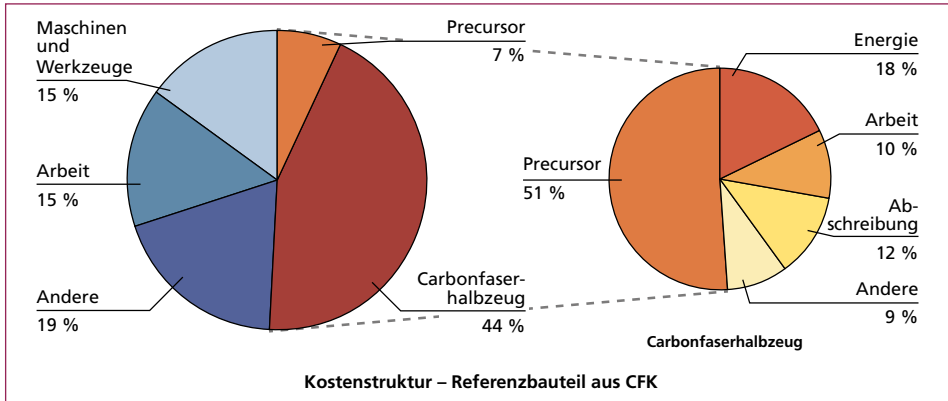


Bild 4: Kostenaufteilung für CFK-Teile

nach Eickenbusch, H.; Krauss, O.: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien. 2013, [http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-03-VDI-ZRE-CFK.pdf](http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-03-VDI-ZRE-CFK.pdf), Zugriff 01.12.2016

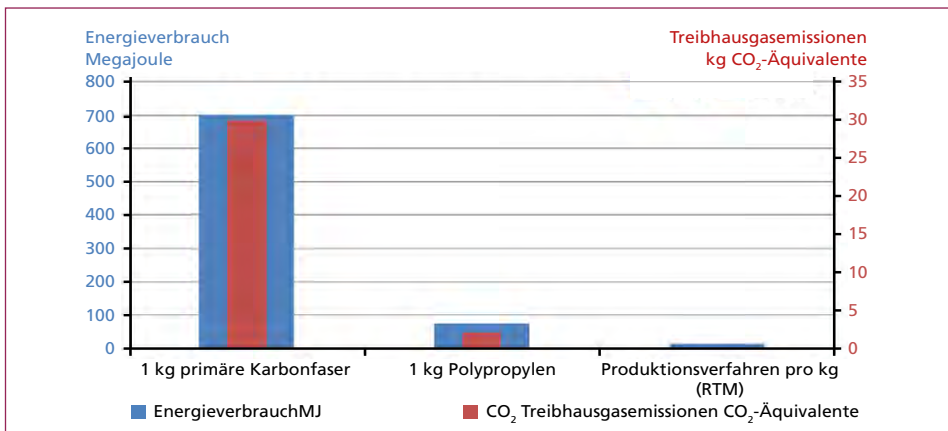


Bild 5: Vergleich des Primärenergiebedarfes bei der Herstellung von 1 kg primäre Carbonfasern mit der Polypropylenherstellung und dem Aufwand für das weitere Produktionsverfahren RTM sowie die entsprechenden Treibhausgasemissionen

nach Institut für Aufbereitung und Recycling: Carbonfaserverstärkte Kunststoffe. <http://www.iar.rwth-aachen.de/cms/IAR/Forschung/Kompetenzen/Referenzprojekte/~ilbd/CFK-Carbonfaserverstaerkte-Kunststoffe/>, aufgerufen am 10.10.2016

Duflou, J.R.; Deng, Y.; Van Acker, K.; Dewulf, W.: Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment based study. MRS Bulletin, 2012

Die Produktion von 1 kg Polypropylen benötigt 73,4 MJ und verursacht 2 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente an Emissionen. Für PAN-basierte Karbonfaser wird pro Kilogramm zwischen 286 und 704 MJ aufgewendet und zwischen 22,4 und 31 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente freigesetzt.

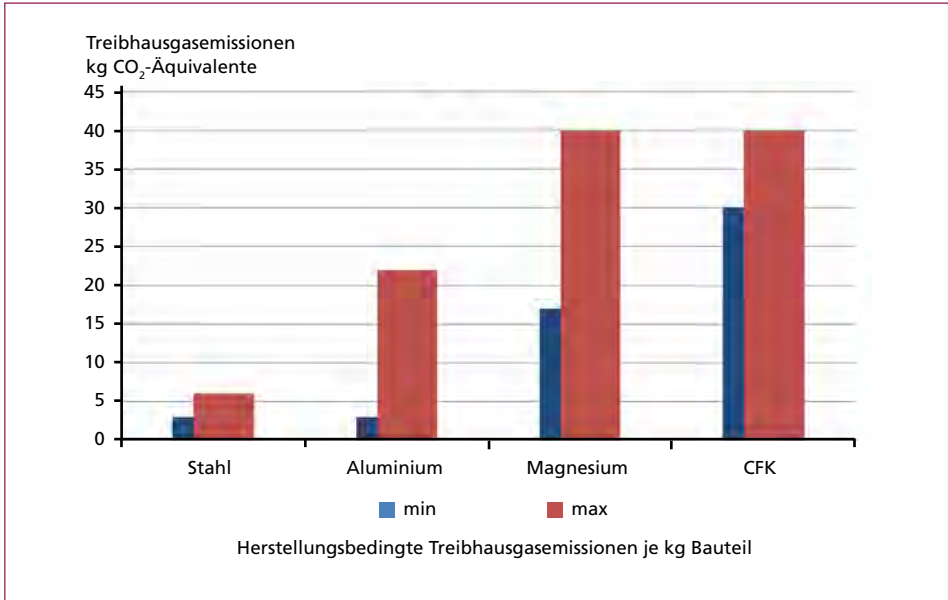


Bild 6: Vergleich der Treibhausgasemissionen bei Automobilbauteilen aus verschiedenen Werkstoffen

nach Xperion Components: Der Werkstoff für Innovationen. Faszination CFK. [http://www.avanco.de/fileadmin/user\\_upload/pdf-broschueren/xperion-components\\_faszination-CFK\\_DE\\_low.pdf](http://www.avanco.de/fileadmin/user_upload/pdf-broschueren/xperion-components_faszination-CFK_DE_low.pdf), Zugriff 01.12.2016

Das RTM-Verfahren benötigt 12,8 weitere MJ pro kg [9]. Das Kilogramm fertigen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffes verursacht Emissionen zwischen 30 und 40 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Bild 6). Im Vergleich dazu kann Magnesium auf bis zu 17 kg bei der Produktion reduzieren. Auch die Emission von Aluminium fällt mit 2 bis 21 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Kilogramm deutlich geringer aus. Noch niedriger ist die Produktion von Stahl mit 2 bis 6 kg [2].

Die Herstellung der karbonfaserverstärkten Kunststoffe ist also zunächst mit einem erhöhten Energieaufwand verbunden. Allerdings muss der gesamte Lebenszyklus inklusive Nutzung und Kreislaufwirtschaft mit betrachtet werden. Da karbonfaserverstärkter Kunststoff leichter ist als alle zuvor genannten Materialien ergibt sich eine Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes beim Transport und möglicherweise auch bei der Installation. Durch bessere Steifigkeit oder Zugfestigkeit ist ein materialsparendes Design des Bauteiles oder Bauwerkes möglich. Des Weiteren handelt es sich um sehr langlebige Produkte mit hoher Korrosionsresistenz, wodurch die Nutzungsphase deutlich länger ausfällt und die höheren Produktionskosten und Emissionen damit rechtfertigt [22].

## 3.2. Abfallaufkommen und Verwertung

### Abfallströme

An dieser Stelle muss unterschieden werden, ob es sich um Abfall aus der Produktion handelt, oder um Produkte, welches die End-of-Life Phase erreicht haben. Im gesamten Prozess von der Herstellung der Kohlenstofffasern, über die Halbzeugverarbeitung bis zur Produktion des fertigen Teiles fallen über Ausschuss und Verschnitt 40 % bis 50 % Abfall an [20, 29]. Bei einer weltweiten Produktion von 129.000 Tonnen im Jahr 2015 ist diese Menge durchaus erheblich. In Europa setzt sich der produktionsbedingte Abfallstrom etwa wie folgt zusammen: 62,4 % gewobenes Prepreg, 10,9 % nicht-gewobenes Prepreg, 14,5 % trockene Karbonfasern, 8,1 % Zwischenmittel, 4,1 % Verbundstoffe [7]. Wird außerdem von einer Lebensspanne von 30 Jahren eines Flugzeuges ausgegangen, und in Betracht gezogen, seit wann relevante Mengen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffes eingesetzt werden, kann ab dem Jahr 2020 mit einem Abfallstrom von etwa 3.500 Tonnen pro Jahr allein aus diesem Sektor gerechnet werden. 2030 erhöht sich diese Zahl auf geschätzte 7.000 Tonnen pro Jahr [7].

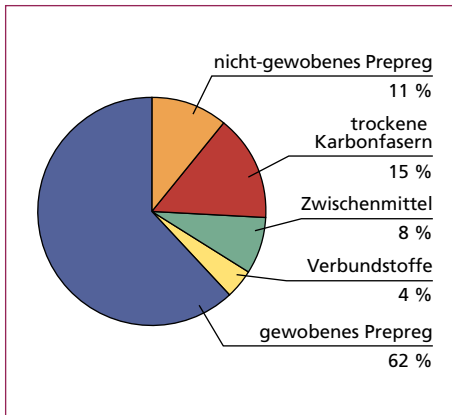


Bild 7: Zusammensetzung der produktionsbedingten jährlichen Abfallströme in Europa

Quelle: Dauguet, M.; Mantaux, O.; Perry, N.; Zhao, Y.F.: Recycling of CFRP for high value applications: effect of sizing removal and environmental analysis of the super critical fluid solvolysis. 2015

Wird außerdem von einer Lebensspanne von 30 Jahren eines Flugzeuges ausgegangen, und in Betracht gezogen, seit wann relevante Mengen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffes eingesetzt werden, kann ab dem Jahr 2020 mit einem Abfallstrom von etwa 3.500 Tonnen pro Jahr allein aus diesem Sektor gerechnet werden. 2030 erhöht sich diese Zahl auf geschätzte 7.000 Tonnen pro Jahr [7].

### Gegenwärtige Recyclingoptionen

Generell bestehen neben dem Recycling die grundsätzlichen Möglichkeiten zur energetischen Verwertung von Materialien oder deren Deponierung. Die Deponierung ist in Deutschland gesetzlich verboten [13]. Die energetische Verwertung in einer Abfallverbrennungsanlage ist schwierig. Ein Grund hierfür ist, dass die Fasern nicht vollständig verbrennen und in der Asche zurückbleiben [36]. Aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit können die feinen Faserpartikel im Abgasstrom die Filter der Abfallverbrennungsanlage beschädigen [13]. Ein Recycling ist daher unbedingt anzustreben, zumal eine erneute Verwendung die Ökobilanz der Kohlefasern deutlich verbessert. Im BMW i3 beispielsweise bestehen zehn Prozent der kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe aus recyceltem Material [40]. Ein Ziel der Automobilbranche ist die weitere Verbesserung ihrer Recyclingquoten in Richtung hundert Prozent Recycling, was die Schaffung einer leistungsfähigen Kreislaufwirtschaft zwingend erforderlich macht.

An Recyclingmöglichkeiten des fertigen Verbundstoffes stehen derzeit die Pyrolyse, die auch in mehreren technischen Anlagen durchgeführt wird, und die Solvolyse zur Verfügung. Bei beiden Vorgängen kann in einem vorangehenden Schritt eine Zerkleinerung vorgenommen werden [33]. Die Recyclingverfahren haben beide das Ziel eine Trennung von Matrix und Faser herbeizuführen. Bei der Pyrolyse werden die unterschiedlichen Zersetzungstemperaturen der Fasern und der Matrix ausgenutzt. Während die von Karbonfasern bei über 3.600 °C liegt, zersetzt sich die Matrix bereits bei unter 600 °C. Da die Oxidationsneigung der Karbonfasern jedoch mit der Temperatur steigt, findet diese Reaktion unter Schutzgasatmosphäre statt [33]. Trotz allem ist meist ein Qualitätsverlust der Fasern zu beobachten. Der Durchmesser der Fasern reduziert sich im Schnitt um etwa elf Prozent, die Standardabweichung bezüglich des Durchmessers verdreifacht sich. Auch die mechanischen Eigenschaften verschlechtern sich. Statt einer Zugfestigkeit von ehemals 4.111 MPa werden häufig nur noch 2.643 MPa erreicht, auch die maximale Dehnung von 1,67 % einer neuen Faser wird mit nur noch 0,95 % nicht mehr erreicht [11]. Die Trennung von anderen Materialien wie Glasfasern und Metallinlays aus den kunstvoll verwobenen Strukturen bereitet zusätzliche Schwierigkeiten.

Im Recyclingprozess werden die Abfälle häufig zerkleinert und die Fasern geschnitten, so dass keine Endlosstrukturen mehr damit hergestellt werden können. Eine Wiedergewinnung der Matrix ist ebenfalls kaum möglich, bislang ist eine begrenzte, thermische Energiegewinnung realisiert.

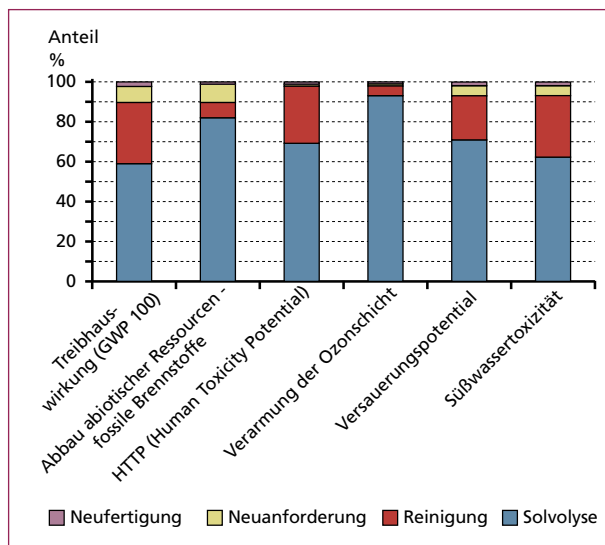


Bild 8:

Umweltauswirkungen eines Recyclings von CFK durch Solvolyse

nach Dauguet, M.; Mantaux, O.; Perry, N.; Zhao, Y.F.: Recycling of CFRP for high value applications: effect of sizing removal and environmental analysis of the supercritical fluid solvolysis. 2015

Bei der Solvolyse kommen superkritische Flüssigkeiten zum Einsatz. Diese, jeweils auf die Matrix abgestimmten Lösungsmittel werden unter erhöhtem Druck und Temperatur dazu verwendet, die Matrix chemisch aufzulösen. Im Anschluss müssen die Fasern gereinigt und getrocknet werden. Nachdem das Lösungsmittel aufbereitet wurde, kann es in der chemischen Industrie weiterverwendet werden.

Die Solvolyse ist zwar weniger energieintensiv als die Pyrolyse, dafür aber aufwändiger und mit potentiell umweltschädlichen Lösungsmitteln verbunden. Ein Vergleich der verschiedenen Recyclingschritte von der Solvolyse an bis zum neuen Produkt zeigt deutlich den hohen Recyclingaufwand im Vergleich zur weiteren Verarbeitung.

Fortgeschrittener ist der Ansatz, bereits das Design der Matrix auf ein Recycling auszulegen. In einzelnen Prototypen ist es schon möglich, die Matrix unter Zugabe einer organischen Lösung bei Raumtemperatur aufzulösen und für eine Wiederverwendung aufzubereiten. Zudem soll es möglich sein, Produktionszeiten von 60 Sekunden zu erreichen, was den Weg in weitere Anwendungsgebiete ebnet [20].

Andere solvolytische Verfahren erheben den Anspruch die Matrix allein mit 200 °C heißem Wasser unter Druck abbauen zu können. Nicht nur die Faser, sondern auch deren Beschichtung bleiben unbeschädigt zurück [25].

### Nutzung der Recyclate

Die geschätzte gemeinsame Kapazität der großen Recyclingfirmen für karbonfaserverstärkte Kunststoffe beläuft sich auf 3.500 bis 5.000 metrische Tonnen jährlich. Dabei ist das Problem weniger Rohmaterial für ihre Recyclingprozesse zu erhalten, sondern vielmehr Abnehmer für das recycelte Produkt ausfindig zu machen [18]. Recycelte Fasern sind kürzer als Primärfasern und sind zudem von minderer Qualität (Downcycling).

Erster Schritt in der Verarbeitung der wieder gewonnen Fasern ist die Vereinheitlichung der Länge. Sie werden entweder sortiert oder geschnitten. Auch das Mahlen bis hin zu einer Partikelgröße kleiner 100 µm ist möglich. Diese können wie auch Kurzfasern von einer Größe von 0,1 bis 1 mm als Füllstoff verwendet werden. Dieser wird entweder im Bauwesen in Beton oder Zement verwendet oder thermoplastischen Kunststoffen als Verstärkungsmaterial zugefügt. Fasern, welche eine Länge von bis zu 50 mm erreichen, können zu Organofolien oder textilem Faservliesen verarbeitet werden [23]. Obwohl hier bereits hohe Qualität möglich ist – mit maximal drei Prozent Standardabweichung bezüglich dem Gewicht pro Fläche, müssen Anwendungen gefunden und Märkte erschlossen werden, welche diese Produkte, die zwanzig bis vierzig Prozent im Vergleich zum primären Produkt billiger sind, nutzen können. In der Automobilindustrie sind Anwendungen im Innenbereich wie für Sitze, Verkleidungen oder Armaturen zur Gewichtseinsparung bei geringerer Beanspruchung als in der Karosserie oder in der Fahrgastzelle angedacht [18].

## 3.3. Ansatzpunkte zur Verbesserung

Aus der ganzheitlichen Betrachtung karbonfaserverstärkter Kunststoffe über ihren Lebensweg können Handlungsansätze abgeleitet werden, um die Umweltauswirkungen dieses Materials weiter zu verringern. Wichtige Ansatzpunkte zeichnen sich in den Bereichen verwendeter Rohstoff, Verarbeitung und Produktdesign, und Recycling ab.

### Der Rohstoff

Für Anwendungen, welche primäre Endlosfasern benötigen, muss auf den Rohstoff Erdöl zur Gewinnung der notwendigen Ausgangspolymere zurückgegriffen werden. Alternativ lassen sich viele Anforderungen an Faserverbundwerkstoffe auch mit

alternativen Materialien wie Bioharzen und Naturfasern erfüllen. Damit ergeben sich Energieeinsparungen und Emissionsreduktionen bei der Produktion des Verbundwerkstoffes. Auch bei Lebensende haben Naturfasern den Vorteil, dass sie – abhängig vom Bauteil – kompostierbar sind. Allerdings würden sie durch eine Pyrolyse zum Recycling, welche die Matrix thermisch verwertet für eine zweite Verwendung unbrauchbar gemacht. [8, 10]

### Verarbeitung und Produktdesign

Die Recyclingmöglichkeit sollte schon im Produktdesign berücksichtigt werden. Der Anteil an Produktionsabfällen von derzeit vierzig bis fünfzig Prozent sollte mit künftigen, verbesserten Verfahren deutlich zu reduzieren sein. Zum einen wurde in das Material bereits viel Energie investiert, und zum Anderen benötigt es viel Energie für das Recycling. Auch wäre es sinnvoll den Verschnitt von Halbzeugen zu minimieren. Der Produktionsprozess kann nicht nur in Hinsicht auf den Materialverbrauch, sondern auch in Bezug auf den Energieverbrauch optimiert werden. Der Vorteil von karbonfaserverstärktem Kunststoff im Vergleich zu anderen, günstigeren und energieeffizienteren Leichtbaumetallen, liegt in seinen besonderen Eigenschaften, wie beispielsweise die Haltbarkeit und Korrosionsresistenz. Würde es beispielsweise gelingen, die Langlebigkeit der Produkte und die Nutzungszeiten noch weiter zu verbessern, würden sich die negativen Auswirkungen der Produktion über den gesamten Lebensweg betrachtet deutlich verbessern.

### End-of-Life Behandlung

Neben dem weiteren Aufbau von leistungsfähigen Recyclingprozessen ist auch die Erschließung neuer Märkte und Anwendungen für die Recyclate zur weiteren Verbesserung des ökologischen Profils der kohlenfaserverstärkten Kunststoffe eine wichtige Aufgabe.

## 4. Solarmodule

### 4.1. Grundlagen

#### Lage der Industrie

Photovoltaikanlagen liefern heute einen deutlichen Beitrag zur *grünen* Stromerzeugung. In Deutschland deckte der Strom aus Photovoltaikanlagen in 2015 etwa 7,5 Prozent des Nettoenergieverbrauchs. Im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien spielt die Solarenergie im Mittelfeld, hinter Windenergiegewinnung an Land und Biomasse, jedoch vor Energie aus Wasserkraft und Offshore-Windanlagen. Gemeinsam decken diese 38 Prozent des Energieverbrauchs. Im Jahr 2015 wurden 1,3 GW neuer Photovoltaik Kapazität installiert. Das entspricht etwa zwei Prozent der in diesem Jahr weltweit neu installierten Kapazität. Die installierte Leistung verfehlt jedoch bei Weitem das Ausbauziel der Bundesregierung von jährlich 2,5 GW.

Durch den Aufbau großer Produktionskapazitäten in Asien sind die Preise stark gefallen, gegenwärtige Überkapazitäten über weiteren Druck aus. Deutschland ist heute überwiegend ein Importeur von Solarmodulen [44].

### Verwendete Materialien

Die Solarmodule werden häufig nach der verwendeten Solarzellentechnologie klassifiziert [6, 37]. Der überwiegende Anteil von über neunzig Prozent basiert heute auf Solarzellen aus mono- oder multikristallinem Silicium. Weiterhin werden sogenannte Dünnschichttechnologien für die Halbleiter eingesetzt, die im wesentlichen auf Basis der Halbleiter CdTe und Cupfer-Indium-Diselenid (CIS) basieren. Amorphes Silicium und andere Technologien spielen eine geringe Rolle.

Tabelle 2: Beispielzusammensetzung eines Solarmodules auf Basis von kristallinem Silicium

Material	Einheit	kristallines Si
Glas	%	60 – 85
Aluminium	%	0 – 20
Kunststoff	%	7 – 10
Verbinder/Leiter		Cu, verzinkt etwa 1 %
Solarzellen	%	3 – 4
Anschlussdose	%	1 – 1,5
Metalle		Cu, Sn, Pb, Ag, Al, Ni

Im Weiteren werden daher Module auf Basis von kristallinen Silicium-Solarzellen betrachtet. Eine typische Zusammensetzung eines solchen Modules zeigt Tabelle 2. Der Hauptanteil besteht aus Glas, Aluminium und Kunststoff, die eigentlichen Solarzellen machen bis etwa vier Prozent aus, die verwendeten Leiterbahnen etwa einen Prozent. Weitere Metalle aus der Zellenmetallisierung und den Loten sind nur noch in kleinen Mengen vorhanden.

## 4.2. Bisherige Umweltauswirkungen

### Rohstoffe

Während Silizium aufgrund der geforderten Reinheit die vermutlich teuerste Komponente darstellt, ist der Rohstoff keineswegs selten. Es ist als Siliziumoxid in Sand und Quarz enthalten. Vom relativen Materialwert eines Solarpanels macht es lediglich 11 Prozent aus. Kupfer und Glas stellen jeweils 8 Prozent des Wertes. Weitere 26 Prozent entfallen auf Aluminium des Rahmens. Den größten Teil des Materialwertes stellt Silber dar (Bild 9). Pro Panel sind bis 10 Gramm Silber enthalten, allerdings wurden aufgrund des hohen Preisdruckes der letzten Jahre erhebliche Einsparungen an Silber erzielt. Während 2005 noch über 0,16 Gramm Silber pro Watt (bei Höchstleistung) benötigt wurden, reichten ein Jahrzehnt später etwa 0,03 Gramm aus. Dennoch verbrauchte die Photovoltaikindustrie im Jahr 2014 bis zu 15 Prozent der globalen Silberproduktion [24]. Durch die erheblichen Mengen installierter Solarmodule ergibt sich damit eine große Menge künftig rückgewinnbarer wertvoller Rohstoffe aus den Komponenten Glas, Silber, Kupfer, Aluminium und Silicium während die Kunststoffanteile zunächst energetisch verwertet werden. Die weitere Reduzierung des Rohstoff- und Energiebedarfes der Solarmodulproduktion ist Gegenstand diverser Entwicklungsprojekte. Bild 10 zeigt die Entwicklungsziele am Beispiel des EU-Projektes ECOSOLAR [4].

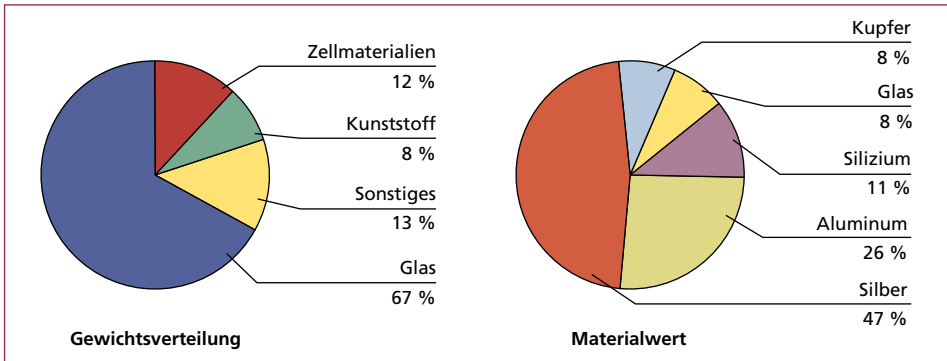


Bild 9: Relative Massenanteile (links) und Materialwerte (rechts) in einem Solarmodul

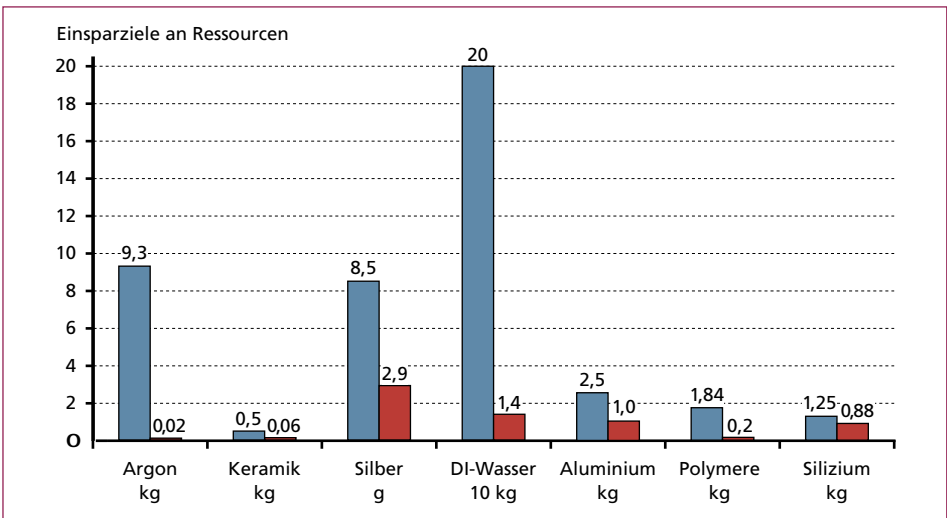


Bild 10: Beispielhafte Einsparziele an Ressourcen gegenüber dem Referenzjahr 2013 (linke Balken) und am Projektende (rechte Balken) im EU-Projekt ECOSOLAR

nach Bellmann, M.P.; Roligheten, R.; Park, G.S.; Denafas, J.; Buchholz, F.; Einhaus, R.; Lombardi, I.; Ehlen, B.; Wambach, K.; Romero, P.; Bollar, A.: Eco-solarFactory: 40 % Plus Eco-efficiency gains in the photovoltaic value chain with minimised resource and energy consumption by closed loop systems. 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2016

### CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und Energierücklaufzeit

Wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck in Äquivalenten auf einen Zeithorizont von 100 Jahren betrachtet, fallen die produktionsbedingten Unterschiede von Mono- und Multikristallinen Siliziumzellen ins Auge. Gerechnet wird auf eine Lebensdauer von 30 Jahren bei einer Südeuropäischen Einstrahlung von 1.700 kWh/m<sup>2</sup>/Jahr und einem Ausnutzungsgrad von 0,75. Daraus ergibt sich ein Fußabdruck von etwa 38 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro kWh für Monokristalline. Bei Polykristallinen fällt der Wert auf etwa 35 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro kWh (Bild 11). Der Unterschied ist dem unterschiedlichen Rohstoff und Energiebedarf bei der Kristallisation zuzuschreiben.



Die größten Anteile des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks entfallen auf die Produktion des Moduls und des Solarsiliciums. Der Großteil der Treibhausgasemissionen ist dem hohen Energieverbrauch zuzuschreiben, der für die hohen Temperaturen des Fertigungsprozesses nötig ist. Daher sind die Berechnungsergebnisse auch vom angenommenen Energiemix abhängig [17]. Würde die gleiche Solarzelle auf die gleiche Art und Weise in China produziert statt in Europa, verdoppeln sich die CO<sub>2</sub>-Äquivalente Emissionen aufgrund des höheren Anteiles fossiler Energieträger bei der Stromherstellung [34, 38]. Eine Möglichkeit zur Senkung ist also, den Fokus auf den Ursprung der verwendeten Energie zu legen. Eine zweite Möglichkeit ist, die Effizienz des Moduls zu steigern, was

durch die rasch technische Entwicklung bei der Solar modul-Herstellung belegt wird [16]. Da die Berechnung pro kWh aufgeführt ist, würde eine Verbesserung der Stromausbeute den ursprünglichen Einfluss der Fertigung weiter relativieren.

In der Photovoltaik wird gerne die sogenannte Energierücklaufzeit verwendet. Sie beschreibt nach welcher Zeit des Betriebes die Energie, welche zur Produktion benötigt wurde, erzeugt wird. Je nach Standort und Randbedingungen der Berechnungen hier liegt ein monokristallines Modul mit knapp über zwei Jahren etwas höher als das multikristalline mit nur zwei Jahren [17]. Eine Studie von bifa ergab sogar deutlich niedrigere Rücklaufzeiten (Tabelle 3) [39].

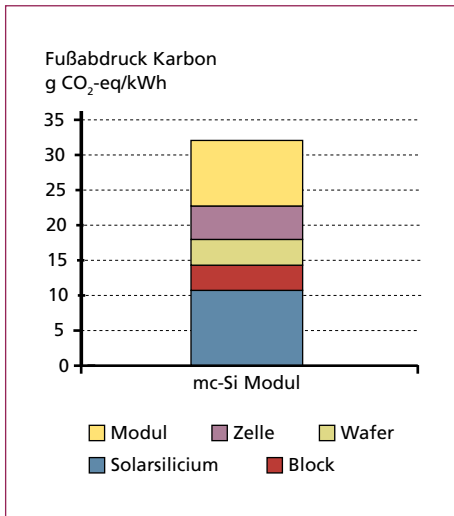


Bild 11: CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines mc-Si Modules

Tabelle 3: Energierücklaufzeiten in Jahren, bezogen auf den KEA gesamt für das Szenario 2012

Anwendungsfall	Aufdach-Privat	Großdach-Industriell	Freifläche
Si-multi	1,29	1,20	1,15
Si-mono	1,30	1,24	1,18
Angenommene Effizienz der Energieversorgung: 9,8 MJ <sub>prim</sub> /kWh			

nach Seitz, M.; Kroban, M.; Pitschke, T.; Kreibe, S.: Ökoeffizienzanalyse von Photovoltaikmodulen. Bifa Umweltinstitut GmbH (Hrsg.): bifa Text Nr. 62, 20213; ISSN 0944-593540

Ein Vergleich verschiedener Modultechnologien mit fossilen Energieträgern zeigt das Ökoeffizienz-Portfolio in Bild 12. Mit Bezug auf die hohen Ökologie-Indizes der Stromerzeugung aus nicht-regenerativen Quellen erscheinen die Ergebnisunterschiede der einzelnen PV-Technologien untereinander marginal. Die Ermittlung der Ökologie-Index Punkte für die Stromerzeugung aus den fossilen Energieträgern Gas, Kohle, Öl erfolgte anhand der jeweiligen Eco-Invent-Ergebnisdatensätze *Strom, ab XYZ-Kraftwerk [DE]*.

Die Einordnung auf der Preisachse zeigt dabei nur eine Momentaufnahme, da die Einspeisevergütung für PV-Anlagen seit 01.04.2012 jeweils nach unten angepasst wird. Die Angebotspreise für Strom aus nicht erneuerbaren Energien hängen von den jeweilig geltenden Primärenergiepreisen sowie den Preisen für benötigte CO<sub>2</sub>-Zertifikate ab. Der starke Preisverfall der Solarmodule macht allerdings die Photovoltaik heute in vielen Fällen bereits wirtschaftlich wettbewerbsfähig. Die mit der Stromerzeugung aus Photovoltaik verbundene Gesamtumweltwirkung ist im Vergleich zum durchschnittlichen europäischen Strom-Mix mit fossilen Energieträgern um den Faktor 10 bis 20 geringer.

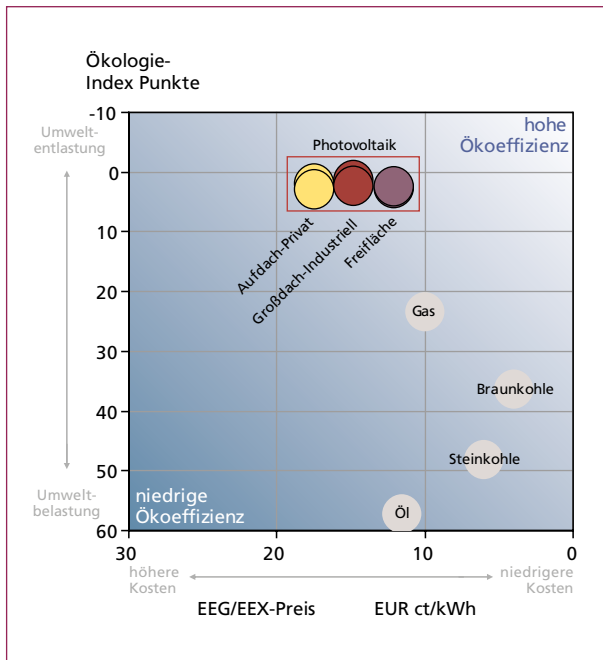


Bild 12:

Ökoeffizienz-Portfolio\* für die drei PV-Anwendungsfälle Aufdach-Privat, Großdach-Industriell und Freifläche und prinzipielle Einordnung der Stromerzeugung aus nicht regenerativen Quellen (niedriger Ökologie-Index bedeutet niedrige Umweltbelastungen; hoher Ökologie-Index bedeutet hohe Umweltbelastungen; Bezugs-einheit: Erzeugung von 1 GWh Strom

\* nach Seitz, M.; Kroban, M.; Pitschke, T.; Kreibe, S.: Ökoeffizienzanalyse von Photovoltaikmodulen. Bifa Umweltinstitut GmbH (Hrsg.): bifa Text Nr. 62, 20213; ISSN 0944-593540

### 4.3. End-of-Life

Photovoltaikanlagen sind auf eine Lebensdauer 30 und mehr Jahren ausgelegt [24]. Nach den Annahmen in der Studie erreichen statistisch betrachtet 93 % das Lebensalter von 30 Jahren. Bei 40 Jahren besteht eine Wahrscheinlichkeit von 99,99 % Verlust des Solarpanels. Angelehnt sind diese Wahrscheinlichkeiten an den Bau- und Konstruktionssektor. Noch vor Inbetriebnahme wird durch Schäden während des Transportes und Aufbau von 0,5 % Verlust ausgegangen. Weitere 0,5 % Verlust treten im Schnitt nach zwei, bis maximal vier Jahren auf. Die Hauptgründe hierfür liegen häufig in mangelhafter Planung und Umsetzung. In bis zu 5 % war der Grund licht-induzierte Degradation. Weitere Beschädigungen, welche fünf bis elf Jahre nach der Installation auftreten, stehen in Zusammenhang mit der Antireflexionsbeschichtung des Glases, Verfärbungen des Ethylen Vinyl Acetats sowie Ablösungen und Beschädigung

der Zellisolation. Diese Ausfälle machen in Summe etwa 2 % aus. Nach zwölf Jahren beginnen sich Langzeitbelastungen auszuwirken. Nach durchschnittlich 15 Jahren betragen die Ausfälle 4 %. Sie werden verursacht durch Brüche im Glas, lose Rahmen, Kontaktfehler, Zellkorrosion oder Diodendefekte. Zusätzlich weisen etwa 40 % der Photovoltaikpanel mindestens eine Zelle mit Mikrofrakturen auf. Diese werden umso häufiger je dünner die verwendeten Zellen sind [24]. Nach etwa 20 Jahren weisen die Zellen noch 80 % ihrer ursprünglichen Leistung auf [38]. Neuerdings wird davon ausgegangen, dass sie aufgrund besserer Technik pro Jahr nur etwa 0,5 % ihrer Leistung einbüßen. Auch Gleichstrom-Wechselstrom-Konverter weisen keine gleichbleibende Leistung auf. Es wird davon ausgegangen, dass sie alle 10 Jahre etwa 10 % Ersatzteile benötigen [30].

Geschätzt werden im Jahr 2016 weltweit 250.000 Tonnen Abfall an Photovoltaik-Panels anfallen. Geht man 2030 von einer gesamten installierten Kapazität von 1.630 GW und den zuvor beschriebenen Verlustraten vor Ende des eigentlichen Produktlebens aus, werden bereits 8 Millionen Tonnen Abfall anfallen. Bis 2050 würde es sich bei einer Kapazität von 4.500 GW bereits um 78 Millionen Tonnen handeln. Der Wert der Rohmaterialien, welche im Jahr 2030 weltweit durch PV-Anlagen in den Abfallstrom eintreten entspräche 450 Millionen USD. Es könnten genug Materialien geborgen werden, um 60 Millionen neuer Panel zu bauen. In Deutschland lägen die produzierten Abfallströme für 2016 bei etwa 0,1 Millionen Tonnen, für 2030 bei etwa 11 Millionen Tonnen, und 2050 bei etwa 4,2 Millionen Tonnen [4].

Haben die PV-Module ihr Lebensende erreicht, gibt es je nach rechtlichen Rahmenbedingungen zwei Möglichkeiten. Entweder sie werden recycelt oder deponiert. Das Deponieren kann nicht die bevorzugte Lösung sein, da wenn auch geringe Mengen toxischer Substanzen enthalten sind und wertvolle Rohstoffe verloren gehen. Seit 2012 fallen PV-Module in Europa unter die EU-Direktive WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) und müssen gesammelt und recycelt werden [38]. Das Recycling in Europa erfolgt aufgrund der derzeitigen geringen Abfallmengen überwiegend in Anlagen zum Verbundglasrecycling, wobei das Glas beispielsweise für Wärmedämmungen verwendet wird, die Metalle recycelt werden und die Kunststoffanteile mit den Solarzellen energetisch verwertet werden [24]. Weltweit finden umfangreiche Entwicklungsarbeiten mit dem Ziel statt leistungsfähigere Recyclingverfahren zu entwickeln, um für die künftig erwarteten hohen Rücklaufmengen vorbereitet zu sein. Auch hier kann eine Pyrolyse unter Nutzung des Energieinhaltes der Polymeranteile vorteilhaft eingesetzt werden [43].

## 5. Zusammenfassung

Die Anforderungen an die Einführung neuer Technologien sind heute äußerst anspruchsvoll. Die Verfolgung eines ganzheitlichen Produktansatzes schon in der Frühphase der Entwicklung neuer Massenprodukte kann aber vielfältige Fehlentwicklungen vermeiden, zu effizienterem Umgang mit Rohstoffen und Energien führen und wirtschaftliche und umweltschonende Lösungen schaffen. Das beginnt bereits beim Produktdesign, der Materialauswahl und dem Verwendungszweck.

Produktion und Fertigung, sowie Recycling und Neufertigung gilt es weiter zu optimieren. Hierfür müssen Märkte und Strukturen geschaffen werden. Das Ziel ist eine geschlossene Kreislaufwirtschaft mit all ihren Vorteilen.

Durch die inzwischen im Vergleich zu Karbonfaserprodukten sehr hohe Verbreitung der Photovoltaik ist ein höherer Reifegrad des Produktes erreicht worden, der sich in starker Standardisierung, gesetzlichen Regelungen und vielfältigen Entwicklungen von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Nutzung und Recycling niederschlägt. Gemeinsam ist den Produkten jedoch, dass teure und energieintensive Rohmaterialien und Prozesse zum Einsatz kommen. Der erhöhte Produktionsaufwand wird jedoch durch lange Nutzungsdauern und zunehmende Effizienz teilweise vielfach kompensiert. In Verbindung mit einem werterhaltenden Kreislaufwirtschaftskonzept kann der Einsatz der noch jungen Technologieprodukte künftig einen deutlich Beitrag zur umweltschonenden Mobilität bzw. Energieerzeugung leisten.

## 6. Literatur

- [1] Anderson J. et al.: green guide to composites. An environmental profiling system for composite materials and products. 2004
- [2] Audi AG: Umweltbilanz. 2011
- [3] Becks, H.; Gelbke, H.: Die Ökoeffizienzanalyse nach BASF. 2001; [https://www.tatup-journal.de/downloads/2001/tadn012\\_bege01a.pdf](https://www.tatup-journal.de/downloads/2001/tadn012_bege01a.pdf), Zugriff 01.12.2016
- [4] Bellmann, M.P.; Roligheten, R.; Park, G.S.; Denafas, J.; Buchholz, F.; Einhaus, R.; Lombardi, I.; Ehlen, B.; Wambach, K.; Romero, P.; Bollar, A.: Eco-solarFactory: 40 % Plus Eco-efficiency gains in the photovoltaic value chain with minimised resource and energy consumption by closed loop systems. 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2016
- [5] Brosius, D.: Thermosets vs. Thermoplastics: Is the battle over? 2015; <http://www.composites-world.com/articles/thermosets-vs-thermoplastics-is-the-battle-over>, aufgerufen am 12.10.2016
- [6] Brosy, M.: Herstellung einer Solarzelle. <http://www.energienpoint.de/erneuerbare-energien/solarenergie/herstellung-einer-solarzelle/>, aufgerufen am 20.10.2016
- [7] Dauguet, M.; Mantaux, O.; Perry, N.; Zhao, Y.F.: Recycling of CFRP for high value applications: effect of sizing removal and environmental analysis of the super critical fluid solvolysis. 2015
- [8] Deng, Y.; Tian, Y.: Assessing the Environmental Impact of Flax fibre reinforced polymer composite from a cosequential life cycle assessment perspective. 2015
- [9] Dufloy, J.R.; Deng, Y.; Van Acker, K.; Dewulf, W.: Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment based study. MRS Bulletin, 2012
- [10] Eickenbusch, H.; Krauss, O.: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien. 2013, [http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-03-VDI-ZRE-CFK.pdf](http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-03-VDI-ZRE-CFK.pdf), Zugriff 01.12.2016
- [11] Emmerich, R.; Kuppinger, J.: Kohlenstofffasern wiedergewinnen. Kunststoffe 204 (2014), Nr.6, 2014, S.92-97; ISSN: 0023-5563
- [12] Eskelinen, J.; Robles, A.G.; Lindy, I.; Marsch, J.; Munte-Kunigami, A. (Edt.): Citizen-Driven Innovation. 2015
- [13] EU Recycling: ein heikles Material. <http://eu-recycling.com/Archive/12269>, aufgerufen am 11.10.2016
- [14] European Commission: Product Environmental Footprint Pilot Guidance. 2016

- [15] FIA: Global reduction in CO<sub>2</sub> emissions from cars: a consumer's perspective. Policy recommendations for decision makers
- [16] Frischknecht, R.: TREEZE 2016. [http://www.swissolar.ch/fileadmin/user\\_upload/Tagungen/14\\_pv-Tagung/5.6\\_Umweltfussabdruck\\_von\\_Photovoltaikstrom\\_Stand\\_heute\\_und\\_zukuenftige\\_Entwicklungen\\_ROLF\\_FRISCHKNECHT.pdf](http://www.swissolar.ch/fileadmin/user_upload/Tagungen/14_pv-Tagung/5.6_Umweltfussabdruck_von_Photovoltaikstrom_Stand_heute_und_zukuenftige_Entwicklungen_ROLF_FRISCHKNECHT.pdf), Zugriff 30.11.2016
- [17] Fthenakis, V. et al.: Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. International Energy Agency, 2005
- [18] Gardiner, G.: Recycled carbon fiber update: Closing the CFRP lifecycle loop. 2014; <http://www.compositesworld.com/articles/recycled-carbon-fiber-update-closing-the-cfrp-lifecycle-loop>, aufgerufen am 10.10.2016
- [19] Greenhouse gas protocol: <http://www.ghgprotocol.org/>, Zugriff 01.12.2016
- [20] Hardcastle, J.L.: Strong, Lightweight and Recyclable: Has this startup discovered the holy grail of carbon-fiber composites? 2016; <http://www.environmentalleader.com/2016/02/19/strong-lightweight-and-recyclable-has-this-startup-discovered-the-holy-grail-of-carbon-fiber-composites/>, aufgerufen am 11.10.2016
- [21] Higgins, A.; Klein, S.: Introduction to the Living Lab Approach. 2011; [https://www.researchgate.net/publication/226682643\\_Introduction\\_to\\_the\\_Living\\_Lab\\_Approach](https://www.researchgate.net/publication/226682643_Introduction_to_the_Living_Lab_Approach), Zugriff 01.12.2016
- [22] Industrievereinigung Verstärkter Kunststoffe e.V.: Nachhaltigkeit von Faserverbundkunststoffen. Betrachtung anhand ausgewählter Beispiele; [http://www.avk-tv.de/files/20110701\\_nachhaltigkeit\\_fvk.pdf](http://www.avk-tv.de/files/20110701_nachhaltigkeit_fvk.pdf), Zugriff 01.12.2016
- [23] Institut für Aufbereitung und Recycling: Carbonfaserverstärkte Kunststoffe. <http://www.iar.rwth-aachen.de/cms/IAR/Forschung/Kompetenzen/Referenzprojekte/~ilbd/CFK-Carbonfaserverstaerkte-Kunststoffe/>, aufgerufen am 10.10.2016
- [24] IRENA and IEA-PVPS: End-of-Life Management – Solar Photovoltaic Panels. IEA-PVPS Report Number: T12-06:2016, 2016; ISBN 978-3-906042-36-7 (IEA PVPS)
- [25] Kempkens, W.: Siemens entwickelt neues Recyclingverfahren für Carbonfasern. 2013; <http://www.ingenieur.de/Fachbereiche/Umwelt-Recyclingtechnik/Siemens-entwickelt-neues-Recyclingverfahren-fuer-Carbonfasern>, aufgerufen am 11.10.2016
- [26] Kraus, T.; Kühnel, M.: Composites – Marktbericht 2015. carbon composites, 2015
- [27] Landesamt für Umwelt: Der Ökologische Fußabdruck. 2008; [http://www.lfu.bayern.de/umwelt-wissen/doc/uw\\_86\\_oekologischer\\_fussabdruck.pdf](http://www.lfu.bayern.de/umwelt-wissen/doc/uw_86_oekologischer_fussabdruck.pdf), Zugriff 01.12.2016
- [28] Lexikon der Nachhaltigkeit: Ökoeffizienzanalyse. 2016; [https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/oekoeffizienzanalyse\\_1566.htm](https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/oekoeffizienzanalyse_1566.htm), Zugriff 01.12.2016
- [29] Manis, F. et al.: Bewertung der mechanischen und ökologischen Aspekte des thermischen Recyclings von Faserverbundwerkstoffen. 2016; [http://www.forcycle.de/sites/default/files/manis\\_betz\\_woelling\\_drechsler\\_thermischesrecycling.pdf](http://www.forcycle.de/sites/default/files/manis_betz_woelling_drechsler_thermischesrecycling.pdf), Zugriff 01.12.2016
- [30] Masakazu, I.: Life Cycle Assessment of PV systems, Crystalline Silicon – Properties and Uses. 2011; <http://www.intechopen.com/books/crystalline-silicon-properties-and-uses/life-cycle-assessment-of-pv-systems>, Zugriff 01.12.2016
- [31] Masuelli, M.A.: Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Process. 2013; [https://www.researchgate.net/publication/259287074\\_Introduction\\_of\\_Fibre-Reinforced\\_Polymers\\_-\\_Polymers\\_and\\_Composites\\_Concepts\\_Properties\\_and\\_Processes](https://www.researchgate.net/publication/259287074_Introduction_of_Fibre-Reinforced_Polymers_-_Polymers_and_Composites_Concepts_Properties_and_Processes), Zugriff 01.12.2016
- [32] Mazumdar, S.: State of the composites industry. compositesmanufacturingmagazine, 2016; <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2016/01/state-of-the-composites-industry-lucintel-2016/2/>, aufgerufen am 12.10.2016
- [33] Meiners, D.; Eversmann, B.: Recycling von Carbonfasern. [http://www.vivis.de/phocadownload/2014\\_rur/2014\\_RuR\\_371\\_378\\_Meiners.pdf](http://www.vivis.de/phocadownload/2014_rur/2014_RuR_371_378_Meiners.pdf), Zugriff 01.12.2016

- [34] Nunez, C.: How green are those solar panels, really? National Geographic; <http://news.nationalgeographic.com/news/energy/2014/11/141111-solar-panel-manufacturing-sustainability-ranking/>, Zugriff am 21.10.2016
- [35] Pant, R.; Pelletier, N.; Chomkham Sri, K.; Manfredi, S.: Environmental Footprint. European Commission, 2011
- [36] reinforcedplastics.com: Composites can be recycled. 2011
- [37] renewable-energy-concepts: Produktionsverfahren – Solarzellen Herstellung. <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/sonnenenergie/solaranlage-solartechnik/solarzellen-herstellung.html>, Zugriff am 20.10.2016
- [38] Schwartzfeger, L.; Miller, A.: Environmental Aspects of photovoltaic solar power, EEA Conference & Exhibition 2015, 24-26 June, Wellington, 2015; [http://www.epecentre.ac.nz/research/need\\_slides/Environmental%20Aspect%20of%20Photovoltaic%20Solar%20Power%20-%20The%20New%20Zealand%20Context%20-%20Luke%20Schwartzfeger,%20Allan%20Miler.pdf](http://www.epecentre.ac.nz/research/need_slides/Environmental%20Aspect%20of%20Photovoltaic%20Solar%20Power%20-%20The%20New%20Zealand%20Context%20-%20Luke%20Schwartzfeger,%20Allan%20Miler.pdf), Zugriff 01.12.2016
- [39] Seitz, M.; Kroban, M.; Pitschke, T.; Kreibe, S.: Ökoeffizienzanalyse von Photovoltaikmodulen. Bifa Umweltinstitut GmbH (Hrsg.): bifa Text Nr. 62, 20213; ISSN 0944-593540
- [40] SGL automotive carbon fibers: recycling products. <http://www.sglacf.com/en/products/recycling.html>; Zugriff 11.10.2016
- [41] Tukker, A.; Jansen, B.: Environmental Impacts of Products: A Detailed Review of Studies. In: Journal of Industrial Ecology, 10. 2006, S. 159-182; doi:10.1162/jiec.2006.10.3.159
- [42] VDI (2014): H. Eickenbusch, O.Krauss, Kurzanalyse Nr. 3: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien, VDI ZRE Publikationen 2. Aufl. Berlin 2014
- [43] Wambach, K.; Schlenker, S.; Konrad, B.; Müller, A.; von Ramin-Marro, D.; Clyncke, J.; Gomez, V.; Hartleitner, B.; Rommel, W.: Pvcycle – the voluntary take back system and industrial recycling of PV modules. 24th EU PVSec, 2009
- [44] Wirth H., Fraunhofer ISE, Freiburg (2016): Recent Facts about Photovoltaics in Germany
- [45] Xperion Components: Der Werkstoff für Innovationen. Faszination CFK. [http://www.avanco.de/fileadmin/user\\_upload/pdf-broschueren/xperion-components\\_faszination-CFK\\_DE\\_low.pdf](http://www.avanco.de/fileadmin/user_upload/pdf-broschueren/xperion-components_faszination-CFK_DE_low.pdf), Zugriff 01.12.2016