

Kurzfassung der Dissertation

Werden Faserverbundbauteile aus vorimprägnierten Halbzeugen (Prepregs) hergestellt, fallen aufgrund der Form der Halbzeuge und der Art der Herstellungsprozesse i.d.R. zwischen 10 % und 40 % des eingesetzten Materials als Verschnittabfall an. Bislang werden diese im industriellen Umfeld zusammen mit ausgehärteten Verschnittresten gesammelt und einer thermischen Verwertung zugeführt, wobei es sich um klassische Müllverbrennung oder auch pyrolytisches Recycling handeln kann. Dabei wird weitgehend ignoriert, dass die Entsorgung unausgehärteter Abfälle nicht nur Gefahren birgt, etwa durch eine unkontrollierte exotherme Aushärtungsreaktion an der Sammelstelle, sondern auch die Chance, diesen Harzanteil zu erhalten und zu nutzen – obwohl in einigen Betrieben über 70% der Faserverbundabfalls auf unausgehärtete Abfälle entfallen. Um diese Herausforderung zu lösen, wird im Rahmen dieser Arbeit ein technisches Verfahren entwickelt, mit dem unausgehärtete Prepregabfälle in Form einer duroplastischen Fließpressmasse weiterverwertet und zu neuen Bauteilen verarbeitet werden können.

Verfahren zur Aufbereitung der geometrisch sehr unterschiedlichen Abfallformen, bspw. einlagige Restrollen und mehrlagiger Randbeschnitt, werden hinsichtlich der Eignung zur Homogenisierung der Abfälle untersucht. Eine direkte Weiterverarbeitung des damit hergestellten Kurzfaserschnittmaterials ist aufgrund des geringen Harzgehaltes und nicht vorhandener Fließfähigkeit nicht möglich. Erst die Modifikation des Verbundes durch Zugabe von ergänzendem Matrixmaterial und geeigneten Füllstoffen zur Rheologiemodifikation erlauben eine Verarbeitung als Fließpressmasse („reBMC“).

Weiter wird der Einfluss der Alterung des Prepregs, insbesondere durch Überlagerung zwischen Abfallentstehung und Weiterverwertung, untersucht. Dabei kann gezeigt werden, dass teilpolymerisiertes Prepregs bis zu einem Polymerisationsgrad von über 30 % erfolgreich als reBMC weiterverarbeitet werden. Dabei hat die reduzierte Klebrigkeit der Matrix positiven Einfluss auf die Materialvorbereitung, die mechanischen Eigenschaften übertreffen die von aus frischem Prepreg hergestellten Probekörpern. Den experimentellen Teil abschließend wird die Herstellbarkeit eines komplexen Bauteils im Heißpressverfahren nachgewiesen.

Aufgrund von Defiziten existierender Materialmodelle zur Beschreibung derartiger Kurzfaserverbundbauteile wird im letzten Abschnitt dieser Arbeit ein Materialmodell zur Beschreibung der Festigkeit von hybriden Verbunden, unter Einbezug des in der Praxis häufig auftretenden Porengehalts, sowie eines kritischen Füllgrades, ab dem Füllstoffagglomerationen die mechanischen Eigenschaften stark negativ beeinflussen, entwickelt. Abschließend wird gezeigt, dass die aus diesem Modell entwickelte Funktion

$$\sigma_c = \begin{cases} \frac{\eta_f \sigma_f}{2\pi} V_f + a (\sigma_a + 0,83 \tau_m) V_p + \eta_m \sigma_m (V_m - \sqrt[3]{V_L^n} - \sqrt[3]{V_p^n}) & \text{für } (V_f + V_p + V_L) < V_{krit} \\ \frac{\eta_f \sigma_f}{2\pi} V_f + a (\sigma_a + 0,83 \tau_m) V_p + \eta_m \sigma_m (V_m - \sqrt[3]{V_L^n} - \sqrt[3]{V_p^m}) - \sigma_m c (V_L + V_f + V_p - V_{krit})^n & \text{für } (V_f + V_p + V_L) > V_{krit} \end{cases}$$

empirische ermittelte Versuchsdaten zur Festigkeit von gefüllten Verbunden beschreiben kann.

1 Einführung

Bereits seit den frühen achtziger Jahren werden kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) in der Luftfahrtindustrie in großem Umfang eingesetzt. Das hervorragende Verhältnis von guten mechanischen Eigenschaften zu geringer Werkstoffdichte hat gerade in der Luft- und Raumfahrtindustrie zu einer stetigen Ausweitung des Einsatzes dieses Materials geführt. Anfänglich nur in kleinerem Umfang eingesetzt, wurde 1983 das erste Seitenleitwerk aus CFK in der Airbus A320-Serie eingeführt. Und diese Entwicklungstendenz kulminierte im Jahr 2013 mit dem Erstflug des Airbus A350, einem Flugzeug mit einem Faserverbundanteil von über 50 % und Großstrukturbauteilen wie Rumpf, Flügel und Leitwerken aus CFK. Diese Bauteile werden heute fast ausschließlich aus vorimprägnierten Faserhalbzeugen (Prepregs) mit einer Matrix auf Epoxidharzbasis hergestellt.

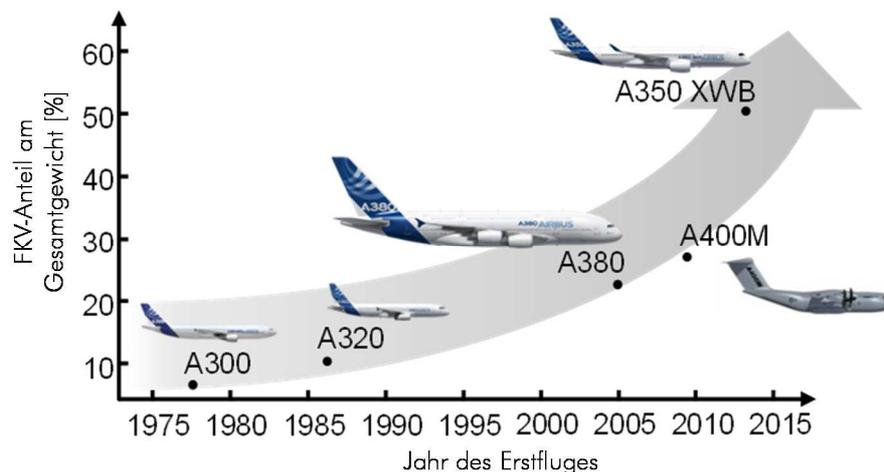


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Entwicklung des FKV-Anteils am Gesamtgewicht der Airbus-Flugzeuge [1]

Die wesentlichen Herausforderungen des Einsatzes dieses Werkstoffes waren die Fertigungstechnologien zur Verarbeitung der Rohstoffe (Matrix und Fasern) in Bauteile, sowie der Aufwand zur Herstellung der Kohlenstofffaser an sich – und die damit einhergehenden Kosten.

Die heute in der Luftfahrt gängigen Fertigungsverfahren, wie etwa automatisiertes Faser- (AFP) oder Tape-Ablegen (ATL), weisen zwar einen relativ hohen Ausnutzungsgrad des Werkstoffes – verglichen mit dem Zuschnitt aus Rollenmaterial – auf, dennoch reichen typische Verschnittmengen bis zu 40 %. Dies birgt ein ökonomisches und ein ökologisches Problem: eine nicht optimale Ausnutzung der eingekauften Werkstoffe führt dazu, dass Material verschwendet wird, diese Mehrkosten auf die Herstellungspreise umgelegt werden müssen und damit zu teureren Bauteilen führen.

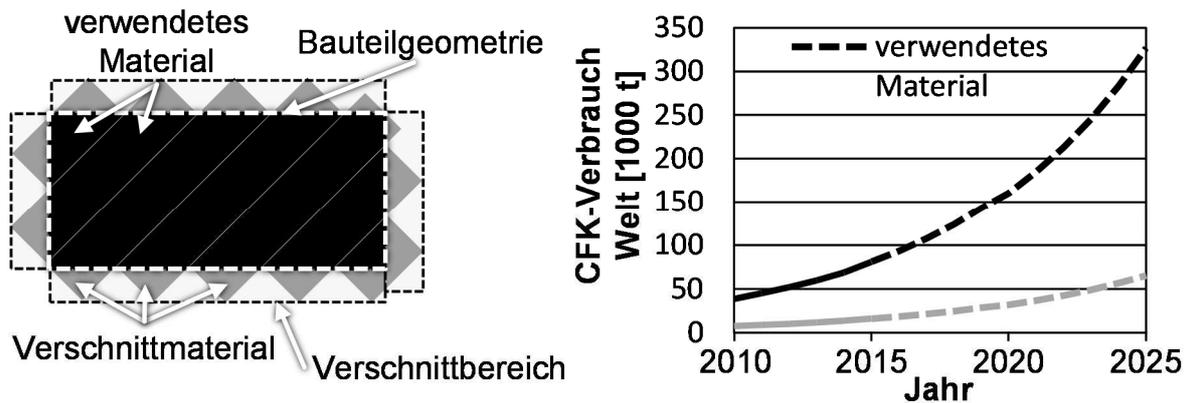


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Verschnittentstehung (links), sowie weltweiter CFK-Verbrauch mit Verschnittanteilen (rechts) [1]

Der hohe intrinsische Energiegehalt der Kohlenstofffasern (~ 286 MJ/kg, im Vergleich Aluminium: 160 MJ/kg oder Stahl: 33 MJ/kg), sowie des Matrixsystems (76 MJ/kg für typische Epoxidharze) impliziert, dass Umweltressourcen, die zur Herstellung eingesetzt wurden, nicht gut genutzt werden [2].

Obwohl Kohlenstofffasern bereits in den frühen 1960er Jahren entwickelt wurden, wurden Recyclingverfahren für CFK erst gegen Ende der 2000er Jahre kommerzialisiert. Mittels thermischer Verfahren wie der Pyrolyse werden dabei Fasern und Matrix voneinander getrennt, wobei die Matrix energetisch verwertet (verbrannt) wird, während die Fasern zurückgewonnen und weiterverarbeitet werden können.

Der Großteil der CFK-Abfälle in der Luftfahrtindustrie entsteht jedoch in Form von Fertigungsverschnitt aus unausgehärtetem Prepreg: etwa 70 - 80 % des CFK-Abfalls fallen in dieser Form an, nur ein vergleichsweise geringer Anteil entfällt auf ausgehärtete CFK-Bauteile oder Beschnittreste.

Diese Tatsache wirft die Frage auf, ob es für diesen spezifischen Wertstoffstrom grundsätzlich ein industriell einsetzbares Verfahren gibt, das sich zur direkten oder indirekten Weiterverarbeitung des Prepregverschnitts eignet. Eine Aufbereitung ohne Einsatz eines thermischen Recyclingverfahrens und des damit einhergehenden Verlustes der Matrix, der Oberflächenschichte der Fasern und des grundsätzlichen Abbaus der mechanischen Eigenschaften der C-Fasern nach derartiger thermischer Behandlung, könnte die Wiederverwertungsquote von heute maximal 40 % bis 60 % (entsprechend dem Faservolumengehalt) auf 100 % heben.

Ein solches direktes Aufbereitungsverfahren zu identifizieren oder zu entwickeln soll Ziel dieser Arbeit sein.

1.1 Ziel dieser Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Verfahren entwickelt werden, mittels dessen es möglich ist, die in der Produktion von CFK-Bauteilen in der Luftfahrtindustrie anfallenden Prepreg-Verschnittmengen weitestgehend einschließlich des vorhandenen, unausgehärteten Matrixsystems zu neuen Halbzeugen und Bauteilen weiterzuverarbeiten.

Grundlage hierfür ist eine Analyse des Ist-Zustandes in der Produktion: Was für ein Material bzw. welche Materialien werden verwendet, welche Form haben die Fertigungsreste, welchen Aushärtegrad hat das Material bereits erreicht („shop/shelf life“), wo ist der Entstehungsort, wie ist Regelmäßigkeit des Anfallens, welche Form der Sammlung und welcher Grad der Abfall-Trennung.

Auf dieser Basis werden dann – ausgehend vom aktuellen Stand der Technik – Ansätze untersucht, mit denen Prepregverschnitt entweder direkt, d.h. in der Form, in der der Verschnitt angefallen ist, oder indirekt, d.h. mit zusätzlichen Hilfsstoffen oder Aufbereitungsschritten, weiter verwertet werden kann.

Die aufbereiteten Materialien werden, so möglich, zu Prüfkörpern weiterverarbeitet und hinsichtlich ihrer Werkstoffeigenschaften untersucht. Dabei wird besonderer Augenmerk auf die Sensitivität der Eigenschaften in Abhängigkeit vom gewählten Aufbereitungsverfahren allgemein, sowie von den spezifischen Eigenschaften der eingebrachten Rohstoffe (etwa z.B. von dem Alter bzw. Polymerisationsgrad der aufbereiteten Verschnittmengen) im Speziellen, gelegt. Anschließend wird die Umsetzbarkeit und Skalierbarkeit des Herstellungsprozesses des entwickelten Rezyklat-Materials in industriellem Maßstab validiert und die Verarbeitbarkeit zu realen Bauteilen nachgewiesen.

Aufgrund von Defiziten existierender Materialmodelle zur analytischen Beschreibung der mechanischen Eigenschaften, insbesondere aber der Festigkeit derartiger Kurzfaserverbunde, soll im letzten Abschnitt dieser Arbeit ein Materialmodell zur Beschreibung der Festigkeit von Vier-Phasen-Verbunden, unter Einbezug des in der Praxis häufig auftretenden Porengehalts, entwickelt werden.

1.2 Struktur der Arbeit und Arbeitsbereiche

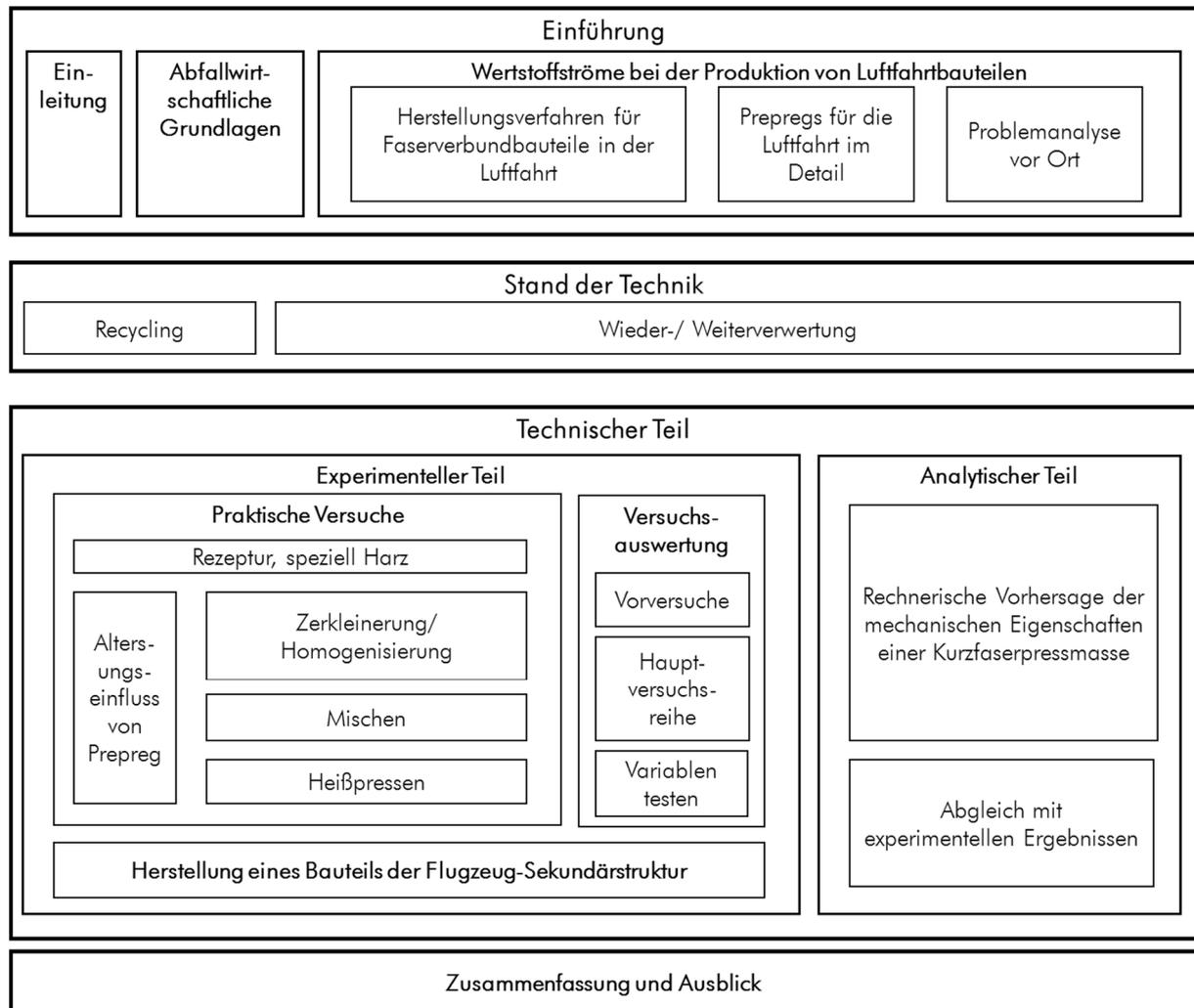


Abbildung 3: Struktur der Kapitel dieser Arbeit

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Abfallwirtschaftliche Grundlagen

2.1.1 Rechtliche Grundlagen

Produktentwicklungen sind heute im Wesentlichen von technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten geprägt. Umweltaspekte tauchen zwar in Strategiepapieren auf, müssen aber meist über den Weg des Gesetzes eingefordert werden. Die Strategie der EU sieht einen ganzheitlichen Ansatz vor, bei dem eine langfristig abfallfreie Kreislaufwirtschaft, vgl. Abbildung 4, angestrebt wird.

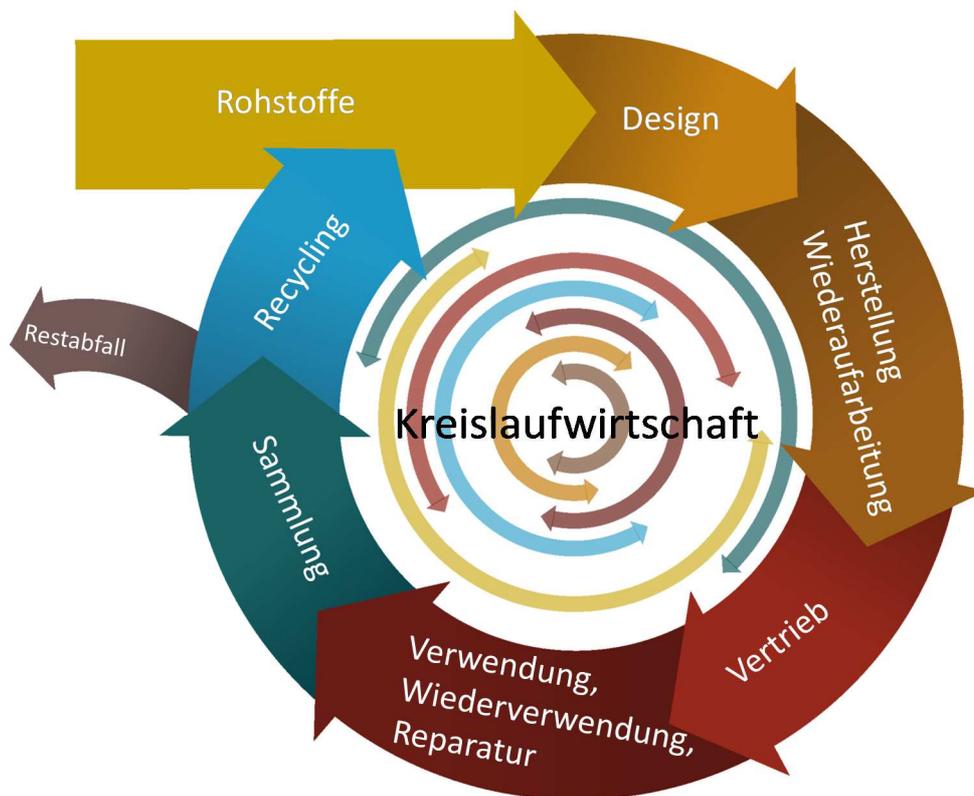


Abbildung 4: Das Ziel einer Kreislaufwirtschaft: Ein abfallfreies Programm für Europa [3]

Die Notwendigkeit einer Strategie zur Förderung und Verbesserung einer Kreislaufwirtschaft kann mit einer Sankey-Darstellung der Materialflüsse innerhalb der EU illustriert werden (Abbildung 5). Von den 1,79 Gt Material, die in die Abfallaufbereitung gegangen sind, konnten in 2018 etwa 0,75 Gt recycelt werden.

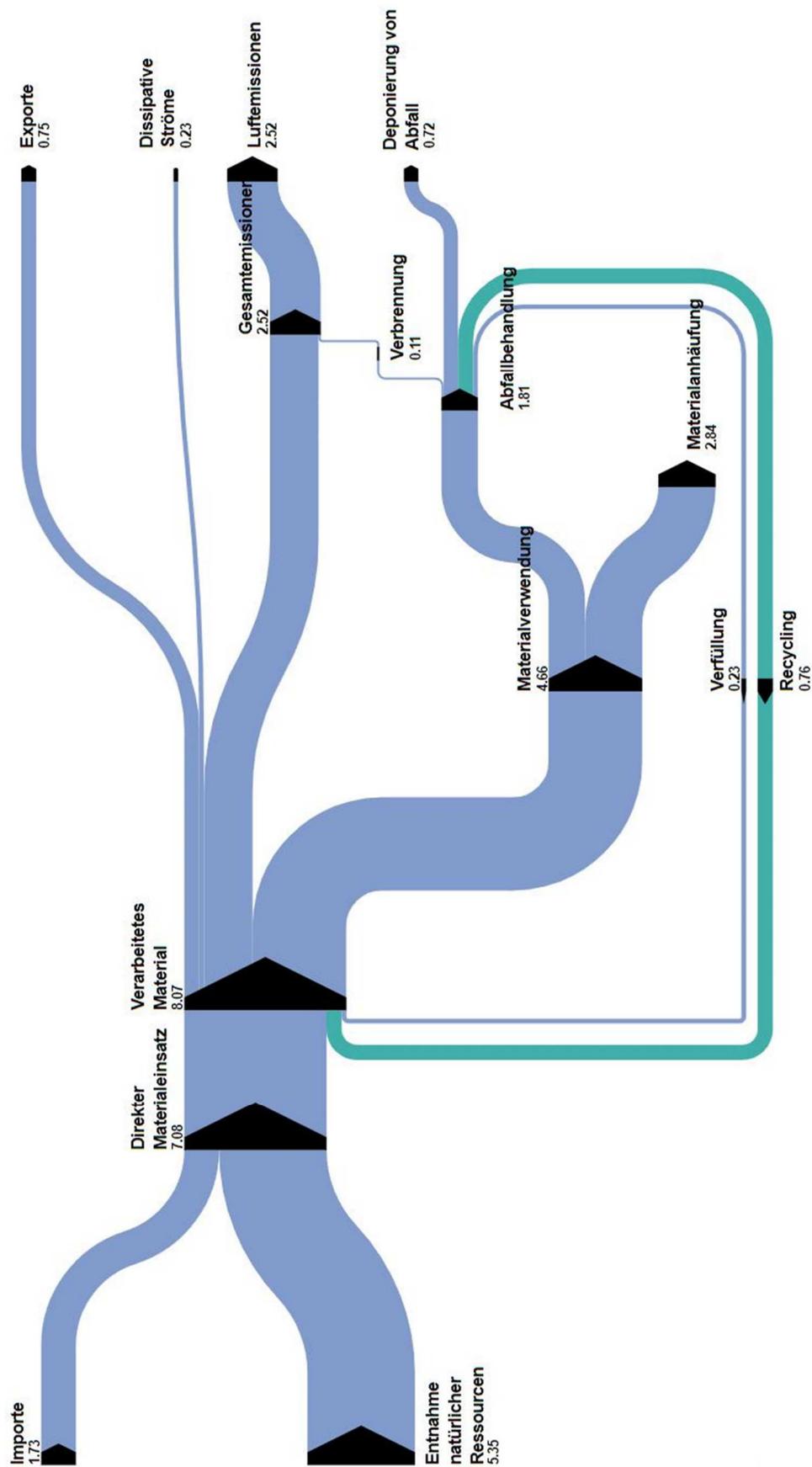


Abbildung 5: Materialflüsse in der EU in Gt/Jahr in 2018, maßstabsgetreue Darstellung [4]

Mit der EU-Richtlinie 1999/31/EG wird eine klare Strategie der EU eingeführt, um die Menge deponierbaren Abfalls deutlich zu reduzieren. Die Richtlinie 2003/33/EG klärt im Anhang II die spezifischen Annahmekriterien für zu deponierende Abfälle, wobei zwischen den Deponieklassen „Deponie für gefährliche Abfälle“, „Deponie für nicht gefährliche Abfälle“ und „Deponie für Inertabfälle“ (1999/31/EG, Art. 4) unterschieden wird. Glasfasern gelten beispielsweise als Inertabfall, jedoch „nur ohne organische Bindemittel“ (vgl. 2003/33/EG, Abschnitt 2.1.1.).

Eine Deponierung von CFK-Abfällen wäre entsprechend o.g. Richtlinien zwar prinzipiell auf Deponien für gefährliche Abfälle möglich, würde aber eine gesonderte Antragstellung erfordern und diese ist entsprechend der Strategie des Bundes und der EU nur dann zu erteilen, wenn keine höherwertigen Aufbereitungs- bzw. Entsorgungswege möglich sind. Eine Deponierung unausgehärteten CFKs ist jedoch dahingehend ausgeschlossen, da die Richtlinien eine Minimierung des Umweltschädigungspotentials vorschreiben, die in diesem Fall nur durch eine Aushärtung der Abfälle zu erreichen wäre.

Auf nationaler Ebene ist diese grundsätzliche Zielstellung bereits seit dem Inkrafttreten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) von 1996 gesetzlich verankert. „Zweck des Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen.“ (KrWG, [5, Abschn. 1]). Nach diesem Gesetz sind Abfälle „alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss“ (KrWG, §3). Anwendung findet diese Definition auf alles, was die Produktion neben dem eigentlichen Produkt miterzeugt. Nicht mit einbezogen sind Nebenerzeugnisse, die unmittelbar weitergenutzt werden.

In der Überarbeitung des KrWG von 2012 wurde die Zielhierarchie für den Umgang mit Abfällen ergänzt. Neu eingeführt wurde dabei der Begriff der „Vorbereitung der Wiederverwendung“, also der direkten Weiterverwertung, der der stofflichen Verwertung (z.B. Einschmelzen von thermoplastischen Werkstoffen) vorzuziehen ist. Diese wiederum hat Vorrang vor der energetischen Verwertung von Abfällen (Nutzung des energetischen Gehalts/Brennwertes der Werkstoffe) und letztlich der Deponierung (Europäische Kommission, 2018).

KrWG §6 Abs. 1 legt die strategische Rangfolge der Maßnahmen zur Abfallbewirtschaftung wie folgt fest (in Klammern die Kurzform, die sich im Sprachgebrauch etabliert hat):

- 1) Vermeidung („Reduce“)
- 2) Vorbereitung zur Wiederverwendung („Reuse“)
- 3) Recycling („Recycle“)
- 4) sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung
- 5) Beseitigung

Für die betriebliche Praxis lassen sich daraus klare Handlungsprioritäten ableiten: zuerst sollte versucht werden, die anfallenden Abfallmengen zu reduzieren, etwa durch „net-shape“ Fertigung, d.h. konturexakte Bauteilfertigung. Abfallstoffe, die dennoch anfallen,