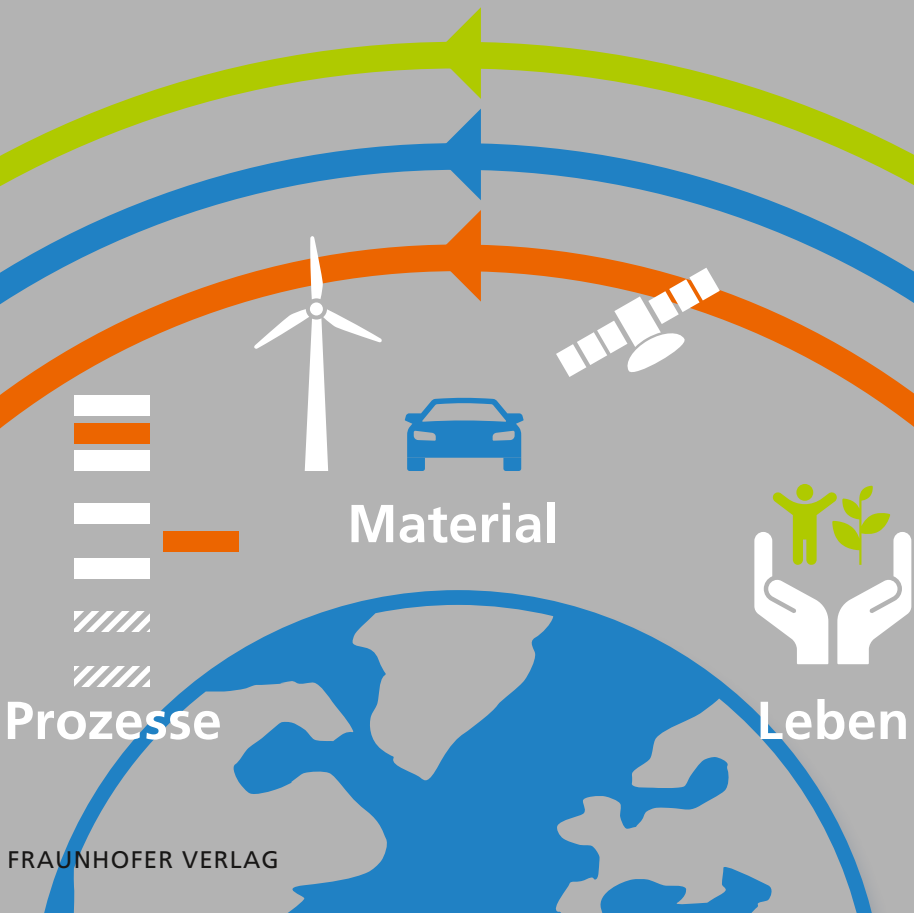


KREISLAUFWIRTSCHAFT UND KLEBTECHNIK

Eine Studie des Fraunhofer IFAM



IMPRESSUM

Kontaktadresse

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und
Angewandte Materialforschung IFAM

Wiener Straße 12, 28359 Bremen

Telefon 0421 2246-0

E-Mail info@ifam.fraunhofer.de

URL www.ifam.fraunhofer.de

© Fraunhofer Verlag, 2020

Fraunhofer-Informationszentrum
Raum und Bau IRB

Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon 0711 970-2500

E-Mail verlag@fraunhofer.de

URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Externe Dienstleister

Grafiken, Satz und Layout
Jens Oertel Design, Bremen

Druck und Bindung
RCOM print GmbH,
Würzburg-Rimpar

Für den Druck des Buches
wurde chlor- und säure-
freies Papier verwendet.



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese
Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <http://dnb.de> abrufbar.

ISBN (Print) 978-3-8396-1636-9

DOI: 10.24406/ifam-n-596949

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Bernd Mayer und Andreas Groß (Hrsg.)

KREISLAUFWIRTSCHAFT UND KLEBTECHNIK

Studie des Fraunhofer-Instituts
für Fertigungstechnik und
Angewandte Materialforschung IFAM



Dipl.-Phys. Kai Brune

Abteilung Qualitätssicherung und Cyber-Physische Systeme



Dr. Stefan Dieckhoff

Abteilung Adhäsions- und Grenzflächenforschung



Dr. Holger Fricke

Abteilung Klebtechnische Fertigung



Prof. Dr. Andreas Groß

Abteilung Weiterbildung und Technologietransfer



Dr.-Ing. Katharina Haag

Abteilung Polymere Werkstoffe und Bauweisen



Prof. Dr. Andreas Hartwig

Abteilung Klebstoffe und Polymerchemie



Dr. Welchy Leite Cavalcanti

Abteilung Adhäsions- und Grenzflächenforschung



Prof. Dr. Bernd Mayer

Leitung Fraunhofer IFAM –
Bereich Klebtechnik und Oberflächen



Dr. Michael Noeske

Abteilung Adhäsions- und Grenzflächenforschung



Dr. Ralph Wilken

Abteilung Plasmatechnik und Oberflächen

Impressum	U2
Autorenteam Fraunhofer IFAM	2
Vorbemerkung	9
Zusammenfassung	11

1 KAPITEL 1 Einführung: Klebtechnik – Definition, Möglichkeiten und heutige Grenzen 17

1.1	Neue Produktanforderungen – die Rolle der Werkstoffe	18
1.2	Neue Produktanforderungen – die Rolle der Verbindungstechniken	21
1.3	Neue Produktanforderungen – die Rolle der Verbindungstechnik »Kleben«	26
1.4	Die Verbindungstechnik »Kleben« – eine Einordnung und Erläuterung	29
1.4.1	Kleben – eine historische Betrachtung	29
1.4.2	Kleben – Meilensteine der Entwicklung	30
1.4.3	Kleben – Vorbild in der Natur	32
1.4.4	Kleben – Einordnung als Verbindungstechnik	34
1.5	Die Verbindungstechnik »Kleben« – Vorteile im Vergleich zu anderen Verbindungstechniken	39
1.6	Die Verbindungstechnik »Kleben« – limitierende Faktoren im Vergleich zu anderen Verbindungstechniken	41
1.7	Die Verbindungstechnik »Kleben« – Beispiele typischer Anwendungsbereiche	44
1.7.1	Kleben im Alltag	44
1.7.2	Industrielles Kleben	46
1.8	Kleben – wirtschaftliche Bedeutung dieser Verbindungstechnik	56
1.9	Kleben – aber sicher: die Entwicklung und Umsetzung von Qualitätsnormen zur Gewährleistung sicheren Klebens	58
1.9.1	Einführung	58
1.9.2	Klebtechnische Qualitätsnormen – Stand der Entwicklungen	62
1.10	Die Verbindungstechnik »Kleben« – ihr Potenzial als Verbindungstechnik Nr. 1 des 21. Jahrhunderts	68

2	KAPITEL 2 Herausforderungen der Klebtechnik im Zusammenhang mit »Kreislaufwirtschaft« und »Ökodesign«	71
<hr/>		
2.1	Politische Rahmenbedingungen aus globaler Sicht	72
2.2	Politische Rahmenbedingungen aus europäischer Sicht: Der Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft unter dem Green Deal	76
2.3	Ökodesign im Rahmen der Kreislaufwirtschaftsstrategie der Europäischen Union	82
2.3.1	Definition »Ökodesign«	82
2.3.2	Zusammenfassung des Stands der europäischen Regulierungen mit Bezug zu den Verbindungstechniken bei der Herstellung energieverbrauchsrelevanter Produkte – Ökodesign-Arbeitsprogramm der EU	83
2.4	Weitere für die Verbindungstechnik »Kleben« relevante Gesetzgebung im Rahmen der Kreislaufwirtschaftsstrategie der Europäischen Union	87
2.4.1	EU-Kunststoffstrategie	87
2.4.2	EU-»Abfallpaket«	89
2.4.3	EU-Bauprodukteverordnung	94
2.4.4	EU-Bioökonomiestrategie	97
2.4.5	Zukünftige Maßnahmen	99
2.5	Energieverbrauch und Materialeffizienz/Ressourceneffizienz	100
2.5.1	Energieverbrauch und Materialeffizienz/Ressourceneffizienz: die Bedeutung der Begriffe	100
2.5.2	Energieverbrauch und Materialeffizienz/Ressourceneffizienz: die Bedeutung der ganzheitlichen Betrachtung (Ökobilanz / Life Cycle Assessment – LCA)	107
2.5.3	Energieverbrauch und Materialeffizienz/Ressourceneffizienz: die Bedeutung der Werkstoffe	113
2.5.4	Energieverbrauch und Materialeffizienz/Ressourceneffizienz: die Bedeutung der Verbindungstechnik	115
2.5.5	Energieverbrauch und Materialeffizienz/Ressourceneffizienz: die Bedeutung der Verbindungstechnik »Kleben«	116

2.6	Nichtlösbare Verbindungstechniken – ein mögliches Missverständnis, auch für die Kreislaufwirtschaft	118
2.6.1	»Lösbar« – »nichtlösbar«: grundsätzlich	118
2.6.2	»Lösbar« – »nichtlösbar«: klebtechnisch	120
2.7	Erste Schlussfolgerungen	122

3

KAPITEL 3

125

Klebtechnik: Kreislaufwirtschaft, Ökodesign und Lebenszyklus-analyse (Life Cycle Assessment – LCA)

3.1	Einführung	126
3.2	Ökobilanz/Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment/LCA) – Bedeutung für nachhaltige Entwicklungen	128
3.3	Ökobilanz/Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment/LCA) – Datenbasierte Methoden an der Schnittstelle zwischen Material- und Umweltforschung	148
3.4	Product Environmental Footprint (PEF) / Umweltfußabdruck und Environmental Product Declaration (EPD) / Umweltproduktdeklaration – Instrumente zur Ermittlung der geeignetsten Option zur Bestimmung der Kreislaufwirksamkeit geklebter Produkte	173
3.4.1	Product Environmental Footprint (PEF) / Umweltfußabdruck	173
3.4.2	Environmental Product Declaration (EPD) / Umweltproduktdeklaration	190
3.4.3	Vergleich: Product Environmental Footprint (PEF) und Environmental Product Declaration (EPD)	196
3.5	Nachhaltige Geschäftsmodelle dank Kreislaufwirtschaftswirksamkeit geklebter Produkte	202

4	KAPITEL 4 Klebtechnik und ihre Funktion als Partner zur Erfüllung von Anforderungen im Rahmen von »Kreislaufwirtschaft« und »Ökodesign«	210
<hr/>		
4.1	Klebtechnik und Ökodesign: kein Widerspruch	211
4.2	Lösbare Klebverbindungen	213
4.3	Klebtechnik und Reparatur	226
4.4	Klebtechnik und Recycling	229
4.5	Klebtechnik und Ressourceneffizienz	235
4.6	Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Klebstoffen	240
<hr/>		
5	KAPITEL 5 Strategien für die Klebtechnik zur Unterstützung von Kreislaufwirtschaft und Ökodesign	250
<hr/>		
5.1	Einleitung	251
5.2	Klebstoffformulierungen im Rahmen der Kreislaufwirtschaft	257
5.2.1	Klebrohstoffe aus Polymer-Recyclaten	257
5.2.2	Binden von Kohlendioxid	258
5.2.3	Kohlenstoffmanagement in Klebstoffen: Minimierung des Kohlenstoffgehaltes und Klebrohstoffe in hohem Oxidationszustand	259
5.2.4	Nachwachsende Rohstoffe	260
5.2.5	Abbaubare Klebstoffe	262
5.2.6	Klebstoffe mit hoher Verträglichkeit zu den Substratmaterialien	263
5.3	Kreislaufwirtschaftsgerechtes Produktdesign	265
5.3.1	Demontagegerechtes Design	265
5.3.2	Produktdesigns	266
5.3.3	Auslegung und Klebstoffapplikation	267
5.3.4	Gradierete Klebfugen	269
5.3.5	Einsparen von Sekundärverpackungen durch Kleben	270

5.4	Lösbare Klebverbindungen	271
5.4.1	Vorbemerkung	271
5.4.2	Lösen von Klebverbindungen mit der Hauptfunktion der Lastübertragung	271
5.4.3	Lösen von Klebverbindungen ohne die Hauptfunktion der Lastübertragung	273
5.5	Demontageprozesse	275
5.6	Digitalisierung in der kreislaufwirtschaftswirksamen Klebtechnik	281
5.6.1	Vorbemerkung: Klebtechnik – Digitalisierung und Kreislaufwirtschaft	281
5.6.2	Simulation zur Reduzierung des experimentellen Aufwands	282
5.6.3	Langzeitüberwachung von Klebungen mittels Structural Health Monitoring – SHM	282
5.6.4	Digital Twin	284
5.6.5	Verknüpfung der Entwicklung kreislaufwirtschaftsgerecht geklebter Produkte mit der Digitalisierung (Daten)	285
5.6.6	Integration von vor- bzw. nachgeschalteten Fertigungsschritten in die Prozessketten-Modellierung und -Optimierung	289
5.7	Ausblick hinsichtlich der Digitalisierung in der kreislaufwirtschaftswirk- samen Klebtechnik	293

Vorbemerkung

Der Gedanke der Nachhaltigkeit beeinflusst das Denken und Handeln in allen Bereichen unseres Lebens. Dies betrifft auch den Einsatz der Klebtechnik, da sie in nahezu allen Bereichen des Lebens, also von A wie Auto bis Z wie Zug zum Einsatz kommt. Vor diesem Hintergrund beschreibt die vorliegende Studie branchenübergreifend die Rolle der Klebtechnik im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft und ordnet die Verbindungstechnik in die politischen Rahmenbedingungen sowohl aus globaler als auch aus europäischer Sicht ein. Dabei wird ein umfassender Ansatz verfolgt, der einerseits über die Kreislaufwirtschaftswirksamkeit hinaus auch ökobilanzrelevante Aspekte, die durch Klebstoffe in geklebten Produkten erzeugt werden, einschließt und andererseits die Funktion der Klebtechnik als Partner zur Erfüllung der Anforderungen im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft darstellt. Der Klebstoff als solcher wird ebenfalls betrachtet, jedoch liegt der Schwerpunkt der Studie auf den geklebten (End-)Produkten. Dieses ist für die Bewertung der Technologie »Kleben« hinsichtlich ihrer Relevanz für die Kreislaufwirtschaft die entscheidende Perspektive, da der Klebstoffanteil in geklebten Produkten meist gering und damit in der Bilanz kaum relevant ist.

Die Studie betrachtet die Produktlebenszyklen »Herstellung«, »Nutzung« und »Entsorgung« geklebter Produkte nicht separiert voneinander, sondern in ihren Wechselwirkungen zueinander. Nur so sind die Potenziale der Klebtechnik für die Kreislaufwirtschaft sowie die Effekte auf entsprechende Ökobilanzen aus Sicht des Autorenteam fachlich richtig darstellbar. Diese Potenziale werden an ausgewählten Anwendungen exemplarisch dargestellt und können hinsichtlich der übergeordneten Aussagen, die anhand dieser Beispiele aufgezeigt werden, auf weitere klebtechnische Anwendungen übertragen werden.

Zu jeder Verbindungstechnik gehört auch das Trennen. Darauf wird in der Studie ebenfalls hinsichtlich der Reparatur sowie der Wiederverwertung als ein Betrachtungspunkt für die Kreislaufwirtschaft eingegangen. Die Wiederverwertung der getrennten Fügepartner

und die dazu notwendigen Voraussetzungen, Randbedingungen und Prozesse sind jedoch nicht Gegenstand der Studie.

Perspektivisch betrachtet die Studie im Kontext der Nachhaltigkeit ein mögliches Vorgehen zur Bewertung der Umweltwirkungen geklebter Produkte. An dieser Stelle wird eine Option zur Ermittlung der Kreislaufwirtschaftswirksamkeit vorgestellt. Zur Unterstützung der Wirksamkeit werden Strategien hinsichtlich der Entwicklung von Klebstoffen, des Produktdesigns, von Demontageprozessen sowie der Digitalisierung geklebter Produkte aufgezeigt.

Ein herzlicher Dank gilt allen, die an der Erstellung der Studie beteiligt waren, insbesondere dem Autorenteam des Fraunhofer IFAM.

Bremen, 31.05.2020



Prof. Dr. Bernd Mayer



Prof. Dr. Andreas Groß

Zusammenfassung

Die Gestaltungsräume in Industrie und Handwerk unterliegen aufgrund stetig sich verändernder technischer, gesellschaftlicher und rechtlicher Rahmenbedingungen einem kontinuierlichen Wandlungsprozess. Dieser Wandel betrifft insbesondere auch die Füge-technik Kleben, da diese heute in nahezu allen Bereichen und Branchen eine essentielle Verbindungstechnik ist. Die Einsatzbreite der Klebtechnik basiert dabei auf ihrer einzigartigen Fähigkeit, unterschiedliche Werkstoffkombinationen langzeitbeständig und sicher unter Erhalt produktrelevanter Füge- teil-Werkstoffeigen- schaften zu verbinden und zusätzliche, über das reine Verbinden hinausgehende Funktionen in das geklebte Produkt zu integrieren.

Kontinuierliche Inventionen und Innovationen der Akteure bei der Entwicklung von Rohstoffen, von Klebstoffen wie auch von geklebten Produkten haben eine dynamische Entwicklung in den vergangenen Jahrzehnten ermöglicht. Dabei konnten insbeson- dere auch zahlreiche neue wegweisende Lösungen im Hinblick auf stetig zunehmende regulatorische Anforderungen für bestimmte Substanzen (z.B. aus der Gruppe der Lösemittel, Weichmacher, Monomere und Biozide) entwickelt werden.

Die Klebtechnik ermöglicht durch ihre Funktion als Treiber nach- haltigerer Entwicklungen neue umweltfreundlichere Produkte und Anwendungen sowie auch eine verbesserte Ressourceneffizienz in vielen Bereichen. So ist beispielsweise die Erschließung alternativer Energiequellen ohne das Kleben (wie z.B. die Versiegelung von Solarzellen, das Fügen der Rotorblätter bei Windenergieanlagen) genauso wenig denkbar wie die Elektromobilität (unter anderem der Aufbau der Magnetkerne für die Elektromotoren aus Elek- tropaketierblechen, das Abdichten der Batteriezellen, das Wärme- management der Batterien mit Wärmeleitklebstoffen) und die Brennstoffzelle (z.B. die hermetische Abdichtung, das Verbinden der Bipolarplatten). Darüber hinaus können Klebstoffe zu Mate- rialeinsparungen in Kombination von verbesserten Produkteigen- schaften führen, auch in so unterschiedlichen Bereichen wie der Lebensmittelverpackung (z.B. Haltbarkeitsverlängerung bei mini- miertem Materialeinsatz) und der Mobilität (Leichtbau).

Gerade für den Leichtbau stellt Kleben eine Schlüsseltechnologie dar. Im Automobilbereich unterstützt der Einsatz der Klebtechnik (u.a. Scheibenkleben, Kleben von Versteifungsprofilen, Kleben in der Karosserie) die Verwendung dünnerer Bleche zur Material- und Energieeinsparung in der Nutzungsphase. Im Schienenfahrzeugbau stellt die Produktlebenszyklusphase »Nutzung«, d.h. der Fahrbetrieb gegenüber den Produktlebenszyklusphasen »Herstellung« und »Entsorgung« den bestimmenden Faktor hinsichtlich Energie- und Emissionsreduzierung dar: Der klebtechnische Einsatz von Leichtbauwerkstoffen reduziert den Energieverbrauch und damit die spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen pro Personen- oder Tonnenkilometer. Die Langzeitbeständigkeit von Klebverbindungen unterstützt zudem die Nutzungsdauer geklebter Produkte. Die Lebensdauer eines Autos steigt, ein Schienenfahrzeug fährt bis zu 40 Jahre, ein Flugzeug fliegt bis zu 30 Jahre. Das Kleben ermöglicht somit Bau- und Konstruktionsprinzipien mit verbesserten Ökobilanzen in der ganzheitlichen Betrachtung von Lebenszyklen.

Im Zuge der gegenwärtigen gesellschaftlich politischen Veränderungen wird insbesondere der »Europäische Green Deal« zusätzliche Anforderungen und damit neue Herausforderungen für die Klebtechnik bringen. Er sieht vor, dass Europa sich bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent entwickelt. Hinsichtlich der Wirtschaftsprinzipien ist ein Bestandteil dieses Vorhabens der Übergang von einer Linearwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft. Durch sie wird der Einsatz von Ressourcen, die Entstehung von Abfall und Emissionen sowie die ineffiziente Nutzung von Energie durch Vermeidung und Verringerung des Ressourcenbedarfs, Verlängerung von Nutzungsdauern, Wiederaufarbeitung und Schließen von Energie- wie Materialkreisläufen minimiert. Umsetzungswerkzeuge sind insbesondere langlebige Konstruktionen, Instandhaltung, Sanierung, Reparatur(fähigkeit), Wiederverwendung, Wiederaufarbeitung und Wiederverwertung (verschiedene Ansätze von Recycling).

Die Klebstofftechnologie besitzt das Potential, um auch diese neuen Anforderungen mit technischen Innovationen zu beantworten. Dabei müssen in der Zukunft Wertschöpfungsketten geklebter Produkte grundsätzlich ganzheitlich in den Produktlebenszyklen »Herstellung«, »Nutzung« und »Entsorgung«

zusammenhängend betrachtet werden. Dazu gehört insbesondere, das »End of Life«-Konzept geklebter Produkte bereits in der Produktplanungs- und Designphase zum integralen Bestandteil einer Produktentwicklung zu machen. Diese neuen, aus Kreislaufgedanken resultierenden Herausforderungen erfordern daher zukünftig eine noch intensivere Kommunikation und Zusammenarbeit und damit noch engere Vernetzung aller Akteure entlang von Wertschöpfungsketten. Rohstoff- und Klebstoffhersteller, Klebstoffanwender, Produkthersteller, Endkunden und Recycler als Teil des Systems »Kleben« entlang des Lebenszyklus geklebter Produkte werden zukünftige Wertschöpfungskreisläufe bilden. Die ganzheitliche Betrachtung geklebter Produkte im Hinblick auf ökologische Verbesserungen entlang von Wertschöpfungsketten bzw. -kreisläufen wird durch die Ökobilanz (Life Cycle Assessment – LCA) als derzeit umfassendste Bewertungsmethode für Umweltwirkungen ermöglicht.

Vor dem Hintergrund der ganzheitlichen Betrachtung haben zukünftige Entwicklungen geklebter Produkte im Sinne einer kontrollierten Langlebigkeit zu erfolgen. Diese verknüpft die Beherrschung der Produktintegrität während der Produktlebenszyklusphase »Nutzung« mit der gezielten Werkstofftrennung in der Produktlebenszyklusphase »Entsorgung«. Eine gezielte Werkstofftrennung ist eine Voraussetzung für das werkstoffliche Recycling. Darüber hinaus ist sie für den Rück- und Umbau sowie für die Reparatur notwendig und dient damit zur Erhöhung der Lebens- bzw. Nutzungsdauer eines Produkts. So ist die Reparatur von Frontscheiben in Verkehrsmitteln seit langem Stand der Technik. Die Reparatur von Displayscheiben bei Mobiltelefonen kann inzwischen vielfach auch durch handwerklich geschickte Laien erfolgen. Das Lösen einer Klebverbindung erfolgt durch mindestens einen äußeren Trigger, der im normalen Gebrauch der Klebverbindung nicht vorkommt und daher den sicheren Gebrauch des geklebten Produkts nicht beeinträchtigt.

Die Trennung/Demontage geklebter Produkte kann über die adhäsive oder kohäsive Beeinflussung einer Klebfuge erfolgen. Da nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik insbesondere bei sicherheitsrelevanten Klebungen die Beeinflussung der Adhäsion noch erhebliche grundlegende Forschungsarbeiten erfordert, wird gegenwärtig die kohäsionsbezogene Beeinflussung vorgezogen. Kohäsive Demontagestrategien anhand lokaler

Stimuli wie Erwärmung und mechanische Überbelastung sind besonders zielgerichtet. Bei chemisch härtenden Klebstoffen kann das Erweichen der polymeren Klebschicht auch durch Quellung erreicht werden. Eine andere Möglichkeit ist der Abbau (Degradation) des Polymernetzwerks. Dem Anwender des geklebten Produkts sowie dem Recycler muss die herstellerseitig vorgegebene Demontageoption bekannt sein; sinngemäß gilt dies auch für Reparaturprozesse. Digitale Informationsquellen ermöglichen technisch die Weitergabe dieser Vorgaben. Beim mechanischen (werkstofflichen) Recycling von Kunststofffügeteilen ist eine möglichst hohe Verträglichkeit des Klebstoffs mit den Kunststoffen hilfreich. Als notwendige Ergänzung zum mechanischen/werkstofflichen Recycling und als bevorzugte Alternative zur rein energetischen Verwertung eröffnet für Klebungen mit Kunststoff-Fügepartnern – auch solchen, die möglicherweise noch mit Klebstoff und Lack kontaminiert sind – das chemische (rohstoffliche) Recycling eine zukunftsweisende Perspektive.

Industriell umsetzbare Demontageprozesse geklebter Produkte zur Rohstoffrückgewinnung oder Reparatur werden zukünftig wesentliche Schwerpunkte des Entwicklungsprozesses und der Produkterprobung sein. Von der Mikroelektronik bis hin zu Großstrukturen im Bauwesen sollten zukünftig in Lastenheften die Anforderungen für kreislaufwirtschaftsgerechte und positiv ökobilanzwirksame Produktdesigns unter Berücksichtigung einer Demontage aufgeführt sein. Trigger zur Klebstofflösung und konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung der wirtschaftlichen Effizienz von Demontageprozessen müssen bereits in einer frühen Phase der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Im Fall hoher Variantenvielfalt, kleinen Baumaßen und hohen Stückzahlen kann dabei das Zerstückeln (Schreddern) eine Variante des Demontageprozesses darstellen, welche eine Auftrennung nach Materialsorte ermöglicht. Große Bauteilmaße mit einem hohen Eigengewicht der sortenreinen Komponenten begünstigen die Anwendung des mechanischen Lösen von Klebverbindungen. Die Zugänglichkeit für Demontage-Hilfsmittel ist bereits in der Design- bzw. Konstruktionsphase sicherzustellen. Kraftaufwändige Prozesse können mechanisiert durch Automaten oder Roboter durchgeführt oder unterstützt werden. Das Lösen durch Wärmeeintrag stellt sowohl in der Kombination mit dem mechanischen Lösen als auch eigenständig eine Demontageoption geklebter Produkte dar. Das Lösen

durch medialen Einfluss wird sowohl im Handwerk (z.B. Lösen von Tapeten) als auch bei Serienprodukten (z.B. Ablösen der Etiketten von Pfandflaschen) bereits erfolgreich angewendet. Die Klebtechnik ist längst ein unverzichtbarer, positiv ökobilanzrelevanter Faktor für die Realisierung des Leichtbaus durch Multimaterialbauweise. In Zukunft wird die Klebtechnik darüber hinaus ein Schlüssel zur Sicherstellung der Reparatur- und Recyclingfähigkeit von Produkten sein. Das Kleben verhindert demzufolge nicht die Demontage von Produkten, sondern bietet vielversprechende Möglichkeiten zum Lösen der Fügeverbindungen.

Die Digitalisierung unterstützt klebtechnische Entscheidungen zur nachhaltigeren Kreislaufwirtschaftswirksamkeit. Digitale Werkzeuge und die Verfügbarkeit detaillierter material- und prozessbezogener Daten entlang gesamter Wertschöpfungsketten bzw. -kreisläufe erlauben zukünftig den Entwicklern von Klebungen im Rahmen einer lebenszyklusübergreifenden Betrachtung die Identifizierung umweltschonender Optima im Hinblick auf Ressourcen- und Kosteneffizienz. Cyber-Physische Systeme digitalisieren Produkt- und Prozessinformationen und geben diese entlang von Produktionsprozessen weiter. Digitale Zwillinge (Digital Twins) ermöglichen beispielsweise die Auswahl eines optimal geeigneten Demontageprozesses. Geklebte Produkte können mit einem RFID-Chip versehen werden, über den alle Daten der Werkstoffe und Klebstoffe für die Demontage abrufbar sind. Der hohe experimentelle Verifizierungsaufwand bei der Prozessintegration der Klebtechnik in eine Fertigung kann ebenfalls mithilfe geeignet kalibrierter, digitaler Werkstoff- und Bauteilmodelle reduziert werden. Überprüfbare Lebensdauervorhersagen, die Wartungskosten reduzieren, zu ressourcenschonenderem Austausch von Verschleißteilen führen und den Sicherheitszugewinn deutlich erhöhen, erfordern die Entwicklung von Strukturüberwachungssystemen (Structural Health Monitoring/SHM). Die notwendige Sensorik und die Wege, wie diese Informationen gespeichert und ausgelesen werden können, sind Gegenstand aktueller Forschungsaktivitäten.

Auch der Klebstoff selbst kann durch Verwendung alternativer Bausteine zur nachhaltigeren Kreislaufwirtschaftsfähigkeit beitragen. So können auf Recyclaten basierte Bausteine geeignete Rohstoffe für Klebstoffe sein. Zudem werden bereits heute in bestimmten Massen Anwendungen biobasierte Klebstoffe

eingesetzt. Viele notwendige Eigenschaftsprofile synthetischer Klebstoffe können jedoch bisher noch nicht durch biobasierte Klebstoffe vollständig abgebildet werden, was ihre Einsatzfähigkeit gegenwärtig noch limitiert. Klebstoffe sind insbesondere für die Verwendung alternativer bzw. nachwachsender Rohstoffe eine ideale Produktgruppe. Die moderaten Mengen sind ausreichend, so dass Rohstoffsynthesen noch wirtschaftlich durchführbar und der ökologische Impact groß genug sein könnte. Die Entwicklung nachwachsender Rohstoffe für eine breite Nutzung in Klebstoffen befindet sich zwar auf einem guten Weg, benötigt jedoch ebenfalls noch enormen Forschungsbedarf, um das Performance-Level vollsynthetischer Klebstoffe zu erreichen. Die Gewinnung alternativer Bausteine unter Verwendung von CO₂ sowie aus dem chemischen Recycling ist ebenfalls denkbar. Abbaubare Klebstoffe auf der Basis verschiedener nachwachsender Materialien wie Stärke, Cellulose oder Proteinen werden längst industriell eingesetzt, beispielsweise bei der Etikettierung von Lebensmitteln.

Der Blick »vom Material zum Produkt« vereint entlang von Wertschöpfungsketten und -kreisläufen zukünftig die Aspekte der Sicherheit, der technologischen Leistungsfähigkeit und der kontrollierten Langzeitbeständigkeit mit den gesellschaftlichen Anforderungen einer nachhaltigeren Kreislaufwirtschaft.

Die Klebtechnik besitzt in diesem Spannungsfeld sowohl technologisch als auch ökologisch das notwendige Leistungsvermögen und bietet somit das Potenzial zur führenden Verbindungstechnik des 21. Jahrhunderts.

1

Einführung:
Klebtechnik – Definition,
Möglichkeiten
und heutige Grenzen

1.1 Neue Produktanforderungen – die Rolle der Werkstoffe

Unsere Lebenswelt unterliegt einem fortwährenden Wandlungsprozess. Dieser Wandel beschleunigt sich stetig und betrifft alle entscheidenden Gestaltungsräume der Gegenwart und Zukunft. Industrie und Handwerk stellen sich dieser immer komplexeren Aufgabe, um den kommenden Herausforderungen gewachsen zu sein und auch zukünftig marktfähige Produkte anzubieten.

Die Komplexität in der Produktentwicklung wird zusätzlich durch steigende Kundenerwartungen erhöht. Beispiele dafür sind die bessere Qualität eines Produktes, die höhere Funktionalität, das geringere Gewicht oder das zeitgemäße Design.^{1,2}

| Die Anforderungen an Produkte wandeln sich ständig.

Am Markt erfolgreiche Produktinnovationen erfüllen diese komplexen Anforderungsprofile. Neben notwendigen Absatzinvestitionen wie Marktforschung, Werbung, Aufbau der Kundendienstorganisation sowie Gestaltung der Absatzwege³ basiert dieser Erfolg auf drei Kernelementen:

- technologische Überlegenheit
- ökonomische Balance
- ökologische Verträglichkeit.

1 O.-D. Hennemann, A. Groß, M. Bauer, Spektrum der Wissenschaft 1993, 9, 84–89, Innovationen durch vielseitige Füge-technik.

2 O.-D. Hennemann, A. Groß In Schweißen und Schneiden '94, Vorträge der gleichnamigen Großen Schweißtechnischen Tagung, Bremen, Deutschland, 28. – 30. September 1994, DVS-Berichte Band 162, Deutscher Verlag für Schweißtechnik: Düsseldorf, 1994, S. 273–278, Kleben – Schlüsseltechnologie für Industrie und Handwerk.

3 P. Kenning, Absatzweg – Ausführliche Definition. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/absatzweg-29823> (Zugriff April 30, 2020)

Erfolgreich und verantwortlich handelnde Unternehmen vereinbaren diese drei scheinbar widersprüchlichen Kernelemente bei der Entwicklung, Optimierung und Fertigung ihrer Produkte: Eine rein technologische (Weiter-)Entwicklung, die ausschließlich steigende technische Anforderung erfüllt, reicht nicht aus. Die ökonomische Balance der Preis-/Leistungserwartung des Kunden muss genauso berücksichtigt werden wie die ökologische Herstellung, Nutzung und Entsorgung des Produkts. Die ökologische Verträglichkeit wird nicht nur durch Auflagen des Gesetzgebers, sondern zunehmend durch ein verändertes Bewusstsein des Käufers gefordert.

Die Realisierung dieser ständig komplexeren Anforderungen an Produkte, Bauteile und Komponenten erfolgt nicht nur durch funktionale oder konstruktive Änderungen. Bahnbrechende Möglichkeiten ergeben sich auch durch die Neu- bzw. Weiterentwicklung von Werkstoffen mit immer anforderungsspezifischeren Eigenschaften. Außer den klassischen Metallen kommt eine Vielzahl spezifischerer Metalllegierungen, Kunststoffe, Keramiken und Gläser zum Einsatz. Zur Entwicklung technologisch überlegener, ökonomisch balancierter und ökologisch verträglicher Produkte ist daher die permanente Weiterentwicklung neuer Spezialwerkstoffe notwendig. → s. Abb. 1⁴

Steigende Produkthanforderungen werden durch Werkstoffe umgesetzt.

Werkstoffe stehen im Mittelpunkt der Erfüllung komplexerer Anforderungen.

Werkstoffe sind ein bedeutender Faktor zur Erfüllung zukünftiger Anforderungsprofile. Neuartige Anforderungsprofile sind eine Triebfeder der Werkstoffwissenschaft. Sie entstammen den großen Zukunftsfeldern Energie, Klima- und Umweltschutz, Ressourcenschonung, Mobilität, Gesundheit, Sicherheit oder Kommunikation. Dafür kombiniert die Werkstoffwissenschaft interdisziplinär eine im Bereich der Materialwissenschaft eher erkenntnisorientiert-naturwissenschaftliche geprägte Herangehensweise mit einer im Bereich

4 Fraunhofer IFAM

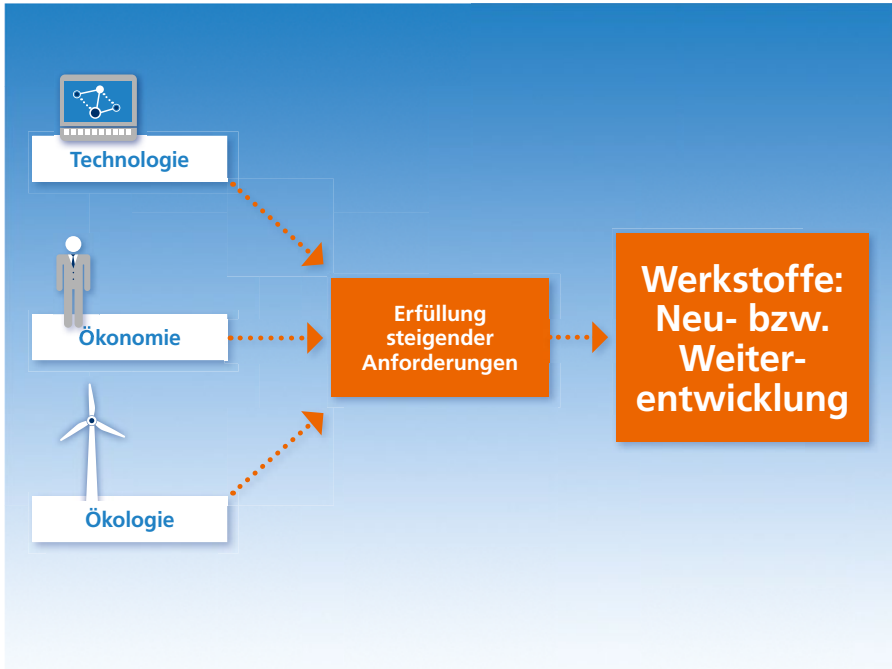


Abb. 1
Erfüllung steigender Anforderungen durch Werkstoffe

der Werkstofftechnik eher anwendungsbezogen-ingenieurwissenschaftliche Herangehensweise. Beides führt stetig zu Forschungsergebnissen, ohne die ein kontinuierlicher Fortschritt zum Beispiel in den Bereichen Maschinenbau, Verkehrsmittelbau, Luftfahrtindustrie, Chemische Industrie, Medizintechnik, Energietechnik oder Umweltschutz nicht denkbar wäre.⁵ Nicht ohne Grund zeigen aktuelle Studien daher bei einem Großteil technischer Innovationen die direkte oder indirekte Abhängigkeit vom jeweiligen Werkstoff auf.⁶

Folge der Werkstoffentwicklung ist, dass die Vielfalt spezieller Werkstoffe für die Herstellung von Produkten steigt, um so die wachsenden Anforderungen an Produkte zu erfüllen.

Die Zahl der Werkstoffe zur Erfüllung komplexerer Anforderungen wird weiter steigen.

- 5 W. Schatt, H. Worch In Werkstoffwissenschaft. Wiley-VCH Verlag: Weinheim 2011
- 6 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Neue Werkstoffe, Nanotechnologie, KIT, Vom Material zur Innovation, 01- 2015

1.2 Neue Produktanforderungen – die Rolle der Verbindungstechniken

Jedoch ist bereits heute in der Regel die Komplexität zu erfüllender Anforderungen derart hoch, dass ein einzelner Werkstoff mit seinen spezifischen Eigenschaften allein nicht in der Lage ist, diese zu erfüllen. Im Gegensatz zu universellen Werkstoffen wie manchen Stählen erfüllen neuartige, hochentwickelte und stark spezifizierte Werkstoffe zwar bestimmte Anforderungen hervorragend, gleichzeitig haben sie aber auch Schwächen. Diese Spezialisierung eines Werkstoffs zu Lasten der Universalität ist von Naturwerkstoffen bekannt: Holz besitzt eine hohe Festigkeit bei Zugbelastung in Faserrichtung, senkrecht zur Faser ist Holz jedoch nur begrenzt auf Zug belastbar.

Ihre Innovationskraft entfalten diese neuen Werkstoffe durch ihre Verbindung zu einem Produkt. Dabei werden Bauteile aus verschiedenen Werkstoffen durch eine Fügetechnik zu einem Produkt verbunden. Jede Fügetechnik hat dabei ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Die Klebtechnik ist insbesondere zum langzeitbeständigen Verbinden von Werkstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften besonders geeignet (siehe Kapitel 1.3 und 1.5). Folglich werden auch in Zukunft aus verschiedenartigen Werkstoffen zusammengesetzte Verbundsysteme, sog. Multiwerkstoffverbunde, zweifellos notwendig sein. Die beiden folgenden Beispiele verdeutlichen dies.

Die Bedeutung der Kombination von Werkstoffen zur Erfüllung komplexerer Anforderungen wird ebenfalls weiter steigen.

Beim ersten Automobil (1886 / → s. Abb. 2⁷) genügte den damaligen Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Langzeitbeständigkeit,

7 Daimler AG

Abb. 2
Das erste Automobil
mit Vollgummireifen



Geschwindigkeit und Komfort eine Vollgummibereifung. Rund 130 Jahre später sind diese Anforderungen deutlich gestiegen (→ s. Abb. 3). Der Autofahrende hat heute wesentlich höhere Sicherheitsansprüche. Gleichzeitig ist die Nutzungsdauer des Fahrzeugs wesentlich länger – und damit auch die Fahrleistung in Kilometern.⁸ Die Anforderungen an Geschwindigkeiten sind mit denen des 19. Jahrhunderts definitiv nicht mehr vergleichbar. Gleiches gilt auch für die Anforderungen an den Komfort des Produktes. Für die Bereifung besteht die Konsequenz darin, dass der moderne Autoreifen nur durch die Kombination vieler verschiedener Werkstoffe zu einem »Verbund-Autoreifen« das heutige Anforderungsprofil erfüllen kann. → s. Abb. 3⁹

Ein weiteres Beispiel aus einem ganz anderen Bereich mag die Bedeutung der Werkstoffkombination ebenfalls verdeutlichen: → s. Abb. 4¹⁰ oben zeigt ein Submillimeter-Radioteleskop mit hochpräzisem Parabolspiegel, dessen Durchmesser ca. 10 m beträgt. Auf Grund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten darf der Spiegel unabhängig vom jeweiligen Witterungseinfluss (Sturm, Regen, Schnee, Trockenheit, hohe/tiefe Temperaturen, Sonnen-

8 B. Engel; PS Welt. 2018, Werden Autos bald für die Ewigkeit gebaut? <https://www.welt.de/motor/article181378662/Werden-Autos-bald-fuer-die-Ewigkeit-gebaut.html> (Zugriff April 30, 2020)

9 M. Jordan, Wikipedia, Lizenz: CC BY-SA 3.0

10 Thyssenkrupp AG



Abb. 3
Heutige Anforderungen können dagegen nur durch die Kombination vieler verschiedener Werkstoffe zu einem Verbund-Autoreifen erreicht werden

einstrahlung, hohe/niedrige Luftfeuchtigkeit) nicht mehr als $17 \mu\text{m}$ ($= 0,017 \text{ mm}$) von der berechneten Oberfläche abweichen. Vereinfacht gesagt: Die Halterung (\rightarrow s. Abb. 4 unten) des Spiegels muss absolut starr konstruiert werden.

Mit konventionellen Werkstoffen wie Stahl und Aluminium ist das nicht möglich. Zur Erfüllung der gestiegenen Anforderungen an die Maßhaltigkeit des Produkts Radioteleskop werden neue, hochsteife und gleichzeitig wärmeausdehnungsarme Werkstoffe eingesetzt. In diesem Fall sind das kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) für die Rohrverbindungsstücke und für die konstruktiven Verbindungsknotenpunkte der Werkstoff »Invar« (\rightarrow s. Abb. 5), eine spezielle Stahllegierung aus 64 % Eisen und 36 % Nickel¹¹. Beide Werkstoffe weisen nur geringe Wärmeausdehnungskoeffizienten auf.

Zum Erreichen der Anforderungen wurde beim Design des CFK-Werkstoffs das anomale Verhalten der C-Faser (Schrumpfung bei Temperaturanstieg/Ausdehnung bei Temperaturabfall) mit dem normalen Verhalten des Matrixharzes (Ausdehnung bei Temperaturanstieg/Schrumpfung bei Temperaturabfall) dahingehend zusammengeführt, dass für diesen Anwendungsfall ein neuer Werkstoff mit einem gewünschten Temperaturexpansionskoeffi-



Abb. 4
Submillimeter-Radioteleskop mit hochpräzisem Parabolspiegel (Modell, oben) / Verbindung von Invar (Knotenpunkte) mit CFK-Rohren (unten)

11 U. Hübschmann, E. Links In Tabellen zur Chemie, Verlag Handwerk und Technik: Hamburg, 1991; S. 35, Ausdehnungskoeffizienten von Metalllegierungen (Werkstoffen, Gläsern und anorganischen Materialien).



Abb. 5
Verbinden von
Spezialwerkstoffen
mit thermischer
Null-Ausdehnung⁴

zienten von nahezu Null entsteht. So können durch den geschickt gewählten Werkstoffverbund die gestiegenen Anforderungen erfüllt werden.

Werkstoffe und Werkstoffentwicklungen nehmen eine Schlüsselposition ein.

Jedoch ist in diesem Zusammenhang eines von ganz entscheidender Bedeutung: Werkstoffe werden erst dann nutzbar, wenn

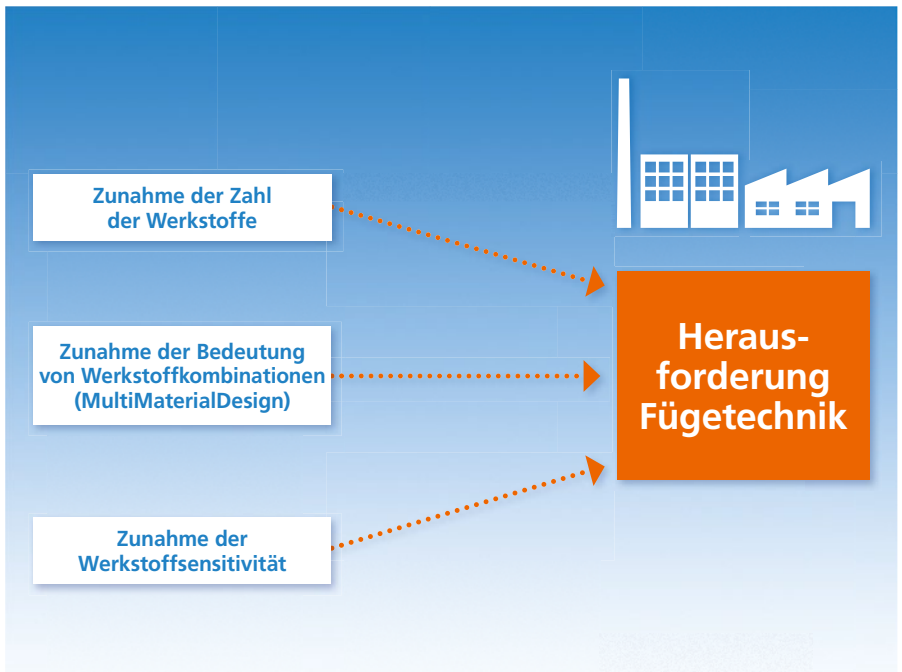
- nicht nur ihre Eigenschaften zur Erfüllung des Anforderungsprofils beitragen,
- sondern sie im Produkt, im Bauteil oder in der Komponente mit sich oder anderen Werkstoffen verbunden werden können.

Erst die Verbindungstechnik macht den Werkstoff nutzbar.

Aus anwendungstechnischer Sicht kommt damit der Verbindungstechnik grundsätzlich die gleiche Bedeutung zu wie der Werkstoffentwicklung. Die anwendungsorientierte Werkstoffentwicklung muss folglich immer mit einer werkstoffgerechten Verbindungstechnik zusammengeführt werden, um sie nutzen zu können. Erst wenn beides, Werkstoff und Verbindungstechnik, zusammenpasst, werden Innovationen überhaupt möglich. Diese Innovationen erfüllen dann die komplexen Anforderungen an Produkte in technologischer, ökonomischer und ökologischer Hinsicht.

Produkte der Zukunft werden aus Werkstoffverbunden bestehen: Die Entwicklung eines Werkstoffs und die Entwicklung ihrer geeigneten Verbindungstechnik müssen als gleichberechtigt betrachtet werden.

Zu beachten ist jedoch, dass im Allgemeinen die Sensitivität eines Werkstoffs zunimmt, je höher ein Werkstoff entwickelt ist. Eine werkstoffgerechte Verbindungstechnik muss diese Sensitivität berücksichtigen. »Werkstoffgerechte Verbindungstechnik« bedeutet in diesem Zusammenhang eigentlich »werkstoffeigenschaftsgerechte Verbindungstechnik« (→ s. Abb. 6). Die Eigenschaften der Werkstoffe müssen trotz der Anwendung einer Verbindungstechnik erhalten bleiben, um das geforderte Anforderungsprofil zu erfüllen.



Eine zentrale Aufgabe der Verbindungstechnik besteht darin, die Eigenschaften des Werkstoffs im Verbund zu erhalten.

Abb. 6 Folge der Werkstoffentwicklungen: die Herausforderung für die Verbindungstechnik⁴

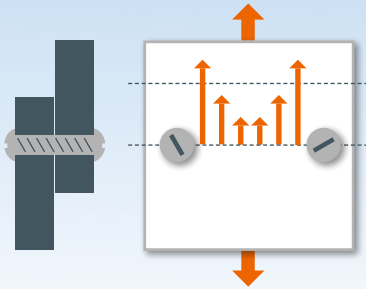
1.3 Neue Produktanforderungen – die Rolle der Verbindungstechnik »Kleben«

Der Erhalt der Werkstoffeigenschaft beim Verbinden mit sich und/oder anderen Werkstoffen ist für traditionelle Verbindungstechniken oftmals nicht gegeben: Bei thermischen Verfahren wie dem Schweißen verändert der Werkstoff innerhalb der Wärmeeinflusszone seine spezifischen Eigenschaften. Zwar bleiben im Grundwerkstoff die ursprünglichen Eigenschaften erhalten, jedoch ändern sich in der Wärmeeinflusszone die physikalischen Materialeigenschaften durch Kornwachstum, Phasenumwandlungen, Ausscheidungsvorgänge an den Korngrenzen oder auch Aufhärtungen. Im Schweißgut geschieht dies durch Kristallisation (Bildung eines Gussgefüges), Lösungserscheinungen von Begleitelementen, Ausscheidungsvorgängen, Steigerungen, Schrumpfung und entstehenden Eigenspannungen. D.h., in der Wärmeeinflusszone weist der Werkstoff nach dem Schweißvorgang (Schmelzen/Erstarren) andere Eigenschaften auf als im Grundwerkstoff. Diese veränderten Eigenschaften beeinflussen die Eigenschaften des Verbundes insgesamt. Oftmals versagt der Verbund daher nicht in der Schweißnaht, sondern in der Wärmeeinflusszone.¹²

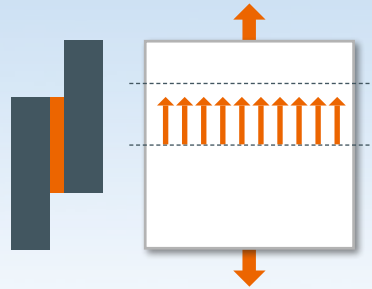
Mechanische Verfahren wie Nieten oder Schrauben wiederum ermöglichen nur eine punktförmige Kraftübertragung an der Verbindungsstelle. Außerdem muss man in die zu verbindenden Werkstücke Löcher bohren, den Werkstoff also verletzen und damit schwächen. Im Gebrauch kommt es bei mechanischen Belastungen, also den auftretenden Lastfällen, zu sogenannten Spannungsspitzen. Und genau diese Spannungsspitzen sind es, die die Festigkeit des Verbundes limitieren. Werden diese nämlich im Lastfall überschritten, reißt der Werkstoff an den Stellen, wo sie auftreten (→ s. **Abb. 7, links**).

12 G. Schulze In Die Metallurgie des Schweißens; Springer: Berlin und Heidelberg 2010: S. 237–297, Einfluss des Schweißprozesses auf die Eigenschaften der Verbindung.

Niet- und Schraubverbindung



Klebverbindung



Die Klebtechnik dagegen weist die oben dargestellten Nachteile nicht auf (→ s. **Abb. 4, rechts**). Sie nimmt daher in diesem Zusammenhang aus vier wesentlichen Gründen eine Schlüsselstellung ein (→ s. **Abb. 8**):

1. Mit der Verbindungstechnologie »Kleben« ist es möglich, nahezu alle Werkstoffkombinationen sowohl aus gleichen als auch aus unterschiedlichen Werkstoffen langzeitbeständig zu verbinden und somit Werkstoffkombinationen zu realisieren, die die gesteigerten Anforderungen an das Produkt erfüllen.
2. Durch das Kleben werden die Werkstoffeigenschaften der Füge­teile nicht unzulässig verändert. Im Regelfall bleiben sie sogar unverändert erhalten: Der Klebprozess, auch bei heißhärtenden Klebstoffen, ist im Vergleich zum Schweißen oder Löten relativ wärmearm, eine Verletzung der Füge­teile durch Durchlöcherung wie beim Nieten oder Schrauben findet nicht statt. Die Spannungsverteilung im Lastfall ist annähernd gleichmäßig (→ s. **Abb. 7, rechts**).

Abb. 7
Wirkungsweise von Verbindungen bei mechanischer Belastung

Links⁴: Niet- oder Schraubverbindung – Auftreten von Spannungsspitzen, die die Festigkeit des Verbundes limitieren

Rechts⁴: Klebverbindung – die Spannungsverteilung ist gleichmäßig, daher kein Auftreten von Spannungsspitzen, die die Festigkeit des Verbundes limitieren

3. Werkstoffkombination und Erhalt der Werkstoffeigenschaften ermöglichen, die spezifischen Werkstoffeigenschaften für das Bauteil optimal zu nutzen. Möglichkeiten für neue Bauweisen (z. B. Leichtbauweisen, Miniaturisierung) sind dadurch gegeben.
4. Über den Klebstoff können gezielt zusätzliche Eigenschaften in das Bauteil integriert werden. Diese Eigenschaften gehen über die Hauptfunktion des Verbindens hinaus und können für die Kreislaufwirtschaft relevant sein (siehe dazu Kapitel 1.5).



Abb. 8
Gründe für die Schlüsselstellung der Klebtechnik⁴

Klebtechnisch ist es möglich, alle Werkstoffe mit sich und anderen unter Erhalt ihrer Eigenschaften langzeitbeständig zu fügen und dadurch zu den gewünschten Produkteigenschaften zu gelangen.

1.4 Die Verbindungstechnik »Kleben« – eine Einordnung und Erläuterung

1.4.1 Kleben – eine historische Betrachtung

Klebstoffe und die Verbindungstechnik Kleben sind keine neue Erfindung. Schon vor vielen tausend Jahren haben Menschen mit klebenden Naturstoffen unterschiedliche Werkstoffe miteinander verbunden. Diese natürlichen Klebstoffe stellten sie damals aus Tierhäuten und Tierknochen oder aus Pflanzen her.

Etwa 5000 v. Chr., also in der jüngeren Steinzeit, bedienten sich die Menschen eines Birkenharzes zum Befestigen von Speer- und Beilspitzen. So fand man bei der Entdeckung des Gletschermannes »Ötzi« im Jahre 1991 unter seinen Ausrüstungs- und Kleidungsstücken ein aus einem Eibenstämmchen gefertigtes Beil, dessen Klinge mit dem Klebstoff Birkenpech sowie mit Lederstreifen befestigt worden war.

Um 2000 v. Chr. begann man dann in Vorderasien Gelatineleime zur Möbelherstellung zu verwenden. Im Mittelalter war es das Handwerk des Vogelfängers, mit Leimruten kleine Vögel zu fangen. Die Vögel wurden mit Beeren und Früchten angelockt und verfangen sich in den klebrigen Ästen.

Im 17. Jahrhundert erhielt der Klebstoff große Bedeutung in vielen Haushalten, denn erstmals wurden chinesische Papiertapeten nach Europa geliefert und kamen in Mode. Hierfür wurde Anfang des 17. Jahrhunderts der notwendige Klebstoff, der Tapetenkleister, entwickelt. Das ist ein anschauliches Beispiel dafür, wie gesellschaftliche Veränderungen zur Entwicklung neuer Materialien führen. Doch nicht nur für das Anbringen der Tapete an der Wand, auch in den Tapetendruckereien wurden damals große Mengen Leim benötigt. Dazu gehörte beispielsweise der Pergamentleim, der aus Pergamentschnitzeln hergestellt wurde. Er diente als weiße Grundierung des Papiers für die Tapeten, um so die Brillanz der aufgedruckten Farben zu erhalten.

1748 wurde in England das erste Patent auf einen Fischleim vergeben. Aufgrund der großen Nachfrage entstanden zu Beginn des 18. Jahrhunderts in vielen Städten Leimsiedereien. Oft waren sie in der Nähe von Ledergerbereien zu finden, da der Leim aus den dort anfallenden Abfallprodukten gekocht wurde. Die Firma Gillon fils & Thorailleur in Paris, eine florierende Tapetenfabrik, verbrauchte um 1850 täglich 1500 Kilogramm Leim!

1.4.2 Kleben – Meilensteine der Entwicklung

In den letzten gut 100 Jahren machte die chemische Industrie auf dem Gebiet der Klebstoffe große Fortschritte. 1909 stellte Leo Hendrik Baekeland (1863–1944) ein Novum vor, das es in der gesamten Menschheitsgeschichte so nicht gegeben hatte: Phenol-Formaldehyd-Harz war das erste rein künstlich synthetisierte, nicht auf Naturstoffen basierende Polymer. Es kam unter dem Namen »Bakelit« auf den Markt.¹³ Basis der folgenden Aufschwungszeit waren die von Hermann Staudinger (1881–1965) in der 1920er Jahren vorgestellten Grundlagen der Makromolekularchemie. So ging es nach der Entwicklung von Bakelit rasant weiter:

1931	Die erste stabile Kunststoffdispersion, also eine Feinstverteilung eines Kunststoffes in einem Lösemittel, wurde entwickelt.
1936	Pierre Castan erfand mit den Epoxiden eine bis heute wichtige Klebstoffgruppe, u. a. für den Fahrzeug- und Flugzeugbau.
1937	Erste Synthese von Polyurethanen, die heute breite Anwendung in der Automobilindustrie, im Schienenfahrzeug- und Schiffbau sowie in vielen anderen Bereichen finden.
1940	Die Methacrylat-Klebstoffe, die u. a. bei der Verklebung von Metallen und Kunststoffen zum Einsatz kommen, wurden patentiert.
1953	Die ersten anaerob härtenden Klebstoffe kamen auf den Markt.

13 Eintrag zu Phenolharze In: Römpf Online. Georg Thieme Verlag, <https://roempf.thieme.de/lexicon/RD-16-01590> (Abruf April 30, 2020)

1958	Ein »Sekundenklebstoff«, das Cyanacrylat, kam in den USA auf den Markt.
1968	Die Entwicklung der feuchtigkeitshärtenden Polyurethane, mit deren Nachfolgern auch heute noch Autoscheiben eingeklebt werden, begann.
1970	Erste UV-lichthärtende Acrylat-Formulierungen (strahlenhärtende Klebstoffe) wurden entwickelt, genauso wie silanmodifizierte Klebstoffe auf Polyether-Basis in Japan (MS-Polymere).
1980	Die reaktiven Schmelzklebstoffe wurden erstmals vorgestellt.
Ende der 1980er Jahre	Hochfeste Klebstoffe wurden entwickelt, die sogar das Kleben beölter Bleche erlauben.
Ab 1990	Entwicklung diverser Klebstoffe mit multiplen Härtungsmechanismen, die z. B. zunächst durch UV-Bestrahlung an- und anschließend über Luftfeuchtigkeit aushärten.
1993	Entwicklung von Klebstoffen, deren Härtung durch Sauerstoff eingeleitet wird (aerob härtende Klebstoffe).
1995	Entwicklung silanvernetzender Polyurethan-Prepolymere (SMP-Klebstoffe).
Ab 2000	Entwicklung wiederlösbarer Klebstoffsysteme mit hoher Klebfestigkeit für Reparatur und Recycling
Ab 2012	Farbreaktionen, mit deren Hilfe der Zustand eines Klebstoffes (frisch, überlagert, ausgehärtet) visuell erkannt werden kann.
2014	Vorapplizierbare, chemisch härtende Klebstoffe mit der Hauptfunktion der Übertragung mechanischer Lasten. Hierbei werden Bauteile vom Lieferanten mit einem festen Klebstoff, der in diesem Zustand nicht klebrig ist, versehen, der dann in dem späteren Montageprozess schnell härtet.

Eine besondere Herausforderung für die Chemie bestand von Beginn an darin, die Verfestigung der Klebstoffe genau zu steuern. Dazu wurden ab den 1980er Jahren verschiedene Klebstoffe mit kombinierten Verfestigungsmechanismen auf den Markt gebracht. Seit der Jahrtausendwende konzentriert sich die Klebstoffindustrie

neben der Beschleunigung von Aushärtungsreaktionen und der Erhöhung der Fertigungsprozesssicherheit unter anderem auch auf die Entwicklung wiederlösbarer Klebstoffsysteme. Diese sollen Reparaturen und sortenreines Recycling ermöglichen. In den letzten Jahren gab es vor allem auf dem breiten Gebiet der Haftklebstoffe viele Innovationen weit über den bekannten Alltagsbereich (etwa Etikette oder selbstklebende Notizzettel) hinaus. Der Einsatzbereich von Klebstoffen reicht buchstäblich von A–Z, vom Auto bis zum Zug. Produkte mit geklebten Verbindungen haben bewiesen, dass sie problemlos mindestens 15 Jahre, ggf. sogar 30 Jahre halten.

1.4.3 Kleben – Vorbild in der Natur

Kleben ist keine Erfindung der Technik und keine Erfindung des Menschen: In der Natur ist das Kleben schon seit eh und je fest verankert. Eine Grundvoraussetzung des Klebens ist die Haftung von Stoffen an Oberflächen, wissenschaftlich als »Adhäsion« bezeichnet. Gute Adhäsion zu bestimmten Oberflächen ist darüber hinaus eine Voraussetzung für den natürlichen Lebenskreislauf: Durch selektive Haftung kann sich die befruchtete Eizelle sich in der Gebärmutter einnisten.

Für die Klebtechnik war, ist und bleibt die Natur das größte Vorbild und der wichtigste Ideengeber. Bienen (→ s. [Abb. 9¹⁴, links](#)) setzen beispielsweise auf das Prinzip der Schmelzklebstoffe: Sie erwärmen Wachs (ihren Klebstoff) in ihrem Körper und tragen das flüssige Wachs auf ihre Waben auf. Sobald das Wachs auf Raumtemperatur abkühlt, verfestigt es sich und haftet (Adhäsion) an der Oberfläche. Die innere Festigkeit wird wissenschaftlich als »Kohäsion« bezeichnet. Bienenwachs verhält sich bezüglich Adhäsion und Kohäsion wie ein technischer Schmelzklebstoff.

Interessant ist auch der Klebstoff der Miesmuschel (→ s. [Abb. 9⁴, rechts](#)). Sie hat die besondere Fähigkeit unter Wasser zu kleben und sich so an Felsen oder Schiffsrümpfen festzusetzen. Der Miesmuschel-Klebstoff muss dabei extrem viel aushalten: hohe Salzkonzentrationen, hohe Wellen und hohe Fließgeschwindigkeiten des Wassers. Das sind Herausforderungen, denen viele synthetisch hergestellte

14 AdobeStock 271140465



Abb. 9
Kleben in der Natur –
die Bienen und die
Miesmuschel⁴

Klebstoffe nicht gewachsen sind. In Versuchen konnte gezeigt werden, dass Miesmuscheln sogar auf Antihafschichten aus Teflon (Polytetrafluorethylen – PTFE) kleben. Das ist selbst für moderne industrielle Klebstoffe eine besondere Herausforderung.

Die Miesmuscheln produzieren einen natürlichen Unterwasserklebstoff, der unter Wasser langzeitbeständige Haftung ausbildet und dann aushärtet. Zudem besitzt er eine hohe Festigkeit, ist aber gleichzeitig auch ausreichend elastisch. Aus diesem Grund stehen die klebtechnisch relevanten Bestandteile des Klebstoffs der Miesmuschel im Mittelpunkt früher und aktueller Forschungsprojekte.^{15,16} Dabei handelt es sich um sog. »Katechole«, die funktionelle Gruppe der Schlüsselaminosäure DOPA, welche im Muschelklebstoff vorhanden ist.¹⁷ Erste potenzielle Anwendungen dieser Klebstoffe sind im Bereich der Medizin zu finden.^{18,19}

Die Natur ist also nicht nur Vorbild für den Klebstoff, sondern auch für seine Anwendung. Aus der Tierwelt adaptierte Mecha-

-
- 15 K. Rischka, K. Richter, A. Hartwig, M. Kozielec, M. Slenzka, R. Sader, I. Grunwald, I. (2010) »Bio-inspired Polyphenolic Adhesives for Medical and Technical Applications«. In: von Byern J., Grunwald I. (eds) *Biological Adhesive Systems*. Springer, Vienna, doi:10.1007/978-3-7091-0286-2_13
- 16 K. H. Park, K. Y. Seong, S. Y. Yang, S. Seo, *Biomater Res.* 2017;21:16, doi: 10.1186/s40824-017-0101-y, *Advances in medical adhesives inspired by aquatic organisms' adhesion*.
- 17 J. Saiz-Poseu, J. Mancebo-Aracil, F. Nador, F. Busqué, D. Ruiz-Molina, *Angew Chem Int Ed Engl.* 2019;58(3): 696–714. Doi: 10.1002/anie.201801063, *The Chemistry behind Catechol-Based Adhesion*.
- 18 D. W.R. Balkenende, S. M. Winkler, P. B. Messersmith, *Europ. Polym. J.* 2019, 116, 134–143. Doi: 10.1016/j.eurpolymj.2019.03.059, *Marine-inspired polymers in medical adhesion*.
- 19 O. Guo, J. Chen, J. Wang, H. Zeng, J. Yu«, *Nanoscale* 2020, 12, 1307–1324. Doi: 10.1039/C9NR09780E, *Recent progress in synthesis and application of mussel-inspired adhesives*.

nismen der Klebstoffabsonderung sind Vorbilder für automatisierte Fertigungsprozesse. In der industriellen Fertigung werden flüssige Klebstoffe exakt dosiert und in Punkten oder Linien mit Hilfe spezieller Düsen aufgetragen, um eine hohe Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.

1.4.4 Kleben – Einordnung als Verbindungstechnik

Mit »Verbindungstechnik« werden allgemein die konstruktiven Methoden des Zusammenbaus Maschinen, Anlagen, Apparaten, Geräten und modernen Bauwerken aus ihren Einzelteilen beschrieben. Der Vorgang des Verbindens wird dabei als »Fügen« bezeichnet und ist ein Element der Fertigungstechnik.²⁰ In der Fertigungstechnik stellt das »Fügen« die vierte der sechs Fertigungshauptgruppen (Urformen: Zusammenhalt schaffen/ Umformen: Zusammenhalt beibehalten/Trennen: Zusammenhalt mindern/Fügen: Zusammenhalt vermehren/Beschichten, Zusammenhalt vermehren/Stoffeigenschaften ändern) dar.²¹

Einschub

Die Fertigungshauptgruppe »Fügen« kann nach physikalischen Wirkprinzipien eingeteilt (→ s. Abb. 10) werden in kraftschlüssige Verbindungen wie Schraub- und Nietverbindungen, die durch Haftreibung zwischen den zu verbindenden zusammengehalten werden, in formschlüssige Verbindungen wie Clinch-, Falz-, Bolzen- und Schnappverbindungen, bei denen die Form und Geometrie der Bauteile zum Verbinden ausgenutzt wird und stoffschlüssige Verbindungen wie Schweiß- und Lötverbindungen, die im Verbund eine Verbindung über atomare oder molekulare Kräfte im Werkstoff selbst herstellen.²² Die Klebtechnik zählt in diesem Zusammenhang zu den stoffschlüssigen Verbindungen²³ und wird als »heterogen stoffschlüssig« bezeichnet.

Verbindungstechniken wirken über Stoffschluss, Formschluss und Kraftschluss.

- 20 M. Neitzel, P. Mitschang, U. Breuer (Hrsg.) In Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung; Hanser Verlag: München, 2014, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage.
- 21 DIN 8580:2003-08, Beuth-Verlag: Berlin, 2003
- 22 W. Skolaut (Hrsg.), Maschinenbau, Springer Verlag: Berlin, 2014
- 23 DIN 8593-0:2003-09, Beuth-Verlag: Berlin, 2003

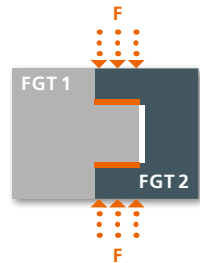
Stoffschluss



Formschluss



Kraftschluss



(FGT = Fügeeteil)

Das Kleben ist als einzige Verbindungstechnik in der Lage, mit anderen Fügeverfahren kombiniert zu werden (→ s. Abb. 11). Die Mischformen als Kombination eines »elementaren« Fügeverfahrens wird als Hybridfügen bezeichnet. Beispiele sind: Kleben und Punktschweißen, Kleben und Clinchen, Kleben und Falzen sowie Kleben und Nieten. Das Hybridfügen bietet den Vorteil, Stärken der elementaren Fügeverfahren zu ergänzen und Schwächen zu reduzieren. Beispielsweise kann eine Hybridfügeverbindung aus Kleben und Clinchen die hohe Leistungsfähigkeit des Klebens bereitstellen und ist gleichzeitig durch den Clinchpunkt sofort nach dem Fügen fixiert.

Die Verbindungstechnik »Kleben« selbst ist zunächst einmal ganz einfach definiert als die »Verbindung zweier Werkstoffe (Fügeteile) mit einem Klebstoff«. ²⁴ Klebstoff hierbei ist ein nichtmetallischer Werkstoff, der zwei Fügeteile über Adhäsion (Oberflächenhaftung) und Kohäsion (innere Festigkeit) verbindet (→ s. Abb. 12). ²⁵

Abb. 10
Systematik der
Verbindungstechniken
(FGT = Fügeenteil)⁴

24 DIN EN 923:2016-03, Beuth-Verlag: Berlin, 2016

25 in Anlehnung an Zitat 23

VERBINDUNGSTECHNIKEN



Abb. 11
Einteilung der Verbindungstechniken⁴

Kleben ist das Verbinden von Werkstoffen mit einem Klebstoff.

Ein Klebstoff ist ein Nichtmetall, welches Werkstoffe über Oberflächenhaftung (Adhäsion) und innerer Festigkeit (Kohäsion) verbindet.

Adhäsion (Haftung) ist hier der Fachbegriff für die Wechselwirkungen (Klebkraft) zwischen dem Klebstoff und den Füge-teiloberflächen. Sie erfolgt in nm-Dimensionen (1 nm entspricht dem millionsten Teil eines Millimeters = 0,000.000.1 mm). Zu diesen Adhäsionskräften gehören physikalische Wechselwirkungen, chemische Bindungen und die mikromechanische Adhäsion. Die Kohäsion beschreibt die innere Festigkeit des verfestigten Klebstoffs. Kohäsionskräfte halten die Moleküle eines Klebstoffs zusammen. Diese Kräfte basieren auf physikalischen Anziehungs-

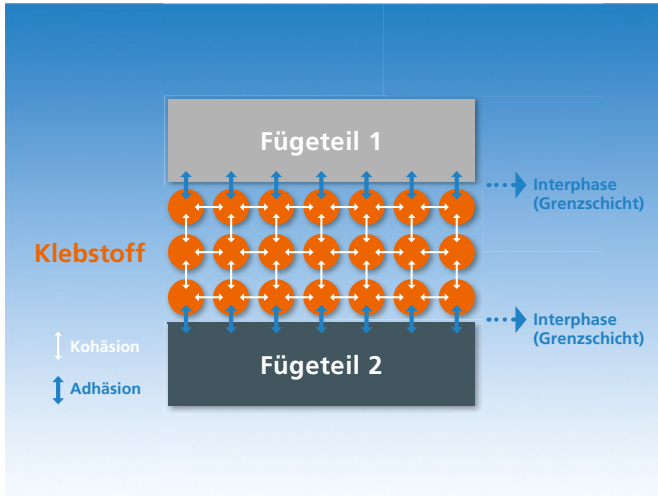


Abb. 12
Prinzipielle Wirkungs-
weise eines Klebstoffs
in einer Klebung⁴

kräften zwischen den Polymerketten, der Verknäuelung der Polymerketten und chemischen Verbindungen innerhalb und zwischen den Klebstoff-Polymerketten.

Das Kleben, welches auf dem oben dargestellten Wirkprinzip einer heterogen-stoffschlüssigen Verbindung mittels Adhäsion und Kohäsion basiert, geht aber eindeutig über das reine Verbinden von Werkstoffen hinaus. Eine Klebverbindung erfüllt zwei Hauptfunktionen: Kraftübertragung (zur Übertragung von Lasten) und Verformungsausgleich (zum Ausgleich unterschiedlicher Fügedynamiken). Dieses führt dann zu den Haupteigenschaften einer Klebverbindung: ihrer Festigkeit und ihrer Verformungsfähigkeit (→ s. Abb. 13).

Über das reine Verbinden von Werkstoffen hinaus ist das Kleben durch die Hauptfunktionen »Kraftübertragung« und »Verformungsausgleich« charakterisiert.

Beispielsweise erfüllt der Klebstoff zwischen einer Badfliese und Handtuchhalter aus Kunststoff diese zwei Hauptfunktionen: Der Klebstoff überträgt die Gewichtskraft vom Halter in die Fliese, und

er kompensiert die unterschiedlichen thermischen Dehnungen von Keramikfliese und Kunststoffhalter.

Abb. 13
Funktion und Wirkungsweise von Klebverbindungen⁴

Die Hauptfunktionen Kraftübertragung und Verformungsausgleich einer Klebverbindung führen zu den Haupteigenschaften »Festigkeit« und »Verformungsfähigkeit«.



1.5 Die Verbindungstechnik »Kleben« – Vorteile im Vergleich zu anderen Verbindungstechniken

Die Klebtechnik zeigt eine Reihe weiterer Vorteile im Vergleich zu anderen Verbindungstechniken. Neben dem reinen Verbinden von Werkstoffen und den Hauptfunktionen »Kraftübertragung« und »Verformungsausgleich« bietet die Klebtechnik eine Reihe von Zusatzfunktionen (→ s. Abb. 14).

Über die Hauptfunktionen Kraftübertragung und Verformungsausgleich hinaus bietet die Klebtechnik eine Reihe vorteilhafter Zusatzfunktionen.

Ein Klebstoff kann in der Lage sein, Fugentoleranzen auszugleichen. Er kann zudem eine Klebfuge abdichten gegenüber Flüssigkeiten und ggf. auch gegenüber Gasen. Elastische Klebstoffe ermöglichen eine Schalldämmung und eine Vibrationsdämpfung. Beim Kleben metallischer Werkstoffe kann der Klebstoff in der Klebung als Korrosionsschutz wirken. Viele Klebstoffe basieren auf organischen Polymeren, die nicht leitfähig sind. Diese Klebstoffe können elektrisch isolieren. Anderen Klebstoffen sind Metallpulver (in der Regel Silberpulver) zugemischt. Die so modifizierten Klebstoffe weisen eine sehr gute Leitfähigkeit auf. Sie werden z. B. in der Mikro-Elektronik für die Übertragung von elektrischem Strom eingesetzt. Andere Klebstoffe sind speziell für die Übertragung von Wärme modifiziert und haben eine hohe Wärmeleitfähigkeit.

Moderne Klebstoffe können dahingehend entwickelt werden, dass sie in der Klebverbindung Licht der gewünschten Wellenlängen durchlassen oder auch herausfiltern. Jede Klebverbindung kann wieder gelöst werden (siehe dazu auch Kapitel 2.6), so dass die Werkstoffe des Verbunds nach dem Recycling wiederverwendet werden können. Kleben bietet zudem ein hohes Maß an

Designfreiheit. Dies gilt auch für die Gestaltung von Oberflächen im Fugenbereich. Außerdem ist das Verbinden dünner, kleiner und teilweise kompliziert geformter Komponenten möglich. Eine Klebung kann so gestaltet werden, dass sie dem Auge des Betrachters verborgen bleibt und das Design des Gesamtprodukts nicht stört.

Abb. 14
Mögliche Funktionen
eines Klebstoffs in
einer Klebverbindung⁴



1.6 Die Verbindungstechnik »Kleben« – limitierende Faktoren im Vergleich zu anderen Verbindungstechniken

Wie jede Technologie hat natürlich auch das Kleben Grenzen. Sind diese limitierenden Faktoren dem Konstrukteur nicht bekannt bzw. werden vom Nutzer nicht beachtet, besteht die Gefahr des Versagens der Verbindung.

Das wahrscheinlich bekannteste Beispiel eines solchen Versagen ist der Absturz des Ikarus (→ s. Abb. 15²⁶). Der griechischen Mythologie zufolge wurden Ikarus und Dädalus im Labyrinth des Minotauros auf Kreta gefangen gehalten. Dädalus erfand für sich und seinen Sohn Ikarus Flügel, indem er Federn mit Wachs (also einem »Schmelzklebstoff«) an ein Gestänge klebte. Die Randbedingungen waren vorgegeben: nicht zu hohe und nicht zu tiefe Flughöhen. Bei zu hohen Flughöhen führt die Hitze der Sonne zur Erweichung des Wachses und damit zum Absturz. Bei zu niedrigen Flughöhen führt die Feuchte des Meeres zu Ablösungen der Federn. Trotzdem setzte Ikarus die Klebverbindungen seiner Flügel Bedingungen aus, für die sie nicht ausgelegt waren: Er stieg so hoch hinauf, dass die Sonne das Wachs schmolz, die Klebungen sich lösten und er ins Meer stürzte. Noch heute heißt die Unglücksstelle Icaria, das Meer drum herum das »Ikarische Meer«.²⁷

Das Beispiel zeigt die Grenzen in der Anwendung von Klebtechnik. Diese sind im Einzelnen:



Abb. 15
Der Absturz des Ikarus

26 La caída de Ícaro, Madrid, Museo del Prado von Jacob Peter Gowdy. Wikicommons (Zugriff April 30, 2020)

27 in Anlehnung an: O. Höfer In Ausführliches Lexikon der griechischen und römischen Mythologie; W. H. Roscher (Hrsg.); Leipzig 1894, Band 2, 1, Sp. 114–117, Ikaros 1.

- Klebstoffe und damit Klebungen sind nur begrenzt thermisch belastbar.
- Die Langzeitbeständigkeit von Klebungen wird durch Alterungsprozesse (Degradation) eingeschränkt.
- Beim Herstellen eines Klebverbundes variiert die Zeit bis zum Erreichen der Handfestigkeit von wenigen Sekunden bis zu vielen Stunden. Fixierungen können notwendig sein.
- Die Wiederlösbarkeit der Verbindung ist grundsätzlich möglich. Sie kann aber mit Aufwand verbunden sein.

Nicht nur bei Ikarus, sondern auch heute sind Klebungen nur begrenzt thermisch belastbar. Moderne Klebstoffe sind organische Polymere und Silikone. Bei ihnen ist die Energie einer chemischen Kohlenstoff-Kohlenstoff- bzw. Silizium-Sauerstoffverbindung auf ca. 350 kJ/mol bzw. ca. 370 kJ/mol begrenzt. Wird diese Bindungsenergie überschritten, kommt es zwangsläufig zu einer Zersetzung. Aber bereits vor einer Zersetzung ändert das Klebstoffpolymer seine mechanisch-technologischen Eigenschaften wie Festigkeit und Verformbarkeit: Bei Erreichen einer spezifischen erhöhten Temperatur erweicht das Polymer. Die Festigkeit nimmt ab und die Verformbarkeit steigt.

Wird eine spezifische tiefe Temperatur dagegen unterschritten, versprödet das Klebstoffpolymer. Die Festigkeit nimmt zu und die Verformbarkeit nimmt ab. Um diesen limitierenden Faktoren zu begegnen, setzt der Ingenieur für seine Konstruktion nur Klebstoffe ein, die dem für das Produkt vorgesehenen Temperaturbereich entsprechen. Gibt es keinen entsprechenden Klebstoff, ist das Kleben in diesem Anwendungsfall eine ungeeignete Verbindungstechnik.

Die Bindungsenergien der organischen Polymere und Silikone sind ebenfalls Grund für die beschränkte Langzeitbeständigkeit von Klebungen. Wie andere Kunststoffe unterliegen Klebstoffe – und damit die Klebung – Alterungsprozessen durch Feuchtigkeit, UV-Strahlung, Temperatur, äußere Medien etc. Diese Einflussfaktoren können einzeln, aber auch kombiniert auftreten. Für den Klebstoffanwendenden ist entscheidend, dass er für sein zu klebendes Produkt die möglichen Degradationsprozesse kennt und entsprechende Gegenmaßnahmen ergreift. So ist beispielsweise bekannt, dass die üblicherweise für Scheibenklebungen einge-

setzten Polyurethan-Klebstoffe nicht stabil gegenüber Sonnenlicht sind. Der UV-Anteil des Sonnenlichts lässt die Polyurethan-Klebung altern. Die Gegenmaßnahme, um diesem Degradationsprozess zu begegnen, besteht – Stand der Technik! – darin, die Klebfläche auf der Scheibe vor dem Kleben mit einem UV-undurchlässigen Keramiksiebdruck zu beschichten. Der Keramiksiebdruck schützt die Klebung vor dem UV-Licht.

Eine Klebverbindung ist in der Regel nicht sofort einsetzbar. Grund hierfür ist das Wechselspiel zwischen Benetzung der Oberfläche und innerer Festigkeit des Klebstoffs: Ein Klebstoff muss bei seinem Auftrag die Werkstoffoberfläche vollständig benetzen, um Haftung aufzubauen. Dazu muss der Klebstoff ausreichend fließfähig sein, um überhaupt in die Mikrostruktur (Adhäsionsfläche) der Werkstoffoberfläche vorzudringen. Erst nach der Benetzung und dem anschließenden Aufbau der Oberflächenhaftung (Adhäsion), darf die innere Festigkeit des Klebstoffs aufgebaut werden. Dies geschieht durch die chemische oder physikalische Verfestigung des Klebstoffs. Die Verfestigung ist ein Prozess, der, in Abhängigkeit vom eingesetzten Klebstoff, mehr oder weniger Zeit in Anspruch nehmen kann und währenddessen Fixierungen der Werkstücke erfordert.

Grundsätzlich kann jede Klebverbindung auch wieder gelöst werden (siehe hierzu Kapitel 2.6). Dieses kann jedoch, wie bei einer Niet- oder Schweißverbindung auch, mit Aufwand verbunden sein. Auf Einzelheiten wird in Kapitel 2.6 näher eingegangen.

Die Grenzen der Klebtechnik müssen dem Anwender bekannt sein.

1.7

Die Verbindungstechnik

»Kleben« – Beispiele typischer Anwendungsbereiche

1.7.1 Kleben im Alltag

Ohne dass wir uns dessen bewusst sind, ist die Klebtechnik längst ein ständiger Begleiter. Häufig auch bodenständig: Fliesen, Parkett, Teppichboden – alles garantiert geklebt. Die Klebtechnik hat sich längst zu einer Zukunftstechnologie entwickelt, ohne die fast nichts läuft. Mit Klebstoffen kann man Alltagsgegenstände und hoch komplizierte Spezialprodukte (siehe Kapitel 1.7.2) fügen. Trotzdem werden Klebstoffe oft unterschätzt. Einer ihrer technischen Vorteile ist nämlich gleichzeitig auch ein Nachteil für ihr Image: Klebstoffe sind oftmals für den Konsumenten nicht sichtbar.

Man kann sich schwer vorstellen, wieviel Klebstoff in alltäglichen Gebrauchsgegenständen steckt. Allein in Deutschland wurde 2018 über eine Million Tonnen Kleb- und Dichtstoffe produziert (siehe Kapitel 1.8), Tendenz steigend. Deutschland ist sogar Kleb-Weltmeister: Der durchschnittliche Pro-Kopf-Verbrauch lag im Jahr 2019 bei 10,8 Kilogramm.²⁸ Ohne sich dessen bewusst zu sein, umgeben uns im Alltag viele verschiedene Klebstoffe und klebtechnische Anwendungen beispielsweise an Schuhen, Handys und anderen elektronische Geräten, an Büchern und Zeitschriften, Möbeln, Fensterscheiben, Flaschenetiketten, Preisschildern, Verpackungen, Zahnkronen, Windeln, Fingernägeln und Pflastern.

→ s. Abb. 16^{29, 30, 31}

28 Information Industrierverband Klebstoffe e. V., 2020

29 AdobeStock 2758638

30 Andreas Groß, privat

31 »Ettore Sottsass Tribute« – art by NO CURVES / www.nocurves.ws / photo courtesy: Marco »Sfrevol« Montanari



Pflaster zum Beispiel werden als »Allerweltsprodukte« wahrgenommen, jeder braucht sie hin und wieder. Sie müssen vor allem die Wunde abdecken und vor Verunreinigungen schützen. Dazu müssen sie auf der Haut kleben, aber sie müssen auch schmerzfrei wieder lösbar sein. Gleichzeitig sollen sie bei Bewegungen mitgehen, zusätzlich noch Wasser vertragen und Wundflüssigkeit oder Blut aufnehmen können. Viele Anforderungen an ein nur scheinbar einfaches Produkt. Ein weiteres Alltags-Beispiel: die Brötchentüte aus Papier ist selbstverständlich geklebt. Beim Beispiel in Abbildung 16 unten links sind die Tragehenkel ebenfalls geklebt. Auch moderne Künstler verwirklichen sich mit Hilfe der Klebtechnik. Abbildung 16 unten rechts zeigt das Beispiel des Künstlers Marco Montanari. Das Bild stellt den Architekten Ettore Sottsass (1917–2007) dar.

Abb. 16
Klebtechnik im
Alltag – aufge-
klebte Fingernägel²⁹,
Pflaster⁴, geklebte
Brötchentüte mit
geklebten Trage-
henkeln³⁰, Tape-Art
Bild des Künstlers
NO CURVES³¹

Es gibt heutzutage kaum Bereiche, in denen die Verbindungstechnik »Kleben« nicht zum Einsatz kommt. Im folgenden Kapitel 1.7.2 sind Beispiele industriellen Klebens aufgeführt, von denen einige genauer erläutert werden, die das verdeutlichen.

1.7.2 Industrielles Kleben

Flugzeugbau

Klebstoffe sind aber nicht nur im Alltag zu finden. Auch in der Industrie sind sie aus der Produktion nicht mehr wegzudenken. Ein Beispiel dafür ist die Flugzeugindustrie (→ s. **Abb. 17**³²). Um Betriebskosten pro Passagier und Flugzeug zu reduzieren und den Treibstoffverbrauch zu senken, werden sogenannte Verbundwerkstoffe eingesetzt. Das sind Materialien, die aus Schichten von glasfaserverstärktem Kunststoff und Aluminium bestehen, die mit Hochleistungsklebstoffen miteinander verbunden werden.

Abb. 17
Klebtechnik – aus dem modernen Flugzeugbau nicht mehr wegzudenken



Fahrzeugbau

Heutzutage kommen in einem PKW (→ s. **Abb. 18**^{33, 34}) zwischen 15 und 20 kg Klebstoff zum Einsatz.

Eine typische Anwendung ist das Scheibenkleben (→ s. **Abb. 18, unten**), die im Automobilbau längst zum Stand der Technik gehört. Im Gegensatz zu früher wird heutzutage die Scheibe nicht mehr eingesteckt, sondern mit elastischem Polyurethan-Klebstoff eingeklebt. Da der Klebstoff in der Klebung Kräfte übertragen kann, wird

32 AdobeStock 128490717

33 AdobeStock 50101004, AdobeStock 45667995, AdobeStock 50101006

34 AdobeStock 142408206



die Scheibe zum Konstruktionselement für die gesamte Karosserie. Der Vorteil besteht darin, dass sich durch die Klebung Scheibe/Karosserie die Torsionssteifigkeit des Fahrzeugs im Vergleich zur eingesteckten Scheibe um 15–20 % erhöht. Dieses wiederum ermöglicht, dünnere, d. h. leichtere Bleche zu verwenden und eine Gewichtsreduzierung des Fahrzeugs bewirken.

Abb. 18
Klebtechnik – aus dem modernen Automobilbau nicht mehr wegzudenken: Scheibenkleben im modernen Automobilbau (unten) ist Stand der Technik

Im automobilen Karosseriebau wird ebenfalls geklebt: Das Punktschweißkleben (Hybridfügen, siehe Kapitel 1.3) gehört dort mittlerweile zum Stand der Technik. Der Vorteil des Punktschweißklebens besteht darin, dass Kraftübertragung und sofortige Fixierung miteinander kombiniert werden. Verantwortlich für die hohe Kraftübertragung ist das Kleben. Schweißpunkte ermöglichen lediglich eine punktförmige Kraftübertragung (→ s. Abb. 7, links). Bei ausschließlich punktschweißten Verbindungen konzentriert sich die Kraftübertragung daher auf wenige Punkte und eine geringe Fläche. Bei zu hoher Krafteinwirkung können die Schweißpunkte aus dem Blech »herausgerissen« werden. Die Klebung erfolgt über die gesamte Fläche der Verbindung und ermöglicht dadurch die Kraftübertragung auf der gesamten Fläche. Zusätzlich verhindern die Schweißpunkte ein Aufschälen der Klebung. Klebstoff ist in vielen modernen deutschen Fahrzeugen sogar maßgeb-

Abb. 19
Hybridfügen (Punktschweiß-Kleben) im Karosseriebau: Erhöhung der Crashstabilität = Erhöhung der Insassensicherheit



lich für die Crashesicherheit und damit für das Überleben der Insassen bei einem Unfall verantwortlich (→ s. Abb. 19^{35,36})

Auch im Nutzfahrzeugbau wird zunehmend geklebt. Abbildung 20³⁷ zeigt das Beispiel eines LKWs. Die Außenelemente der Fahrerkabine bestehen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und sind an die Karosserie angeklebt.

Abb. 20
Klebtechnik im Nutzfahrzeugbau: die GFK-Außenelemente der Fahrerkabine sind geklebt (Bild links)/ die roten Linien verdeutlichen die Klebnähte (Bild rechts)



Schienefahrzeugbau

Der Schienenfahrzeugbau ist inzwischen ebenfalls ein bedeutender Bereich der klebtechnischen Anwendung (→ s. Abb. 21³⁸ und 22). Bei Schienenfahrzeugen besteht die Steigerung der Anforderungen neben vielen anderen Faktoren u. a. in der Geschwindigkeits- und Transportkomforterhöhung. Dazu müssen die Fahrzeuge leichter werden und gleichzeitig höhere Belastungen aushalten können (siehe hierzu auch Kapitel 2.5.3 und 2.5.4).

Die klebtechnische Entwicklung im Schienenfahrzeug schreitet weiter voran. Die Klebtechnik ermöglicht modernes Design, und Design ist auch im Schienenfahrzeugbau ein wichtiges Verkaufsargument.

35 AdobeStock 243726087

36 AdobeStock 243726169

37 MAN AG

38 MBD Design / Bombardier



Die Klebtechnik hat im Schienenfahrzeugbau inzwischen einen derartigen Umfang angenommen hat, dass auf Initiative des Eisenbahn-Bundesamtes – EBA eine Norm (DIN 6701³⁹/siehe Kapitel 1.9) zur Qualitätssicherung der Organisation und Umsetzung klebtechnischer Prozesse im Schienenfahrzeugbau entwickelt und im Jahr 2006 eingeführt wurde. Obwohl es sich um eine nationale Norm handelt, arbeiten inzwischen (Stand 31.12.2019) über 700 Betriebe weltweit nach dieser Norm und sind nach der Norm zertifiziert. → s. Abb. 22⁴⁰

Abb. 21
Tram Marseille
(Frankreich): Kleb-
technik ermöglicht
modernes Design



Abb. 22
Schienenfahrzeugbau/
Beispiel ICE – Die Kleb-
technik hat inzwi-
schen einen Umfang
erreicht, dass analog
zum Schweißen eine
Qualitätssicherungs-
norm (DIN 6701)
eingeführt wurde

39 Normenreihe DIN 6701, Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen, Beuth-Verlag: Berlin, 2006–2015

40 AdobeStock 51103001

Abb. 23
Schiffbau – die Passagierfensterscheiben aus Polycarbonat und die Sitzreihen (Bilder unten) sind eingeklebt



Schiffbau

Bereits im Jahr 2000 konstruierte die Lürssen-Werft in Lemwerder für einen indonesischen Kunden Hochgeschwindigkeitsfähren (→ s. Abb. 23⁴¹), die mit einer in diesem Bereich bislang nicht da gewesenen Geschwindigkeit von 40 Knoten (> 70 km/h) unterwegs sind. Bei schwerer See sind diese Fähren heftigen Stößen ausgesetzt. Die Sitzreihen sind deshalb mit feuchtigkeithärtenden, gummielastischen Klebstoffen auf die Decks geklebt. Statt einer punktuellen Fügeverbindung wie Nieten oder Schrauben wird durch die flächige Kraftübertragung beim Kleben das Herausreißen der Sitze verhindert. Zusätzlich wirkt der Klebstoff vibrationsdämpfend, was wiederum den Fahrkomfort erhöht. Rund eine Tonne Gewicht konnte darüber hinaus eingespart werden, indem die Passagierdeckfenster nicht mehr aus Glas, sondern aus Polycarbonat bestehen. Die Kunststoffscheiben wurden ebenfalls mit Polyurethan-Klebstoffen eingeklebt. Über die Produktlebensdauer eines Schiffs mindert der durch die Klebtechnik realisierte langzeitbeständige Multimaterial-Leichtbau den CO₂-Fußabdruck dramatisch.

41 alle Bilder: Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG, Lemwerder / Henkel AG & Co. KGaA, Düsseldorf

Windenergie

Windenergie ist ein wichtiger Gestaltungsraum der Zukunft. Zur Realisierung immer effizienterer Windenergieanlagen (→ s. Abb. 24) werden die Rotorblätter komplett geklebt. Die Rotorblätter der Anlagen bestehen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK), einem Werkstoff mit vergleichsweise hoher Steifigkeit bei vergleichsweise geringem Gewicht. Nach herkömmlicher Bauart werden die Rotorblätter aus zwei Halbschalen hergestellt, die dann komplett klebtechnisch zu einem Ganzen verbunden werden. Je nach Größe eines Rotorblattes werden dazu mehrere hundert Kilogramm Epoxidharz-Klebstoff eingesetzt.



Abb. 24
 Windenergieanlagen –
 die Rotorblätter aus
 FVK sind geklebt³⁰

Ein Fügen der Rotorblatt-Halbschalen wäre ohne Klebtechnik nicht denkbar. Schweißen würde Rotorblattwerkstoffe zerstören und punktförmige mechanische Fügetechniken würden durch das Bohren von Löchern zu Werkstoffschädigungen im Rotorblatt führen. Allein durch die im Betrieb auftretenden extremen mechanischen Belastungen bei Umlaufgeschwindigkeiten von bis zu 390 km/h⁴² hätten diese Schädigungen fatale Auswirkungen. Daher wurden hochdynamisch belastbare Klebstoffe entwickelt, die diesen extremen Belastungen standhalten. Folglich ermöglicht die Klebtechnik die notwendige Verhinderung der Werkstoffschädigung und damit überhaupt erst die Realisierung dieser Anlagen zur Gewinnung regenerativer Energie.

42 enercity AG, <https://www.enercity.de/windenergie/wissen-windenergie/windraeder/index.html> (Zugriff April 30, 2020)

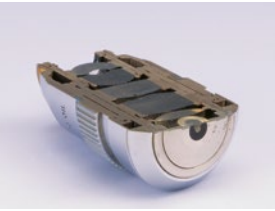


Abb. 25
Klebtechnik in der Optik – angepasste Lichtdurchlässigkeit erlaubt die Verwendung von Klebstoffen im Strahlengang von Optiken⁴

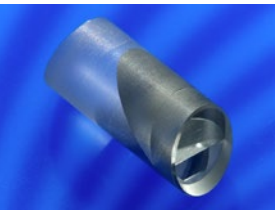


Abb. 26
Klebtechnik in der Medizintechnik – geklebte Optik eines Endoskops für den minimalinvasiven Einsatz (Rohrdurchmesser ca. 2 mm, UV-härtender Klebstoff)⁴

Abb. 27
Klebtechnik in der Medizintechnik – Einsatz der Klebtechnik im Dentalbereich

Optik

Für die Optik und die Hochleistungsoptik ist die Klebtechnik ein essenzielles Fügeverfahren (→ s. Abb. 25). Sie ermöglicht das spannungsfreie Verbinden der verschiedenen optischen Elemente. Die Spannungsfreiheit ist häufig erforderlich, erlaubt sie doch einen störungsfreien, unbeeinflussten Strahlengang.

Medizintechnik

Stellvertretend für den umfangreichen Einsatz der Klebtechnik in unterschiedlichen Bereichen der Medizintechnik ist die geklebte Optik eines Endoskops ein Beispiel (→ s. Abb. 26). Endoskope werden für den minimalinvasiven Einsatz hergestellt. Der Rohrdurchmesser dieses Endoskops beträgt ca. 2 mm. Geklebt wird mit einem UV-härtenden Klebstoff angepasster Wellenlänge, der einen ungestörten Durchgang des Lichtes während der Untersuchung ermöglicht.

Der Einsatz Klebtechnik in der Dentalmedizin (→ s. Abb. 27⁴³) ist ebenfalls Standard. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Mundflora höchste Anforderungen an die Langzeitbeständigkeit einer Klebung stellt. Verwendet werden strahlenhärtende Klebstoffe, die genau für diesen Anwendungsbereich entwickelt wurden.



43 AdobeStock 26812232 (links), 169282841 (rechts)

Haushaltsgeräte (»weiße Ware«)

Im Haushaltsbereich kommt die Klebtechnik ebenfalls vielfältig zum Einsatz (→ s. **Abb. 28**⁴⁴).



Abb. 28
 Kleben von
 Haushaltsprodukten

Ein Beispiel ist der Kochherd, bei dem das Keramik-Kochfeld (→ s. **Abb. 29, Mitte**⁴⁵) sowie die Glasscheibe und Designteile der Dunstabzugshaube (→ s. **Abb. 29, links**⁴⁶) geklebt sind. In → s. **Abb. 29, rechts**⁴⁷, rechts ist ein Backofen dargestellt, bei dem Bedienfront, Tür und Designteile mit hitzebeständigem Silikon-Klebstoff (bis 250 °C) geklebt sind.

Abb. 29
 Klebtechnik im
 Haushaltsbereich –
 geklebte Glasscheibe
 und Designteile der
 Dunstabzugshaube
 (links), geklebtes
 Keramik-Kochfeld
 (Mitte) und geklebte
 Tür und Designteile
 des Backofens (rechts)



 44 AdobeStock 57110605
 45 Adobe 27997579
 46 BSH Hausgeräte GmbH
 47 AdobeStock 123650428



Abb. 30
Klebtechnik in der
Akustikindustrie –
eingeklebte Lautspre-
chermembranen

Akustikindustrie

Die Herstellung von Akustikboxen ist ohne den Einsatz der Klebtechnik nicht mehr denkbar. Durch das Einkleben von Lautsprechermembranen werden höchste Qualitätsstandards realisiert (→ s. Abb. 30⁴⁸).

Schuhindustrie

Die Klebtechnik ist bei der Herstellung von Schuhen ebenfalls nicht mehr wegzudenken. Sie ermöglicht ein flächiges und dichtes Verbinden der einzelnen Teile aus unterschiedlichen Werkstoffen (→ s. Abb. 31).

Gleichzeitig ermöglicht sie die Reparatur der Schuhe, wodurch die Produktlebensdauer signifikant erhöht wird (→ s. Abb. 32⁴⁹).

Abb. 31
Klebtechnik in der
Schuherstellung –
geklebter Lami-
nataufbau eines
Sportschuhs⁴



Abb. 32
Klebtechnik in der
Schuhreparatur



48 AdobeStock 79864289

49 AdobeStock 32143097 (links), AdobeStock 1326609423 (Mitte),
AdobeStock 266601382 (rechts)

Sportbereich

Ein sehr einprägsames Beispiel für den Einsatz der Klebtechnik im Bereich des Sports sind die WM-Bälle der FIFA-Fußballweltmeisterschaften. Der ursprüngliche Fußball wurde aus dem Naturwerkstoff Leder (daher »Lederpille«) gefertigt, indem die einzelnen Lederteile zusammengenäht wurden (→ s. Abb. 33, links). Auch wenn seit der WM 1986 die WM-Bälle nicht mehr aus Leder, sondern aus Kunststoff gefertigt wurden, die Verbindungstechnik blieb die alte: es wurde weiter genäht.

Der Teamgeist (→ s. Abb. 33, rechts), der Ball der FIFA WM 2006 (»das Sommermärchen«) war der erste WM-Ball, der werkstoffgerecht gefertigt wurde. Es gab keine Werkstoffverletzungen durch Lochbohrungen für das Nähen und keine punktförmigen Kraftübertragungen mehr, sondern flächige Klebungen. Der Teamgeist war der erste vollständig geklebte Fußball einer FIFA-Weltmeisterschaft.

Abb. 33
Klebtechnik im Sport –
Von der Lederpille
zum Hightech-Ball:

Links: Ball der WM
1954 (das »Wunder
von Bern«): der Ball
besteht aus
18 Ledersegmenten,
die zusammengenäht
wurden³⁰

Rechts: Teamgeist
(WM 2006 – das
»Sommermärchen«):
der erste vollständig
geklebte Fußball³⁰



1.8 Kleben – wirtschaftliche Bedeutung dieser Verbindungstechnik

Die moderne Klebtechnik ist somit in nahezu allen Bereichen längst integraler Bestandteil innovativer Technikentwicklung.⁵⁰ Auf Grund ihres technologischen Potenzials leistet sie wirtschaftliche Beiträge zur Stabilisierung und zum Ausbau des Wirtschaftsstandorts Deutschland. Nicht ohne Grund ist Deutschland im Bereich der Klebtechnik weltweit führend.

Im Jahr 2018 wurden 1.137.000 Jahrestonnen Kleb- und Dichtstoffe (Klebstoffe: 955.000 Tonnen/Dichtstoffe 182.000 Tonnen) hergestellt, zementäre Bauklebstoffe sind dabei nicht berücksichtigt. Die gemessen am Produktionsumfang bedeutendsten Produkttypen in diesem Zusammenhang waren im Jahr 2018 Dispersionsklebstoffe mit einer Produktionsmenge von rund 423.000 Tonnen. Dahinter folgen reaktive Klebstoffsysteme mit ca. 300.000 Tonnen und Schmelzklebstoffe mit ca. 142.000 Tonnen. Hinzu kommen 35.000 Tonnen Casein- und Knochenleime, Stärke, Dextrine sowie pflanzliche Klebstoffe und 55.000 Tonnen lösemittelhaltige Klebstoffe sowie 1.055 Mio. m² Klebebänder.⁵¹ Letzteres kommt einer Fläche von etwa 150.000 Länderspiel-konformen⁵² Fußballfeldern gleich.

Die o. g. Produktionsmenge entspricht einem Umsatz von rd. 4 Mrd. € für Klebstoffe. Für die Volkswirtschaft entscheidend ist jedoch, dass das Kleben 2018 zu einer indirekt generierten Wertschöpfung von ca. 450 Mrd. € führte.⁵³ Man kann davon

50 A. Wagner; A. Stett In *Sicheres Kleben – Herausforderungen in der klebtechnischen Praxis: NMI – Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut an der Universität Tübingen*: Reutlingen, 2015

51 Information Industrieverband Klebstoffe e. V., 2020

52 Union des Association Européennes de Football (UEFA) (Hrsg.) In *UEFA-Stadioninfrastruktur-Reglement*, Ausgabe 2010, Artikel 29

53 B. Tasche, A. van Halteren In *Pressemitteilung Industrieverband Klebstoffe*; Düsseldorf, 2019; *Deutsche Klebstoffindustrie: Verlangsamtes Wachstum*.

ausgehen, dass in Deutschland rd. 33.000 verschiedene Klebstoffprodukte am Markt sind, aus denen für die verschiedensten gegenständlichen Produkte das geeignetste ausgewählt werden kann. Nur den sogenannten »Alleskleber« gibt es nicht, genauso wenig wie es die »Universal-Schraube« oder den »Global-Niet« gibt.

Einen »Alleskleber« gibt es genauso wenig wie eine »Universal-Schraube«.

1.9 Kleben – aber sicher: die Entwicklung und Umsetzung von Qualitätsnormen zur Gewähr- leistung sicheren Klebens

1.9.1 Einführung

Durch Breite und Umfang des Einsatzes ist die Klebtechnik für die deutsche Industrie und für unseren privaten Alltag unersetzlich. Die wirtschaftliche Bedeutung der durch Klebtechnik indirekt generierte Wertschöpfung ist extrem hoch (siehe Kapitel 1.8). Trotzdem hat das technologische Leistungspotenzial und das Image der Klebtechnik in der breiten Öffentlichkeit nicht den verdienten Stellenwert. Die Gründe hierfür sind vielschichtig und können durch zwei Beispiele verdeutlicht werden.

1. Kleben wird für Bastelarbeiten beispielsweise mit Holz und Papier eingesetzt. Daraus wird abgeleitet, dass Klebtechnik »kinderleicht« ist. Das für Bastelarbeiten erfolgreich eingesetzte Klebsystem wird auf professionelle Anwendungen übertragen, dies stellt sich in der Regel als Trugschluss heraus. Der Trugschluss liegt aber nicht am »Klebstoff« und schon gar nicht an der »Klebtechnik«, sondern am »Kleber«, d. h. an der ausführenden Person. Der »Kleber« hat auf Grund mangelnder Klebkompetenz falsch abstrahiert und ist zu falschen Transferschlüssen gelangt.
2. Klebtechnik wird oftmals erst dann als Verbindungstechnik berücksichtigt, wenn festgestellt wird, dass der Einsatz der eigentlich vorgesehenen Füge­technik aus übergeordneten Gesichtspunkten in der Fertigung nicht realisierbar ist. Nicht selten soll dann die Klebtechnik das Ganze retten, jedoch ohne dass die Füge­teilwerkstoffe auf ihre Klebbarkeit geprüft, ohne dass die Füge­teiler­flächen adhäsionsgerecht gestaltet (siehe Kapitel 1.4.4.), ohne dass die Kompatibilität des Kleb-

stoff-Verfestigungsmechanismus zu Füge­teilwerkstoffen und Fertigungsrandbedingungen ermittelt und ohne dass die konstruktive Auslegung der Verbindung notwendigerweise klebgerecht gestaltet wurde. Der Misserfolg ist auch hier vorprogrammiert: Wenn für eine erfolgreiche Klebung notwendige technologische Grundvoraussetzungen nicht eingehalten werden, kann das Kleben nicht funktionieren.

Beiden Beispielen – und die Liste ließe sich noch nahezu beliebig erweitern – jedoch ist eins gemeinsam: Für die Bewertung des unter diesen Bedingungen in der Regel unausweichlichen Misserfolgs wird die Schuld dem »Klebstoff« bzw. der »Klebtechnik« zugewiesen. Dieser falsche wie unreflektierte Eindruck prägt das Image der Klebtechnik. Er verhindert die für zukünftig notwendigen Einsätze die erforderliche Basis: Vertrauen!⁵⁴ Dieses ist kein Kleb­spezifikum. Es gilt grundsätzlich: Dinge, denen man nicht vertraut, verwendet man besser nicht.

In der Historie der Verbindungstechniken gibt es dafür ein herausragendes Beispiel: Die Verbindungstechnik Nr. 1 des 19. Jahrhunderts im Metallbau war die Niettechnik.⁵⁵ Ihr wurde vertraut und deshalb wurde sie eingesetzt.⁵⁶ Nicht ohne Grund ist das wohl bekannteste, rein genietete und bis heute existente Exponat der Eiffel-Turm in Paris. Der Schweißtechnik stand man bei ihrer Einführung im Metallbau um die Wende 19./20. Jahrhundert äußerst kritisch gegenüber. Obwohl die Schweißtechnik ein der Niettechnik überlegenes Potenzial hatte war ihr Einsatz durch ihr mangelndes positives Image gehemmt. Der Grund war ganz einfach: Der Niettechnik wurde auf Grund der positiven Erfahrungen mit ihr genau das Vertrauen entgegengebracht, welches der Schweißtechnik zu dem Zeitpunkt fehlte.

54 A. Gross, In Proceedings 2nd Symposium on Adhesion and Bonding Research, Tokyo, Japan, December 6, 2018, Reed Exhibition Japan Ltd (Hrsg.); Tokyo, 2018, Contemporary quality requirements for adhesive bonding processes.

55 H. Behnisch, G. Aichele In Die Schweißtechnik im Wandel der Zeiten; DVS-Verlag GmbH: Düsseldorf, 2006; S. 210–219, Kapitel: Nieten – die wichtigste Verbindungstechnik im 19. Jahrhundert.

56 L. Klases, In Handbuch – Der Hochbau – Constructionen in Eisen und anderen Metallen für Architekten, Ingenieure, Constructeurs, Bau-Handwerker und Technische Lehranstalten; Verlag Engelmann: Leipzig, 1876



Abb. 34
Beispiele schweißtechnischer Regelwerke zur Qualitätssicherung⁴

Unbestreitbar ist jedoch auch, dass sich das Image der Schweißtechnik – auch im landläufigen Sinne – im Laufe des 20. Jahrhunderts komplett gedreht hat und die Schweißtechnik sich zur Verbindungstechnik Nr. 1 des 20. Jahrhunderts entwickelte.^{57, 58, 59} Der Grund dafür ist ebenfalls ganz einfach: Der Schweißtechnik wird auf Grund der positiven Erfahrungen mit ihrem Einsatz genau das Vertrauen entgegengebracht, welches notwendig ist, eine –

57 H. Behnisch, G. Aichele In Die Schweißtechnik im Wandel der Zeiten; DVS-Verlag GmbH: Düsseldorf, 2006; S. 219–228, Kapitel: Von der genieteten zur geschweißten Stahlkonstruktion

58 N. Witte, Elektroschweißung 1 1930, 7, 140–142, Die erste geschweißte Reichsbahnbrücke.

59 M. Beckert, Schweißen und Schneiden 54 2002, 2, 95–97, Aus der Geschichte des Schweißens im Schiffbau.

ursprünglich auch einmal »neue« – Technologie im Industriellen auf breiter Ebene einzusetzen.⁶⁰

Vertrauensbildung ist die Basis dieses Imagewandels. Zu dem Imagewandel gehören natürlich kontinuierliche Forschung und Entwicklung zur Verbesserung der Technologie. Die Schweißer haben Vertrauen jedoch stark durch frühzeitiges Entwerfen und Umsetzen qualitätssichernder Maßnahmen und Regelwerke für den Einsatz ihrer Technologie aufgebaut (→ s. Abb. 34^{61, 62, 63, 64, 65, 66}). Dadurch wurden Anwendungsfehler mehr und mehr vermieden und der Weg zu motivierenden Erfolgserlebnissen geöffnet. Erfolgserlebnisse, welche dann zu zunehmender Sicherheit in der Anwendung und damit letztlich zum Vertrauen in die Technologie führten. Dieses Vertrauen bildete die Basis für weitergehende Innovationen.

Vertrauen ist deshalb essenziell, da es sich beim Schweißen gemäß ISO 9001 um einen »speziellen Prozess« handelt.⁶⁷ Damit sind Prozesse und Prozessschritte gemeint, deren Fehlerlosigkeit zerstörungsfrei nicht hundertprozentig verifiziert werden kann. Für derartige »spezielle Prozesse« fordert die ISO 9001 die Implementierung eines Qualitätsmanagementsystems zur umfas-

-
- 60 H. Büttemeyer In Sonderband 100 Jahre DVS; DVS-Verlag: Düsseldorf, 1997, S. 218–226, Schweißtechnische Fertigung am Beispiel des Schienenfahrzeugbaus
- 61 Normenreihe DIN EN ISO 3834, Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen, Beuth-Verlag: Berlin, 2006
- 62 DIN EN 1090:2012-02, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken, Beuth-Verlag: Berlin, 2012
- 63 DIN EN 13455:2012-07, Unbefeuerte Druckbehälter, Beuth-Verlag: Berlin, 2012
- 64 Normenreihe DIN EN 15085, Bahnanwendungen – Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen, Beuth-Verlag: Berlin, 2008
- 65 Normenreihe DIN EN ISO 15607, Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe, Beuth-Verlag: Berlin, 2004–2018
- 66 H. Behnisch, G. Aichele In Die Schweißtechnik im Wandel der Zeiten; DVS-Verlag GmbH: Düsseldorf, 2006; S. 251–252, Kapitel: Regelwerke wurden angepasst.
- 67 DIN EN ISO 9001:2000, Beuth-Verlag: Berlin, 2000, Kapitel 7.5.2, Validierung der Prozesse zur Produktion und Dienstleistungserbringung.

senden Prophylaxe von zerstörungsfrei nicht hundertprozentig nachzuweisenden Fehlern. Die in Abbildung 34 aufgeführten schweißtechnischen ISO- und CEN-QS-Normen haben in diesem Zusammenhang die Funktion, den ISO 9001-Kerngedanken der Fehlerprophylaxe technologisch zu spezifizieren. Folglich stellen diese Regelwerke ausschließlich eine technologiespezifische Ergänzung eines bestehenden Qualitätsmanagement-Systems dar. Die in Abbildung 34 exemplarisch aufgeführten QS-Normen zur Schweißtechnik weisen für ihre schweißtechnische QMS-Spezifizierung die drei strategischen Kernelemente Klassifizierung, Aufsichtspersonal und Nachweisführung auf. Regelwerke dieser Art gehören im Bereich der Schweißtechnik zum Stand der Technik und sind international akzeptiert.

1.9.2 Klebtechnische Qualitätsnormen – Stand der Entwicklungen

Wie das Schweißen ist auch das Kleben als »spezieller Prozess« einzustufen. Die Zahl qualitätsbeeinflussender Faktoren ist beim Kleben im Vergleich zum Schweißen jedoch höher und oftmals sind die Auswirkungen auf die Verbindungsqualität signifikanter.⁶⁸

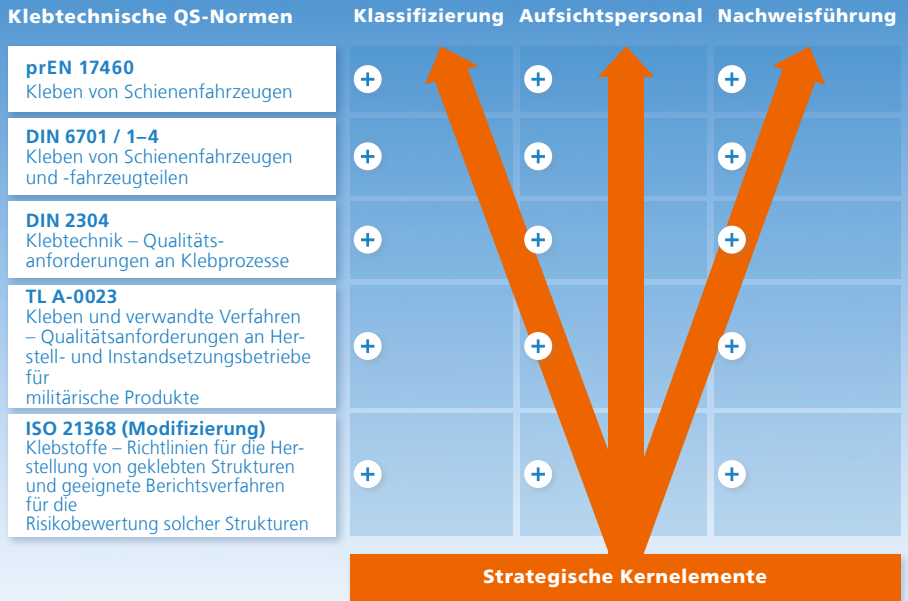
→ s. Abb. 35

Um das Vertrauen in die Klebtechnik weiter auszubauen, wird daher in der Klebtechnik seit dem Jahr 2000 der gleiche Weg beschritten. Auf Initiative des Eisenbahn Bundesamtes wurde zunächst eine Norm für das »Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen« erarbeitet. Nach und nach wurden in Analogie zur Schweißtechnik weitere Regelwerke zur Qualitätssicherung klebtechnischer Prozesse in nahezu allen Anwendungsbereichen entwickelt und umgesetzt.⁶⁹

Heutige Klebstoffe sind Hightech-Produkte und ermöglichen in der Regel eine Null-Fehler-Produktion. Jedoch kommt es immer noch

68 A. Groß, H. Lohse; Mittelstand konkret / Gesetze und Regularien; FARBE UND LACK 2015, 12, 2–3, DIN 2304: Kleben – aber sicher.

69 A. Gross, Proceedings of the 4th China Bonding Days, Hangzhou, China, May 20–21, 2019, B. Zhang (Ed.); Eigendruck: Shanghai YIFA Bonding Training Center, Shanghai, 2019, Contemporary quality requirements for adhesive bonding processes.



zu Klebfehlern, die zu über 90 % auf Anwendungsfehler zurückzuführen sind. Genau diesen Widerspruch nehmen die u.g. klebtechnischen Qualitätssicherungsnormen auf: Wenn der wesentliche Grund nicht Klebstofffehler sondern Anwendungsfehler sind, muss im Bereich der Anwendung nachgebessert werden. Folglich handelt es sich bei diesen Regelwerken um Anwender-Normen mit dem Ziel, klebtechnische Anwendungsprozesse organisatorisch so zu gestalten, dass der gesamte Klebprozess »beherrscht« wird. Sie gelten für alle Klebstoffklassen, unabhängig von ihrem Verfestigungsmechanismus und mechanisch-technologischen Eigenschaften in der Klebfuge, für alle Werkstoffkombinationen sowie für alle Losgrößen in der Produktion.⁷⁰

Abb. 35
Beispiele klebtechnischer Regelwerke zur Qualitätssicherung⁴

Bis heute (Stand 30.04.2020/Abbildung 35) umfassen diese Regelwerke folgende Dokumente:

70 A. Groß, H. Lohse, Adhäsion kleben + dichten 2015, 6, 14–20, Die neue DIN 2304 und ihr Nutzen für die Praxis.

- DIN 6701³⁹
- DIN 2304⁷¹
- DIN SPEC 2305 / Teile 1–3^{72, 73, 74}
- TL A0023⁷⁵
- prEN 17460⁷⁶
- ISO/DIS 21368⁷⁷

Basis ist in allen Fällen ein Qualitätsmanagement (QMS), z. B. nach ISO 9001, mit dem Kerngedanken: Wenn nicht zerstörungsfrei einhundertprozentig auf Fehler geprüft werden kann und damit ein sogenannter »spezieller Prozess« vorliegt (s.o.), müssen alle Fehlermöglichkeiten ausgeschlossen werden. Die Regelwerke konkretisieren das bestehende QMS und legen den im Produktsicherheitsrecht verbindlichen »Stand der Technik« für die fachgerechte Umsetzung klebtechnischer Prozesse fest. Sie fixieren sowohl die Anforderungen an eine qualitätsgerechte Ausführung von Klebverbindungen als auch die allgemeinen organisatorischen, vertraglichen und fertigungstechnischen Grundlagen für die Herstellung klebtechnischer Verbindungen.⁷⁸

-
- 71 DIN 2304:2016-03, Klebtechnik – Qualitätsanforderungen an Klebprozesse, Beuth-Verlag: Berlin, 2008
 - 72 DIN SPEC 2305-1:2018-05, Klebtechnik – Prozesskette Kleben – Teil 1: Hinweise für die Fertigung, Beuth-Verlag: Berlin, 2018
 - 73 DIN SPEC 2305-2:2018-10, Klebtechnik – Qualitätsanforderungen an Klebprozesse – Teil 2: Kleben von Faserverbundkunststoffen, Beuth-Verlag: Berlin, 2018
 - 74 DIN SPEC 2305-3:2019-02, Klebtechnik – Qualitätsanforderungen an Klebprozesse – Teil 3: Anforderungen an das klebtechnische Personal, Beuth-Verlag: Berlin, 2019
 - 75 Technische Lieferbedingungen TL A0023, Kleben und verwandte Prozesse – Qualitätsanforderungen an Herstell- und Instandsetzungsbetriebe für militärische Produkte, Urheber: Bund 2017, zu beziehen beim: BAAINBw, Koblenz, www.baainbw.de/TL
 - 76 prEN 17460, Bahnanwendungen – Schienenfahrzeuge – Kleben von Schienenfahrzeugen und Schienenfahrzeugteilen, CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels, 2019
 - 77 ISO/DIS 21368:2019 (E), ISO copyright office, CP 401, Ch. de Blandonnet 8, CH-1214 Vernier, Geneva, 2019
 - 78 A. Groß In 4. Klebtechnisches Kolloquium: Aktuelle Entwicklungen in der Klebtechnik, Ulm, 30. Oktober, 2014; Eigendruck: Hochschule Ulm, 2014, ISO 9001 und Klebtechnik – eine unlösliche Verbindung.

Alle genannten Dokumente sind reine Anwender-Normen. Sie sind inhaltlich und strukturell kompatibel zueinander und enthalten die drei strategischen Kernelemente Klassifizierung, Aufsichtspersonal und Nachweisführung.⁷⁹

Kernelement 1 – Klassifizierung der Klebungen

Für die Klassifizierung der Klebverbindung nach Sicherheitsanforderungen betrachten die Regelwerke/Normen nur eine Frage: Was passiert, wenn die Klebverbindung versagt? Die Einstufung der Klebung erfolgt ausschließlich hinsichtlich potenzieller Auswirkungen auf das Versagen der Klebung und stellt daher eine Schadensfolgenanalyse dar. Alle Klebungen müssen durch den Klebstoff-Anwender, nicht durch den Klebstoff-Hersteller, in die Sicherheitsklassen

- Klasse 1: mittelbare/unmittelbare Gefährdung für Leib und Leben
- Klasse 2: mögliche Gefährdung von Leib und Leben, große Umweltschäden
- Klasse 3: wahrscheinlich keine Personenschäden oder größere Umweltschäden, maximal Komfort-/Leistungseinbußen
- Klasse 4: definitiv keine Personen- oder Umweltschäden, maximal Komfort-/Leistungseinbußen

eingestuft werden.

79 A. Groß, E. Meiß In Dichtungstechnik Jahrbuch 2019; K.-F. Berger, S. Kiefer (Hrsg.); ISGATEC gmbH: Mannheim / Silber Druck oHG: Niestetal, 2018; S. 367–374, Wissen und verstehen, was man tut – Das Potenzial der Klebtechnik und die Notwendigkeit der Qualitätssicherung

Kernelement 2 – Klebaufsichtspersonal (KAP)

Das Klebaufsichtspersonal (KAP) umfasst Mitarbeiter/innen mit nachzuweisender klebtechnischer Qualifikation^{80, 81, 82, 83, 84, 85} und trägt im Betrieb Verantwortung für die Klebtechnik sowie aller damit verbundenen Tätigkeiten. Das KAP ist im Betrieb die zentrale Ansprechstelle für alle qualitätsbeeinflussenden Faktoren des gesamten »speziellen Prozesses« Kleben.

Kernelement 3 – Nachweisführung:

reale Beanspruchung < maximale Beanspruchbarkeit

Die Verbindung ist unter Mitwirkung des Klebaufsichtspersonals (KAP) so zu bemessen, dass über die gesamte Produktlebenszeit ihre reale Beanspruchung stets kleiner ist als die maximale Beanspruchbarkeit. Dieses muss nachvollziehbar dokumentiert werden. Die Nachweisführung selbst kann auf den Wegen erfolgen:

1. Bemessung
2. Bauteilprüfung
3. dokumentierte Erfahrung bzw.
4. Kombination aus 1.–3.

80 DIN EN ISO/IEC 17024:2012-11, Beuth-Verlag: Berlin, 2012

81 Richtlinie DVS®-EWF 3305 Europäischer Klebpraktiker, DVS Media: Düsseldorf, 2019 / EWF-515r2-19 European Adhesive Bonder (EAB), EWF Management Team, Porto Salvo, Portugal, 2019

82 Richtlinie DVS®-EWF 3301 Europäische Klebfachkraft, DVS Media: Düsseldorf, 2019 / Guideline for European Adhesive Engineer (EAE) and European Adhesive Specialist (EAS) EWF-662r0-19, EWF Management Team, Porto Salvo, Portugal, 2019

83 Richtlinie DVS®-EWF 3309 Europäischer Klebfachingenieur, DVS Media: Düsseldorf, 2019

84 Richtlinie DVS® 3308 DVS®-Bildungseinrichtungen auf dem Gebiet der Klebtechnik Zulassung-Schulung-Überwachung, DVS Media: Düsseldorf, 2011

85 Richtlinie DVS® 3306 Planung und Einrichtung von klebtechnischen Kursstätten, DVS Media: Düsseldorf, 2011

Die Anwendernormen haben das Ziel, klebtechnische Anwendungsprozesse organisatorisch so zu gestalten, dass der Anwender den gesamten Prozess und den Produktlebenszyklus robust und reproduzierbar gestaltet, also im normentechnischen Sinne »beherrscht«. Neben diesem konkreten Ziel besteht das übergeordnete Ziel der Regelwerke dann darin, durch qualifizierte Klebstoffanwendungen die Anwendungsgebiete der Schlüsseltechnologie Kleben qualifiziert weiterzuentwickeln und somit das in manchen Bereichen immer noch ausbaufähige Image des Klebens nachhaltig zu verbessern.⁸⁶

86 A. Gross, H. Lohse, adhesion ADHESIVES & SEALANTS 2015, 4, 12–17, Topic of the month: New DIN 2304 standard and its use in practice.

1.10 Die Verbindungstechnik »Kleben« – ihr Potenzial als Verbindungs- technik Nr. 1 des 21. Jahrhunderts

Wie die Anwendungsbeispiele aus Kapitel 1.7 skizzieren, gibt es heute kaum noch einen Bereich industrieller, handwerklicher oder haushaltsbezogener Art, in der die Verbindungstechnik »Kleben« nicht zum Einsatz kommt. Die Klebtechnik umgibt uns bereits in den meisten Bereichen unseres Lebens (→ s. Abb. 36). Trotz dieser Erfolge ist das technologische Potenzial der Klebtechnik noch stark erweiterungsfähig.

Abb. 36
Kleben – kaum ein Bereich, in dem es nicht zum Einsatz kommt⁴



Es gibt kaum Bereiche, in denen heute noch nicht geklebt wird. Klebtechnisch können alle Werkstoffe mit sich und anderen langzeitbeständig verbunden werden.

Die Notwendigkeit zur Erfüllung komplexer Anforderungen bei gegenständlichen Produkten (siehe Kapitel 1.1) ist zwangsläufig mit neu- bzw. weiterentwickelten Werkstoffen mit spezifischen, im Produkt benötigten Eigenschaften verbunden.⁸⁷ Der zunehmenden Komplexität der Anforderungen ist der einzelne Werkstoff jedoch nicht gewachsen, so dass die Kombination von Werkstoffen immer wichtiger wird. Die Anforderungen provozieren die Weiterentwicklung des Multimaterialdesigns und der Multiwerkstoffverbunde. Gleichzeitig jedoch nimmt die Sensitivität hochentwickelter Werkstoffe zu, was folglich eine werkstoffgerechte Verbindungstechnik erfordert, die die zur Erfüllung der Anforderungen notwendigen Werkstoffeigenschaften des Produktes auch gewährleistet.

Das entscheidende Potenzial der Verbindungstechnik »Kleben« besteht im Erhalt der Werkstoffeigenschaften im Produkt.

Und genau hierin liegt das Potenzial der Klebtechnik: Klebtechnisch können alle Werkstoffe langzeitbeständig unter Erhalt der Werkstoffeigenschaften miteinander verbunden werden. Der Erhalt der Werkstoffeigenschaften beim Kleben eröffnet neue Bauweisen, die mit anderen Fügeverfahren nicht möglich sind. Kleben erfüllt die Hauptfunktionen »Kraftübertragung« und »Verformungsausgleich«. Über das Verbinden von Werkstoffen hinaus können zusätzliche Funktionen in den Klebverbund integriert werden.

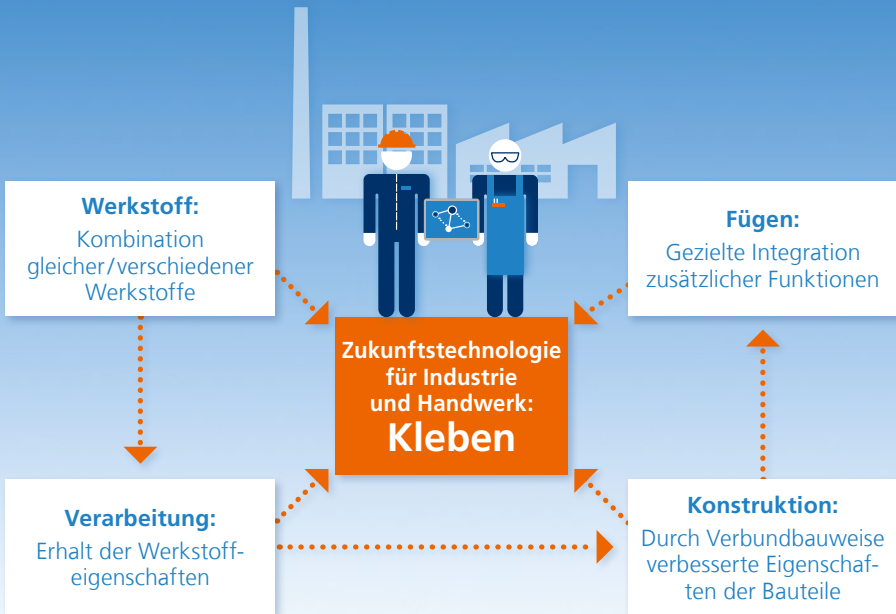
Kleben ermöglicht neue Bauweisen, die mit konventionellen Verbindungstechniken nicht möglich sind.

87 K. Kristof, C. Liedtke, T. Lemken, C. Baedeker In Materialeffizienz & Ressourcenschonung; K. Kristof, P. Hennicke (Hrsg.); Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH: Wuppertal, 2007, Paper 8.1, Kapitel 3.1.2, S. 13, Werkstoffauswahl, neue Werkstoffe und werkstoffgerechte Konstruktion.

Die Funktionen der Kreislaufwirtschafts- und Ökobilanzwirksamkeit von Materialmischbauweisen durch das Kleben sicherzustellen, wird zunehmend an Bedeutung gewinnen.⁸⁸

Abb. 37
Kleben – Potenzial als Verbindungstechnik Nr. 1 des 21. Jahrhunderts⁴

Die Klebtechnik besitzt das Potenzial zur Verbindungstechnik Nr. 1 des 21. Jahrhunderts!



88 O.-D. Hennemann, A. Groß In: Kunststoff Innovation; H.-J. Warnecke et al., Hrsg.; Springer-Verlag: Berlin, 2003, S. 165–172, Kleben – Eine Füge-technik setzt sich durch.

2

Herausforderungen
der Klebtechnik im
Zusammenhang mit
»Kreislaufwirtschaft«
und »Ökodesign«

2.1 Politische Rahmenbedingungen aus globaler Sicht

Die von der Generalversammlung der Vereinten Nationen verabschiedeten »Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung«⁸⁹ hat die Form eines Weltzukunftsvertrags.⁹⁰ Sie enthält als Kernstück einen ehrgeizigen Katalog mit 17 Zielen für eine nachhaltige Entwicklung (»Sustainable Development Goals« – SDGs). Diese berücksichtigen erstmals alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit: Soziales, Umwelt, Wirtschaft sind unteilbar und bedingen einander. Fünf Kernbotschaften sind als handlungsleitende Prinzipien vorangestellt: Mensch, Planet, Wohlstand, Frieden und Partnerschaft. Im Englischen spricht man von den »5 Ps«: People, Planet, Prosperity, Peace, Partnership.⁹¹ → s. **Abb. 38**^{92,93}

Die Agenda 2030 ist das erste internationale Abkommen, in dem das Prinzip der Nachhaltigkeit sowohl mit der Armutsbekämpfung als auch mit der ökonomischen, ökologischen und sozialen Entwicklung verknüpft wird.⁹⁴ Sie bildet einen neuen globalen Rahmen, in welchem die Länder ihre Absicht erklären, die Armut zu beseitigen und bis 2030 weltweit für eine nachhaltige Entwicklung zu sorgen. Niemand soll zurückbleiben, allen Menschen weltweit soll ein Leben in Würde ermöglicht werden. Die Agenda

89 Vereinte Nationen; Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 25. September 2015; A/RES/70/1 – Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung

90 B. Bornhorst In Politik & Kultur; O. Zimmermann, T. Geißler (Hrsg.), ConBrio Verlagsgesellschaft mbH: Regensburg, 2018; Vol 1, S. 21, Der Weltzukunftsvertrag Kultur und Agenda 2030 – (wie) passt das zusammen?

91 A/RES/70/1

92 www.unesco.de (Zugriff April 30, 2020)

93 Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), Referat Öffentlichkeitsarbeit, digitale Kommunikation, Besucherdienst (Hrsg.); BMZ: Bonn, 2017; Der Zukunftsvertrag für die Welt – Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung

94 Siehe Zitat 93



Abb. 38
Die 17 Ziele der »UN-Sustainable Development Goals – SDGs«

2030 soll Frieden fördern und dazu beitragen, dass alle Menschen in Freiheit und einer intakten Umwelt leben können.

Die Agenda richtet sich an alle Staaten der Weltgemeinschaft. Diese sind gleichermaßen aufgefordert, sich für die in der Agenda formulierten Entwicklungsziele einzusetzen – eine Einteilung in »Geber« und »Nehmer« oder in »erste«, »zweite« und »dritte Welt« gibt es in diesem Abkommen nicht. Die Agenda 2030 gilt für alle Staaten dieser Welt. Entwicklungsländer, Schwellenländer und Industriestaaten: Alle müssen ihren Beitrag leisten.⁹⁵

Die 17 Ziele der Agenda 2030 tragen im Sinne eines Drei-Säulen-Modells (→ s. Abb. 39) wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung Rechnung.⁹⁶ Sie enthalten konkrete Zielsetzungen für die nächsten Jahre und fokussieren unter anderem die menschliche Würde, die regionale und

95 Vereinte Nationen, A/RES/70/1 <https://www.un.org/Depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf> (Zugriff April 30, 2020)

96 Abschlussbericht der Enquete-Kommission »Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung, Drucksache 13/11200; Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft Bonner Universitätsdruckerei: Bonn, 1998

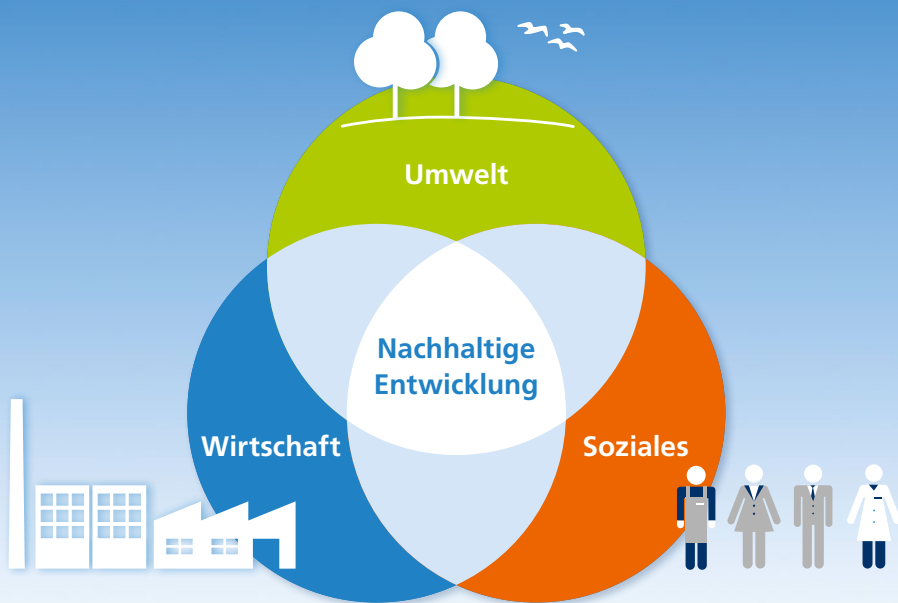


Abb. 39
Drei-Säulen-Modell
der Nachhaltigkeit⁴

globale Stabilität, gerechte und widerstandsfähige Gesellschaften, florierende Volkswirtschaften sowie eine gesunde Umwelt.

Mit der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung drückt die internationale Staatengemeinschaft ihre Überzeugung aus, dass sich die globalen Herausforderungen nur gemeinsam lösen lassen. Die Agenda schafft die Grundlage dafür, weltweiten wirtschaftlichen Fortschritt im Einklang mit sozialer Gerechtigkeit und im Rahmen der ökologischen Grenzen der Erde zu gestalten.⁹⁷

In Nachfolge des Kyoto-Protokolls haben knapp drei Monate nach der Verabschiedung der Agenda 2030 im »Abkommen von Paris« (→ s. **Abb. 40**) 197 Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) das Ziel des Klimaschutzes

⁹⁷ Die Bundesregierung; Agenda 2030 – Ziele für eine nachhaltige Entwicklung weltweit, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung-weltweit-35596> (Zugriff April 30, 2020)

vereinbart.⁹⁸ Das Abkommen von Paris sieht die Begrenzung der menschengemachten globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C gegenüber vorindustriellen Werten vor.⁹⁹ Ziele sind:

- die Risiken und Auswirkungen des Klimawandels deutlich zu reduzieren
- die Fähigkeit, sich an die nachteiligen Auswirkungen des Klimawandels anzupassen, zu erhöhen
- die Widerstandsfähigkeit gegenüber Klimaänderungen zu erhöhen
- eine Entwicklung einzuleiten, die mit geringen Treibhausgasemissionen einhergeht und zugleich die Nahrungsmittelproduktion nicht bedroht.

Ferner wurde die Vereinbarkeit einer wachsenden Wirtschaft mit niedrigen Treibhausgasemissionen und klimaresistenten Entwicklungen geregelt.^{100, 101} → s. **Abb. 40**¹⁰²



Abb. 40
Abkommen von Paris
zum Klimaschutz

98 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; Abkommen von Paris, 2015 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html> (Zugriff April 30, 2020)

99 United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC (Hrsg.); Historic Paris Agreement on Climate Change: 195 Nations Set Path to Keep Temperature Rise Well Below 2 Degrees Celsius, Article/ 13 Dec, 2015; <https://unfccc.int/news/finale-cop21> (Zugriff April 30, 2020)

100 FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1, 12. Dezember 2015, ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> (Zugriff April 30, 2020)

101 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Abkommen von Paris. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html> (Zugriff April 30, 2020)

102 <https://de.cleanpng.com/png-du2y2l/download-png.html> (Zugriff April 30, 2020)

2.2 Politische Rahmenbedingungen aus europäischer Sicht: Der Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft unter dem Green Deal

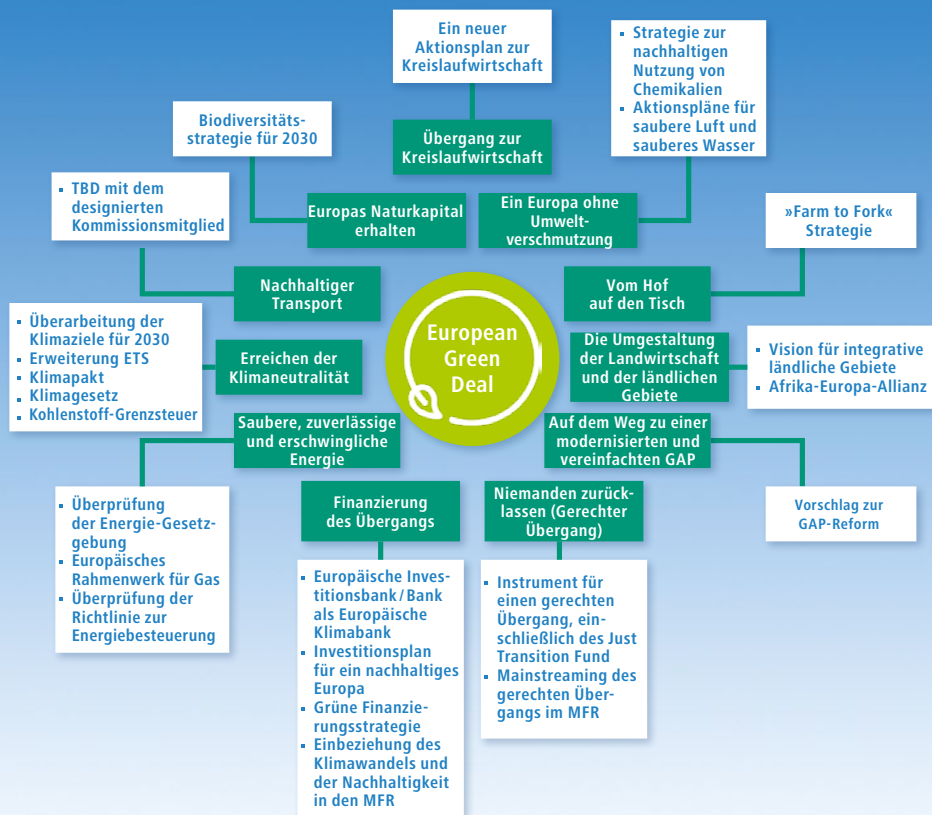
Die EU-Kommission wird nach Vorstellungen ihrer neuen Vorsitzenden Ursula von der Leyen und anderen einen »Europäischen Green Deal« umsetzen.¹⁰³ → s. **Abb. 41**¹⁰⁴ Dieser sieht vor, dass sich Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent entwickelt. Den Vorstellungen zufolge gehört dazu das erste europäische Klimagesetz in Kraft zu setzen. Bisher besteht das Ziel, die Emissionen Europas bis 2030 um 40 % im Vergleich zu 1990 zu reduzieren. Nach Vorstellungen der EU-Kommission sollen die Emissions-Reduktionen auf 50 % bzw. 55 % erhöht werden. Der Plan soll auf sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Folgenabschätzungen beruhen und gleiche Wettbewerbsbedingungen gewährleisten sowie Innovation, Wettbewerbsfähigkeit und Erwerbstätigkeit fördern.

Der »Green Deal« soll Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent entwickeln.

Nach dem Plan sollen Kohlenstoffemissionen bepreist und das Emissions-Handelssystem auf den Seeverkehr ausgedehnt werden. Den Fluggesellschaften zugeteilte, kostenlose Emissionshandels-Zertifikate sollen im Laufe der Zeit reduziert und diese Vorgehensweise auf den Verkehr und die Bauwirtschaft ausgedehnt werden. Der Erhalt der Konkurrenzfähigkeit der EU, die Schaffung gleicher

103 U. von der Leyen In Politische Leitlinien für die künftige Europäische Kommission / Eine Union, die mehr erreichen will – Meine Agenda für Europa; 2019; S. 4–9, Ein europäischer Grüner Deal.

104 Vergleiche European Compost Network ECN, 2020, <https://www.compostnetwork.info/eu-green-deal> (Zugriff April 30, 2020)



Wettbewerbsbedingungen und die Verhinderung einer CO₂-Verlagerung sollen durch eine CO₂-Grenzsteuer realisiert werden. Die Steuer soll in vollem Umfang den WTO-Regeln entsprechen. Mit ausgewählten Bereichen soll begonnen und dann das Ganze schrittweise erweitert werden. Weiterhin soll die Verabschiedung einer Energiesteuerrichtlinie geprüft werden.

Abb. 41
Einordnung des EU-Aktionsplans Kreislaufwirtschaft zur Erfüllung des Green Deal

Die Zielsetzung des Pariser Abkommens (siehe Kapitel 2.1) steht im Zusammenhang der EU-Strategie zur Kreislaufwirtschaft. Dieser Strategie zur Kreislaufwirtschaft liegt in ihren grundsätzlichen Überlegungen die einfache Tatsache zugrunde, dass in dem geschlossenen System »Erde«, also in einer materiell endlichen Welt, die gängigen Produktionsverfahren, die in der Regel der »Linearwirtschaft« (→ s. Abb. 42) ohne wirklichen stofflichen Kreischluss folgen, aus zwei Gründen nicht unsere Zukunft gestalten:

- In absehbarer Zukunft sind die bislang genutzten fossilen, d. h. nicht regenerativen Ressourcen als Quellen aufgezehrt.
- Die zur Verfügung stehenden Flächen zur Deponierung von Abfällen und Reststoffen aus der industriellen Produktion werden ausgeschöpft sein.

Der EU-Aktionsplan zur Kreislaufwirtschaft konzentriert sich auf Maßnahmen auf EU-Ebene mit hohem Mehrwert. Die Verwirklichung der Kreislaufwirtschaft erfordert jedoch eine langfristige Beteiligung auf allen Ebenen, von den Mitgliedstaaten, Regionen und Städten bis hin zu Unternehmen und Bürgern. Die Mitgliedstaaten werden ersucht, sich an den EU-Maßnahmen zu beteiligen, sie zu integrieren und durch nationale Maßnahmen zu ergänzen.

Kreislaufwirtschaft muss global entwickelt werden. Eine stärkere politische Kohärenz der internen und externen Maßnahmen der EU in diesem Bereich verstärkt die Globalisierung der Kreislaufwirtschaft. Von wesentlicher Bedeutung sind globale Verpflichtungen der Europäischen Union und der EU-Mitgliedstaaten wie die Agenda 2030 und die G7-Allianz zur Ressourceneffizienz.¹⁰⁵ Der EU-Aktionsplan zur Kreislaufwirtschaft ist daher direkt verbunden mit dem Ziel 12 (SDG 12) der Agenda 2030: »Nachhaltige/r Konsum und Produktion«. Es soll der Kreislauf der jeweiligen Produktlebenszyklen geschlossen werden: von Produktion und Verbrauch bis zu Abfallentsorgung und zum Markt für Sekundärrohstoffe. Der Aktionsplan fokussiert vorrangig die u.g. Bereiche mit dem Ziel, den Übergang zur Kreislaufwirtschaft entlang deren Wertschöpfungskette zu beschleunigen¹⁰⁶:

105 Bundesministerium für Bildung und Forschung – BMBF, <https://www.bmbf.de/de/g7-allianz-fuer-ressourceneffizienz-beschlossen-1168.html> (Zugriff April 30, 2020)

106 Europäische Kommission, Für länger haltbare und nachhaltigere Produkte: Neuer EU-Aktionsplan zur Kreislaufwirtschaft, https://ec.europa.eu/germany/news/20200311-kreislaufwirtschaft_de (Zugriff April 30, 2020)

- Elektronik und Informations- und Kommunikationstechnik
- Batterien und Fahrzeuge
- Verpackungen
- Kunststoffe
- Textilien
- Bauwesen und Gebäude
- Lebensmittel.

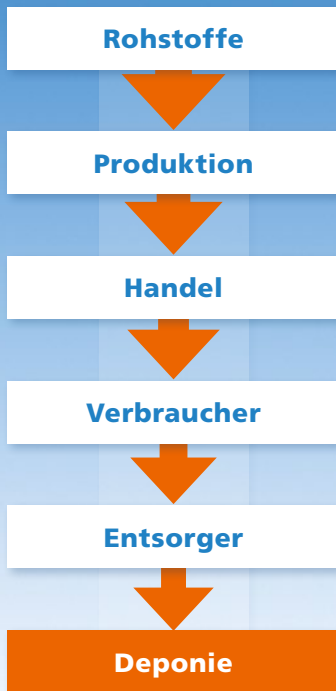
Ein deutlicher Schwerpunkt liegt auf dem Aufbau einer soliden Grundlage, auf der Investitionen und Innovation gedeihen können.

Die Kreislaufwirtschaft nimmt grundsätzlich den Stoffkreislauf der Natur zum Vorbild und versucht durch intelligente, kaskadische Nutzungen ohne Abfälle (Ideal: zero waste) und ohne Emissionen (Ideal: zero emission) Stoffe und Energie möglichst lange und sinnvoll zu verwenden.

Die »Kreislaufwirtschaft« stellt das Gegenteil der »Linearwirtschaft« dar.

Die Kreislaufwirtschaft stellt daher das Gegenteil des derzeit noch vorherrschenden Prinzips der industriellen Produktion der »Linearwirtschaft« (häufig auch »Wegwerfwirtschaft« genannt / → s. Abb. 42, links) dar. In der Linearwirtschaft wird ein Großteil der eingesetzten Rohstoffe nach der jeweiligen Nutzungsdauer der Produkte deponiert oder verbrannt. Nur ein geringer Anteil wird einer Wiederverwendung zugeführt.¹⁰⁷

107 F. Läpple : Abfall- und kreislaufwirtschaftlicher Transformationsprozess in Deutschland und in China: Analyse – Vergleich – Übertragbarkeit, Dissertation, Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2007



»WEGWERF- WIRTSCHAFT« — LINEAR- WIRTSCHAFT

Im Gegensatz zur Linearwirtschaft stellt die Kreislaufwirtschaft (→ s. Abb. 42, rechts) ein regeneratives, erneuerbares System dar. In ihm werden der Einsatz von Ressourcen, die Produktion von Abfall und Emissionen sowie die Verschwendung von Energie minimiert. Erreicht wird dieses durch Verlangsamen, Verringern und Schließen von Energie- wie Materialkreisläufen. Instrumente zur Umsetzung sind u. a. langlebige Konstruktionen, Instandhaltung, Sanierung, Reparatur(fähigkeit), Wiederverwendung, Wiederaufarbeitung und Wiederverwertung (Recycling).¹⁰⁸

108 M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M.P. Bocken, E. J. Hultink, Journal of Cleaner Production 2017, Band 143, 757–768, The Circular Economy – A new sustainability paradigm?

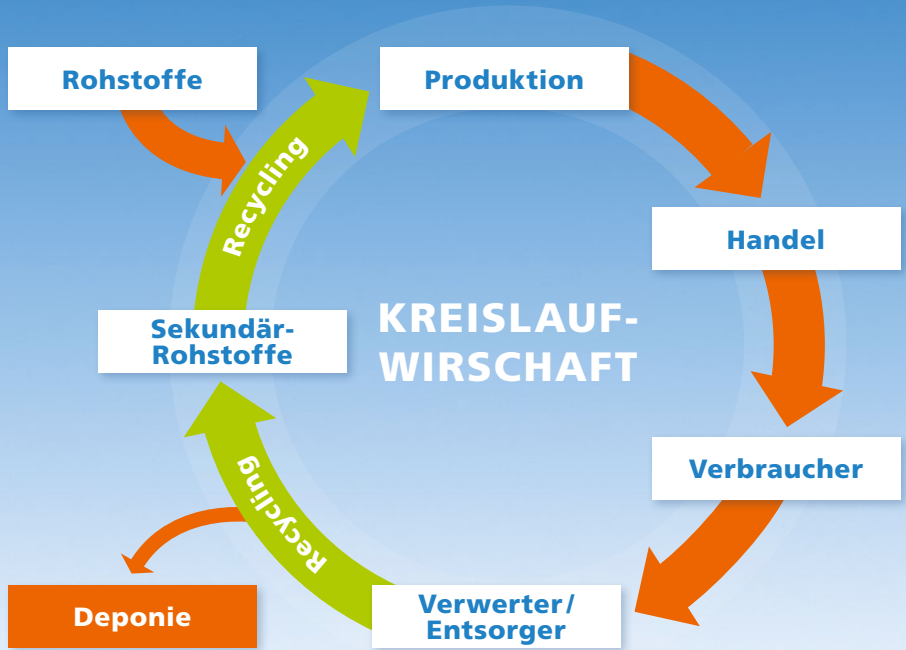


Abb. 42
Schemata⁴ der Linearwirtschaft (»Wegwerfwirtschaft«) und Kreislaufwirtschaft

2.3 Ökodesign im Rahmen der Kreislaufwirtschaftsstrategie der Europäischen Union

2.3.1 Definition »Ökodesign«

Das Ökodesign (engl.: Ecodesign) ist ein Element der Kreislaufwirtschaftsstrategie der EU. Der Bedeutung des Begriff Ökodesign kann man sich an Hand einer Definition des Design-Begriffs nähern: »Design ... hat den Anspruch, die Welt zum Wohl der Menschen besser zu gestalten ... Design gestaltet Kommunikation und schafft Identität. Es ist bewusstes Handeln zur Herstellung sinnvoller Ordnung und somit Teil unserer Kultur«¹⁰⁹.

»Ökodesign« erweitert den o. g. Designbegriff dahingehend, die Welt zum Wohle der Menschen mit Blickrichtung auf die Umwelt besser zu gestalten. Ökodesign beinhaltet »eine systematische Vorgehensweise, die zum Ziel hat, möglichst frühzeitig ökologische Aspekte in den Produktplanungs-, -entwicklungs- und -gestaltungsprozess einzubinden. (...) Kurz gesagt, Ökodesign führt zu Produkten, Systemen, Infrastrukturen und Dienstleistungen, die bei optimaler Erfüllung des gewünschten Nutzens eine minimale Menge an Ressourcen, Energie und Fläche benötigen, und das bei gleichzeitiger Minimierung des Schadstoffeinsatzes und -ausstoßes sowie der Abfälle – und das über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg«¹¹⁰.

Ökodesign bezeichnet die umweltgerechte Gestaltung von Produkten in der Weise, dass deren Auswirkungen auf die Umwelt möglichst gering sind. Das Umweltbundesamt (UBA) nimmt in seiner Definition des Ökodesign-Begriffs diesen ganzheitlichen

109 B. Schneider: Design – eine Einführung: Entwurf im sozialen, kulturellen und wirtschaftlichen Kontext, Birkhäuser Verlag: Basel, 2009, S. 9

110 U. Tischner; E. Schmincke; F. Rubik; M. Prösler: Was ist Ecodesign?, Ein Handbuch für ökologische und ökonomische Gestaltung; form-praxis: Frankfurt a.M., 2000, S. 12

Betrachtungs- und Gestaltungsansatz der Reduzierung von Umweltbelastungen über den gesamten Produktlebenszyklus von der Planung über die Herstellung und Nutzung bis zur Entsorgung des – aus welchen Gründen auch immer – nicht mehr nutzbaren oder nicht mehr genutzten Produkts durch verbessertes Produktdesign auf.¹¹¹

Das bedeutet, Umweltaspekte müssen bereits in die Entwicklung von Produkten integriert und die Umweltauswirkungen von Beginn an über den gesamten Produktlebenszyklus einschließlich Entsorgung (»End of Life«) vom Produkthersteller beurteilt werden.¹¹²

Beim Ökodesign sind bereits in Design und Produktentwicklung die Umweltauswirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus einschließlich Entsorgung (»End of Life«) zu betrachten.

2.3.2 Zusammenfassung des Stands der europäischen Regulierungen mit Bezug zu den Verbindungstechniken bei der Herstellung energieverbrauchsrelevanter Produkte – Ökodesign-Arbeitsprogramm der EU

Das Ökodesign-Arbeitsprogramm ist Bestandteil des EU-Aktionsplans zur Kreislaufwirtschaft. Darin wird Ökodesign als Mittel zur Erreichung einer Kreislaufwirtschaft aufgezeigt¹¹³, worauf auch

111 U. Tischner; H. Moser In Was ist Ecodesign? – Praxishandbuch für Ecodesign inclusive Toolbox, Verlag Umweltbundesamt: Berlin, 2015

112 S. Schaltegger, C. Herzig, O. Kleiber, T. Klinke, J. Müller In Nachhaltigkeitsmanagement in Unternehmen – Von der Idee zur Praxis: Managementansätze zur Umsetzung von Corporate Social Responsibility und Corporate Sustainability; Bundesumweltministerium (BMU) / Referat Öffentlichkeitsarbeit (Hrsg.); Volkswagen ServiceFactory: 2007, S. 103–104, Design for the Environment (DfE), Sustainable Design.

113 D. Jepsen, L. Spengler und L. Augsberg In Delivering resource-efficient products; C. Wachholz, S. Arditi, S. Pant (European Environmental Bureau / Ed.), 2015, S. 24–38, abrufbar unter <https://mk0eoborgicuyupctuf7e.kinstacdn.com/wp-content/uploads/2019/05/Delivering-resource-efficient-products.pdf> (Zugriff April 30, 2020)

der Sachverständigenrat für Umweltfragen – SRU hinweist.¹¹⁴ Durch eine Reihe von Maßnahmen wird die Schaffung einer stärker kreislaforientierten und den gesamten Lebenszyklus von Produkten und Stoffen betreffenden Wirtschaft in der EU gefördert. Die Verbesserung der Effizienz von Material, Ressourcen und Produkten (siehe Kapitel 2.5) in der EU ist zunehmend erforderlich und stellt eine politische Priorität dar. Eine Schlüsselrolle nimmt dabei die Produktgestaltung ein. Sie beeinflusst den gesamten Lebenszyklus eines Produkts und ist mitentscheidend für dessen oder legt fest, ob das Produkt leicht (und sinnvoll!) reparierbar, wiederverwendbar oder wiederverwertbar ist.

Ökodesign ist ein Mittel zur Realisierung von Kreislaufwirtschaft.

In diesem Zusammenhang legt die Ökodesign-Richtlinie¹¹⁵ nach wie vor die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung »energieverbrauchsrelevanter Produkte« fest. Ökonomische und soziale Aspekte werden dabei nicht außer Acht gelassen.¹¹⁶ Die Ökodesign-Richtlinie erweitert aber – neben direkt energieverbrauchenden Produkten¹¹⁷ (→ s. Abb. 43) – ihren Anwendungsbereich auf alle Produkte, deren Nutzung in irgendeiner Form

114 Sachverständigenrat für Umweltfragen (Hrsg.); Umweltgutachten 2016 – Impulse für eine integrative Umweltpolitik; Hausdruck: 2016, S. 5–56, Kreislaufwirtschaft, abrufbar unter [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2016_Umweltgutachten_HD.pdf? blob=publicationFile](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2016_Umweltgutachten_HD.pdf?blob=publicationFile) (Zugriff April 30, 2020)

115 Amtsblatt der Europäischen Union, Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, 21. Oktober 2009, L 285/10 – L 285/35

116 C. Thomas In: I. Härtel (Hrsg.): Nachhaltigkeit, Energiewende, Klimawandel, Welternährung; Nomos Verlagsgesellschaft: Baden-Baden, 2014; S. 168–193, Die Ökodesign-Richtlinie der Europäischen Union als Konkretisierung des Nachhaltigkeitsprinzips.

117 Amtsblatt der Europäischen Union; Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Juli 2005 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG des Rates sowie der Richtlinien 96/57/EG und 2000/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates; abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:191:0029:0058:DE:PDF> (Zugriff April 30, 2020)

»energieverbrauchsrelevant« ist. Damit sind neben direkt energiebetriebenen Geräten wie Straßenbeleuchtungen, Fernseher, Staubsauger, Klimaanlage und Kühlschränke usw. auch Produkte eingeschlossen, die zwar selbst keine Energie verbrauchen, aber indirekt während ihrer Nutzung den Energieverbrauch beeinflussen*. Als Beispiele werden Baumaterialien und Fenster, Autoreifen mit geringem Rollwiderstand, Duschköpfe und Wasserhähne, Isoliermaterialien usw. genannt.¹¹⁸ Zu den Zielen der Ökodesign-Richtlinie gehört, zur nachhaltigen Entwicklung beizutragen und die Ressourceneffizienz (siehe Kapitel 2.5.1) zu steigern.

Auch wenn die Ökodesign-Richtlinie den Begriff »Kreislaufwirtschaft« nicht unmittelbar erwähnt, sieht sie Möglichkeiten vor, Eigenschaften mit Abfallbezug verbindlich festzulegen und Anforderungen einer Ressourcenbewirtschaftung so zu treffen, dass diese Ressourcen nach ihrer erstmaligen Nutzung weiter, erneut bzw. schonend genutzt werden können.¹¹⁹ Die Rückführung in den Stoff- bzw. Produktkreislauf realisiert die Ökodesign-Richtlinie vor allem durch eine erhöhte Recycelfähigkeit und Demontierbarkeit¹²⁰ von Produkten und deren Bestandteilen sowie durch Förderung der Wiederverwendung. Auf diese Weise soll in der Zukunft Ökodesign einen deutlich größeren Beitrag zur Kreislaufwirtschaft liefern, etwa durch systematischere Fokussierung auf Fragen der Material-/Ressourceneffizienz (siehe Kapitel 2.5.1), der Langlebigkeit sowie der Wiederverwertbarkeit. Ökodesign stellt einen maßgeblichen Treiber für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft dar.¹²¹

* Auf den Zusammenhang Energieverbrauchsrelevanter Produkte und der Bedeutung der Klebtechnik in diesem Kontext wird in Kapitel 2.5 eingegangen (grundsätzlich: Kapitel 2.5.1–2.5.2 / exemplarisch: Kapitel 2.5.3–2.5.5).

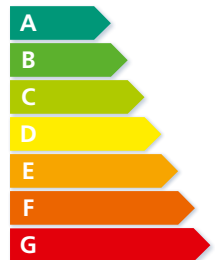


Abb. 43
Ökodesign-Richtlinie
und Energieverbrauchs-
kennzeichnung /
 »A«: gering
 »G«: hoch⁴

118 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.); Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz – EVPG Gesetz über die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte; 25.11.2011; abrufbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Gesetze/Energie/evpg.html> (Zugriff April 30, 2020)

119 M. Alt In Ökodesign und Kreislaufwirtschaft, Nomos Verlagsgesellschaft: Baden-Baden, 2018, 1. Auflage, S. 67–72, Systematik der Ökodesign-RL.

120 Siehe hierzu Kapitel 2.6 und 5.3

121 A. Reichel; M. De Schoenmakere; J. Gillabel In EEA Report 2/2016: Circular Economy in Europe; European Environmental Agency (Hrsg.); Luxembourg Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2016; S. 18, Eco-design. abrufbar unter <http://www.eea.europa.eu/publications/circular-economy-in-europe> (Zugriff April 30, 2020)

Das Herstellen, Nutzen und Entsorgen von Produkten bewirkt einen nicht unerheblichen Anteil des Ressourcenverbrauchs.¹²² Dabei betrachtet die Ökodesign-Richtlinie den Lebenszyklus eines Produkts grundsätzlich ganzheitlich, d. h. von der Planung/Entwicklung über die Herstellung bis zur Entsorgung. Trotz Anerkennung einer Gesamtbetrachtung aller Umweltauswirkungen stellt sie die Senkung der Treibhausgasemissionen in den Vordergrund. Die Zielsetzung besteht primär darin (siehe Kapitel 2.5.1), Energie sowie andere Ressourcen (incl. Rohstoffe und deren Umweltauswirkungen bei der Herstellung/Gewinnung etc.) bei Herstellung, Betrieb (incl. Langlebigkeit, Reparaturfähigkeit) und Entsorgung (incl. Recyclfähigkeit, Wiederverwertbarkeit, Umweltauswirkungen bei der Herstellung/Gewinnung von Sekundärrohstoffen etc.) von energieverbrauchsrelevanten Produkten einzusparen. Umweltauswirkungen werden während der Planungs- und Designphase maßgeblich vorgegeben.^{123, 124} Nach Ansicht der EU beeinflusst diese Phase 80 % der Auswirkungen eines Produkts.¹²⁵ Auch der Ressourcenverbrauch wird entscheidend in dieser Phase bestimmt.¹²⁶

Die Designphase bestimmt maßgeblich über Umweltwirkungen und Ressourcenverbrauch.

-
- 122 H. Wilts In Deutschland auf dem Weg in die Kreislaufwirtschaft; Friedrich-Ebert-Stiftung (Hrsg.); Druck: www.bub-bonn.de, 2016, S. 13–17, Wo steht Deutschland auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft. Abrufbar unter: <https://library.fes.de/pdf-files/wiso/12576.pdf> (Zugriff April 30, 2020)
- 123 S. Tölle In Der Rechtsrahmen für den Erlass von Ökodesign-Anforderungen; Nomos Verlagsgesellschaft: Baden-Baden, 2016, S. 17 f
- 124 C. Thomas In Nachhaltigkeit, Energiewende, Klimawandel, Welternährung; I. Härtel (Hrsg.); Nomos Verlagsgesellschaft: Baden-Baden, 2014; S. 168, 169 f, Die Ökodesign-Richtlinie der Europäischen Union als Konkretisierung des Nachhaltigkeitsprinzips.
- 125 7. Umweltaktionsprogramm: »Gut leben innerhalb der Belastungsgrenzen unseres Planeten«, Beschluss Nr. 1386/2013/EU, ABIEU 354/171, Angang Rz. 36
- 126 C. Wachholz; S. Arditi; Sébastien Pant / European Environmental Bureau (Hrsg.), Delivering resource-efficient products – How Ecodesign can drive a circular economy in Europe; 2015; S. 24–38, Addressing Resource Use Through Decisions. abrufbar unter: <https://mk0eeborgicuytuf7e.kinstacdn.com/wp-content/uploads/2019/05/Delivering-resource-efficient-products.pdf> (Zugriff April 30, 2020)

2.4 Weitere für die Verbindungstechnik »Kleben« relevante Gesetzgebung im Rahmen der Kreislaufwirt- schaftsstrategie der Europäischen Union

2.4.1 EU-Kunststoffstrategie

Im Rahmen der EU-Kunststoffstrategie¹²⁷ steht erstmalig der materialspezifische Lebenszyklus im Mittelpunkt, um eine kreislauforientierte Produktgestaltung, Verwendung und Wiederverwendung von Materialien sowie das Recycling in die Kunststoffwertschöpfungsketten zu integrieren. Der Umgang mit Kunststoffen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft ist zu verbessern. Die Strategie enthält auf EU-Ebene quantifizierbare Ziele. Ein Ziel ist, dass bis 2030 alle Kunststoffverpackungen, die in der EU auf den Markt gelangen, wiederverwendbar oder recyclingfähig sind.

Die Strategie zeigt auch zentrale Maßnahmen zur Einbeziehung und Mitarbeit verschiedenster Interessenträger entlang der Wertschöpfungskette auf. Demzufolge soll sichergestellt werden, dass bis 2025 10 Millionen Tonnen recycelter Kunststoffe zu neuen Produkten verarbeitet werden. Dieses Ziel wird erreicht, wenn die Selbstverpflichtungen der Anbieter von recyceltem Kunststoff erwartungsgemäß erfüllt werden: Dabei wird die Nachfrage nach recycelten Kunststoffen infolge der Selbstverpflichtungen der Industrie bis 2025 auf etwa 6,2 Millionen Tonnen pro Jahr ansteigen.

127 Bericht der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Umsetzung des Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft (SWD(2019) 90 final; Kapitel 2.5 – Ein systematischer Ansatz: die EZU-Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft, S. 7–9

Die Nachfrage nach recyceltem Kunststoff wird steigen.

Hinsichtlich der Verbesserung der Qualität des Kunststoffrecyclings wurden wichtige Meilensteine bereits erreicht. Dazu gehören

- das neue Recyclingziel von 55 % bis 2030 für Kunststoffverpackungen,
- die Verpflichtungen zur getrennten Sammlung von Kunststoffen und
- die Verbesserung der Systeme der erweiterten Herstellerverantwortung.

Von den Herstellern wird erwartet, dass sie ein recyclingfreundliches Design fördern. Künftige Verbesserungen werden sich aus der für Ende 2020 geplanten Überarbeitung der grundlegenden Anforderungen an Verpackungen ergeben.

Die Strategie soll für Synergien zwischen wirtschaftlichen und ökologischen Zielen sorgen. Die offensichtlichen potenziellen Gesundheits- und Umweltrisiken aufgrund der Verschmutzung durch Mikroplastik rechtfertigen, den gezielten Zusatz von Mikroplastik zu beschränken und Erkenntnisse über die Messung und Kennzeichnung im Falle von unbeabsichtigt freigesetztem Mikroplastik zu gewinnen. Darüber hinaus ist ein Rahmen für die biologische Abbaubarkeit von Kunststoffen zu entwickeln. Es ist sicherzustellen, dass die Entwicklung und Verwendung von Kunststoffprodukten nur gefördert wird, wenn sich dies positiv auf die Umwelt auswirkt. Abfallbewirtschaftungssysteme und Lebensmittelsicherheit dürfen dadurch nicht beeinträchtigt werden.

Die EU-Kunststoffstrategie fördert den Wandel über die Grenzen Europas hinaus. Mit Maßnahmen, insbesondere hinsichtlich der Einwegkunststoffe, hat die EU eine Führungsrolle übernommen und so entscheidend zur internationalen Dynamik im Zusammenhang mit Kunststoffen beigetragen. Parallel dazu unterstützt die EU die Entwicklungsländer bei ihren Bemühungen, die Umweltverschmutzung durch Kunststoffe zu bekämpfen.

Maßgeschneiderte Maßnahmen sind:

- ein Verbot von Einwegprodukten aus Kunststoff und aus oxo-abbaubarem Kunststoff
- Maßnahmen zur Reduzierung des Verbrauchs von Lebensmittelbehältnissen und Getränkebechern aus Kunststoff sowie die besondere Kennzeichnung und Etikettierung bestimmter Produkte
- das Ziel eines Anteils von 30 % recyceltem Kunststoff in Getränkeflaschen ab 2030 und von 25 % in PET-Flaschen ab 2025
- eine angestrebte Mindestquote von 90 % für die getrennte Sammlung von Kunststoffflaschen bis 2029
- die Einführung von Vorschriften für das Produktdesign, wonach die Deckel an den Getränkeflaschen fest angebracht sein müssen
- Systeme der erweiterten Herstellerverantwortung zur Deckung der Kosten der Müllbeseitigung bei Produkten wie Tabakfiltern und Fanggeräten
- Maßnahmen zur Verringerung des Plastikmülls von Schiffen, z. B. durch Einführung einer Pauschalgebühr für Abfälle von Schiffen
- der Ausbau der Meldepflicht für verloren gegangene Fanggeräte sowie der Verpflichtung zur Kennzeichnung und Kontrolle von Fanggerät für die Freizeitfischerei.

2.4.2 EU-»Abfallpaket«

Ein zentraler Bestandteil des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) und gleichzeitig der Bezug zwischen Ökodesign und Kreislaufwirtschaft ist die fünfstufige Abfallhierarchie (→ s. **Abb. 44**)¹²⁸, deren oberstes Ziel in der Vermeidung von Abfall besteht und

128 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 6 / Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien

zu dieser verpflichtet.^{129,130} Maßnahmen zur Abfallvermeidung zielen darauf ab, ein Produktdesign zu fördern, welche das jeweilige Produkt ressourceneffizient, langlebig, reparierbar, wiederverwendbar oder aktualisierbar gestaltet. Sofern die Vermeidung von Abfall nicht möglich ist, wird das Recycling von sog. Siedlungs- und Verpackungsabfällen erheblich gesteigert. Durch die Vorschriften wird ein schrittweiser Ausstieg aus der Abfall-Deponierung vollzogen. Die Nutzung wirtschaftlicher Instrumente wie der erweiterten Herstellerverantwortung wird gefördert. Die neuen Rechtsvorschriften stärken die fünfstufige »Abfallhierarchie«. Sie verpflichten die EU-Mitgliedstaaten, spezifische Maßnahmen zu ergreifen, die den Schwerpunkt statt auf Deponierung und Verbrennung auf Vermeidung, Wiederverwendung und Recycling legen.¹³¹

Dies richtet sich in erster Linie an die Hersteller von Waren aller Art. Wenn die Vermeidung von Abfall nicht möglich ist, sollten sie sich bemühen, nur wiederverwertbare Stoffe zu nutzen und diese dann tatsächlich wiederzuverwerten. Der Rest muss auf ökologisch schonende Art und Weise beseitigt werden.

Die fünf Stufen der Abfallhierarchie im Einzelnen:

Die Vermeidung von Abfall hat höchste Priorität¹³². Sie erfolgt durch Maßnahmen, die zu ergreifen sind, bevor ein Stoff, ein Material oder ein Erzeugnis überhaupt zu Abfall geworden ist. Diese Maßnahmen sollen die Abfallmenge verringern. Beispiele dafür sind die Wiederverwendung von Erzeugnissen oder die

129 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 7, Abs. 1

130 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 13, 24, 25

131 Pressemitteilung – Europäische Kommission, Brüssel, 22.05.2018 / IP/18/3846

132 Europäische Kommission, Änderung unserer Produktions- und Verbrauchsmuster: neuer Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft ebnet den Weg zu klimaneutraler und wettbewerbsfähiger Wirtschaft mit mündigen Verbrauchern, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_20_420 (Zugriff April 30, 2020)

Verlängerung ihrer Lebensdauer. Zusätzlich sollen die schädlichen Auswirkungen erzeugten Abfalls auf Umwelt und menschliche Gesundheit reduziert werden. Gleiches gilt für den Gehalt an schädlichen Stoffen in Materialien und Erzeugnissen.

Die zweite Stufe besteht in der Vorbereitung zur Wiederverwendung. Diese beschreibt »jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren«¹³³. Dabei wird »jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur angesehen, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere Vorbehandlung wiederverwendet werden können«¹³⁴.

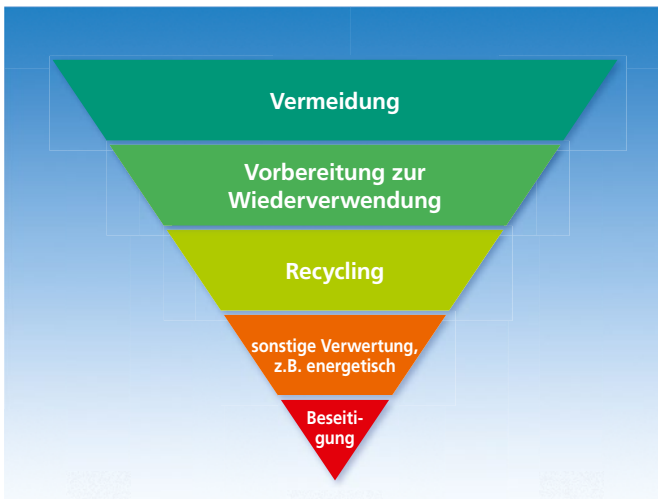


Abb. 44
Abfallhierarchie
der EU⁴

133 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 3, Absatz 21

134 Amtsblatt der Europäischen Union L 150/109, RICHTLINIE (EU) 2018/851 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle

Erst an dritter Stelle in der Abfallhierarchie steht das Recycling. Es umfasst alle Verfahren, »durch die Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden«¹³⁵. Ausgeschlossen davon sind die energetische Verwertung genauso wie die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.¹³⁶ Somit verbleiben zwei Recyclingwege (→ s. Abb. 45): das mechanische (werkstoffliche) Recycling, welches anhand physikalischer Prozesse durchgeführt wird, und als Ergänzung das auf chemischen Prozessen basierende chemische (rohstoffliche) Recycling (siehe Kapitel 5.1).

Auch wenn das Recycling von Gütern der dritten Stufe der Abfallhierarchie zugeordnet ist, kommt ihm eine wesentliche Funktion zur Erreichung einer Kreislaufwirtschaft zu.¹³⁷ → s. Abb. 45¹³⁸

Das chemische Recycling wird zukünftig das mechanische Recycling ergänzen.

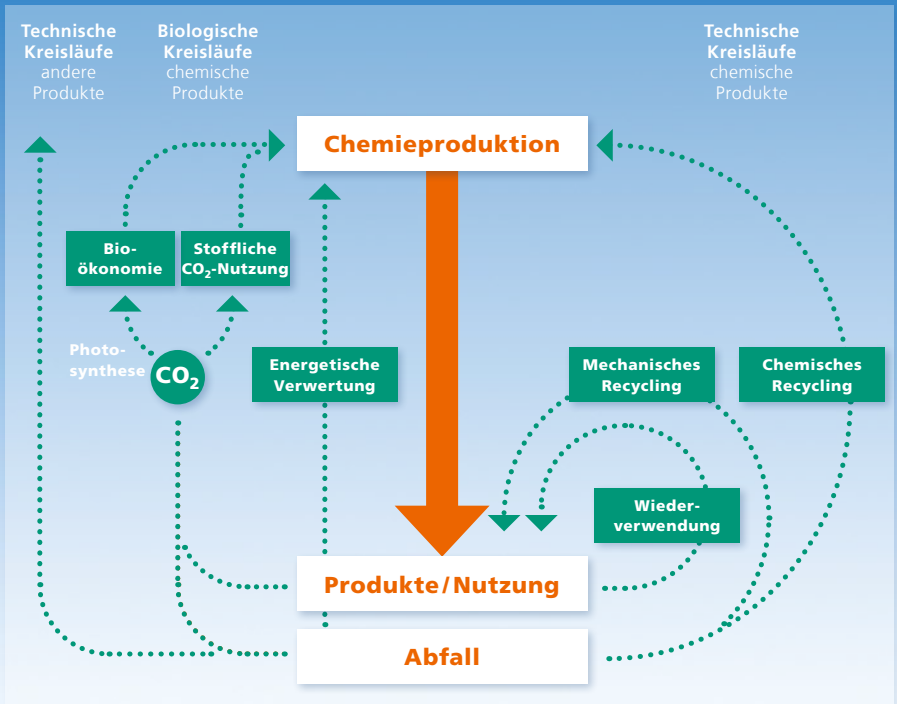
Unter »sonstiger Verwertung« (Stufe 4) wird im Sinne der Richtlinie jedes Verfahren verstanden, bei dem Abfälle »innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie andere Materialien ersetzen, die ansonsten zur Erfüllung einer bestimmte Funktion verwendet worden wären, oder die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion

135 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 3, Absatz 25

136 Siehe Zitat 134

137 M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, E. J. Hultink, *Journal of Cleaner Production* 2017; 143; 757–768; *The Circular Economy – A new sustainability paradigm*.

138 U. Tillmann; *Nachhaltigkeit braucht mehr Chemie, nicht weniger*, 11. Juni 2018, <https://www.vci.de/themen/energie-klima-rohstoffe/klimaschutz/vci-hauptgeschaeftsfuehrer-utz-tillmann-auf-pressekonferenz-eroeffnung-achema-2018-nachhaltigkeit-braucht-mehr-chemie-nicht-weniger.jsp> (Zugriff April 30, 2020)



erfüllen«¹³⁹. Im Gegensatz zu Stufe 3 (Recycling) zählt zur »sonstigen Verwertung« u. a. die Hauptverwendung als Brennstoff, die Rückgewinnung organischer Stoffe außer Lösungsmitteln, das Recycling/die Rückgewinnung von Metallen und anderen anorganischen Stoffen, die Regenerierung von Säuren und Basen, die erneute Ölraffination oder andere Wiederverwendungen von Öl sowie die Aufbringung auf den Boden zum Nutzen der Landwirtschaft oder zur ökologischen Verbesserung/Beseitigung.¹⁴⁰

Abb. 45
Kreislaufwirtschaft
und Recycling

139 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 3, Absatz 23

140 Umwelt-Bundesamt – UBA; Verwertung und Entsorgung ausgewählter Abfallarten, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlder-abfallarten>, 18.09.2019 (Zugriff April 30, 2020)

Erst an fünfter und damit letzter Stelle in der Abfallhierarchie steht die Beseitigung von Abfällen. Sie umfasst alle Verfahren¹⁴¹, die nicht zur Verwertung führen. Ob das jeweilige Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden, ist dabei nicht bedeutend. Nach der Richtlinie sind Beispiele für Beseitigungsverfahren die Ablagerungen in oder auf dem Boden (z. B. Deponien usw.), die Behandlung im Boden (z. B. biologischer Abbau von flüssigen oder schlammigen Abfällen im Erdreich), speziell angelegte Deponien wie z. B. die Ablagerung in abgedichteten, getrennten Räumen, die gegeneinander und gegen die Umwelt verschlossen und isoliert werden, das Verpressen (z. B. pumpfähiger Abfälle in Bohrlöcher, Salzdomen oder natürliche Hohlräume), die Einleitung in ein Gewässer, in Meere/Ozeane einschließlich Einbringung in den Meeresboden, die Verbrennung an Land und auf See sowie die Dauerlagerung z. B. in einem Bergwerk.

2.4.3 EU-Bauprodukteverordnung

Die Richtlinie 89/106/EWG ist seit dem 09.03.2011 ersetzt durch die EU-Bauprodukteverordnung (EU-BauPVO)¹⁴². Diese legt Bedingungen für das Vermarkten und Inverkehrbringen von Bauprodukten durch die Aufstellung harmonisierter Regeln und Grundanforderungen fest. Hierdurch sollen das Inverkehrbringen von Bauprodukten einschließlich der dazu notwendigen Bedingungen vereinheitlicht, ihr freier Warenverkehr vereinfacht und Handelshemmnisse im EU-Binnenmarkt beseitigt werden.

Für die Zwecke der Verordnung werden Bauprodukte definiert als dauerhaft in Bauwerke (oder Teile davon) eingebaute Produkte, deren Leistung sich auf die Grundanforderungen, welche an das Bauwerk gestellt werden, auswirkt. Diese Grundanforderungen

141 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 3, Absatz 26

142 Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02011R0305-20140616> (Zugriff April 30, 2020)

umfassen einen sehr weiten Bereich: Erfüllen der Standsicherheit, Ansprüche an Brandschutz, Hygiene, Gesundheit, Umweltschutz, Sicherheit, Barrierefreiheit, Schallschutz, Wärmeschutz und Energieeinsparung bis hin zur nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen. Das Bauwerk muss demzufolge so entworfen und ausgeführt sein, dass:

- die Standsicherheit während der Errichtung und Nutzung des Gebäudes gewährleistet ist und auftretende Verformungen die Gebrauchstauglichkeit nicht einschränken
- bei einem Brand die Tragfähigkeit des Bauwerks für einen definierten Zeitraum erhalten bleibt
- die Entstehung und Ausbreitung des Feuers und des Rauchs begrenzt wird und die Bewohner flüchten oder gerettet werden können
- während eines gesamten Lebenszyklus weder die Hygiene noch die Gesundheit und Sicherheit von Arbeitnehmern, Bewohnern oder Anwohnern gefährdet wird
- sich bei der Nutzung oder dem Betrieb keine inakzeptablen Unfallgefahren wie u. a. Rutsch-, Sturz- oder Aufprallunfälle sowie Verbrennungen, Stromschläge oder Explosionsverletzungen ergeben
- die Nutzung des Gebäudes von Menschen mit Behinderung durch eine barrierefreie Gestaltung gewährleistet ist
- der wahrgenommene Schall auf einem nicht-gesundheitsgefährdenden Pegel gehalten wird und bei dem zufriedenstellende Nachtruhe-, Freizeit- und Arbeitsbedingungen sichergestellt sind
- die Anlagen und Einrichtungen zum Heizen, Kühlen, Beleuchten und Lüften während der Nutzung sowie beim Auf- und Rückbau möglichst wenig Energie verbrauchen
- die Dauerhaftigkeit des jeweiligen Bauwerks gewährleistet ist und die umweltverträglichen Bau- und Rohstoffe nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können.

Bauwerke müssen diese Grundanforderungen bei normaler Instandhaltung über einen wirtschaftlich angemessenen Zeitraum erfüllen. Dieser kann je nach Kategorie mehrere Jahrzehnte bis zu einem Jahrhundert betragen. Dabei umfasst dieser Zeitraum nicht nur die eigentliche Lebensdauer des Bauwerks, sondern im Sinne einer mehr ganzheitlichen Betrachtung des gesamten Lebenszyklus

schließt er auch den Rückbau bzw. das Recycling der Baustoffe ein. Daher legt in diesem Zusammenhang die EU-BauPVO einen besonderen Wert auf die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen. Sie stellt den Begriff der Recyclingfähigkeit des Bauwerks, seiner Baustoffe und Abrussteile sowie die Verwendung umweltfreundlicher Rohstoffe in den Vordergrund. Die Bewertung der Leistung von Bauprodukten soll anhand harmonisierter technischer Spezifikationen erfolgen, die Prüfungen, Berechnungsverfahren und andere Instrumente beinhalten, welche wiederum anforderungsspezifisch in Klassen gestaffelt sind.

Damit die Grundanforderungen erfüllt werden können, sollen Produktinformationsstellen kostenlos Informationen über die Bestimmungen bereitstellen. Darüber hinaus beabsichtigt die EU-Verordnung, dass die Kriterien der CE-Kennzeichnung bei Bauprodukten erfüllt werden. Um die Wiederholung bereits durchgeführter Prüfungen zu vermeiden, ist es den Herstellern dabei gestattet, von Dritten gewonnene Prüfergebnisse zu verwenden. Die Hersteller der Bauprodukte sind verpflichtet, eine Leistungserklärung zu erstellen und ihre Produkte mit einer CE-Kennzeichnung zu versehen. Darüber hinaus müssen die Hersteller durch entsprechende Verfahren gewährleisten, dass ihre erklärte Leistung auch in der Serienfertigung sichergestellt ist. Bevor ein Produkt auf dem Markt bereitgestellt wird, müssen sich die Händler vergewissern, ob das Produkt mit der CE-Kennzeichnung versehen ist und weitere Unterlagen wie u. a. Anleitungen und Sicherheitsinformationen beigefügt sind. Weitere Punkte der Verordnung beschäftigen sich mit der Finanzierung und Überwachung.

| **Auch Klebstoffe können Bauprodukte sein.**

Grundsätzlich stellen Klebstoffe auch ein Bauprodukt dar. Die Anwendbarkeit eines Klebstoffs im Bauwesen ist durch einen Abgleich der genannten Grundanforderungen an Bauprodukte mit dem Leistungsspektrum des einzusetzenden Klebstoffs jeweils nachweislich zu prüfen. Folgende Schwerpunkte sind dabei besonders zu berücksichtigen:

- Im Fall eines Brands ist die Tragfähigkeit bei thermischer Beanspruchung während des in der Spezifikation zum jeweiligen Bauwerk definierten Tragfähigkeitszeitraumes nachzuweisen.
- Klebstoffe, die als Gefahrstoffe klassifiziert sind, müssen während der Verarbeitung von klebtechnisch qualifizierten Personen so fachgerecht verarbeitet werden, dass eine Gefährdung des Arbeitnehmers und demzufolge entsprechend negative Auswirkungen auf dessen Gesundheit ausgeschlossen werden.
- Die Klebtechnik kann nicht nur gleiche, sondern auch unterschiedliche Materialien langzeitbeständig unter Erhalt der für das Produkt unverzichtbaren Materialeigenschaften fügen (siehe Kapitel 1.9). Für ein Recycling bzw. für die Wiederverwendbarkeit der geklebten Bauwerkstoffe ist bereits in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase die Trennbarkeit der unterschiedlichen Materialien zu berücksichtigen.

2.4.4 EU-Bioökonomiestrategie

Die Bioökonomie ist die Summe der Sektoren und Dienstleistungen, die biologische Ressourcen wie Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen nutzen. Bioökonomie stellt eine wesentliche Komponente einer sog. postfossilen Wirtschaft dar und beschreibt den Paradigmenwechsel von einer Erdöl-basierten Marktwirtschaft zu einer Marktwirtschaft, in der fossile Ressourcen durch verschiedene nachwachsende Rohstoffe substituiert werden. Vor dem Hintergrund, dass biologische Ressourcen und Ökosysteme endlich sind, werden innovative Wege bei der Versorgung mit Lebensmitteln, Waren und Energie notwendig. Aus diesem Grund sollen Produkte und Prozesse innerhalb einer Volkswirtschaft nachhaltiger erzeugt werden.¹⁴³ Die Bioökonomiestrategie ist verknüpft mit verschiedenen Zielen der Agenda 2030 (SDGs, siehe Kapitel 2.1)¹⁴⁴:

143 Nationale Politikstrategie Bioökonomie – Wachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie, BMEL/Referat 531, Berlin, 03/2014

144 Bioökonomierat: »Bioeconomy Policies (Part 2): Synopsis of national Strategies around the World, 2015

- Sicherung der Ernährung
- Schutz des Klimas
- nachhaltige Konsum- und Produktionsbedingungen
- Erhalt der wichtigsten Naturgüter wie Trinkwasser, fruchtbare Böden, saubere Luft und
- Biodiversität.

Die Bioökonomie stellt eine Komponente der postfossilen Wirtschaft dar.

Die Bioökonomie berührt somit verschiedene Politikbereiche wie die Industrie- und Energiepolitik, die Agrar-, Ernährungs-, Forst- und Fischereipolitik, die Klima- und Umweltpolitik sowie die Forschungs- und Entwicklungspolitik. Die nachhaltige, kreislaforientierte Bioökonomiestrategie der EU konzentriert sich auf drei Schlüsselaspekte:

- die Entwicklung neuer Technologien und Verfahren für die Bioökonomie
- die Entwicklung der Märkte und Wettbewerbsfähigkeit in den Sektoren der Bioökonomie
- die enge Zusammenarbeit politischer Entscheidungsträger und Stakeholder.

Hauptziele sind¹⁴⁵

- die Ausweitung und Stärkung der biobasierten Sektoren
- die schnelle europaweite Einführung der Bioökonomie sowie
- der Schutz der Ökosysteme und die Erforschung der ökologischen Bioökonomie-Grenzen.

Die vorhandenen biologischen Ressourcen können durch die Bioökonomie mit Hilfe innovativer Verfahren nachhaltiger als

¹⁴⁵ Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Referat Bioökonomie / Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) In Bioökonomie in Deutschland – Chancen für eine biobasierte und nachhaltige Zukunft, 3. Auflage, 2014

bisher genutzt und ihre Anwendungsfelder auf Basis neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse ergänzt werden.¹⁴⁶

2.4.5 Zukünftige Maßnahmen

Über die in den Kapiteln 2.4.1–2.4.4 genannten Maßnahmen hinaus wird sich der neue Aktionsplan^{147,148} auf Branchen konzentrieren, in denen die meisten Ressourcen genutzt werden und in denen ein hohes Kreislaufwirtschaftspotenzial besteht. Dies betrifft die in Kapitel 2.2 genannten Branchen wie die Elektronik und Informations- und Kommunikationstechnik. Hierbei geht es schwerpunktmäßig um die Lebensdauererlängerung der Produkte und die Optimierung der Sammlung und Behandlung von Abfällen. Für Batterien und Fahrzeuge wird ein neuer Rechtsrahmen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit und zur Stärkung des Kreislaufwirtschaftspotenzials von Batterien geschaffen. Für Verpackungen, die auf den EU-Markt zugelassen sind, ergehen neue verbindliche Anforderungen. Diese umfassen die Verringerung, insbesondere übertrieben aufwändiger Verpackungen. Für den Einsatz von Kunststoffen werden neue, ebenfalls verbindliche Anforderungen an den Rezyklatanteil geschaffen. Diese konzentrieren im Besonderen auf Mikroplastik sowie auf biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe. Für Textilien soll eine neue EU-Strategie die Wettbewerbsfähigkeit und Innovation in der Branche stärken den EU-Markt für die Wiederverwendung von Textilien stärken. Für den Bereich Bauwesen und Gebäude wird es eine umfassende Strategie für eine nachhaltige bauliche Umwelt zur Berücksichtigung des Kreislaufwirtschaftsprinzips bei Gebäuden geben. Im Bereich Lebensmittel wird es eine neue Gesetzesinitiative geben. Sie hat die Wiederverwendung von Einwegverpackungen, -geschirr und -besteck durch wiederverwendbare Produkt in Verpflegungsdienstleistungen zum Ziel.

146 K. Pillen; L. Wessjohann In Jahresbericht 2018–2019 Leibniz-WissenschaftsCampus Halle – Pflanzenbasierte Bioökonomie, sedruck KG: Leipzig, 2019; S. 3–5, Pflanzenbasierte Bioökonomie – Wegbereiter der grünen Transformation.

147 Europäische Kommission, Für länger haltbare und nachhaltigere Produkte; https://ec.europa.eu/germany/news/20200311-kreislaufwirtschaft_de (Zugriff April 30, 2020)

148 Europäische Kommission, Änderung unserer Produktions- und Verbrauchsmuster; https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_20_420 (Zugriff April 2020)

2.5 Energieverbrauch und Material- effizienz/Ressourceneffizienz

2.5.1 Energieverbrauch und Materialeffizienz/Ressourcen- effizienz: die Bedeutung der Begriffe

Energieverbrauch:

Der Begriff »Energieverbrauch« wird in diesem Zusammenhang umgangssprachlich verwendet. Physikalisch kann Energie in einem geschlossenen System nicht »verbraucht« sondern lediglich »umgewandelt« werden. Dass dennoch von Energieverbrauch gesprochen wird, hat seinen Grund darin, dass für Produktionsverfahren, Produktanwendungen/-nutzungen sowie Entsorgungsvorgänge Energie genutzt, diese im landläufigen Sinn also dafür verbraucht wird. Umgangssprachlich geht es also um die Nutzung aufbereiteter Energieformen (Erdgas/-öl, Kohle, Kraftstoffe wie Benzin oder Diesel, elektrischer Strom oder Fernwärme) zur Verrichtung der o. g. Tätigkeiten.^{149, 150}

Materialeffizienz:

Im einfachsten Fall beschreibt der Begriff »Materialeffizienz« zunächst einmal das Verhältnis des Materialinputs (verwendete Materialien) und Produktoutput (erhaltene Produkte). Im Rahmen dieser Studie ist es notwendig, dass der Begriff »Materialeffizienz« auch Entsorgungs- und Recyclingprozesse einschließt. Daher wird die »Materialeffizienz«* beschrieben durch das Verhältnis von »mengenmäßigem Bonus Produktoutput« zu »mengenmäßigem Aufwand Materialinput«. ¹⁵¹ Nicht jedes Erzeugnis einer Produktion ist erwünscht, und nicht jedes einer Produktion zugeführte

* Die Festlegung auf »Produktoutput« und »Materialinput« gilt nur für den Standardfall der Produktion. Der mittlerweile populärere Begriff Materialeffizienz ist gleichbedeutend mit dem fachlich präziseren Begriff »Materialproduktivität«.

149 E. Rebhan (Hrsg.) In Energiehandbuch – Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie; Springer Verlag: Berlin 2002

150 VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (Hrsg.); VDI-Fachbereich Betriebliches Sicherheitsmanagement In VDI-Richtlinie 4661 Energiekenngrößen: Definitionen – Begriffe – Methodik, 2014

151 H. Dyckhoff, Betriebliche Produktion – Theoretische Grundlagen einer umweltorientierten Produktionswirtschaft, 2. Auflage, Springer: Berlin, 1994

Material kann im Endprodukt genutzt werden. Daher ist Folgendes zu berücksichtigen:

- Der »mengenmässige Bonus Produktoutput« entspricht
 - den Gütern der Produktoutputseite (= hergestellte Produkte) abzüglich des Onus** der Materialinputseite wie unerwünschte Materialien, Abfälle etc.
- Der mengenmässige Aufwand Materialinput entspricht
 - den Gütern der Materialinputseite wie Rohstoffe und (knappe) Ressourcen zuzüglich des Onus der Produktoutputseite wie Abfälle und Emissionen.

** Onus (lat.): Last, Bürde (englische Übersetzung: »burden«)

Die Materialeffizienz steigt,

- je größer der Wert des Bonus Güter Produktoutput (= hergestellte Produkte) abzüglich des Onus Materialinput (unerwünschte Materialien, Abfälle) und
- je kleiner der Wert des Aufwands Güter Materialinput (Rohstoffe und (knappe) Ressourcen) zuzüglich des Onus Produktoutput (= Abfälle, Emissionen) wird.

Beides wird erreicht, indem der Aufwand Güter Materialinput und die Onera Materialinput sowie Produktoutput so klein wie möglich gehalten werden. Je geringer der Aufwand Güter-Input ist und je geringer die Onera der Input- wie Outputseite sind, umso höher ist die Materialeffizienz.

Eine hohe Materialeffizienz ist bei einem hohen Wert für den Bonus Güter Produktout und geringen Werten für den Aufwand Güter Materialinput und die Onera der Input- und Outputseite gegeben.

In der bisher dargestellten Betrachtung der Materialeffizienz ist der Energieaufwand nicht berücksichtigt. Die Produktlebenszyklusphasen »Herstellung«, »Nutzung« (Gebrauch) und »Entsorgung« sind mit Energieaufwand verbunden. Daher beeinflusst über die genannten drei genannten Produktphasen die Materialeffizienz auch den jeweiligen Energiebedarf.

Ressourceneffizienz:

Folglich ist die »Materialeffizienz« in engem Zusammenhang mit dem Konzept der »Ressourceneffizienz« zu sehen. Die Ressourceneffizienz berücksichtigt neben dem Material den Faktor Energie in der Produktherstellung, in der Produktnutzung sowie in der Produktentsorgung mit. Die Ressourceneffizienz dient dem übergeordneten Ziel, Wirtschaftsleistung und Ressourceneinsatz zu entkoppeln und fördert die Initiative »Green Deal« der EU für eine Klimaneutralität bis 2050.

Die Ressourceneffizienz berücksichtigt auch den Faktor Energie.

Ganz allgemein beschreibt der Begriff »Ressourceneffizienz« das Verhältnis eines bestimmten Nutzens, z. B. eines gegenständlichen Produkts, zu dem dafür erforderlichen Einsatz an natürlichen Ressourcen (Aufwand).^{152, 153} Dem folgend gilt: je geringer der nötige Input an natürlichen Ressourcen und je höher gleichzeitig der Nutzen des Produktes, desto größer die Ressourceneffizienz.

Der Begriff »Materialeffizienz« kann in den Begriff der »Ressourceneffizienz« überführt werden.

Die Ökodesign-Richtlinie trennt zwischen Material-, Ressourcen- und Energieeffizienz.^{154, 155} Jedoch spricht die Richtlinie von Energie, Material und anderen Ressourcen. Also werden in der Ökodesign-Richtlinie sowohl »Material« als auch »Energie« als

152 J. Kosmol, J. Kanthak, F. Herrmann, M. Golde, C. Alsleben, G. Penn-Bressel, G. N. Schmitz, U. Gromke In Glossar zum Ressourcenschutz; Umweltbundesamt Dessau: Umweltbundesamt, 2012, S. 23

153 VDI-Fachbereich Umwelttechnik, VDI-Richtlinie 4800 Blatt 1 »Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen – Prinzipien und Strategien«, VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (Hrsg.), 2016

154 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Ökodesign-Richtlinie Art. 11 Erwägungsgrund Nr. 10 und 13

155 F. Reimer, S. Tölle, ZUR 2013, 589–598, Ressourceneffizienz als Problembegriff.

»Ressource« eingeordnet.¹⁵⁶ Daraus ergibt sich die Möglichkeit, den Begriff »Materialeffizienz« in den Begriff der »Ressourceneffizienz« zu überführen. In Erweiterung zum o. g. Begriff »Material-effizienz« werden Emissionen und Energieverbrauch integriert und die einzelnen Effizienz-Komponenten wie folgt definiert:

- Bonus Güter Produktoutput
 → hergestellte Produkte incl. additiver Funktionen
- Onus Ressourceninput***
 → unerwünschte Materialien, Abfälle und Emissionen
- Recyclinganteil****
 → kreislaufwirksamer Werkstoffanteil abzgl.
 Energieaufwand für die Rückgewinnung
- Aufwand Güter Materialinput
 → einzusetzende Rohstoffe bzw. (knappe) Ressourcen
- Onus Produktoutput
 → Abfälle, Emissionen, Energieverbrauch im
 Prozesszyklusabschnitt

Diese Betrachtung der Ressourceneffizienz ist dann jeweils für die Produktzyklusabschnitte

- Herstellung
- Nutzung
- Entsorgung (»End of Life«)

als eine erste grobe qualitative Abschätzung durchzuführen. Die Zusammenfassung der einzelnen Produktlebenszyklusabschnitte kann als grundsätzliche Entscheidungsgrundlage für die (Weiter-)Entwicklung eines geklebten Produkts dienen.

- Für das Ziel einer hohen Ressourceneffizienz ist ein grundsätzlich möglichst hoher Bonus Güter Produktoutput anzustreben.
- Der Anteil Onus Ressourceninput ist möglichst klein zu halten.

*** Das o. g. »Onus Materialinput« ist nun durch das »Onus Ressourceninput« substituiert, welches zusätzlich Emissionen einschließt.

**** Neu hinzu kommt der materielle und/oder energetische »Recyclinganteil«, der sich aus der Differenz des »kreislaufwirksamen Werkstoffanteils« und des »Energieaufwandes für die Rückgewinnung« ergibt. »Kreislaufwirksam« bedeutet, dass die Rückgewinnung des Werkstoffanteils allein nicht ausreicht und Selbstzweck wäre. Der Werkstoffanteil (Rezyklat) muss hinsichtlich seiner wertgebenden Eigenschaften qualitativ hochwertig sein (Werkstoff-Recycling im Gegensatz zum Downcycling) und auf Basis dieser Voraussetzung auch tatsächlich wieder in den Kreislauf integriert werden. Der zur Rückgewinnung notwendige energetische Aufwand muss diese Rückführung rechtfertigen.

 156 M. Alt In Ökodesign und Kreislaufwirtschaft, Nomos Verlagsgesellschaft: Baden-Baden 2018, 1. Auflage, Kapitel 2, S. 53, Rechtsgrundlagen für produktbezogene Abfallvermeidung und das recyclinggerechte Design.

- Je geringer der Energieaufwand des Recyclinganteils im Verhältnis zur kreislaufwirksamen Werkstoffrückgewinnung ist, umso größer wird der Recyclinganteil. Dieses wirkt sich positiv auf den Bonus Güter Produktoutput aus.
- Das »Onus Produktoutput« ist um die Berücksichtigung des Energieverbrauchs pro Produktzyklusabschnitt erweitert worden. Ziel für eine möglichst hohe Ressourceneffizienz ist, sowohl den Aufwand Güter Materialinput als auch das Onus Produktoutput so klein wie möglich zu halten.

Die Betrachtung der Ressourceneffizienz aller Produktlebenszyklusabschnitte zusammengefasst kann grundsätzlich als qualitative Entscheidungsgrundlage für die Entwicklung geklebter Produkte dienen.

Aus der Summation der Ressourceneffizienz pro Produktzyklusabschnitt ergibt sich die gesamte Ressourceneffizienz eines Produktlebenszyklus. Bezogen auf gegenständliche Produkte kann die Effizienz des Produktoutputs entlang des Lebenszyklus qualitativ betrachtet und grundsätzlich die »Öko-Rentabilität« einer Produktentwicklung abgeschätzt werden kann. Für quantifizierte Aussagen bedarf es zweifelsohne einer Nachhaltigkeitsbetrachtung, beispielsweise anhand einer Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz/Life Cycle Assessment – LCA, siehe Kapitel 2.5.2 und Kapitel 3).

Als Beispiele einer Ressourceneffizienz, die bereits im Produktdesign zu berücksichtigen ist, seien der Leichtbau und die Miniaturisierung genannt. Einsparungen von Rohstoffen während der Fertigung, Reduktion von Verbrauchsmaterial und Energie in der Produktions- und Nutzungsphase sowie die Möglichkeit der (sortenreinen) Trennung und Rückführung der Materialien in die technischen oder natürlichen Kreisläufe sind weitere Maßnahmen zur Optimierung der Ressourceneffizienz. Sie führen zu einer optimierten Effizienz des Produkts, die sich aus einer ganzheitlichen Betrachtung der Ressourceneffizienzwerte über den gesamten Produktlebenszyklus ergibt.

Beispiele zur Verdeutlichung

Als plakatives Beispiel für die Abschätzung der Ressourceneffizienz kann das Backen von Brot betrachtet werden. Der »Bonus Güter Produktoutput« ist das Brot. Der »Aufwand Güter Materialinput« sind die zum Backen notwendigen Zutaten. Zum »Onus Ressourceninput« gehören Verpackungsmaterialien etc. und alle dabei entstandenen Emissionen sowie die notwendige Energie für das Brotbacken. Dem »Onus Produktoutput« zuzurechnen sind entstehende Backüberreste, nicht weiter verwendbare Abfälle, die beim Brotbacken entstehenden Emissionen sowie für die Reinigung der Backgeräte notwendigen Mittel. Nicht verkaufte Brot kann beispielsweise als »Recyclinganteil« dem Kompost zugeführt werden.

Eine hohe Ressourceneffizienz ist gegeben, wenn der »Bonus Güter Produktoutput« gegenüber den anderen Faktoren maximiert werden kann. Das Backen von Brot ist ressourceneffizient, wenn viele Brote mit wenig Energie, wenig Verpackungsmaterial, bei geringen Verschmutzungen, hoher Verkaufswahrscheinlichkeit und mit einem hohen Recyclinganteil der Überschüsse gebacken werden.

Etwas tiefergehend ist der Vergleich zweier funktionsgleicher Fahrzeuge, denn hier kann die Produktzyklusphase »Nutzung« die Ressourceneffizienz entscheidend beeinflussen. Unter der Voraussetzung, dass sich beispielsweise durch die Verwendung von Aluminium an Stelle von Stahl das Fahrzeuggewicht dermaßen verringert, dass die während der Fahrzeugnutzung eingesparte Energiemenge im Gesamtlebenszyklus größer ist als die bei Werkstoffherstellung und -recycling im Vergleich zum Stahl mehr benötigte Energie, ist das Aluminium-basierte Fahrzeug ressourceneffizienter. Der »Onus Ressourceninput« wäre in diesem Fall aufgrund der insgesamt eingesparten (Nutzungs-)Energie der ausschlaggebende Faktor.

Eine Kreislaufwirtschaft ist im Zusammenhang sowohl mit Ressourcenschonung, d. h. der sparsamen Nutzung natürlicher Ressourcen mit dem Ziel der Erhaltung ihrer Menge und Funktion^{157, 158}, als

157 J. Kosmol, J. Kanthak, F. Herrmann, M. Golde, C. Alsleben, G. Penn-Bressel, G. N. Schmitz, U. Gromke In Glossar zum Ressourcenschutz; Umweltbundesamt Dessau: Umweltbundesamt, 2012, S. 25

158 <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/ressourcenschonung-45471>

auch mit Ressourceneffizienz^{159, 160} zu sehen. Der Unterschied zwischen »Schonung« und »Effizienz« besteht in Folgendem:

- Ressourcenschonung¹⁶¹ ist die Reduktion des Einsatzes von Ressourcen. Sie ist Ziel der Kreislaufwirtschaft.¹⁶²
- Ressourceneffizienz erreicht mit den vorhandenen Mitteln über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg den besten Produktoutput (Bonus Güter Produktoutput) bzw. mit geringerem Input (Onus Materialinput, Aufwand Güter Materialinput, Onus Produktoutput) den gleichen Produktoutput. Die Ressourceneffizienz stellt in diesem Zusammenhang ein Mittel zur Ressourcenschonung dar.

Für die Europäische Kommission in ihrem Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa setzt sich die Ressourceneffizienz aus dem optimierten Input/Output-Verhältnis, der nachhaltigen Nutzung von Ressourcen sowie der Minimierung von Umweltauswirkungen zusammen.

Ressourceneffizienz bezeichnet eine Relation, keinen absoluten Wert. Die Erhöhung der Ressourceneffizienz bewirkt nicht zwangsläufig die absolute Senkung des Ressourceneinsatzes (Ressourcenschutz bzw. Ressourcenschonung). Nimmt durch überdurchschnittliche Steigerung der Zahl eines Produktoutputs, die Wirtschaftsleistung stärker zu als die Effizienzsteigerungen im Ressourceneinsatz, ist das Resultat – absolut betrachtet – ein Mehrverbrauch an Ressourcen. Nichtsdestotrotz ist die Steigerung der Ressourceneffizienz grundsätzlich ein Schritt in die richtige Richtung.

159 Umweltbundesamt, Glossar zum Ressourcenschutz, Januar 2012, S. 23

160 E. Günther, Ressourcenschonung – Ausführliche Definition. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/effizienz-35160> (Zugriff April 30, 2020)

161 E. Gawel In Ressourceneffizienz – Leitbild für das Umweltrecht / Gießener Abhandlungen zum Umweltrecht; F. Reimer (Hrsg.); Nomos Verlagsgesellschaft: Baden-Baden, 2016; Band 26, S. 31–62, Ressourceneffizienz als ökonomisches Konzept.

162 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 1

2.5.2 Energieverbrauch und Materialeffizienz / Ressourceneffizienz: die Bedeutung der ganzheitlichen Betrachtung (Ökobilanz / Life Cycle Assessment – LCA)

»Energieverbrauch«, »Materialeffizienz« sowie »Ressourceneffizienz« sind stets auf den gesamten Produktlebenszyklus zu beziehen. Eine separate Fokussierung auf Einzelelemente der Kreislaufwirtschaft oder des Ökodesigns verzerrt Entscheidungsgrundlagen. Ohne den Gesamtlebenszyklus des Produkts zu betrachten, ist es nicht sinnvoll, den »Aufwand Güter Materialinput«, das »Onus Produktoutput/Materialinput« oder den »Recyclinganteil«/ die Recyclingfähigkeit separat zu optimieren.

Der gesamte Produktlebenszyklus ist zu betrachten.

Ein Beispiel aus dem Schienenfahrzeugbau verdeutlicht die Notwendigkeit der ganzheitlichen Betrachtung: Die Bahn zeigt im Vergleich zu anderen Fahrzeugen eine gute Ökobilanz und wird aus diesem Grund seitens der Bundesregierung als attraktives Beförderungsmittel stark in den Fokus gerückt. Für die Herstellung des ca. 750 Tonnen schweren Triebwagens eines ICE der Deutschen Bahn werden erhebliche Mengen an Material und an Energie benötigt. Jedoch ist bei der Betrachtung der Ressourceneffizienz des ICE zu berücksichtigen, dass er eine Jahresfahrleistung von ca. 500.000 km hat, für eine Lebensdauer von 40 Jahren (= 20.000.000 km) ausgelegt ist und Platz für ca. 700 Fahrgäste bietet. Hier setzt sich eine ganzheitliche Betrachtung zusammen aus dem Bau und Unterhalt der Fahrzeuge, dem Betrieb der Infrastruktur, dem Bau und Unterhalt Infrastruktur sowie dem Fahrbetrieb. Letzterer, in g CO₂-Äquivalenten pro Personenkilometer (Pkm) bzw. 1.000 km (tkm) über alle drei Verkehrsbereiche (Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr) betrachtet, macht den mit Abstand größten Anteil aus, Bau und Unterhalt der Fahrzeuge den mit Abstand geringsten.¹⁶³ Daher hat ein erhöhter Aufwand

¹⁶³ vergleiche M. Schmied; M. Mottschall In Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland (FKZ 363 01 044); Öko-Institut: Freiburg, 2013; S. 118 / Bild 33

an Energie und Material in der Phase der Produktherstellung nur geringe direkte Auswirkungen auf das »Onus Ressourceninput« und damit auf die Ressourceneffizienz. Die Produktlebenszyklusphase »Nutzung« bestimmt die Ressourceneffizienz und macht das Schienenfahrzeug so überlegen. Diese Überlegenheit entstammt nicht aus der Phase der Produktherstellung sondern aus der Phase der Produktnutzung¹⁶⁴. Erhöhte Aufwände an Energie und Material in der Phase der Herstellung eines ICE können sogar das CO₂-Äquivalent senken, wenn sie als Hebel für eine Steigerung der Effizienz in der Produktlebenszyklusphase des Betriebs genutzt werden. Zum Beispiel können Maßnahmen zur Steigerung der Akzeptanz des ICE beim Kunden (Komfort, WLAN während der Reise etc.) die Auslastung des Zuges erhöhen und so durch einen frühzeitigen, gut geplanten Einsatz von Ressourcen indirekt die Gesamt-Ressourceneffizienz des ICE weiter steigern sowie das CO₂-Äquivalent weiter herabsetzen.

Nicht nur in dem Beispiel Bahn, sondern in jedem Produktoutput-Einzelfall müssen die gesamten Umweltauswirkungen während der Entwicklung, der Produktion, der Nutzung und der Entsorgung sowie aller damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozesse frühzeitig betrachtet werden. Vor- und nachgeschaltete Prozesse sind beispielsweise die Herstellung und Modifizierung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, die Entnahmen aus der Umwelt (z. B. Erze, Rohöl und deren Aufarbeitung), die Emissionen in die Umwelt (z. B. Abfälle, CO₂- und sonstige Emissionen) sowie der Energieverbrauch in Entwicklung, Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Produkte.

Ein Instrument ganzheitlicher Produktlebenszyklusbetrachtung ist die Ökobilanz.

Ein Instrument zur ganzheitlichen Betrachtung eines Produkts ist die Erstellung einer Ökobilanz (auch Lebenszyklusanalyse,

¹⁶⁴ M. Mottschall, T. Bergmann In Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienenverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland / Arbeitspaket 4 des Projektes »Weiterentwicklung des Analyseinstrumentes Renewability; Umwelt-Bundesamt / Fachgebiet 3.1 Umwelt und Verkehr (Hrsg.), 3. korrigierte Fassung Januar 2015, S. 2

im Englischen Life Cycle Assessment – LCA/DIN EN ISO 14040–14044).^{165, 166, 167, 168, 169} Der Grundgedanke der Ökobilanzen besteht darin, Umweltauswirkungen eines Produktes nicht separiert voneinander und linear in einzelnen Phasen zu betrachten (und zu bewerten), sondern die gesamte Lebenszeit, in diesem Sinne die Summe der Produktlebensphasen, zu berücksichtigen.¹⁷⁰ Sie zielt darauf ab, Verbesserungsmöglichkeiten bei Produkten quantifiziert zu identifizieren, um die Umweltauswirkungen und die Nutzung natürlicher Ressourcen während des gesamten Produktlebensweges zu verringern. Sie stellt die derzeit umfassendste Methode zur Bewertung der Umweltwirkungen dar und kann die Bewertung der Umweltwirkungen eines Produktes in jeder Produktlebenszyklusphase ermöglichen.¹⁷¹

Eine Ökobilanz umfasst vier Schritte:

1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Im ersten Schritt wird entschieden, welche Produktoutputs bilanziert und miteinander zu vergleichen sind. Zu untersuchende Produktoutputs müssen den gleichen Nutzen haben. Anhand sog. »funktioneller Einheiten« werden Funktion und Nutzen zu vergleichender Produkte so weit wie möglich quantifiziert.

165 DIN EN ISO 14040:2019-11, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Beuth-Verlag: Berlin, 2009

166 DIN EN ISO 14041:1998-11, Umweltmanagement – Ökobilanz – Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz, Beuth-Verlag: Berlin, 1998

167 DIN EN ISO 14042:2000-07, Umweltmanagement – Ökobilanz – Wirkungsabschätzung, Beuth-Verlag: Berlin, 2000

168 DIN EN ISO 14043:2000-07, Umweltmanagement – Ökobilanz – Auswertung, Beuth-Verlag: Berlin, 2000

169 DIN EN ISO 14044:2018-05, Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, Beuth-Verlag: Berlin, 2018

170 Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament, Integrierte Produktpolitik – Auf den ökologischen Lebenszyklus-Ansatz aufbauen, KOM 2003 302 endg., S. 5

171 J. Sanf elix, F. Mathieux, C. da la R ua, M.-A. Wolf, K. Chomkhamri, The International Journal of Life Cycle Assessment 2013, Vol 11, Issue 1, 273–277, The enhanced LCA Resources Directory: a tool aimed at improving Life Cycle Thinking practices.

2. Sachbilanz

In der Sachbilanz werden verschiedene Arten von Umweltbelastungen, die während des Lebenszyklus eines Produktoutputs entstehen, Parameter für Parameter so weit wie möglich quantifiziert und über den gesamten Produktlebenszyklus subsummiert.

3. Wirkungsabschätzung

Im dritten Schritt werden die Größe und Bedeutung potenzieller Umweltwirkungen eines Produktoutputs während des Produktlebenszyklus beurteilt, wobei die einzelnen Ergebnisse jeweils folgenden Wirkungskategorien zugeordnet werden:

- Treibhauseffekt
- direkte Gesundheitsschädigung
- direkte Schädigung von Ökosystemen
- Beanspruchung fossiler Ressourcen
- Abbau stratosphärischen Ozons
- photochemische Oxidantienbildung
- aquatische Eutrophierung
- terrestrische Eutrophierung
- Versauerung
- Naturraumbeanspruchung

Die Charakterisierung einer jeden Wirkungskategorie erfolgt durch einen oder mehrere »Wirkungsindikatoren« (Beispiel Treibhauseffekt: Wirkungsindikator CO₂-Äquivalent). Die Ergebnisse der Sachbilanz aus Schritt 2 werden in diese Wirkungsindikatoren umgerechnet.

Die Bewertung der Wichtigkeit der einzelnen Wirkungskategorien ist von zentraler Bedeutung bei der Wirkungsabschätzung. Um zu vergleichenden Aussagen zu kommen, müssen die unterschiedlichen Umweltwirkungen verglichen, abgewogen und nach ihrer Wichtigkeit geordnet werden.

4. Auswertung

Bei der abschließenden Auswertung der Ökobilanz werden die Ergebnisse der Sachbilanz aus Schritt 2 und Wirkungsabschätzung aus Schritt 3 zusammengeführt. Daraus werden Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Politik, die Produzenten und andere Beteiligte abgeleitet.

Im Zusammenhang mit der Abfallhierarchie (siehe Kapitel 2.4.2) fordert der Lebenszyklusgedanke gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz^{172,173}, eben die Maßnahme der Abfallhierarchie zu wählen, die den Schutz von Mensch und Umwelt am besten gewährleistet. Dazu ist der gesamte Lebenszyklus des Abfalls zu berücksichtigen, insbesondere die zu erwartenden Emissionen, das Maß der Schonung der (natürlichen) Ressourcen, die einzusetzende oder zu gewinnende Energie, die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen, Verwertungsabfällen oder daraus gewonnenen Erzeugnissen.¹⁷⁴ Dem Gedanken der Lebenszyklusanalyse folgend ist es möglich, die Abfallhierarchie (siehe Kapitel 2.4.2) zu durchbrechen. Die Gesamtbilanz der Umweltauswirkungen zu betrachten ist wichtiger, als an der Abfallhierarchie festzuhalten.¹⁷⁵ Erweist sich eine derartige Lebenszyklusanalyse für die Gesamtbilanz als vorteilhaft, ist die Abweichung von der Abfallhierarchie gerechtfertigt.

Das Abweichen von der Abfallhierarchie kann also für die Ökobilanz eines Produkts ökologisch gewinnbringend sein. In diesen Fällen werden durch das Abweichen in einem Schritt des Produktlebenszyklus in einem anderen Schritt deutliche Vorteile in der Ökobilanz ermöglicht. Die Realisierung dieser Vorteile rechtfertigen das Abweichen von der Abfallhierarchie und kann also für die Ökobilanz eines Produkts gewinnbringend sein. In diesen Fällen werden durch das Abweichen in einem Schritt des Produktlebenszyklus in einem anderen Schritt deutliche Vorteile in der Ökobilanz ermöglicht.

 172 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 6 Abs. 2 S. 2

173 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), Art. 4, Abs. 2 AbfallRRL

174 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 6 Abs. 2 S. 3

175 F. Petersen, J. Doumet, G. Stöhr, NVwZ 2012, S. 521–530, Das neue Kreislaufwirtschaftsgesetz.

Das Abweichen von der Abfallhierarchie kann für die Gesamt-Ökobilanz eines Produktes ökologisch gewinnbringend sein.

Der Lebenszyklusgedanke schlägt gemäß Art. 2 Nr. 23 Ökodesign-Richtlinie, worin das Ziel der umweltgerechten Produktgestaltung entlang der gesamten Produktlebensphase formuliert ist, die Brücke zum Ökodesign¹⁷⁶, da der Lebenszyklus gemäß Art. 2 Nr. 13 Ökodesign-Richtlinie als die Gesamtheit der miteinander verknüpften Produktexistenzphasen definiert ist. Die Ökodesign-Richtlinie stellt daher im Zusammenhang mit energieverbrauchsrelevanten Produkten ein Instrument einer Integrierten Produktpolitik dar.¹⁷⁷ Sie sieht vor, Umweltauswirkungen während der gesamten Produktlebensphase zu berücksichtigen. Die Integrierte Produktpolitik (IPP) analysiert folglich den gesamten Produktlebenszyklus und setzt hierbei schwerpunktmäßig einerseits beim Produktdesign an, andererseits aber genauso bei der Akzeptanz, Annahme und Nutzung umweltfreundlicherer Produkte durch den Verbraucher.¹⁷⁸

Zwingende Voraussetzung für eine Lebenszyklusanalyse ist und bleibt die Qualität, Richtigkeit, Aktualität und Verfügbarkeit der einer solchen Analyse zugrunde liegenden Daten. Nur wenn diese Faktoren gegeben sind, kann eine seriöse Lebenszyklusanalyse durchgeführt werden.

176 M. Alt In Ökodesign und Kreislaufwirtschaft, Nomos Verlagsgesellschaft: Baden-Baden 2018, 1. Auflage, Kapitel 4, S. 157, Konzeptionelles Zusammenwirken zwischen Ökodesign und Kreislaufwirtschaft.

177 ABIEU L 285/10 vom 31.10.2009, zuletzt geändert durch RL 22012/27/EU, ABIEU L 315/1 vom 14.11.2012

178 Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Grünbuch zur integrierten Produktpolitik, KOM 2001 68 (endgültig). <http://edz.bib.uni-mannheim.de/www-edz/pdf/kom/gruenbuch/kom-2001-0068-de.pdf> (Zugriff April 30, 2020)

2.5.3 Energieverbrauch und Materialeffizienz / Ressourceneffizienz: die Bedeutung der Werkstoffe

Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, sind neue Werkstoffe zum Erfüllen steigender Produkt-Anforderungsprofile notwendig. Aus ihren Eigenschaften ergeben sich maßgeblich die geforderten Produkteigenschaften. Bezogen auf »Energieverbrauch« und »Material-/Ressourceneffizienz« besteht die zusätzliche Aufgabe der Werkstoffe darin, durch die Steigerung des Bonus Güter-Produktoutput (siehe Kapitel 2.5.1) die »Ressourceneffizienz« zu erhöhen.

Aus den Werkstoffeigenschaften ergeben sich maßgeblich die Produkteigenschaften.

Ein bekanntes Beispiel für die Erfüllung steigender Produkt-Anforderungsprofile ist der RegioShuttle. Beim RegioShuttle handelt es sich um ein dieselbetriebenes Regional-Schienenfahrzeug der Fa. Stadler Rail AG (→ s. Abb. 46, rechts¹⁷⁹). Das Schienenfahrzeug ist bereits Mitte der 90er-Jahre des letzten Jahrhunderts auf den Markt gekommen und heute noch im Einsatz. Mit ihm ließ sich bereits damals die gestiegene Anforderung zur Reduzierung des Energiebedarfs im Fahrbetrieb erfüllen. Schlüssel war die Reduktion des Fahrzeuggewichts durch einen Werkstoffverbund aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und Stahl.

Die »Karosserie« ist eine geschweißte Stahl-Fachwerkkonstruktion (→ s. Abb. 46, links¹⁷⁹).

Diese Fachwerkkonstruktion ist als Stahl-Leichtbau zu verstehen. Sie konnte die gestiegenen Anforderungen hinsichtlich der Gewichtsreduzierung erfüllen, indem ein im Vergleich zum Stahl damals neuer (Leichtbau-)Werkstoff eingesetzt: glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK). GFK hat das für Faserverbundkunststoffe (FVK) typische Charakteristikum eines verhältnismäßig geringen Gewichts bei vergleichsweise hoher Steifigkeit. Um nun die gewünschte Anforderung der Gewichtsreduzierung zu erzielen galt es, zwei unterschiedliche Werkstoffe langzeitbeständig (> 30 Jahre!) miteinander zu verbinden.

179 Stadler Rail AG, Bussnang, Schweiz



Abb. 46
RegioShuttle: die
Karosserie (links) eine
geschweißte Stahl-
Fachwerkkonstruk-
tion / Leichtbau durch
GFK im Außenbereich
(rechts)

Abbildung 46 rechts zeigt das Schienenfahrzeug. Es besteht im Außenbereich (Dachsegmente, Außenhautpaneele, Bugmaske) mit Ausnahme der Puffer (Stahl) und des Fahrwerks (Stahl) sowie der Fenster (Glas) ausschließlich dem Leichtbauwerkstoff GFK. Mit der Werkstoffkombination Stahl/GFK bzw. Glas/GFK war es gelungen, den »RegioShuttle« 25 % leichter als vergleichbare herkömmliche Fahrzeuge gleicher Größenordnung zu bauen ¹⁸⁰.

Im Vergleich mit einem damaligen, vollständig aus Stahl hergestellten, geschweißten Schienenfahrzeug vergleichbarer Größe ist die Ressourceneffizienz positiv zu bewerten:

- In der Produktlebenszyklusphase »Herstellung« sind die Onera Ressourceninput und Produktoutput sowie der Aufwand Güter Materialinput im Falle des GFK-Werkstoffs im Vergleich zum Stahl geringer und damit dem Bonus Güter-Output zuträglich. Dies wirkt sich positiv auf die Ressourceneffizienz aus.
- Aufgrund des Leichtbaus und des damit verbundenen geringeren Energie-/Kraftstoffverbrauchs übersteigt das Bonus Güter-Output in der Produktlebenszyklusphase »Nutzung« die Effizienzkomponente Aufwand Güter Materialinput sowie die Onera Ressourceninput und Produktoutput. Letztgenannte verringern sich zudem noch: Die Langlebigkeit dieser Produkte von über 25 Jahren ist nachgewiesen. Die Reparaturfähigkeit ist bereits in der Konstruktion vorgegeben; ferner unterliegen die Fahrzeuge zum Erhalt ihrer Langlebigkeit regelmäßigen vorgegebenen Instandhaltungen.

180 Information Stadler Rail AG, Bussnang, Schweiz

- In der Produktlebenszyklusphase »Entsorgung« erhöht sich durch die schlechtere Recycelfähigkeit der GFK-Bauteile im Vergleich zum Stahl das Onus Produktoutput (hier: Abfälle). Gleichzeitig verringert sich der Recyclinganteil, was ebenfalls zu einer Reduzierung des »Bonus Güter Output« beiträgt. Dieser Nachteil wird aber durch den beim RegioShuttle deutlich reduzierten Anteil »Onus Ressourceninput« (hier: Energieverbrauch in der Nutzung) übertroffen. Aufgrund des deutlich geringeren Energiebedarfs in der langen Produktzyklusphase »Nutzung« ist dies der Ressourceneffizienz-bestimmende Schritt im Vergleich zum Stahl-Schienenfahrzeug. Dieses wäre deutlich schwerer und der Energie-/Treibstoffverbrauch derart höher, dass die Ressourceneffizienz entsprechend schlechter ausfällt. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass im Falle eines rein aus Stahl gefertigten Schienenfahrzeugs das Recycling des anfallenden Stahls nicht energie- und emissionsfrei zu realisieren ist, was den Vorteil des Recyclings für die Ressourceneffizienz reduziert.

2.5.4 Energieverbrauch und Materialeffizienz / Ressourceneffizienz: die Bedeutung der Verbindungstechnik

Werkstoffeigenschaften bestimmen maßgeblich die Produkteigenschaften. Produkte bestehen aufgrund ihrer zunehmenden Anforderungskomplexität in der Regel aus mehreren Werkstoffen. Die Verbindungstechnik ist für die Erfüllung der Produkteigenschaften wichtig:

Ein Werkstoff wird erst zu einem nutzbaren Werkstoff, wenn

- eine werkstoffeigenschaftsgerechte Verbindungstechnik vorhanden ist,
- diese dann auch fachgerecht eingesetzt wird und
- die Forderungen des Produktsicherheitsgesetzes¹⁸¹ erfüllt.

181 Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) – Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt, letzte Neufassung vom 08.11.2011 (BGBl., S. 2178, ber. 2012, S. 131

Die Verbindungstechnik darf die Nutzung der Werkstoffeigenschaften für das Produkt nicht nur nicht beeinträchtigen, sondern ihre Aufgabe besteht vielmehr darin, die optimale Nutzung der Werkstoffeigenschaften zu ermöglichen, auch unter ökologischen Gesichtspunkten (siehe Kapitel 1.2 und 2.5.1).

Aufgabe der Verbindungstechnik ist die Ermöglichung der optimalen Werkstoffeignungsnutzung.

Die Gewichtsreduzierung des RegioShuttle konnte für eine Nutzungsdauer von mehr als 30 Jahren eine signifikante Reduzierung des Energie-/Treibstoffverbrauchs und damit eine ebenso signifikante Reduzierung der Schadstoff-Emissionen (Reduzierung Onus Produktoutput) erzielen. Die Gewichtsreduzierung bewirkte eine Optimierung des Bonus Güter Produktoutput und damit der Ressourceneffizienz im Vergleich zum alten Produkt aus Stahl. Die Gewichtsreduktion wurde nur durch die Verbindung der geschweißten Stahl-Fachwerkkonstruktion mit dem damals neuen Werkstoff GFK möglich. Aus ingenieurtechnischer Sicht wurde die Ressourceneffizienz des RegioShuttle als zuletzt durch die richtige Wahl der Verbindungstechnik optimiert.

2.5.5 Energieverbrauch und Materialeffizienz / Ressourceneffizienz: die Bedeutung der Verbindungstechnik »Kleben«

Die Klebtechnik ermöglicht den Erhalt der Werkstoffeigenschaften und damit deren optimale Nutzung zur Erfüllung des Anforderungsprofils (siehe Kapitel 1.2 und 2.5.4). Der RegioShuttle ist ein erfolgreiches Beispiel für die Nutzung des Klebens. Um den Vorteil des damals neuen Werkstoffs GFK zu heben, musste eine belastungsfähige, werkstoffeignungserhaltende und langzeitbeständige Verbindung zwischen GFK und Stahl realisiert werden. Hierzu konnte die Klebtechnik erfolgreich eingesetzt werden:

- Dachsegmente/Außenhautpaneele
→ mit dem metallischen »Fachwerk-Karosseriebau« zusammengeklebt

- Scheiben
 - eingeklebt
- Bugmaske
 - auf die Struktur (→ s. Abb. 47) zur Fixierung mechanisch aufgeschoben und anschließend geklebt.



Abb. 47
 RegioShuttle – Einsatz von GFK im Außenbereich: Leichtbau durch Klebtechnik^{179,180}

Beim Fügen durch Kleben bleiben GFK-Werkstoffeigenschaften (hohe Steifigkeit bei vergleichsweise geringem Gewicht) erhalten! Durch das Kleben wurde ermöglicht, die GFK-Leichtbaueigenschaften optimal zu nutzen und den »RegioShuttle« 25 % leichter als vergleichbare herkömmliche Fahrzeuge aus Stahl zu bauen¹⁸⁰.

Folglich leistet die Klebtechnik hier entscheidende Beiträge, die mit anderen Verbindungstechniken nicht möglich wären: Der ökologische Fußabdruck des Systems ist über die Fahrzeuglebensdauer deutlich kleiner. Zusätzlich ist im Vergleich zu rein geschweißten Konstruktionen nachgewiesenermaßen die Fahrkultur des Regio-Shuttle besser, die Fertigungs- und Betriebskosten sind zudem niedriger. Sogar der Faktor Komfort wirkt sich indirekt positiv auf die Ressourceneffizienz aus. Die höhere Fahrkultur erhöht die Akzeptanz der Bahn beim Kunden und damit die Passagierzahl. Dies wirkt sich positiv auf den CO₂-Äquivalent pro Personenkilometer aus.

Die Klebtechnik hat sich inzwischen in nahezu allen Anwendungsbereichen des Schienenfahrzeugbaus etabliert.

2.6 Nichtlösbare Verbindungs- techniken – ein mögliches Missverständnis, auch für die Kreislaufwirtschaft

2.6.1 »Lösbare« – »nichtlösbare«: grundsätzlich

Produktsicherheitsanforderungen¹⁸² müssen bei jeder Produktentwicklung erfüllt werden. Dies ist bei allen in den Kapiteln 2.1–2.5 aufgeführten Auflagen zu beachten und betrifft Werkstoffe genauso wie Verbindungstechniken (siehe Kapitel 1.2). Werkstoff und Verbindungstechnik sind für die funktionsgerechte und sichere Gestaltung von Produkten gleichermaßen erforderlich.

Werkstoffe und Verbindungstechniken sind für die funktions- wie sicherheitsgerechte Produktgestaltung gleichermaßen notwendig.

Das Fügen stellt den verbindungstechnischen Vorgang (siehe Kapitel 1.4) zum Herstellen fester, dauerhafter und sicherer Verbindungen zwischen zwei oder mehreren Werkstoffen dar.¹⁸³ Technisch wird dabei zwischen »lösbaren«¹⁸⁴ und »nichtlösbaren«

182 Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt Produktsicherheitsgesetz – ProdSG (»Produktsicherheitsgesetz vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178, 2179; 2012 I S. 131), das durch Artikel 435 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist« / 08.11.2011. https://www.gesetze-im-internet.de/prodsg_2011/ProdSG.pdf (Zugriff April 30, 2020)

183 DIN 8580:2003-09, Beuth-Verlag: Berlin, 2003

184 M. Blassing, Lösbare Verbindungen. <https://www.metallbau-stahlbau.net/loesbare-verbinding> (Zugriff April 30, 2020)

bzw. »bedingt lösbaren« Verbindungen unterschieden¹⁸⁵. Und hier liegt ein mögliches Missverständnis zwischen der landläufigen und technischen Begriffsdeutung »lösbar« und »nichtlösbar« vor:

Lösbar:

»Lösbare« Verbindungen müssen genauso wie »nicht- bzw. bedingt lösbare« Verbindungen im Gebrauch »halten«, d. h. dauerhaft, fest und sicher sein. Sie dürfen sich nicht unkontrolliert lösen, sollen sich nach dem Gebrauch jedoch lösen lassen. Eine im technischen Sinne »lösbare« Verbindung ermöglicht die Trennung der Füge Teile ohne Beschädigung der Füge Teile und des Fügeelements. Dieselben Fügeelemente können grundsätzlich zur Wiederherstellung der Verbindung wiederverwendet werden.

Nichtlösbar:

Landläufig wird »nichtlösbar« so verstanden, dass die Verbindung »hält« und sich während des Gebrauchs nicht lösen lässt. Nach herkömmlichem Verständnis lässt sich die Verbindung auch nach dem Gebrauch nicht lösen!

Eine »nichtlösbare« Verbindung kann jedoch im technischen Sinn gelöst werden. In der Regel jedoch nur, wenn dabei die Füge Teile oder Fügeelemente und/oder die gefügten Bauteile zerstört oder beschädigt werden. Dann kann dasselbe Füge Teil oder Fügeelement nicht zur Wiederherstellung der Verbindung eingesetzt werden. Das »Lösen« einer »nichtlösbaren« Verbindung zu Recyclingzwecken durch das Beschädigen eines Füge Teils ist jedoch möglich.

»Lösbar« und »nichtlösbar« – ein mögliches Missverständnis, nicht nur für die Kreislaufwirtschaft.

Ein Beispiel für eine »lösbare« Verbindung ist die klassische Verschraubung. Die Schraube ist hier das Fügeelement (→ s. Abb. 48¹⁸⁶). Die Schraube – und das gilt ausschließlich für Standardschrauben! – wird zur Herstellung der Verbindung fest-

185 M. Blassing, Lösbare Verbindungen. <https://www.metallbau-stahlbau.net/unloesbare-verbinding> (Zugriff April 30, 2020)

186 Adobe Stock 175519195

gezogen und zum Lösen wieder losgedreht. Dieselbe (Standard-) Schraube kann anschließend wieder festgezogen werden. Dafür ist jedoch beim Schrauben die Schädigung des Bauteils immanent und eine Beeinträchtigung der Werkstoffeigenschaften des Bauteils stets gegeben: Durch das Bohren des Schraublochs ist das Bauteil bereits vor dem Fügen geschädigt (→ s. Abb. 7) und der Werkstoff des Bauteils in seinen Eigenschaften beeinträchtigt.

Typische Beispiele für »bedingt bzw. nichtlösbare« Verbindungen stellen Schweiß-, Niet- oder Klebverbindungen dar (→ s. Abb. 10). Eine Schweißverbindung kann genauso wie eine Nietverbindung wieder getrennt werden. Beim Trennen werden die verbundenen Fügeile beschädigt bzw. der Niet zerstört. In beiden Fällen muss bei einer Re-Kombination der Fügeile grundsätzlich neues Fügehilfsmittel (z. B. neues Schweißgut bzw. neue Niete) verwendet werden.

Auch »nichtlösbare« Verbindungen können – auch zu Recyclingzwecken – nach dem Gebrauch getrennt werden.

2.6.2 »Lösbar« – »nichtlösbare«: klebtechnisch

Für die Klebtechnik lohnt ein differenzierterer Blick auf die »Nichtlösbarkeit«:

Die heute in Industrie und Handwerk eingesetzten Klebstoffe sind Fügehilfsmittel, die auf Polymerbasis aufgebaut sind. Polymere unterliegen im Vergleich zu Metallen stark thermischen Einflüssen. Ein Klebstoff reagiert also stärker auf Temperatur als metallische Fügehilfsmittel wie Schweißgut oder Niete. Wird eine bestimmte Temperatur unterschritten, versprödet das Polymer: seine Festigkeit nimmt zu, seine Verformungsfähigkeit nimmt ab. Wird eine bestimmte Temperatur überschritten, verhält es sich genau umgekehrt: das Polymer erweicht, d. h. seine Verformungsfähigkeit nimmt zu, und die Festigkeit des Klebstoffpolymers nimmt gleichzeitig ab. Und damit auch die Festigkeit der Verbindung.



Abb. 48
 Standardschrauben –
 Beispiel

»Nichtlösbar« bedeutet nicht »nicht-trennbar«.

Die Versprödung des Klebstoffs genauso wie seine Erweichung können für das gewollte, kontrollierte Trennen einer Klebverbindung genutzt werden. Das gilt für hochfeste industrielle Klebungen mit der Hauptfunktion der langzeitbeständigen Übertragung mechanischer Lasten¹⁸⁷ genauso wie für den Alltag: Auch das Preisetikett kann leicht und rückstandsfrei vom Geschenk entfernt werden. Dabei ist ein moderater Temperatureinsatz, z. B. durch einen Haarfön, hilfreich. Bei der Re-Kombination einer geklebten Verbindung muss in der Regel dann neuer Klebstoff eingesetzt werden. Eine Wiederverwendung des Klebstoffs ist in Ausnahmen bei Schmelzklebstoffen und Haftklebebändern möglich.

»Nichtlösbare« Klebverbindungen können wieder getrennt werden.

187 H. Mason (Hrsg.), Composite World 2020, National Composite Centre leads dismantlable joints research, <https://www.compositesworld.com/news/national-composites-centre-leads-dismantlable-joints-research> (Zugriff April 30, 2020)

2.7

Erste Schlussfolgerungen

Bei der Bewertung der Ökobilanz eines Produktes ist eine ganzheitliche Betrachtung über den gesamten Produktlebenszyklus erforderlich. Das Herausgreifen von Einzelaspekten führt zu falschen Schlussfolgerungen; die Produktsicherheit muss zudem immer betrachtet werden. Die sichere »bestimmungsgemäße und vorhersehbare Verwendung eines Produkts«¹⁸⁸ darf technologischen Entwicklungswünschen oder ökologischen Zielen nicht untergeordnet werden. Das betrifft grundsätzlich alle Produkte, gleichermaßen die einzusetzenden Werkstoffe sowie alle Verbindungstechniken, also auch das Kleben.

Die Produktsicherheit darf unabhängig davon, welche Verbindungstechnik eingesetzt wird, ökologischen Zielen nicht untergeordnet werden.

Zur Produktsicherheit ist eine Beständigkeit der Klebungen für den Zeitraum der geplanten Produktlebensdauer notwendig. Anhand verschiedener Beispiele (siehe Kapitel 1.7) konnte aufgezeigt werden, dass eine ausreichende Beständigkeit einer Klebung vorteilhaft für die Ökobilanz ist: Flugzeuge fliegen und Schienenfahrzeuge fahren 30 Jahre und länger. Sie werden regelmäßig instandgesetzt. Es ist seit über 20 Jahren Stand der Technik, dass Autoscheiben eingeklebt und dadurch zum torsionsversteifenden und gewichtsreduzierenden Konstruktionselement werden. Die Reparaturfähigkeit einer beschädigten Autoscheibe ist Stand der Technik und steht außer Frage.

188 Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt Produktsicherheitsgesetz – ProdSG (»Produktsicherheitsgesetz vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178, 2179; 2012 I S. 131), das durch Artikel 435 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist« / 08.11.2011. https://www.gesetze-im-internet.de/prodsg_2011/ProdSG.pdf § 3, Absatz 1 / Punkt 2 (Zugriff April 2020)

Klebverbindungen – fachgerecht ausgeführt – sind reparaturfähig.

Klebung sind allein schon aufgrund der in Kapitel 2.6 beschriebenen thermischen Eigenschaften von Klebstoffen trennbar. Recyclingfähige, getrennte Werkstoffe stehen grundsätzlich einer Wiederverwertung zur Verfügung. Obwohl »Kleben« technisch als »nichtlösbare« Verbindungstechnik eingeordnet ist, stellt diese Verbindungstechnik kein grundsätzliches Hindernis für das Recycling dar.

Die Klebtechnik stellt – fachgerecht eingesetzt – kein grundsätzliches Hindernis für das Recycling dar.

Recycelte Sekundärrohstoffe reduzieren die Abhängigkeit der EU von Primärrohstoffen. Der Einsatz von Sekundärrohstoffen erfüllt den Grundgedanken einer Kreislaufwirtschaft und kann zu sinkenden Rohstoffkosten in der EU führen. Ein wesentliches Hindernis für ihren Einsatz und ein wesentlicher Grund, weshalb sie in der EU bisher nur in eher geringem Anteil eingesetzt werden, besteht in ihrer Qualität¹⁸⁹ und in den EU-weiten Qualitätsunterschieden. EU-Qualitätsstandards sind hier notwendig¹⁹⁰. Nicht jedes Produkt muss »reparaturfähig« sein; unabhängig von der Verbindungstechnik kann ein Austausch statt einer Reparatur aus ökologischen (nicht ökonomischen!) Gründen sogar wünschenswert sein.

Hinsichtlich »Energieverbrauch« und »Materialeffizienz/Ressourceneffizienz« ist der Bonus Güter Produktoutput zu optimieren. Dabei ist gleichzeitig der Aufwand Güter Materialinput und die Onera Produktoutput und Ressourceninput zu minimieren. Der

189 E. Gandert, *Plastverarbeiter online*, 2020, In der Rezyklat-Qualität liegt ein Schlüssel. <https://www.plastverarbeiter.de/72782/in-der-rezyklat-qualitaet-liegt-ein-schlüssel/> (Zugriff April 30, 2020)

190 Europäisches Parlament, *Plastikmüll und Recycling in der EU: Zahlen und Fakten*. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20181212STO21610/plastikmull-und-recycling-in-der-eu-zahlen-und-fakten> (Zugriff April 30, 2020)

Recyclinganteil (siehe Kapitel 2.5.1) ist zu berücksichtigen. Die Klebtechnik kann bei fachgerechtem Einsatz zu beidem entscheidend beitragen.

Die Klebtechnik – fachgerecht angewendet – steigert die Material-/Ressourceneffizienz.

Lebenszyklusanalysen (Ökobilanzen/Life Cycle Assessments – LCAs, s.o.) ermöglichen die Bewertung der Umweltwirkungen eines Produkts ganzheitlich über alle Produktlebenszyklusphasen. Die unabdingbare Voraussetzung für eine Ökobilanz/Lebenszyklusanalyse ist die Qualität, Aktualität und Verfügbarkeit zugrunde liegender Daten.

Geklebte Produkte können in der Kreislaufwirtschaft grundsätzlich eingesetzt werden.

3

Klebtechnik:
Kreislaufwirtschaft,
Ökodesign und
Lebenszyklusanalyse
(Life Cycle Assessment –
LCA)

3.1 Einführung

Klebtechnische Fügeprozesse erlauben die nachhaltige Fertigung sicherer und gleichzeitig nachhaltiger Produkte.¹⁹¹ Zudem ermöglichen sie nachhaltige Reparaturlösungen. Diese Aussagen wurden in den vorigen zwei Kapiteln anhand zahlreicher Beispiele belegt.

Eine solch qualitative Aussage trifft für den Einsatz anorganischer Klebstoffe in der Bauwirtschaft genauso zu wie für den Einsatz organischer oder siliziumorganischer Klebstoffe in Produkten, die im Verkehrsmittelbau umfänglich eingesetzt werden. Von einem Haus möchte man in der Regel ein Leben lang was haben.¹⁹² Ein Schienenfahrzeug fährt 40 Jahre.¹⁹³ Die Lebensdauer eines Autos steigt.¹⁹⁴ Das Durchschnittsalter der in Deutschland zugelassenen PKW lag am 01.01.2019 bei inzwischen 9,5 Jahren, wobei 40 % der PKW älter als 10 Jahre sind.¹⁹⁵ Klebstoffe werden jedoch genauso in der Elektronik-¹⁹⁶ und Verpackungsindustrie¹⁹⁷ einge-

191 J. Gegner, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 2008, 39, 33–44, Klebtechnik – multifunktionales Fügen für den Werkstoffeinsatz im 21. Jahrhundert.

192 Deutsches Architektenforum; Lebensdauer von Gebäuden, 2012. <https://www.deutsches-architekturforum.de/thread/10421-lebensdauer-von-gebäuden/> (Zugriff April 2020)

193 M. Schmied; M. Mottschall In Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland (FKZ 363 01 244 / Endbericht); Öko-Institut e. V., Freiburg, 2013; Kapitel 5, S. 94 / Tabelle 57, Daten und Ergebnisse für die Herstellung und Wartung der Fahrzeuge und Waggons.

194 B. Engel; PS Welt. 2018, Werden Autos bald für die Ewigkeit gebaut? <https://www.welt.de/motor/article181378662/Werden-Autos-bald-fuer-die-Ewigkeit-gebaut.html> (Zugriff April 30, 2020)

195 Kraftfahrt-Bundesamt – KBA; https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/fahrzeugalter_node.html (Zugriff April 30, 2020)

196 Industrieverband Klebstoffe e. V., Kleben in der Elektronik. <https://www.klebstoffe.com/die-welt-des-klebens/anwendungsgebiete/elektroindustrie.html> (Zugriff April 30, 2020)

197 Industrieverband Klebstoffe e. V., Papier & Verpackung <https://www.klebstoffe.com/die-welt-des-klebens/anwendungsgebiete/papier-verpackung.html> (Zugriff April 30, 2020)

setzt, deren Produkte^{198,199} heutzutage für eine deutlich knapper bemessene Nutzungslebensphase ausgelegt sind. Für sie scheinen Reparaturlösungen vermeintlich eine geringere Bedeutung zuzukommen als in den beiden zuvor genannten Domänen Bauwirtschaft und Verkehrsmittelbau.

Mit Blick auf klebtechnische Anwendungen wird im vorliegenden Kapitel ein etabliertes und standardisiertes Vorgehen zur Bewertung der Wirkungen eines Produkts auf die Umwelt in den Kontext der Nachhaltigkeit eingeordnet und betrachtet – die Ökobilanz/Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment/LCA).

198 D. Stoller; Die Nutzungsdauer von Elektrogeräten sinkt und sinkt und...; INGENIEUR.de, 2016. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/elektronik/die-nutzungsdauer-elektrogeraeten-sinkt-sinkt/> (Zugriff April 30, 2020)

199 N. Seyring; A. Kaeding-Koppers In Recyclingfähige und nachhaltige Verpackungen; E. Sasse; M. Gößl, Hrsg; IHK für München und Oberbayern: München, 2019; Kapitel 20, S. 9, Serviceverpackungen

3.2 Ökobilanz/Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment/LCA) – Bedeutung für nachhaltige Entwicklungen

Die 17 SDGs (siehe Kapitel 2.1/ Abbildung 38) für eine nachhaltige Entwicklung prägen den aktuellen Ausbau des Nachhaltigkeitsmanagements und vor allem die »Messung und Steuerung von betrieblicher Nachhaltigkeitsleistung«. ²⁰⁰ Für Unternehmen ist dabei das Ziel SDG 12 »Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen« von besonderer Relevanz: Noch in diesem Jahr ist das Unterziel 12.4 »bis 2020 einen umweltverträglichen Umgang mit Chemikalien und allen Abfällen während ihres gesamten Lebenszyklus in Übereinstimmung mit den vereinbarten internationalen Rahmenregelungen erreichen und ihre Freisetzung in Luft, Wasser und Boden erheblich verringern, um ihre nachteiligen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt auf ein Mindestmaß zu beschränken« ²⁰¹ umzusetzen. A. Baumast ²⁰² zitiert T. Dyllick mit der Einschätzung, dass sich unternehmerische Nachhaltigkeit (engl.: corporate sustainability) weiterentwickelt: Das »Business as usual«, früher ökonomisch und vom Unternehmenswert (engl.: shareholder value) getrieben sowie aus dem Unternehmen heraus gesehen, wird in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium nach drei zentralen Entwicklungsschritten zu einer »Unternehmerischen Nachhaltigkeit 3.0« entwickelt. Diese umfasst zusätzlich ökologische und

200 A. v. Ahsen In Betriebliche Nachhaltigkeitsleistung messen und steuern – Grundlagen und Praxisbeispiele; Verlag Eugen Ulmer: Stuttgart, 2019; S. 31–41, Einführung in die Nachhaltigkeitsmessung in Unternehmen.

201 Zugänglich unter <https://www.eda.admin.ch/agenda2030/de/home/agenda-2030/die-17-ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung/ziel-12-fuer-nachhaltige-konsum-und-produktionsmuster-sorgen.html> (Zugriff April 30, 2020).

202 A. Baumast In Betriebliche Nachhaltigkeitsleistung messen und steuern – Grundlagen und Praxisbeispiele; Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart: 2019; S. 18–30, Geschichte und aktuelle Herausforderungen des betrieblichen Nachhaltigkeitsmanagements.

soziale Anliegen (→ s. Abb. 49). Diese Anliegen erweitern die Wertschöpfung durch Schaffen eines gesellschaftlichen Nutzens und richten die Unternehmensperspektive von außen nach innen aus. Ein zusätzlicher Antrieb ist aktuell die zunehmende Regulation von Bereichen, die zeitweilig im Rahmen von Selbstverpflichtungen berücksichtigt wurden. Insbesondere werden auch kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) entlang der Lieferkette ihrer Berichtspflicht mit der Nennung nicht-finanzieller Kennzahlen nachkommen müssen. Dem Leitsatz »You can't manage what you can't measure«²⁰³ folgend, ist für Unternehmen zur Erfassung des aktuellen Ist-Stands eine Erfassung ihrer Nachhaltigkeitsleistung essenziell, welche auf der Produkt-, der Prozess- oder der Standortebene eingesetzt werden kann.

Wie schon in Kapitel 2.5.2 ausgeführt wurde, stellt mit Blick auf die Produktebene die seit den 1970er Jahren entwickelte Lebenszyklusanalyse²⁰⁴ (Ökobilanz/Life Cycle Assessment – LCA) derzeit für Unternehmen die umfassendste Methode zur Bewertung der Umweltwirkungen eines ihrer Produkte in jeder Lebensphase dar.²⁰⁵ Sie erlaubt schon in der Produktentwicklungsphase zur Diskussion stehende Ideen zu bewerten und solche Verbesserungsmöglichkeiten zu identifizieren, welche helfen, negative Umweltauswirkungen während des gesamten Produktlebenszyklus zu verringern.

Eine Ökobilanz erlaubt die frühzeitige Bewertung von Produktideen.

Breit angelegte, umfassende Analysen, die den gesamten Lebenszyklus berücksichtigen, liefern einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung, wie sie in den Kapiteln 2.1–2.4 dargestellt ist. Neben lokal, regional, national und global miteinander verbundenen ökologischen und wirtschaftlichen Bestandteilen liefern auch

203 Peter Drucker, 1909–2005

204 A. Inaba, N. Itsubo, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2018, 23, S. 2271–2275; *Development of Global Scale LCIA Method – Preface*.

205 European Commission; European Platform on Life Cycle Assessment. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/> (Zugriff April 30, 2020)

soziale Komponenten einen essentiellen Nachhaltigkeitsbeitrag. Sie bilden weltweit den Rahmen für neue Technologien. Nachhaltigkeit ist in letzter Konsequenz ein wesentlicher Antrieb und das Ziel generationsübergreifender und verantwortungsbewusster Produktentwicklung. In der Umsetzung und Praxis streben die dargestellten Ansätze²⁰⁶ ein individuelles Gleichgewicht für jedes Produkt zwischen Wünschen und Ansprüchen unterschiedlicher Zielgruppen, Märkte und Akteure an.²⁰⁷ → s. Abb. 49²⁰⁸

Abb. 49
Dimensionen der Nachhaltigkeit:
Umwelt – Wirtschaft – Soziales



Auch der Entwicklung geklebter Produkte sind demzufolge Rahmenbedingungen gesetzt. Für das dazu notwendige iterative

206 Siehe Kapitel 2.1–2.4

207 W. Klöpffer; I. Renner; in: Environmental Management Accounting for Cleaner Production; S. Schaltegger et al. Hrsg.; Springer Science + Business Media B. V., 2008; Chapter 5 Life-Cycle Based Sustainability Assessment of Products

208 A. Krämer; The Sustainable People GmbH: Hamburg. <https://thesustainable-people.com/das-drei-saeulen-modell-der-nachhaltigkeit/> (Zugriff April 30, 2020)

Vorgehen stehen zunehmend vernetzt eingesetzte Methoden, virtuelle Werkzeuge sowie stetig wachsende Datenbanken zur Verfügung. In diesen sind die Messlatten zur Ermittlung der ökologischen, ökonomischen oder sozialen Effekte einer in die eine oder andere Richtung angedachten Entwicklung hinterlegt.

Neben bilanzierenden Ansätzen, etwa zur Erstellung von Umweltbilanzen für Unternehmen oder Betriebsbereiche, sind solche lebenszyklusbasierte Methoden im Einsatz, mit denen einzelne Produkte bewertet werden. Für eine umfassende Betrachtung (→ s. Abb. 50) aller Nachhaltigkeitsfacetten des Lebenszyklusmanagements im Rahmen abgesteckter, beispielsweise regionaler oder globaler Systemgrenzen stehen Methoden und Verfahren mit unterschiedlichen Schwerpunkten zur Verfügung.²⁰⁹ Swarr et al.²¹⁰ schlagen für eine Nachhaltigkeitsabschätzung eine summarische Herangehensweise vor, die auf den folgenden drei Methoden fußt:

- LCC – Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing; auch Life Cycle Cost Assessment – LCCA) stellt eine Kostenmanagement-Methode dar, die entweder aus der Produzenten- oder Produktnutzer-Perspektive durchgeführt werden kann. Sie folgt sich weiterentwickelnden Verhaltensregeln²¹⁰ und kann nach verschiedenen Verfahren (z. B. DIN EN 60300-3-3: »Anwendungsleitfaden Lebenszykluskosten«²¹¹) unter Berücksichtigung der Produktnutzungs- und -entsorgungsphase sowie versteckter Kosten durchgeführt werden.
- LCA – Ökobilanz (Life Cycle Assessment/Lebenszyklusanalyse) folgt den Vorgaben der DIN EN ISO 14040^{165–169} und wird in den nachfolgenden Unterkapiteln eingehender betrachtet.

209 A. S. Matharu, K. Lokesh In Green Chemistry Series No. 60, Green Chemistry for Surface Coatings, Inks and Adhesives: Sustainable Applications; R. Höfer, A. S. Matharu, Z. Zhang, Hrsg.; The Royal Society of Chemistry: London, 2019; S. 1–17, Green Chemistry Principles and Global Drivers for Sustainability – An Introduction.

210 vereinfacht: Lebenszyklus-Nachhaltigkeitsbewertung = LCA + LCC + SLCA; nach: T. E. Swarr, D. Hunkeler, W. Klöpffer, H.-L. Pesonen, A. Ciroth, A. C. Brent, R. Pagan, International Journal Life Cycle Assess 2011, 16, S. 389–391, Environmental life-cycle costing: a code of practice; DOI 10.1007/s11367-011-0287-5.

211 Normenreihe DIN EN 60300, Zuverlässigkeitsmanagement, Beuth-Verlag, Berlin, 2010–2014

- S-LCA²¹² – Soziale oder auch gesellschaftliche Lebenszyklus-Analyse (Social and Societal Life Cycle Assessment) erfasst soziale, gesellschaftliche und sozio-ökonomische Aspekte (namentlich Auswirkungen mit Blick auf Menschenrechte, Arbeitsbedingungen, Gesundheit und Sicherheit, kulturelles Erbe, Governance oder sozio-ökonomische Nachwirkungen). Sie folgt den Vorgaben der DIN EN ISO 14040¹⁶⁵⁻¹⁶⁹ und ergänzt die ökologische Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz/LCA) sowie die Lebenszykluskostenrechnung (LCC).

Ein Beispiel zeigt eine von der Universität von Kalifornien, Berkeley, 2012 veröffentlichte Studie²¹³, in deren Rahmen LCA und LCCA für einen Anwendungsfall aus der Automobilherstellung eingesetzt wurden. Als Füge-technologien wurden Kleben, Widerstandspunktschweißen und Nieten für überlappende Aluminiumbleche untersucht. Die Untersuchung wurde mit Blick auf die Erreichung der Leistungsanforderungen mithilfe einer multiattributiven Analyse durchgeführt und erfasste die Umwelteinwirkungen sowie Kosten auf Basis von Energieverbrauch und Materialdurchsatz. Eine mehrere Kriterien einbeziehende Pareto-Optimierung²¹⁴ mit dem Ziel, die ökonomischen Zielwerte nicht zu Lasten der ökologischen zu erreichen, zeigte, dass die vergleichende Bewertung der Füge-techniken von der erreichbaren Beanspruchbarkeit der gefertigten Bauteile abhängt. Die erreichbare Beanspruchbarkeit wurde mit einem Materialermüdungs-Ansatz erfasst. Dazu wurden die Verbindungen mit 2 Millionen Lastwechseln beansprucht. Beim Vergleich erwiesen sich in abgestufter Reihung die niet- und die klebtechnische Lösung als kostengünstiger, die punktschweiß- und die klebtechnische Lösung als umweltfreundlicher. Bei gleicher Gewichtung ökonomischer und ökologischer Aspekte lagen

212 zugänglich über <https://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/life-cycle-approaches/social-lca/>, insbesondere Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products; erhältlich unter <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2009-Guidelines-for-sLCA-EN.pdf> (Zugriff April 30, 2020)

213 J. M. Chien, K. C. McKinstry, C. Baek, A. Horvath, D. Dornfeld In Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering; D. Dornfeld, B. Linke, Hrsg.; Leveraging Technology for a Sustainable World; Springer: Berlin, Heidelberg, 2012, S. 287–292, Multi-objective Analysis on Joining Technologies. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29069-5_49

214 J. Weimann In Wirtschaftspolitik – Allokation und kollektive Entscheidung; Springer (4. Auflage): Berlin, 2006; Kapitel 1.2, S. 17, Die Grundposition.



die klebtechnischen und punktschweißtechnischen Lösungen gleichauf auf Platz 1.

Für ein lebenszyklusbasiertes Herangehen gemäß der DIN EN ISO 14040¹⁶⁵⁻¹⁶⁹ sind weder die digitalen Tools vorgeschrieben noch ist das methodische Vorgehen festgelegt. In einem höheren Detaillierungsgrad lässt sich dies an mehreren Aspekten festmachen. Die Datenqualität, die bei einem naturgemäß iterativen LCA-Vorgehen erreicht wird, kann mit steigendem Aufwand weiter erhöht werden. Dies ist gegeben, wenn etwa auf einem Screening-LCA

Abb. 50
Konzepte und digitale
Werkzeuge im Lebens-
zyklusmanagement

und einer vereinfachten LCA eine komplette Ökobilanz/Lebenszyklusanalyse mit verfeinerter Zieldefinition folgt.²¹⁵

Wie Finkbeiner et al.²¹⁶ ausführen, legt die DIN EN ISO 14040 – 44¹⁶⁵⁻¹⁶⁹ den iterativen Prozess als Basis für die Erstellung einer Ökobilanzstudie fest. Der Antrieb zur Durchführung einer Ökobilanz (LCA) kann aus behördlichen Regulations- oder unternehmensspezifischen Compliance-Vorgaben resultieren oder, wie im 21. Jahrhundert, politikgetrieben und auf Nachhaltigkeit ausgerichtet sein.²¹⁷

Eine Ökobilanzmethode sollte machbar, genau, nachvollziehbar, aussagekräftig und robust sein.

Generell wird jede Methode zur Ökobilanz (Lebenszyklusanalyse/LCA) an mehreren Kriterien gemessen. Sie sollte machbar, genau, nachvollziehbar, anregend aussagekräftig sowie robust sein.²¹⁸ Der grundsätzlichen Fragestellung bei der Zieldefinition und der Festlegung des Untersuchungsrahmens einer LCA entsprechend können aktuell zwei methodisch verschiedene Herangehensweisen betrachtet werden:^{217, 218}

- die zuteilende Ökobilanz/Lebenszyklusanalyse (attributional LCA; ALCA) und
- die Folgen betrachtende Ökobilanz/Lebenszyklusanalyse (consequential LCA, CLCA).

215 M. Stevanovic, K. Allacker, S. Vermeulen, *Sustainability* 2019, 11, S. 856 Development of an Approach to Assess the Life Cycle Environmental Impacts and Costs of General Hospitals through the Analysis of a Belgian Case. doi:10.3390/su11030856.

216 M. Finkbeiner, V. Bach, A. Lehmann; »Environmental Footprint: Der Umwelt-Fußabdruck von Produkten und Dienstleistungen«; Im Auftrag des Umweltbundesamtes verfasster Abschlussbericht; ISSN 1862-4804; Dessau-Roßlau, 2018.

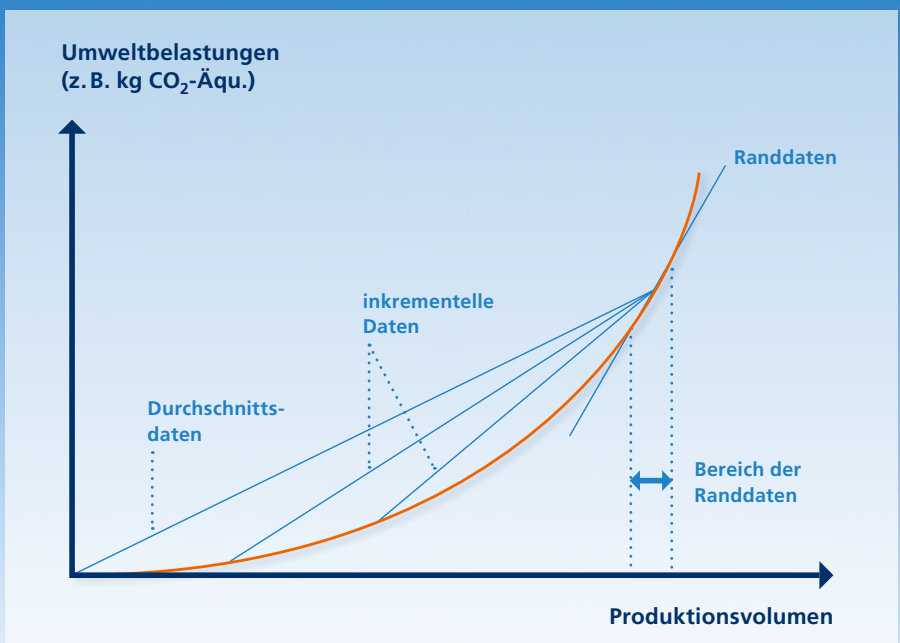
217 M. C. McManus, C. M. Taylor, *Biomass and Bioenergy* 2015, 82, S. 13–26, The changing nature of life cycle assessment«; <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.024>

218 T. Ekvall In *Sustainability Assessment at the 21st Century*; M. J. Bastante-Ceca, Hrsg; IntechOpen: London, 2020; Attributional and Consequential Life Cycle Assessment; DOI: 10.5772/intechopen.78105.

Bei der ALCA wird der Anteil an den globalen Umwelt-Onera bewertet, der einem Produkt zuzuteilen ist. Die ALCA ist durch vergleichsweise enge Umgrenzungen des betrachteten Systems gekennzeichnet und erlaubt eine unmittelbare Quantifizierung der Einwirkungen. Bei der CLCA wird bewertet, wie durch Herstellung und Nutzung eines Produkts die globalen Umwelt-Onera beeinflusst werden. Die CLCA ist durch sehr weite Umgrenzungen des betrachteten Systems gekennzeichnet und erlaubt Projektionen in die Zukunft.

Beide Herangehensweisen unterscheiden sich nicht zuletzt in der Art der einzubeziehenden und folglich zu erhebenden oder abzufragenden Daten. Während ALCA im Wesentlichen auf Durchschnittsdaten unter Maßgabe der Umgrenzungen des Herstellungssystems zurückgreift, berücksichtigt CLCA inkrementelle und auch marginale Daten (→ s. Abb. 51).

Abb. 51
Darstellung von
Durchschnittsdaten,
inkrementellen
Daten und marginalen
Daten²¹⁸



Für eine Weiterentwicklung der Ökobilanz (Lebenszyklusanalyse/LCA) sind aktuell noch einige Aufgaben durchzuführen:²¹⁷

- In Foren ist die Integration von ALCA- und CLCA-Experten zu steigern.
- Die Entwicklung effektiver und objektiver digitaler Tools ist mit Vertretern von Endanwendern voranzutreiben.
- Transparente Mechanismen sind zu entwickeln, um die (Mess-)Unsicherheit und die Vergleichbarkeit von LCA-Studien auszudrücken.
- Durch Datensammlung oder -ermittlung sollen Datenlücken geschlossen werden.
- LCA-methodische Rückkopplungsmechanismen sind zu erforschen und zu validieren.

**Voraussetzung einer Ökobilanz
sind die zugrunde liegenden Daten.**

Im Sinne einer seriösen Ökobilanz (Lebenszyklusanalyse/LCA) stellen Qualität, Richtigkeit, Aktualität und Verfügbarkeit der zugrunde liegenden Daten eine unabdingbare Voraussetzung einer solchen quantitativen Betrachtung dar (siehe Kapitel 2.5.2). Hierfür erfahren folgende datenbezogenen Aspekte hinsichtlich der digitalen Transformation in der industriellen Produktion eine hohe Dynamik:

- Mit Blick auf die Datenqualität sind im Rahmen des Umweltprogramms der Vereinten Nationen die auch »Shonan Guidance Principles« genannten Prinzipien für LCA-Datenbanken beziehungsweise deren Daten erarbeitet.²¹⁹
- Eine repräsentative und handhabbare Anzahl sozialer Indikatoren sind mit der Funktionseinheit eines Produktsystems quantitativ in Bezug zu setzen.²⁰⁷
- Das Management von Forschungsdaten folgt Prinzipien der Implementierung nachhaltiger Entwicklungen, nach denen der

²¹⁹ Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases, A basis for greener processes and products (G. Sonnemann, B. Vigon; Hrsg.) United Nations Environment Programme, 2011.

Lebenszyklus eines Produkts von Forschungsergebnissen und wissenschaftlichen Erkenntnissen gestaltet wird.^{220,221}

Die einer Ökobilanz zugrunde liegenden Daten sollten FAIR sein.

Beispielhaft zu nennen sind hier die Richtlinien der Europäischen Kommission für Horizon 2020²²², dem Rahmenprogramm der Europäischen Union für Forschung und Innovation. Danach werden insbesondere Materialforschungsdaten FAIR (findable (auffindbar), accessible (zugänglich), interoperable (verträglich, zusammenpassend) and reusable (wiederverwendbar) gestaltet. Die Verwirklichung FAIRer Daten²²³ innerhalb des technischen Ökosystems basiert auf

- Datenstandards
- Metadatenstandards
- gemeinsamen Vokabularien und
- Ontologien*.

* Eine Ontologie stellt ein strukturiertes Netzwerk von Informationen mit logischen Relationen dar. Dabei handelt es sich um eine formal geordnete und meist sprachlich gefasste Darstellung, die definiert, wie allgemeines sowie spezifisches Wissen in digitalisierter und formaler Weise organisiert und zwischen Anwendungsprogrammen (beispielsweise »Apps«) und realen Anwendungen ausgetauscht wird. Dazu enthält die Ontologie

-
- 220 S. Deng, X. Hu In KMIR 2014 – Knowledge Maps and Information Retrieval, Proceedings of the First Workshop on Knowledge Maps and Information Retrieval (P. Mutschke, P. Mayr, A. Scharnhorst; Hrsg.) co-located with International Conference on Digital Libraries 2014 – ACM/IEEE Joint Conference on Digital Libraries (JCDL 2014) and International Conference on Theory and Practice of Digital Libraries (TPDL 2014) (DL 2014), London, 2014, Creating a Knowledge Map for the Research Lifecycle.
- 221 DIN EN ISO 14067:2019-02, Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung, Beuth-Verlag: Berlin, 2019
- 222 H2020 Programme – Guidelines on FAIR Data Management in Horizon 2020 EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Research & Innovation, Version 3.0, 26. Juli 2016.
- 223 »Turning FAIR into reality Final Report and Action Plan from the European Commission Expert Group on FAIR Data«; European Commission Expert Group on FAIR Data; 2018 Directorate-General for Research and Innovation; European Commission, 2018.

sowohl zu Schlussfolgerungen als auch zur Gewährleistung ihrer Verbindlichkeit Regeln.²²⁴ Diese Auffassung lehnt sich an die Ausführungen des European Materials Modelling Council (EMMC) mit Blick auf die interdisziplinäre Ontologie European Materials Modelling Ontology (EMMO) an, welche als Ontologie für die Anwendung aus dem Feld der wissenschaftlichen Anwendung heraus aufgebaut wurde und welche physikalische Konzepte wie Elementarteilchen, den Welle-Teilchen-Dualismus, die Endlichkeit des Raums und Zeitspannen einbindet.

Sie helfen, Missverständnisse beim Datenaustausch zwischen Informationssuchenden und Informationsanbietern vorzubeugen und erlauben die ganzheitliche Betrachtung von Produkten. Die sehr zahlreichen Typen produktbezogener Daten lassen sich entsprechend der Skizze in Abbildung 52 erahnen.

FAIRe Daten vermeiden Missverständnisse beim Datenaustausch und erlauben ganzheitliche Produktbetrachtungen.

Diese Daten finden Einzug in die grundlegenden Elemente des Produkt-Lebenszyklus-Managements (PLM)²²⁵ und erlauben die Beschreibung von Prozessen, Methoden und Aspekten der Informations- und Kommunikationstechnologie (engl.: Information and Communication Technology, ICT), wie sie in Abbildung 53 skizziert sind. Dabei werden die drei Produktlebenszyklusphasen

- Produktlebensbeginn (engl.: Beginning of Life – BOL), welcher Planung, Design und Herstellung einbezieht,
- Produktlebensmitte (engl.: Middle of Life – MOL), welche Verteilung, Nutzung und Pflege (etwa Reparatur, Instandsetzung und Unterhalt) umfasst und
- Produktlebensende (engl.: End of Life, EOL), welches im Sinne einer Rückwärtslogistik eine Rückkehr in das Unternehmen mit dem Ziel der Demontage, des Recyclings, der Wiederaufbereitung oder der Entsorgung bedeutet²²⁵,

224 Mit weiteren Referenzen zugänglich unter <https://emmc.info/emmo-info/> (Zugriff April 30, 2020)

225 J. Stark, Product Lifecycle Management – 21st Century Paradigm for Product Realisation, Springer-Verlag: London, 2011, DOI 10.1007/978-0-85729-546-0

miteinander verbunden. Die zeitliche Dimension dieser Abschnitte wird in den Graphiken durch eine im Kreis umlaufende »Achse« repräsentiert. Deren Darstellung führt schließlich zu einer dreiseitigen Pyramide, deren Basiskanten und -ecken jeweils eine das Produkt »tragende« Triade bilden.

Herangehensweisen, die sich auf eine Ontologie stützen, können zukünftig nachhaltige, geklebte Produkte begleiten.

In Kapitel 5.6 wird in einem Tripodenmodell veranschaulicht, wie ontologiebasierte Herangehensweisen zukünftig nachhaltige, klebtechnisch gefertigte Produkte begleiten können. → s. **Abb. 52**²²⁶ und **Abb. 53**²²⁷

Der erforderliche Informationsfluss im PLM ist in Abbildung 54 anschaulich wiedergegeben.

Da Werkstoffe, Maschinen und Menschen beteiligt sind, findet sich im PLM nebeneinander die materialbezogene, die prozessbezogene und die informationsbezogene Ebene. Deren Anordnung zueinander, die jeweils maßgeblichen Begrifflichkeiten sowie die Beziehungen zwischen diesen und der Austauschablauf untereinander sind in Abbildung 55 durch Pfeile wiedergegeben und in der ontologischen Repräsentation des Produktlebenszyklus festgehalten.

Im Produktlebenszyklusmanagement interagieren die Ebenen Material, Prozess und Wissen.

Der Kreis unter Einbeziehung ganzheitlicher Aspekte schließt sich mit Blick auf die Ausführungen des European Materials Modelling

226 J. N. Otte, D. Kiritsis, M. M. Ali, R. Yang, B. Zhang, R. Rudnicki, R. Rai, B. Smith, *Applied Ontology*, 2019, 14/2, S. 179–197, An ontological approach to representing the product life cycle.

227 S. Terzi, A. Bouras, D. Dutta, M. Garetti; *Int. J. Product Lifecycle Management* 2020, 4/4, S. 360–389, Product lifecycle management – From its history to its new role.

Abb. 52
Typen produktbezogener Daten
(BoL: Beginning of Life / MoL: Middle of Life / EoL: End of Life)

Die nicht im Text verwendeten Abkürzungen bedeuten: Product Data Management (PDM), Computer Aided »method« (Cax), Manufacturing Process Management (MPM), (CPD), Project Portfolio Management (PPM), Computer Aided Design (CAD), Electronic Design Automation (EDA), Computer Aided Manufacturing (CAM), (AEC), Computer Aided Quality Control (CAQ), Maintenance, Repair and Operations (MRO).

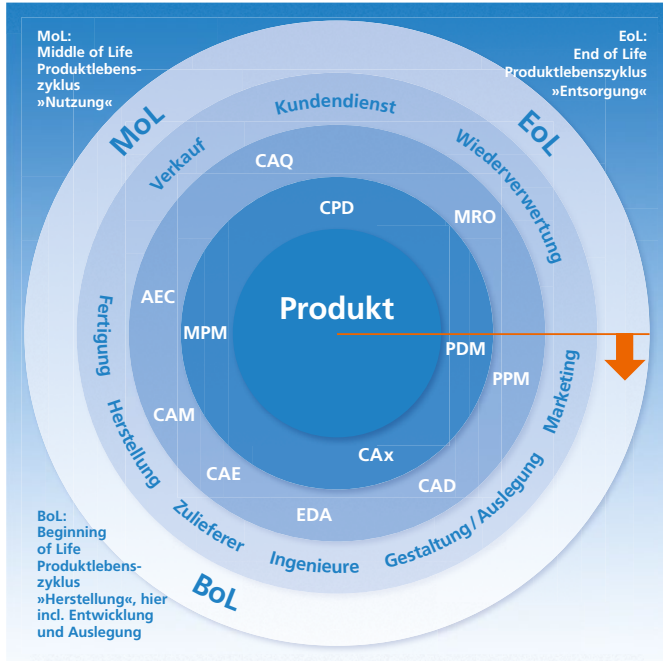
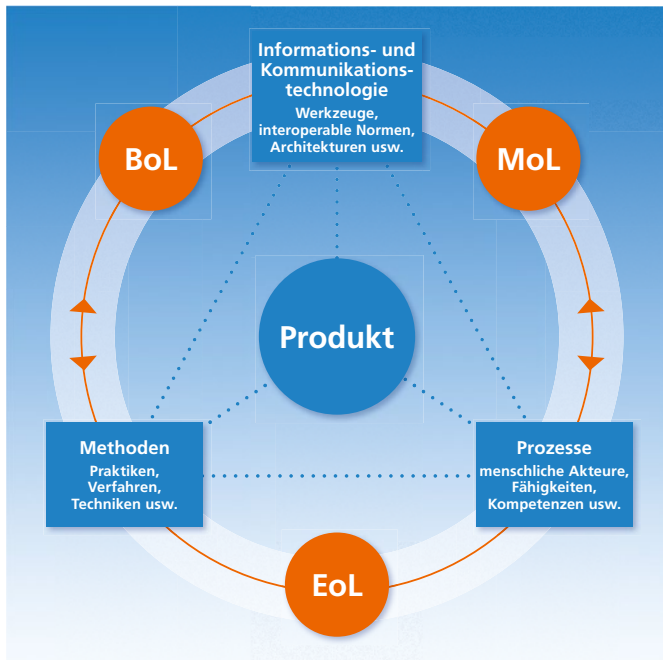
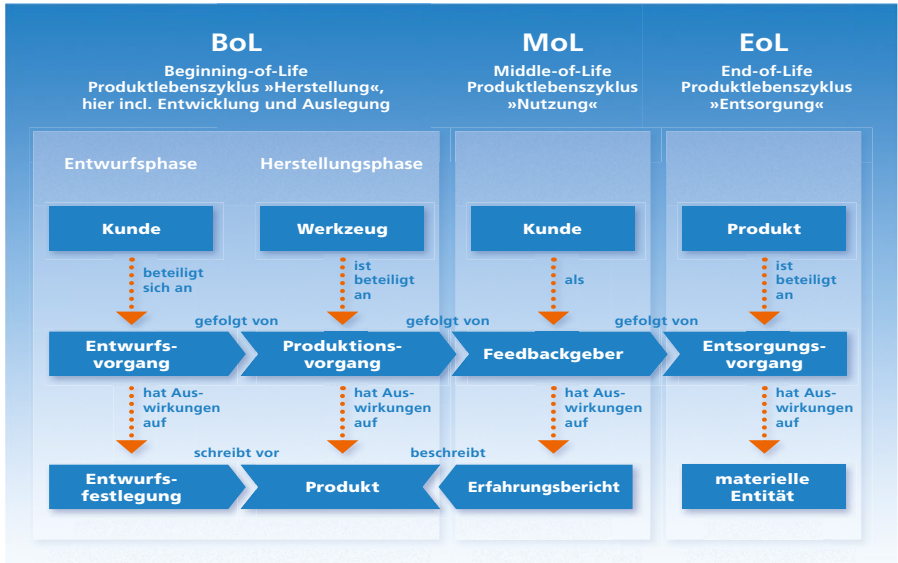


Abb. 53
Grundlegende Elemente des Produktlebenszyklusmanagements (PLM)





Council (EMMC)²²⁸ und auf die unter dessen Federführung entwickelte interdisziplinäre Ontologie European Materials Modelling Ontology (EMMO). → s. Abb. 55

Abb. 54
Grundsätzliche schematische Darstellung des Informationsflusses im Produktlebenszyklusmanagement (PLM)²²⁵

Ontologien bilden die Brücke von Informationen zu Daten und Wissen.

Wie vom EMMC herausgearbeitet wurde, stellen Ontologien die Brücke zu Daten und Wissen (»bridge to data and knowledge«) dar. Für Anwender im Zusammenspiel mit Materialherstellern und industriellen oder institutionellen Softwareeigentümern (engl.: software owners) bieten sie, indem mehrere Modelle in verknüpften Arbeitsplänen (engl.: workflow) miteinander vernetzt werden, eine nachhaltige Chance zur Beschleunigung

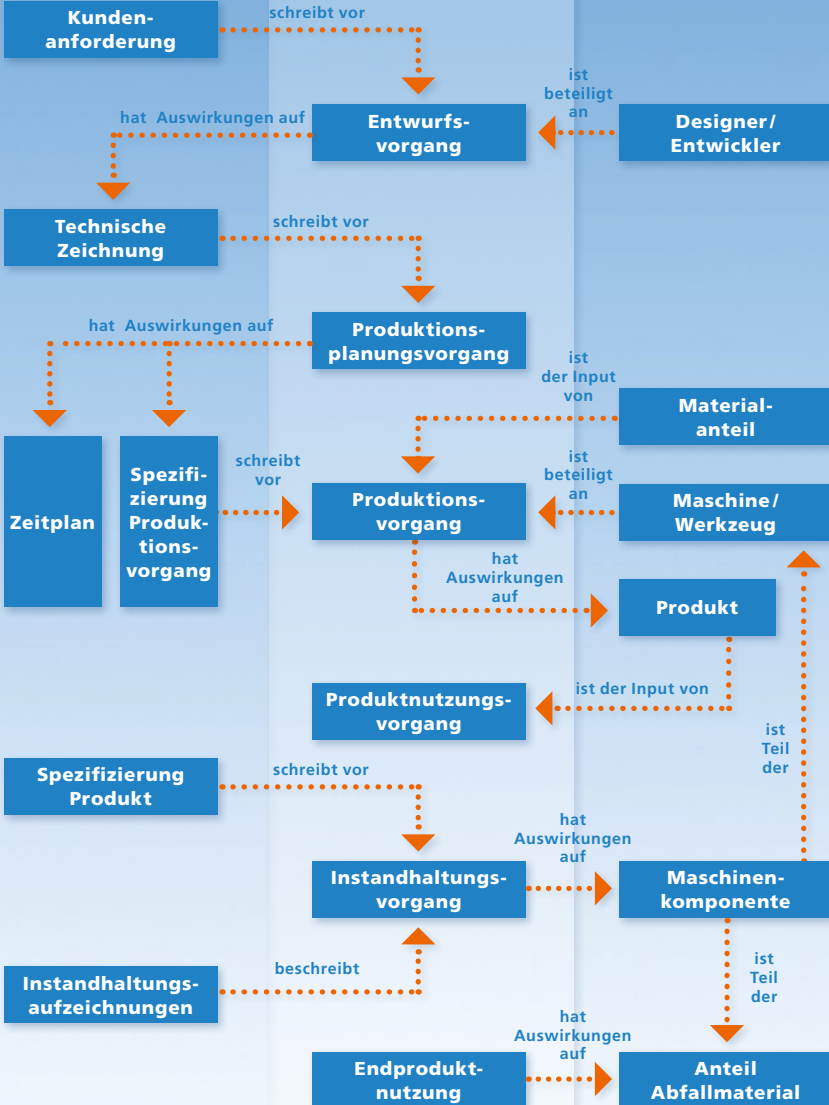
228 Mit weiteren Referenzen zugänglich unter <https://emmc.info/emmo-info/> ; (Zugriff April 30, 2020)



Einheit Informationsinhalt

Prozess

materielle Entität



der Material- und Produktentwicklung.²²⁹ Die Zielsetzung des EMMC als Koordinierungs- und Unterstützungsmaßnahme (engl.: Coordination and Support Action, CSA) im Rahmen der Horizon 2020-Initiative der Europäischen Kommission war explizit, dass die Materialmodellierung und -simulation ein wesentlicher und ganzheitlicher Teil des Produktlebenszyklusmanagements (»integral

Links: Abb. 55
Detaillierte schematische Darstellung des Informationsflusses im Produktlebenszyklusmanagement (PLM)²²⁵

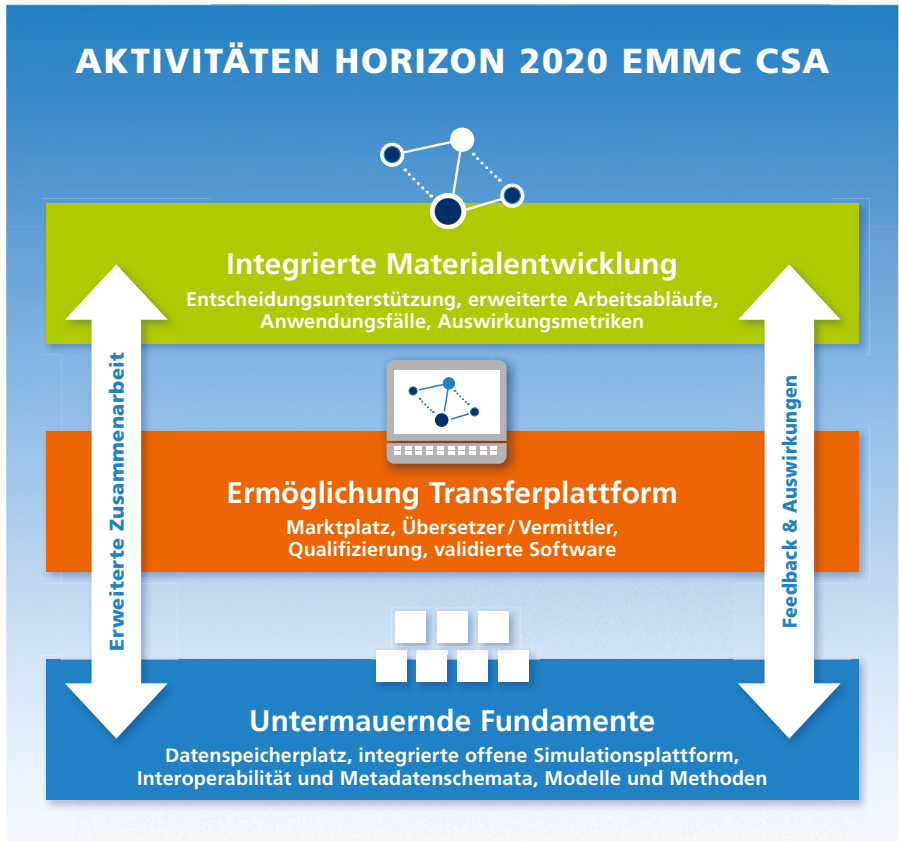


Abb. 56
 Übersicht über die Aktivitäten des Horizon 2020-Projekts EMMC-CSA

229 EMMC-CSA European Materials Modelling Council; »Report on Workshop on Interoperability in Materials Modelling«; IntOp2017, Cambridge, 7./8. November 2017; zugänglich unter https://emmc.info/wp-content/uploads/2018/04/EMMC-CSA_-OutcomeCambridgeFW.pdf (Zugriff April 30, 2020)

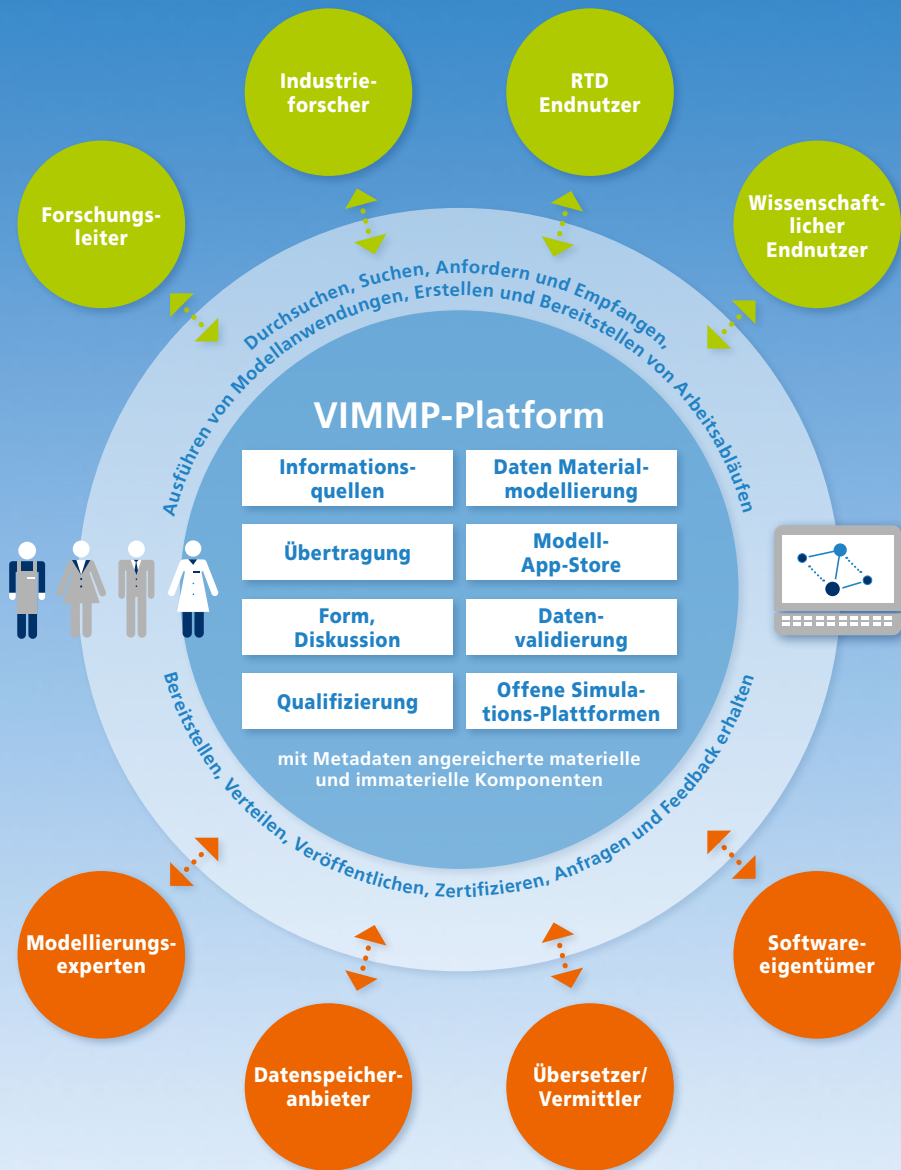
Rechts: Abb. 57
Konzept eines digitalen Marktplatzes für Produkte zur Materialmodellierung

part of product life cycle management«) werden.²³⁰ Eine Übersicht über die Aktivitäten dieser 2019 abgeschlossenen europäischen Koordinierungs- und Unterstützungsmaßnahme und des auch darüber hinaus weiterhin sichtbar aktiven EMMC, der 2019 etwa 1000 registrierte Mitglieder umfasste, ist in Abbildung 56 dargestellt. → s. **Abb. 56**²³¹ und **Abb. 57**²³²

Virtuelle Marktplätze beispielsweise werden für den Austausch materialbezogener Datenaustausch aufgebaut.

Initiiert von der Europäischen Kommission werden als Anlaufstellen für einen Austausch materialbezogener Daten aktuell beispielsweise virtuelle Marktplätze aufgebaut. Exemplarisch ist in Abbildung 57 das Konzept einer seit 2018 im Rahmen des Horizon 2020-Verbundforschungsprojekts »Virtual Materials Marketplace (VIMMP)«²³³ entwickelten und implementierten, einfach zugänglichen und nutzerfreundlichen zentralen Stelle (engl.: hub) dargestellt. Das Konzept ist als zweiseitiger, Web-basierter und quelloffener Marktplatz (engl.: open-source market place) für den

- 230 E. Ghedini, A. Hashibon, J. Friis, G. Goldbeck, G. Schmitz; »EMMO – The European Materials Modelling Ontology«; Materials Ontology Workshop, 29. Juni 2018, Brüssel.
- 231 European Materials Modelling Council, zugänglich unter <https://cordis.europa.eu/project/id/723867/reporting/de> (Zugriff April 30, 2020)
- 232 Graphik entsprechend der Homepage www.vimmp.eu. Die Bildunterschrift lautet: »VIMMP-Marktplatzkonzept: dient allen Beteiligten und erleichtert den Austausch zwischen Anbietern und Verbrauchern von Produkten und Dienstleistungen. Der Marktplatz bietet Endbenutzer-Schnittstellen zu Informationen, Ressourcen, Diskussionsforum, Datenbanken und Repositorien, Übersetzungs- und Schulungsdienstleistungen, validierte Modelle und Modellierungsanwendungen. Er eröffnet die Möglichkeit, offene Simulationsplattformen zu nutzen, um Arbeitsabläufe zu erstellen und einzusetzen und Materialmodellierungsanwendungen über cloud-basierte Computerressourcen auszuführen«; VIMMP »Virtual Materials Market Place« (2018–2021). Projekt finanziert aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm »Horizont 2020« der Europäischen Union im Rahmen der Zuschussvereinbarung Nr. 760907.
- 233 Virtual Materials Market Place (VIMMP), Grant agreement ID: 760907, Funding Scheme: IA – Innovation action; zugänglich über <https://cordis.europa.eu/project/id/760907> sowie <https://www.vimmp.eu/> (Zugriff April 30, 2020)



Austausch von Produkten zwischen Anwendern oder Anbietern im Zusammenhang mit der Modellierung von Materialien gestaltet. Daten, Methoden und Expertisen finden auf einem solchen Marktplatz zusammen und bilden die Basis für Ideen zu einer nachhaltigen Produktentwicklung.

Auf virtuellen Marktplätzen ausgetauschte Daten, Methoden und Expertisen bilden zukünftig die Basis nachhaltiger Produktentwicklungsideen.

Im Zuge nachhaltiger Entwicklung sind also die Anbieter technologischer Konzepte und technischer Lösungen verpflichtet, ihren Beitrag dazu beizusteuern, dass der für ein Produkt zu bezahlende Preis für die Umwelt nicht höher ist als für Verbraucher/Endanwender oder Hersteller. Eine solchermaßen begründete Herangehensweise und Zusammenarbeit aller an der Materialentwicklung zusammenarbeitenden Vertreter aller drei Säulen der Nachhaltigkeit (→ s. Abb. 49) kann durch bewusste und gezielte Beiträge zu FAIRen Datenprinzipien und zum Austausch materialbasierter Informationen technologisch wesentlich unterstützt werden.

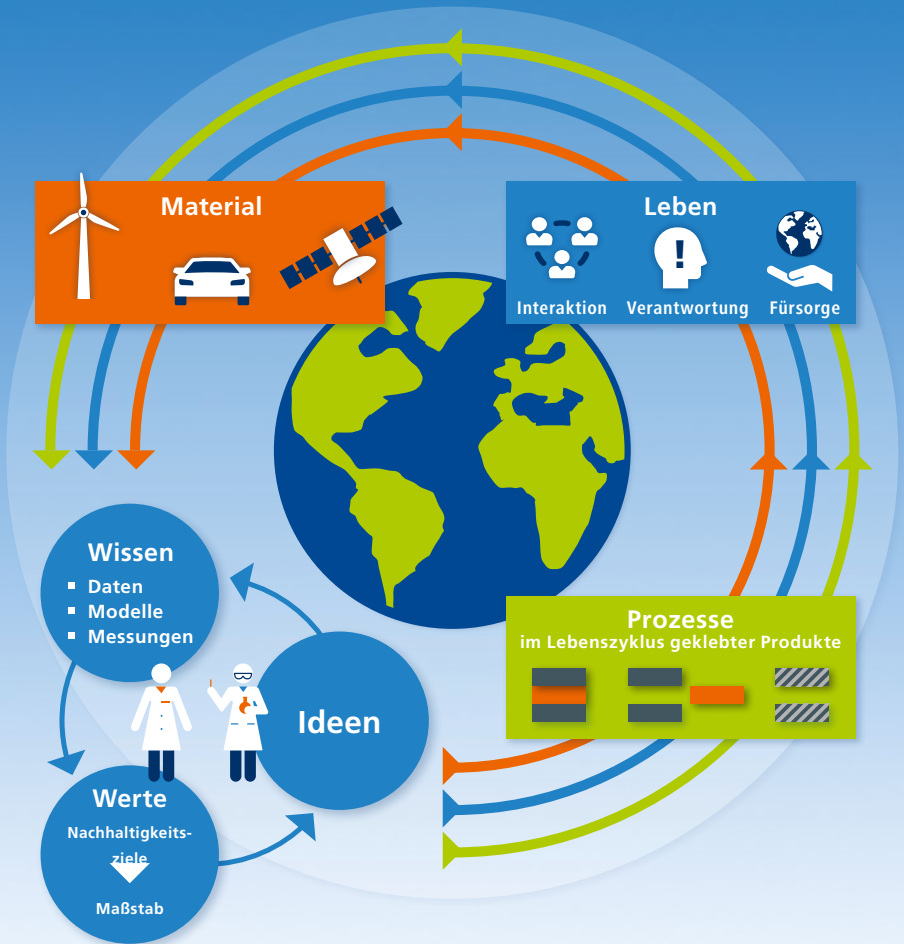
Eines betrifft alle an einem Produktlebenszyklus beteiligten Akteure, d. h. die Entwickler, die Hersteller und die Anwender/Verbraucher/Konsumenten: Das gewachsene Bewusstsein für gravierende Folgen, wenn menschengemachte Produkt-, Material- und Prozessentwicklungen es zuließen, dass die sich wiederholende Abfolge der Produktlebensphasen einer Kreislaufwirtschaft in ihrem Austausch mit natürlichen Lebenszyklen außer Takt geriete (→ s. Abb. 58).

Für geklebte Produkte stehen Methoden und digitale Werkzeuge zukünftig in wachsender Zahl zur Verfügung.

Zusammenfassend betrachtet stehen für die Verbesserung oder Neuentwicklung geklebter Produkte zahlreiche Methoden und digitale Werkzeuge zur Verfügung. Sie unterstützen nach Maßgabe der global akzeptierten Werte Entwickler und Hersteller

iterativ auf dem Weg einer im Markt auch nachgefragten nachhaltigen Entwicklung unter Einbeziehung materialbezogener Datenquellen. Standardisierte lebenszyklusbasierte Herangehensweisen stehen zur Verfügung. Die Etablierung einer auf Ontologien beruhenden einheitlichen »Materialsprache« als Voraussetzung für einen eindeutigen und zügigen Informationsaustausch beschleunigt im Zeitalter der Digitalisierung die Bewertung von Forschungs-ideen sowie die materielle Produktweiterentwicklung im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung.

Abb. 58
Nachhaltige Material-entwicklung für ideen-reiche klebtechnische Produkte



3.3 Ökobilanz/Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment/LCA) – Datenbasierte Methoden an der Schnittstelle zwischen Material- und Umweltforschung

Ein weiterführender Leitgedanke im Sinne der vorgenannten Betrachtungen besteht darin, die geeignetste Option zur Kreislaufwirksamkeitsbestimmung geklebter Produkte zu ermitteln. Voraussetzung dieser Ermittlung ist die Umsetzung FAIRer Datenkonzepte. Diese beruhen auf relevanten materialbezogenen Daten, wie sie z. B. durch Charakterisierung oder Modellierung erzeugt wurden.

Eine Bestimmung der Kreislaufwirtschaftswirksamkeit geklebter Produkte setzt FAIRe Daten voraus.

Welche relevanten Parameter aus diesen Daten erhalten werden können, wurde in Kapitel 2.5 qualitativ betrachtet. Hier sei darauf hingewiesen, dass die Bewertung der Relevanz von Informationen und der Informationsaustausch eng mit der Festlegung ihres Zwecks verbunden ist. Nachfolgend wird ersichtlich, dass auch die methodenbedingte Auswahl eines LCA-Modells zur Aus- und Bewertung relevanter Daten von dessen Zweckfestlegung oder Zieldefinition geprägt wird.

Hinsichtlich der Umweltauswirkungen eines geklebten Produkts bietet die Ökobilanz (Lebenszyklusanalyse/Life Cycle Assessment – LCA)¹⁶⁵⁻¹⁶⁹ ein geeignetes Betrachtungsinstrument. Dessen Grundgedanken zufolge werden die diesbezüglichen Daten für die einzelnen Phasen getrennt erhoben, aber in Summe der Produkt-

lebensphasen über die gesamte Produktlebenszeit bewertet.²³⁴ Wie schon in Kapitel 2.5 ausgeführt, erfasst eine Ökobilanz (LCA) Aspekte über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts, von der Idee und Entwicklung über die Produktlebenszyklusphasen »Herstellung« (incl. des Abbaus von Rohstoffen und deren Aufbereitung, Energieverbrauch) und »Nutzung« (incl. Abfälle, Emissionen, Energieverbrauch) bis zur »Entsorgung« (incl. Abfälle, Emissionen, Energieverbrauch). In der rückblickenden Literatur^{235, 236, 237} finden sich allerdings Beispiele, in denen vor und bei der praktischen Durchführung einer Ökobilanz (LCA) von den Durchführenden eine gewisse Granularität der Betrachtung vorgegeben wird.

Eine Ökobilanz ist für die Betrachtung von Umweltwirkungen geklebter Produkte grundsätzlich geeignet.

Nachfolgend wird beispielhaft und auszugsweise eine publizierte Untersuchung²³⁵ betrachtet, die für die Elektronikindustrie aus der Produkt-Sicht Ökobilanzen bleifreier Alternativen für bleihaltige Lote erstellte, wobei auch elektrisch leitfähige Klebstoffe betrachtet wurden. Schwerpunktmäßig soll dabei an dieser Stelle aufgezeigt werden, wie hoch sich die Dynamik der Entwicklungen auf dem Gebiet der Ökobilanz in der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts darstellt.

-
- 234 Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament, Integrierte Produktpolitik – Auf den ökologischen Lebenszyklus-Ansatz aufbauen, KOM 2003 302 endg., S. 5
- 235 A. S.G. Andrae In *Global Life Cycle Impact Assessments of Material Shifts*; Springer-Verlag, London, 2010, The Example of a Lead-free Electronics Industry.
- 236 H. Stephan; »Bewertungsmethodik für Fertigungsverfahren im Karosseriebau aus Sicht des betrieblichen Umweltschutzes«; Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt, ISBN 978-3-932518-80-5, Darmstadt, 2007.
- 237 V. G. Maciel, G. Bockorny, N. Domingues, M. B. Scherer, R. B. Zortea, M. Seferin; »Comparative Life Cycle Assessment among Three Polyurethane Adhesive Technologies for the Footwear Industry«; *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2017: 5, 8464–8472.

Beispiel Elektronikindustrie

Globale Lebenszyklusanalysen, in denen er sich mit den Auswirkungen eines Ersatzes bleihaltiger Lote durch bleifreie Alternativen, seien es Lote oder elektrisch leitfähige Klebstoffe beschäftigte, veröffentlichte A.S.G. Andrae im Jahre 2010.²³⁵ Einleitend betont der Autor den ganzheitlich wissenschaftlichen Charakter von Vorhersagen der Umweltauswirkungen, weil die Komplexität der Umweltsysteme nicht durch analytische Reduktion, sondern vielmehr durch interdisziplinäres Denken zu erfassen sei. Besondere Aufmerksamkeit wird einer folgenbetrachtenden Lebenszyklusanalyse (CLCA), der Ungenauigkeitsanalyse und der im Publikationsjahr verfügbaren, auf Lebenszyklus-Endpunktmodellierung beruhenden japanischen LIME Methode²⁰⁴ (life cycle impact assessment method based on endpoint modelling) zur Erfassung der Umwelteinwirkungen gewidmet. Nach den ersten beiden Versionen LIME-1 und LIME-2, die auf japanischen Umweltbedingungen und der Umweltwahrnehmung japanischer Menschen aufbauten, wurde 2016 die weltweit einsatzfähige LIME-3 Methode entwickelt, für die regional unterschiedliche Gewichtungsfaktoren mittels Umfragen erhoben wurden.

Im unternehmerischen Entscheidungsprozess für operative oder strategische Aufgaben kommen oft softwarebasierte Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS; engl.: Decision Support Systems, DSS) für menschliche Entscheidungsträger zum Einsatz. Relevante Informationen müssen dazu ermittelt und aufbereitet werden, wobei mehrere Dimensionen zu erfassen sind, nämlich technische, ökologische, ökonomische und zudem auch Sicherheitsaspekte. LCA-Systeme werden vom Autor in diesem Rahmen als eine wertvolle Hilfe bei Auswahlprüfverfahren (engl.: screening) und zur Entscheidungsfindung unter Umweltgesichtspunkten gesehen.

Die Diskussion der Untersuchungsergebnisse führt A.S.G. Andrae unter Einbeziehung einer Verknüpfung zwischen der Lebenszyklusanalyse und der Risikobewertung auf der Grundlage von Auslaugungsprüfungen der betrachteten Materialien (siehe oben) durch. Als produktbezogenes Ergebnis ergab sich statistisch, dass mit Blick auf die Kohlendioxid-Emissionen der Einsatz von silberhaltigem, isotrop elektrisch leitfähigem Klebstoff (engl.: Isotropically Conductive Adhesive, ICAs) vorteilhaft ist.

Was methodische Aspekte betrifft, kommt der Autor mit Blick die Entwicklung bis 2009 zum Schluss, dass CLCA noch auf der Stufe eines halb-quantitativen Diskussionsansatzes stehe. Abschließend hält er fest, dass für wichtige Technologien eine kontinuierliche Durchführung von Lebenszyklusanalysen gegenüber einer einmaligen Erhebung zu empfehlen ist.

Aufgrund ihres umfassenden Geltungsbereichs kann die DIN EN ISO 14040 keine produktspezifischen Regeln als Grundlage für konkrete lebenszyklusbasierte Modellierungen vorgeben.

Trotz der herausragenden Bedeutung derartiger, produktbezogener Projekte für den Erfolg von Unternehmen war auch nach Ansicht weiterer Experten zu Beginn der 2010er Jahre das Produktlebenszyklusmanagement in der seinerzeitigen Form »noch nicht umfassend entwickelt und dementsprechend unzureichend in Unternehmen verankert, um den Herausforderungen der Zukunft in ausreichendem Maße gerecht zu werden²³⁸.« Der zwangsläufig umfassende Geltungsbereich der DIN EN ISO 14040¹⁶⁵⁻¹⁶⁹ kann keine produktgruppenspezifischen Regeln vorgeben, die auf der Grundlage einer erfolgten Zweckbestimmung für eine konkrete lebenszyklusbasierte Modellierung eine einheitliche Basis bieten könnten. Die einheitliche Basis der DIN EN ISO 14040¹⁶⁵⁻¹⁶⁹ ist jedoch für einheitliche Studien mit verlässlichen vergleichenden Aussagen notwendig und in einheitlichen Studien erhaltene Ergebnisse wären nicht nur intern für Produkt- und Prozessoptimierungen, sondern auch extern (B2B und/oder B2C) nutzbar.

Für verlässliche Vergleichsaussagen und -ergebnisse ist eine einheitlich geregelte Basis jedoch notwendig.

Die Entwicklung der letzten 15 Jahre²¹⁷, einsetzend nach der Standardisierung der Ökobilanz mit der 2006 in Kraft getretenen DIN EN ISO 14040¹⁶⁵⁻¹⁶⁹, zeigt, dass von unterschiedlichen Akteuren verschiedener Initiativen Konkretisierungen innerhalb des weiteren Rahmens dieser Norm vorangetrieben wurden (→ s. Abb. 59). Dazu gehören, initiiert von der Europäischen Union, insbesondere Vorgehensweisen, welche der Ermittlung eines Fußabdrucks (engl.

238 U. Raubold, Lebenszyklusmanagement in der Automobilindustrie, Gabler Verlag | Springer Fachmedien: Wiesbaden, 2011; DOI 10.1007/978-3-8349-6613-1_1.

Footprint²³⁹) im Rahmen einer Lebenszyklusperspektive dienen. Im Rahmen der Flaggschiff-Initiative »Ein ressourceneffizientes Europa«²⁴⁰ der Europa 2020-Strategie wurden dazu Ansätze entwickelt, die Ressourcenproduktivität zu erhöhen und wirtschaftliches Wachstum sowohl vom Ressourceneinsatz als auch von Umweltauswirkungen zu entkoppeln (siehe Kapitel 2.5). Die Europäische Kommission startete die Entwicklungen zum Produkt-Umweltfußabdruck (engl.: Product Environmental Footprint – PEF), der nicht mit der Erarbeitung von Vorgehensweisen zur Ermittlung eines Organisationen-Fußabdrucks²⁴¹ (→ s. **Abb. 59**) zu verwechseln ist.

Die EU startete in diesem Zusammenhang Entwicklungen: Footprint-Initiativen.

Einschub

Wie schon der PEF-Leitfaden aus dem Jahre 2012 insbesondere im Anhang X²⁴² ausführt, sollten in diesem Zusammenhang auch

- die französische Norm BP X30-323²⁴³ aus dem Jahre 2008²⁴⁴

239 <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg12> (Zugriff April 30, 2020)

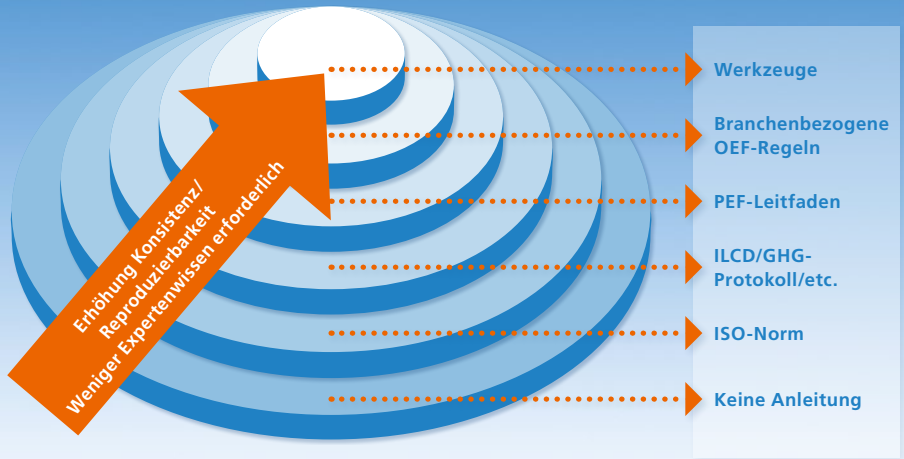
240 C. Liedtke; M. Faulstich In Ein ressourceneffizientes Europa; Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (KRU), Hrsg.; Umweltbundesamt, 2016; S. 3–7, Ein ressourceneffizientes Europa – Ein Programm für Klima, Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung

241 N. Pelletier, K. Allacker, R. Pant, S. Manfredi, International Journal Life Cycle Assess 2014, 19, S. 387–404, The European Commission Organisation Environmental Footprint method: comparison with other methods, and rationales for key requirements; 387–404; DOI 10.1007/s11367-013-0609-x.

242 Product Environmental Footprint (PEF) Guide, Deliverable 2 and 4A of the Administrative Arrangement between DG Environment and the Joint Research Centre No N 070307/2009/552517, including Amendment No 1 from December 2010; Ref. Ares(2012)873782 – 17/07/2012; Annex X: Comparison of the key requirements of the PEF Guide with other methods.

243 BP X 30-323-0 »Principes généraux pour l’affichage environnemental des produits de grande consommation«.

244 C. Cros, E. Fourdrin, O. Réthoré, International Journal Life Cycle Assess 2010, 15, S. 537–539, The French initiative on environmental information of mass market products; DOI 10.1007/s11367-010-0182-5.



- die »Ecological Footprint Standards 2009«²⁴⁵ des Global Footprint Network Standards Committee
- das umfassende International Reference Life Cycle Data System (ILCD)-Handbuch²⁴⁶ der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2010
- der »Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard«²⁴⁷ der privaten und transnationalen Einrichtung GHG Protocol aus dem Jahr 2011
- der britische Standard PAS 2050:2011²⁴⁸ und
- die 2012 in Kraft getretenen DIN EN ISO 14067:2019-02 »Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung«²²¹

nicht unerwähnt bleiben.

Abb. 59
Entwicklung von Standards und Methoden zur Ermittlung des Umweltfußabdrucks von Organisationen

245 Ecological Footprint Standards 2009 (Herausgeber: J. Kitzes); Global Footprint Network, 2009, Oakland, USA: zugänglich unter www.footprintstandards.org.

246 European Commission – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010.

247 Greenhouse Gas Protocol »Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard«, World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2011; ISBN 978-1-56973-773-6.

248 PAS 2050:2011 »Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services«.

Der durchgeführte PCF (Product Carbon Footprint)-Prozess²⁵⁶ hat in mehrfacher Hinsicht auch für die noch andauernde Entwicklung des PEF Bedeutung, selbst wenn nicht nur für Unternehmen, sondern auch für einige Produkte die Treibhausgasemissionen nicht die alleinigen ökologischen Auswirkungen darstellen²⁴⁹. Hinsichtlich des Unterziels SDG 12.4 (siehe Kapitel 3.2) mit dem Bezug zur »Freisetzung in Luft, Wasser und Boden« waren im Jahre 2019 denn auch die drei bekanntesten Footprinting-Ansätze der CO₂-, der Wasser- und der ökologische Fußabdruck (engl.: land footprint).²⁵⁰

Der CO₂-, der Wasser- und der ökologische Fußabdruck umfassen meist nur eine Umweltwirkung.

Alle Footprinting-Ansätze, die für sich als Ausschnitte einer Ökobilanz (LCA) nichts Eigenständiges und meist auf eine Umweltwirkung begrenzt sind, folgen einer vergleichbaren Vorgehensweise²⁵⁰, der zufolge die zugrundeliegende Berechnungsmethode standardisiert und der interessierten Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird. Die Ansätze streben die »Aggregation in einen greifbaren und kommunizierbaren Wert« und in ein Bildnis an, dessen Symbolik leicht verständlich ist. Die Fußabdruckgröße versinnbildlicht dabei die Intensität der Umweltwirkungen. Durch eine hohe Transparenz sollen Nachvollziehbarkeit und Akzeptanz erreicht werden; zudem soll der eigentliche Ansatz vielen Anwendenden anschaulich vermittelt werden. Die mengenmäßige Erfassung von Stoff- und Energieströmen ist dabei eine maßgebliche Grundlage für die Umweltleistungsbewertung und stellt »hinsichtlich der Vollständigkeit, Plausibilität und innerbetrieblichen Allokation«²⁵⁰ eine Herausforderung dar.

249 S. Dierks In Betriebliche Nachhaltigkeitsleistung messen und steuern: Grundlagen und Praxisbeispiele; A. Baumast, J. Pape, S. Weihofen, S. Wellge, Hrgs.; UTB: Stuttgart, 2019; S. 106–116, Der Product Environmental Footprint (PEF) von Kaffee bei Tchibo.

250 S. Weihofen In Betriebliche Nachhaltigkeitsleistung messen und steuern – Grundlagen und Praxisbeispiele; Verlag Eugen Ulmer: Stuttgart, 2019; S. 83–96, Carbon-, Water-, Land-Footprinting-Ansätze.

Für die Quantifizierung der auf Gase zurückgehenden Emissionsströme ist die DIN EN ISO 14067:2019-02²²¹ maßgeblich. Ihre Beziehung zu weiteren Normen mit Umweltbezug ist in Abbildung 60 dargestellt. Die ISO EN 14067:2019-02²²¹ bezieht sich nicht auf ein einzelnes Treibhausgas (THG), sondern betrachtet Treibhausgase als einen gasförmigen »Bestandteil der Atmosphäre, sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprungs, der die Strahlung bei spezifischen Wellenlängen innerhalb des Spektrums der infraroten Strahlung, die von der Erdoberfläche, der Atmosphäre und den Wolken abgegeben wird, absorbiert und emittiert«²²¹. Einerseits sind die im Kyoto-Protokoll/Anlage A²⁵¹ als Treibhausgase klassifizierten Gase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC) und Schwefelhexafluorid (SF₆) genannt²⁵²; andererseits verweist die ISO EN 14067:2019-02²²¹ auf den »aktuellen Bewertungsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)«²⁵³ von 2013. Nicht aufgenommen werden »Wasserdampf und Ozon, die anthropogene sowie natürliche THGs sind«. Die Norm beschränkt sich im Fokus »auf langlebige Treibhausgase und schließt demnach Klimawirkungen durch Änderungen des Reflexionsgrads der Oberfläche (Albedo) und kurzlebige Strahlungsantriebsmedien (z. B. Ruß und Aerosole) aus.« Sie legt das »Kohlendioxid-Äquivalent« (»CO₂-Äquivalent« oder »CO₂Äq«) als »Einheit zum Vergleich des Strahlungsantriebs* eines THG mit dem von Kohlendioxid« fest.²⁵⁴ Gleiches gilt für das »Treibhauspotenzial**« oder »GWP« (engl.: global warming potential). Wie in Kapitel 3.2 diskutiert, ist der Verweis auf die »aktuelle

251 Vereinte Nationen: Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen; 1998; <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-kyoto-protokoll.html> (Zugriff April 30, 2020)

252 »Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen«, am 16. März 1998 zur Zeichnung aufgelegt.

253 Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC; Climate Change 2013: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (Zugriff April 30, 2020)

254 H. Hottenroth; B. Joa; M. Schmidt In Carbon Footprints für Produkte; H. Hottenroth; B. Joa; M. Schmidt, Hrsg.; Institute for Industrial Ecology – INEC: Pforzheim, 2013; S. 4, Treibhausgase und ihre Treibhauswirkung.

Atmosphäre« bemerkenswert. Stetig wachsende wissenschaftliche Erkenntnisse sind für die Durchführung und die Bewertungsschritte innerhalb einer CFP-Studie relevant, und die Norm hält priorisierend fest: »Beim »Treffen von Entscheidungen während der CFP-Studie« wird naturwissenschaftlichen Erkenntnissen (z. B. Physik, Chemie, Biologie) der Vorzug gegeben.«

* Der Strahlungsantrieb ist ein Maß für den Einfluss, den ein Faktor auf die Änderung des Gleichgewichts von einfallender und abgehender Energie im System Erde/Atmosphäre hat.²⁵⁵

** Faktor, der den über einen gewählten Zeithorizont integrierten Strahlungstrieb eines Treibhausgases im Vergleich zu demjenigen von Kohlendioxid ausgedrückt, in CO₂-Äquivalenten angibt. Dabei wird sowohl die unterschiedliche Verweilzeit als auch das unterschiedliche Infrarot-Absorptionsvermögen der verschiedenen Treibhausgase berücksichtigt.²⁵⁶

Wie ein aktuelles Forschungsprojekt²⁵⁷ zeigt, lassen sich mit CFP-Studien für klebtechnische Fragestellungen aus der gesamten Prozesskette wertvolle Einsichten gewinnen.

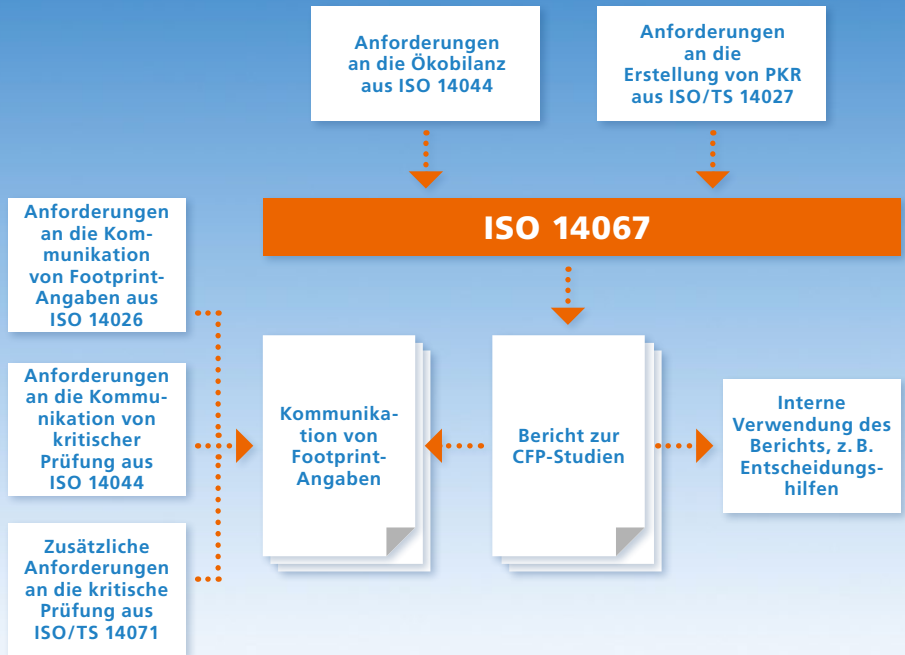
Beim Carbon Footprint auf Organisationsebene, der in der Norm DIN EN ISO 14067²²¹ geregelt ist (→ vgl. **Abb. 60**), werden neben den unternehmenseigenen direkten Emissionen, welche auf Verbrennungsprozesse zurückgehen, auch die durch eingekaufte Energie bedingten und durch vor- und nachgelagerte Prozesse verursachten indirekten Emissionen betrachtet.²⁵⁰ Eine weitere Standardisierung erfolgt durch das Treibhausgasprotokoll (engl.: greenhouse gas (GHG) protocol).

Für Unternehmen ist eine Messung des Produkt-Kohlenstofffußabdrucks oft aus praktischen Gründen herausfordernder als

255 H. Hottenroth; B. Joa; M. Schmidt In Carbon Footprints für Produkte; H. Hottenroth; B. Joa; M. Schmidt, Ed.; Institute for Industrial Ecology – INEC: Pforzheim, 2013; S. 112, Glossar.

256 H. Hottenroth; B. Joa; M. Schmidt In Carbon Footprints für Produkte; H. Hottenroth; B. Joa; M. Schmidt, Ed.; Institute for Industrial Ecology – INEC: Pforzheim, 2013; S. 113, Glossar

257 S. Böhm, D. Estephan, A. Winkel, F. Ebershold, J. Hesselbach; KlebFuß – Entwicklung und Validierung einer Bewertungsmethode zur Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks von Klebanwendungen, Vorhaben 19765 N der Forschungsvereinigung DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. und der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS/AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung IGF



eine Messung des unternehmensbezogenen Fußabdrucks. Eine 2011 veröffentlichte Studie, in der »44 Unternehmen bei insgesamt 1402 Zulieferbetrieben nach deren Treibhausgasemissionen fragten«, ergab, dass »lediglich etwa 20 % der Unternehmen in der Lage« waren, über »die Treibhausgase in ihrer Zulieferkette hinreichend Informationen zu erlangen«²⁰⁰. Eine Abhängigkeit der Unternehmen von weiteren Akteuren bei der Messung der Nachhaltigkeitsleistung ihrer Produkte wurde konstatiert.²⁰⁰ Für unterschiedliche industrielle Klebstoffe liegt eine Abschätzung typischer (cradle to gate) PCF-Werte tabelliert vor.²⁵⁸

Abb. 60
Beziehung zwischen der ISO EN 14067:2018²²¹ und weiteren Normen mit Umweltbezug

Der CO₂-, der Wasser- und der ökologische Fußabdruck erlauben keine ganzheitliche Betrachtung von Umweltauswirkungen.

258 Industrieverband Klebstoffe e.V. »Typical »Product Carbon Footprint« (PCF)-Values for Industrial Adhesives«, Düsseldorf, Deutschland, 2014.

Die drei bislang angesprochenen Fußabdruck-Ansätze (der CO₂-, der Wasser- und der ökologische Fußabdruck) umfassen jeweils nur eine Umweltwirkung. Die Gewichtung unterschiedlicher Umweltaspekte in vorgelagerten, unternehmensinternen oder nachgelagerten Prozessen erlauben die Ansätze nicht, was eine ganzheitliche Betrachtung der Umweltauswirkungen erschwert.²⁵⁰ Zu dieser ganzheitlichen Betrachtung gehören für Unternehmen beispielsweise neben dem Transport von Rohstoffen und Produktgebinden ebenso produkt(entwicklungs)relevante Dienstreisen, das Aufladen der Akkus dienstlicher Mobiltelefone oder die Gebäudebeheizung.

Im Weiteren stellte die EU-Kommission Hemmnisse fest, die einer stärkeren und schnelleren Verbreitung umweltfreundlicher Produkte im Binnenmarkt der EU im Wege stehen²⁵⁹:

- Ein mangelndes gemeinsames Verständnis darüber, was ein »grünes Produkt« auszeichnet.
- Eine Vielzahl einzelstaatlicher und privater Initiativen, die auf unterschiedliche Messmethoden zurückgreifen.
- Der unzumutbare Aufwand und die erheblichen Kosten für produzierende Unternehmen, wenn sie nach derartig verschiedenen Methoden die Umweltwirkung ihrer Produkte ermitteln müssen.
- Die Verwirrung bei Verbrauchern, wenn sie etwa Produkte auf Grundlage uneinheitlicher Umweltinformationen oder einer zunehmenden Vielfalt von Nachhaltigkeitslabeln zu vergleichen versuchen.

Der Product Environmental Footprint – PEF (Umwelt-Fußabdruck) stellt im Zusammenhang der Footprint-Initiativen einen Harmonisierungsansatz dar.

Den produktbezogenen und von der Europäischen Kommission initiierten Harmonisierungsansatz stellt der im April 2013 veröf-

²⁵⁹ J. Berger In Betriebliche Nachhaltigkeitsleistung messen und steuern Grundlagen und Praxisbeispiele; Verlag Eugen Ulmer: Stuttgart, 2019; S. 96–106, Product Environmental Footprint (PEF).

fentlichte »Product Environmental Footprint – PEF«, also der Umweltfußabdruck von Produkten und Dienstleistungen²¹⁶ dar. Er basiert auf etablierten LCA-Standards und der Normenreihe DIN EN ISO 14040/44^{165–169}. Ein PEF-Leitfaden wurde vom Institut für Umwelt und Nachhaltigkeit (engl.: Institute for Environment and Sustainability, IES) und der Gemeinsame Forschungsstelle (engl.: Joint Research Centre, JRC), einer Generaldirektion der Europäischen Kommission, erarbeitet. Der PEF hat nach dem Ende der von 2013 bis 2019 andauernden Pilotphase im Jahre 2020 die Übergangsphase erreicht.²⁶⁰ Eine Entscheidung, ab wann für welche Produkte die Ermittlung der Umweltauswirkungen zwingend nach PEF-Maßgabe zur erfolgen hat, wird von Seiten der Europäischen Union ab 2021 in der Implementierungs- und Kommunikationsphase erwartet.²⁶¹

Der PEF wird in einem im Auftrag des Umweltbundesamtes verfassten Bericht²¹⁶ als »eine multikriterielle Methode zur lebenszyklusbasierten Modellierung und Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen durch auftretende Stoff- und Energieflüsse sowie der dazugehörigen Emissionen und Abfallströme« beschrieben. Er »bezweckt die Vereinheitlichung bestehender Methoden zur Ökobilanz-gestützten Bewertung von Produkten« und verfolgt den Ansatz »Vergleichbarkeit über Flexibilität« (»comparability over flexibility«).

Der PEF nimmt »deutlich mehr Spezifikationen vor als die DIN EN ISO 14040/44«: Wird für einen bestimmten Markt ein und dieselbe Metrik zur Bewertung eingesetzt, so sollte dies zur Steigerung von Transparenz und fairem Wettbewerb beitragen.²⁶² Zwar legt beispielsweise die DIN EN ISO 14040/44^{165–169} den iterativen Prozess als Basis für die Erstellung einer Ökobilanzstudie fest, ist hingegen im PEF ein sogenannter Screening-Schritt verbindlich vorgesehen, bei dem alle Prozesse bzw. Aktivitäten betrachtet

260 European Commission, Environment, »The Environmental Footprint transition phase«, zugänglich unter https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/ef_transition.htm (Zugriff April 30, 2020)

261 ifu Hamburg GmbH | Institut für Umweltinformatik; Die Entwicklung des Product Environmental Footprint in 4 Phasen

262 »A Brief on the European Commission's Product Environmental Footprint Guide«, zugänglich über pre-sustainability.com (Zugriff April 30, 2020)

werden, die im Profil berücksichtigt werden sollen. Der Screening-Schritt im PEF ist mit dem iterativen Ansatz der DIN EN ISO 14040/44¹⁶⁵⁻¹⁶⁹ vergleichbar, wird jedoch in der Norm »nur dringend empfohlen«.

Der Product Environmental Footprint – PEF (Umwelt-Fußabdruck) soll bei Einsatz ein und derselben Bewertungsmetrik zu Transparenz und fairem Wettbewerb beitragen.

In dieser Weise ermöglicht eine Konkretisierung der universell in unterschiedlichen Domänen einsetzbaren und standardisierten Methoden zur Bewertung der Umweltauswirkungen verschiedenartiger Produkte einerseits eine Verringerung von Auslegungsspielräumen und vereinfacht gleichzeitig die Kommunikation gegenüber Marktbegleitern oder Produktanwendern. Andererseits wird bei der Ermittlung der Umweltleistung von Produkten eine zeit- und kostensparende Zielführung eröffnet, die gleichzeitig einen wertvollen Indikator für Weiterentwicklungsmöglichkeiten im Herstellungsprozess darstellt.

Insbesondere für Vergleiche und vergleichende Aussagen hebt der Leitfaden der Europäischen Kommission²⁶³ zum Produkt-Umweltfußabdruck (PEF) hervor, dass solche vergleichenden Betrachtungen die Entwicklung zusätzlicher categoriespezifischer Regeln (engl.: Product Environmental Footprint Category Rules, PEFCR) voraussetzen. Gleiches gilt für eine entsprechende weitere methodische Harmonisierung, Spezifität, Relevanz und Reproduzierbarkeit für die jeweiligen Produkttypen. Hier müssten mit Blick auf PEF »zuerst die zahlreich bestehenden methodischen Herausforderungen gelöst werden«²¹⁶, die »sowohl

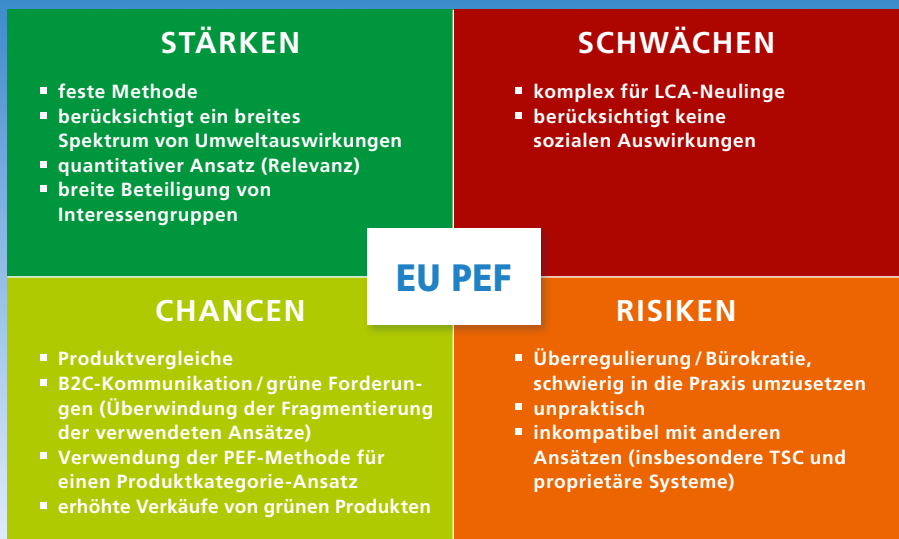
- den Untersuchungsrahmen (z. B. Definition der funktionellen Einheit, Definition des repräsentativen Produktes),

263 Product Environmental Footprint (PEF) Guide, Deliverable 2 and 4A of the Administrative Arrangement between DG Environment and the Joint Research Centre No N 070307/2009/552517, including Amendment No 1 from December 2010; Ref. Ares (2012)873782 – 17/07/2012.

- die Modellierung des Produktsystems (z. B. die Modellierung von Elektrizität) als auch
- die Auswertung und Interpretation (z. B. Eignung der Wirkungsabschätzungsmethoden und Priorisierung von Wirkungskategorien)

betreffen«. Einschätzungen entsprechend einer von der GS1 Germany GmbH und der THEMA1 GmbH durchgeführten SWOT-Analyse (engl.: Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen), Threats (Risiken)) des PEF-Vorgehens²⁶⁴ sind in Abbildung 61 ersichtlich.

Abb. 61
SWOT-Analyse
des PEF-Vorgehens
der Europäischen
Kommission



264 GS1 Solutions; »Collectively defining sustainability for product categories An overview of global hotspot initiatives«; GS1 Germany GmbH, Köln, Deutschland, 2013.

UMWELTAUSWIRKUNGEN IN DER LEBENSZYKLUSANALYSE

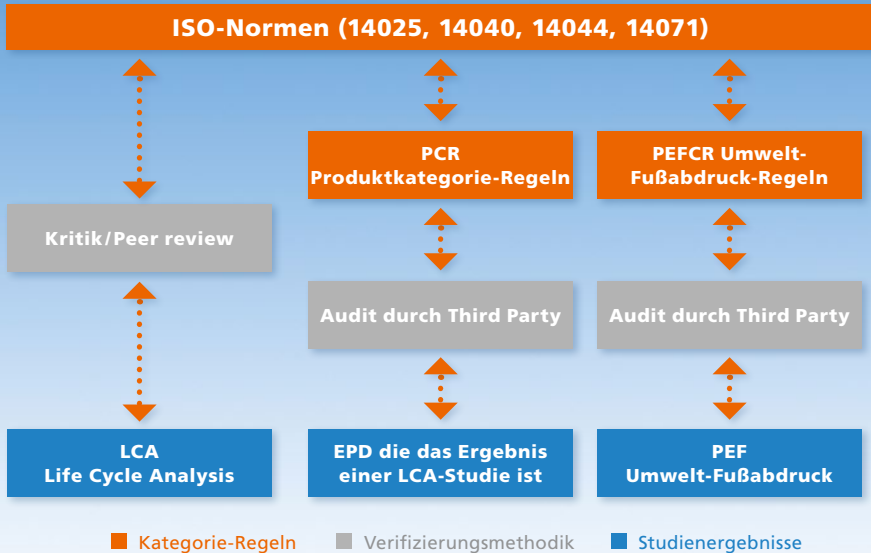


Abb. 62
Gegenüberstellung
von Product Environ-
mental Footprint – PEF
und ISO 14040/44

Für vergleichende Betrachtungen sind kategorie-spezifische Regeln (Product Environmental Footprint Category Rules – PEFCR) zu entwickeln.

Erkennbar wird hieraus, dass von der Europäischen Kommission aktuell große Anstrengungen unternommen werden, durch Standardisierungen einer überbordenden Methodenvielfalt zuverlässige und konkrete Informationen für die Umwelleistung von Produkten den Konsumierenden bereitzustellen (→ vgl. Abb. 62). Dieses geschieht, um einem möglichen Vertrauensverlust für die Belastbarkeit von Umwelleistungsdaten vorzubeugen. Der PEF soll zudem einer Methode den Weg bereiten, die auch von kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) angewendet werden kann.

Der Product Environmental Footprint – PEF (Umwelt-Fußabdruck) soll nicht nur unabhängig von Unternehmensgrößen anwendbar sein, sondern auch Klebstoffanwendern zukünftig weitere Kreislaufbestimmungsmöglichkeiten ermöglichen.

Einerseits ist also mit Blick auf die in Kapitel 3.1 genannten Bereiche Bauwirtschaft, Verkehrsmittelbau, Elektronik- und Verpackungsindustrie nicht zu erwarten, dass domänenübergreifend dieselbe Messmethodik für den Product Environmental Footprint – PEF zum Einsatz kommen wird. Zu erwarten ist vielmehr, dass – etwa im Zuge eines parallelen gesellschaftlichen LCA (S-LCA, s.o.) – domänenspezifische regulatorische Vorgaben einbezogen werden.

Klebstoffdatenblätter wären in Zukunft mit Informationen für den geordneten Klebstoffversagensmechanismus zu ergänzen.

Andererseits ist grundsätzlich davon auszugehen, dass auch Klebstoffanwendern zukünftig weitere Möglichkeiten zur Verfügung stehen werden, die geeignetste Option zur Kreislaufbestimmung geklebter Produkte nicht nur – wie bislang – intern zu ermitteln, sondern auch extern für den Austausch mit Geschäftspartnern und Kunden standardisierte Datensätze kommunizieren zu können. Diese halten auf Grundlage einer Methodenharmonisierung für Experten als auch für Nichtfachleute und Neueinsteiger nachvollziehbare Informationen bereit. Beispielsweise könnten perspektivisch von den Klebstoffherstellern ausgestellte, materialbezogene Sicherheits- oder technische Datenblätter ihrer Klebstoffe für Klebstoffanwender in Europa um digitale, standardisiert zusammengestellte Datensätze, die Klebstoff-Informationen auch über die Produktlebenszyklusphase »Entsorgung« für den geordneten Versagensmechanismus des Klebstoffs (siehe Kapitel 2.6, 4.1–4.4, 5.1, 5.2.6, 5.3–5.6), ergänzt werden. Diese harmonisieren dann mit einem zu erwartenden, domänenspezifisch standardisierten PEF-Vorgehen. Bei der Bewertung der Kreislaufwirtschaftswirksamkeit eines geklebten Produktes besteht die Funktion des Klebstoff-

herstellers in der Beratung des Klebstoffanwenders/Produkt-herstellers. Es ist dringend zu empfehlen, den Klebstoffhersteller in dieser Funktion einzubeziehen, wenngleich die verantwortliche Bewertung dem Klebstoffanwender/Produkthersteller obliegt, da nur dieser verantwortlich entscheiden kann, in welchen seiner Produkte Klebstoffe wie und unter welchen Bedingungen zum Einsatz kommen.

Die Bewertung der Kreislaufwirtschaftswirksamkeit eines geklebten Produktes liegt im Verantwortungsbereich des Klebstoffanwenders/Produktherstellers, wobei das Hinzuziehen des Klebstoffherstellers als Berater dringend zu empfehlen ist.

Diesen Betrachtungen entsprechend und von der Entwicklungs- und Herstellungslebensphase eines Produkts ausgehend, finden sich auch in der Fachliteratur vergleichende Ökobilanzen (LCA). Diese Ökobilanzen bauen auf Systemgrenzen »von der Wiege bis zum Werkstor« (engl.: from cradle to gate) auf. Sie dienen Herstellern geklebter Produkte der internen Entscheidungsfindung, ohne dabei komplette Ökobilanzen mit dem Anspruch einer ganzheitlichen Betrachtung zu sein. Ansätze der vergleichenden LCA sind bei solchen Fragestellungen sehr hilfreich. Für eine Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus jedoch ist zusätzlich die Ökobilanz für die klebtechnisch gefertigten Produkte erforderlich.

Beispiel Automobilindustrie

Mit Blick auf eine Bewertungsmethodik für Fertigungsverfahren im Karosseriebau ging H. Stephan 2007 aus Sicht des betrieblichen Umweltschutzes von der Fragestellung aus »Wie können Fügeverfahren basierend auf der Methode der Ökobilanzierung bewertet werden, so dass die Ergebnisse gemeinsam mit den in der Produktionsplanung üblichen Kenngrößen verarbeitet werden können?«²³⁶ Im Vordergrund standen dabei auf dem Weg zu einer praktikablen und anwenderfreundlichen Methode einerseits die Erstellung der funktionellen Einheit, andererseits die Festlegung der Systemgrenzen. Als funktionelle Einheit für die eingesetzte Bewertungsmethodik diente die maximale Zugscherkraft einer Fügeverbindung in der Einheit Newton. Dafür wurden mit drei Werkstoffkombinationen durch Prüfung von Verbunden materialbezogene Daten erhoben. Emissionsfaktoren (für Luftverunreinigungen) wurden für Schweißverfahren

auf Basis der Methode der Versuchsplanung erhoben. Sach- und Wirkungsbilanzen wurden für die Fügeverfahren Laserstrahlschweißen, Widerstandspunktschweißen, Clinchen und Kleben erstellt. Im Einzelnen wurden für alle betrachteten Fügeverfahren alle Energiebedarfe (pro Fügenahtlänge, pro Anzahl Schweißpunkte, pro Anzahl Clinchpunkte oder pro Fläche Klebflansch) in der betrachteten Fabrik ermittelt. Was das Verhältnis zwischen erreichter Zugscherfestigkeit und dem erforderlichen Energiebedarf betrifft, brachte das Fügeverfahren Kleben das beste Resultat hervor. Im Rahmen der Sachbilanz »für den Prozess Kleben in der Automobilindustrie konnte auf keine zuvor erhobenen Daten zurückgegriffen werden.« Deshalb wurden in Kooperation mit entsprechenden Unternehmen Daten neu erhoben für einen lastübertragenden punktschweißfähigen Metallklebstoff und für einen reaktiven Kleb- bzw. Dichtstoff auf Kautschukbasis. Da die beiden Klebstoffe für unterschiedliche Zwecke im Karosseriebau eingesetzt werden, stellte H. Stephan fest: »Ein direkter Vergleich der Klebstoffe, im Sinne von besser oder schlechter im Hinblick auf die Umweltauswirkungen, ist deshalb nicht zielführend.« Ein Vergleich der vier untersuchten Fügeverfahren bei einer maximalen Zugscherkraft von 5,5 kN nach der gewählten Methodik erfolgte abschließend graphisch getrennt nach fünf Wirkungskategorien²⁶⁵. Dabei zeigte das betrachtete klebtechnische Fügeverfahren mit dem lastübertragenden Klebstoff das geringste Treibhaus-, Ozonabbau-, Eutrophierungs-, photochemische Oxidantienbildungs- und Versauerungspotenzial. Dies gilt insbesondere bei den drei letztgenannten Wirkungskategorien. In der weiteren Wirkungskategorie Humantoxizitätspotenzial sticht beim lastübertragenden Klebstoff die Maschinenbereitstellung heraus.

Beispiel Schuhindustrie

In einer 2017 von einem brasilianischen Autorenteam veröffentlichten LCA-Studie auf Basis der ISO 14040- und ISO 14044-Standards wurden drei auf Polyurethanklebstoffen beruhende Klebtechnologien verglichen²³⁷: lösemittelbasiert, wässrig sowie in Pulverform vorliegend. Dafür wurden bei Terminen vor Ort Primärdatensätze für Umweltemissionen, Abwasser, chemische Bestandteile und technische Spezifikationen ermittelt und ein Vergleich der herstellungsrelevanten Umwelteinwirkungen für Funktionseinheiten von der Größe eines Quadratmeters entsprechend eines Standards geklebter Fügeleifläche durchgeführt. Auf Grundlage dieser Betrachtungen erkannten die Material- und Prozessentwickler Möglichkeiten zur Verringerung von Umwelteinwirkungen und zogen weiterführende Schlüsse hinsichtlich der Auslegung von Fertigungseinrichtungen.

265 J. B. Guinée, M. Gorrée, R. Heihungs, G. Huppess, R. Kleijn, A. de Koning, L. van Oes, A. Wegener Sleseswijk, S. Suh, H. A.U. de Haes, H. de Bruijn, R. van Duin, M. A.J. Huijbregts, E. Lindeijer, A. A.H. Roorda, B. L. van der Ven, B. P. Weidema; »Handbook on Life Cycle Assessment Operational guide to the ISO standards«; Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 2002.

Wie die ISO 14040/44¹⁶⁵⁻¹⁶⁹ stellt auch der von der Europäischen Kommission initiierte Product Environmental Footprint (PEF) Anforderungen an die Qualität, den Typ und die Erfassung von Daten und geht auf den Umgang mit Datenlücken bei der lebenszyklusbasierten Bewertung von Produkten ein.²¹⁶ Fasst man die Datenerhebung allein für den Produktlebenszyklus »Herstellung« geklebter Produkte genauer ins Auge, so wird offensichtlich, dass bereits die in diesem Rahmen etwa zu Zwecken der Dokumentation, Prozesssteuerung oder Qualitätssicherung aufgenommenen und dem Hersteller zur Verfügung stehenden Daten umfangreich und komplex sind.

Auch der Product Environmental Footprint – PEF (Umwelt-Fußabdruck) basiert auf der Qualität und Aktualität zugrunde liegender Daten.

Der »spezielle Prozess« Kleben²⁶⁶ wird durch ein umfassendes Qualitätsmanagementsystem gemäß der ISO 9001 formal geregelt. Dessen Übertragung auf klebtechnische Anwendungen wird in Normen zur Organisation klebtechnischer Prozesse technologie-spezifisch konkretisiert²⁶⁷. Dies bedingt, dass die dafür erzeugten prozess- oder materialbezogenen Datensätze »von der Wiege bis zum Werkstor« auf klar ersichtlichen und eindeutig umrissenen Metadatensätzen fußen und somit überschaubar bleiben.

Die in Abbildung 63 dargestellte Grafik ist von einer hierarchisch gestaffelten ebenen »Automatisierungspyramide« inspiriert. Bei der Grafik handelt es sich um ein modifiziertes und erweitertes dreiseitiges Gebäude. Es stellt menschliche Akteure wie z. B. das Klebaufsichtspersonal²⁶⁸, stoffliche Operanden wie beispielsweise die Füge-teile und das Klebsystem und menschliche sowie

266 K. Brune, Adhäsion – kleben & dichten 2015, 5, 14–16, Anwender müssen umdenken.

267 A. Groß, H. Lohse In Dichtungstechnik Jahrbuch 2016; K-F. Berger, S. Kiefer (Hrsg.); ISGATEC gmbH: Mannheim/Silber Druck oHG: Niestetal, 2015; S. 399–410, Qualitätssicherung – die neue DIN 2304 und ihr Nutzen für die Praxis

268 Vergleiche Zitate 40 und 71

maschinelle Operateure wie etwa Kleber oder Klebstoffapplikationswerkzeuge im Klebprozess in einer Form dar. Zusätzlich ist in die Standfläche eine Zeitachse in Richtung der Transformation des Materials integriert. Anschaulich verläuft die Mensch-Maschine-Interaktion (auch Mensch-Maschine-Kommunikation, engl.: human-machine-interface, HMI) über die beiden in der Skizze dargestellten Seitenflächen des Gebäudes hinweg. Umwelteinwirkungen werden über die dritte, in der Skizze verdeckte Gebäudefläche dargestellt. In die Kommunikationswege dorthin sind beispielsweise Akteure der Arbeitssicherheit oder des betrieblichen Umweltmanagements nach DIN EN ISO 14001²⁶⁹ einbezogen. Hierarchische Strukturen finden sich sowohl bei den Entscheidungsverantwortungen der menschlichen Akteure als auch in den Netzwerken der cyber-physischen Systeme. Diese dienen auch der Erfassung und Auswertung von im Prozess erhobenen Daten wie beispielsweise der prozessbegleitenden Qualitätssicherung, die von den Entscheidungsträgern bewertet werden.

Aus technischer Sicht sind sich Klebtechnik-Anwender der Notwendigkeit ganzheitlicher Betrachtungen bewusst: Bereits während der Produktlebenszyklusphase »Entwicklung« sind Aspekte der Produktlebenszyklusphase »Nutzung« zu berücksichtigen. Bei der Umsetzung des Kernelements »Nachweisführung« der klebtechnischen QS-Normen²⁷⁰ muss nachgewiesen werden, dass über den gesamten Produktlebenszyklus »Nutzung« einer Klebverbindung die auftretenden realen Beanspruchungen stets kleiner sind als ihre maximale Beanspruchbarkeit.²⁷¹ Folglich werden während der Planungs- und Designphase bereits vor der Produktlebenszyklusphase »Herstellung« eines geklebten Produkts signifikante Entscheidungen mit Blick auf den gesamten Produktlebenszyklus getroffen²⁷², relevante Eigenschaften für die

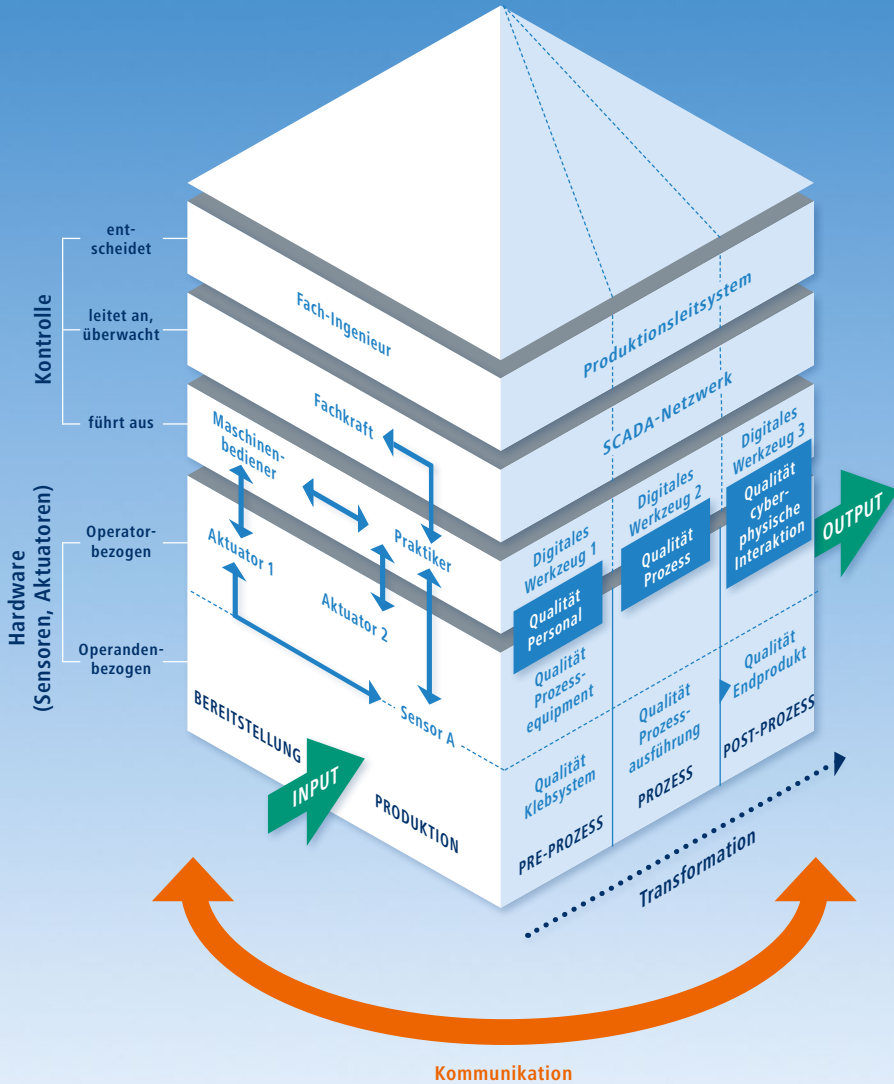
269 DIN EN ISO 14001:2015-11, Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung, Beuth-Verlag: Berlin, 2015

270 A. Paul, DICHT!, 2017, 1, 28–29, DIN 2304 – das bedeutet sie in der Praxis.

271 A. Groß, H. Lohse, Konstruktion, 2016, 1, Qualitätsanforderungen an Klebprozesse.

272 R. Ariffin, R. Ghazilla, Z. Taha, S. Yusoff, S. Hanim, A. Rashid, N. Sakundarini, International Journal Advanced Manufacturing Technology 2014, 70, S. 1403–1413, Development of decision support system for fastener selection in product recovery oriented design; DOI 10.1007/s00170-013-5373-3.

PRODUKTLEBENSZYKLUSPHASE »HERSTELLUNG«



hinsichtlich der Nutzung bedeutende Langlebigkeit der Verbunde, für deren Reparaturfähigkeit sowie für die Entsorgungsphase vorgegeben und die Daten dazu dokumentiert. → s. Abb. 63²⁷³

Das auf technischer Ebene längst verankerte Bewusstsein für ganzheitliche Betrachtungen geklebter Produkte ist auf die ökologische Ebene zu projizieren.

Links: Abb. 63
Prozessschritte in der qualitätsgesicherten klebtechnischen Fertigung sowie Interaktionen zwischen Menschen und physischen oder digitalen Komponenten

Aus ökologischer Sicht ist dieses vorausschauende Denken auf das Design für die Umwelt (engl.: Design for Environment – DfE)^{274,275} zu übertragen. Gerade bei langen Produktlebenszyklen wie beispielsweise im Bau-, Luftfahrt- oder Schienenfahrzeugbereich erweist sich eine zuverlässige Dokumentation und unmissverständliche Beschreibung der bei der Auslegung der Verbunde im Lebenszyklusszenario vorgesehenen Reparatur- und End-of-life-Konzepte als unverzichtbar. Besonders im Falle von Reparatur, Instandsetzung oder Renovierung fallen im Bauwesen entsprechend individuell, überwiegend manuell und lokal (also ausgeprägt dezentral) ausgeführte Arbeiten an. Diese Arbeiten sind mittels unterschiedlicher LCA-Ansätze heutzutage durchaus erfassbar, wenngleich gemäß einer aktuellen Übersichtsbetrachtung unterschiedliche Studien verschiedene Aspekte nicht einheitlich akzentuieren.²⁷⁶

- 273 M. Noeske, W. Leite Cavalcanti, H. Brüning, B. Mayer, A. Stamopoulos, A. Chamos, T. Krousarlis, P. Malinowski, W. Ostachowicz, K. Tserpes, K. Brune, R. Ecault; in: *Adhesive Bonding of Aircraft Composite Structures – Non Destructive Testing and Quality Assurance Concepts* (Hrsg: W. Leite Cavalcanti, K. Brune, M. Noeske, K. Tserpes, W. Ostachowicz, M. Schlag); Springer International Publishing, 2020; ISBN 978-3-319-92809-8.
- 274 T. J. O'Neill; »Life Cycle Assessment and Environmental Impact of Polymeric Products«; Rapra Review Reports, Volume 13, Report 156; Rapra Technology Limited: Shrewsbury, UK, 2003, ISBN 1-85957-364-9.
- 275 J. Fiksel; »Design for the Environment«; McGraw-Hill Education: New York, USA, 2011, ISBN 978-0071776226.
- 276 A. Vilches, A. Garcia-Martinez, B. Sanchez-Montanes; »Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review«; *Energy and Buildings* 2017, 135, S. 286–301; <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.042>.

Das Design für die Umwelt (Design for Environment – DfE) ist auf geklebte Produkte zu übertragen.

Die Verfügbarkeit FAIRer Datenkonzepte kann im Zuge der Entwicklungen im Rahmen der digitalen Transformation einen signifikanten und transparenzsteigernden Beitrag liefern:

- Einerseits beeinflusst er wegweisende Entscheidungen der Entwickler oder Hersteller für die Optimierung des Designs.
- Andererseits macht er für den umweltbewussten Nutzer die im Produktdesign vorgesehenen und implementierten Reparatur- und End-of-Life-Szenarien oder die wahrscheinlichsten produktgemäßen Nutzungsszenarien präziser fassbar und reduziert dadurch die noch vorhandenen Ungewissheiten dieser beiden Produktlebenszyklen.²⁷⁰

Aus technischer Sicht können beispielsweise entsprechende materialbezogene Aspekte mit integrierten Sensoren (siehe auch Kapitel 5.6.3–5.6.6) über den gesamten stofflichen Produktlebenszyklus online erfasst werden.²⁷⁷ Aus dem Blickwinkel der Produktgestaltung ist zu erwarten, dass die Megatrends der Individualisierung, der Personalisierung und »der ganzheitlichen Ausrichtung auf den Kunden« mit Marktforderungen, die vor der Herstellungsphase ermittelt werden, einhergehen. Die ganzheitliche Ausrichtung auf den Kunden lässt den Wunsch nach einer Produktdiversifizierung und Anpassung an individuelle Kundenwünsche nicht nur im Bauwesen und der Fahrzeugindustrie, sondern auch in der Elektronik- und Verpackungsbranche²⁷⁸ sichtbar werden. Klebtechnische Lösungen ermöglichen die erforderliche agile und flexible Produktion und »end-of-life«-Materialverwertung, wenn etwa im

277 M. Hübner, H. Schäfer, K. Koschek, W. Lang; IEEE SENSORS October 2019, S. 1–4, Online monitoring of shape memory polymers with a material integrated flexible interdigital sensor; doi: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956514.

278 B. Kölmel, T. Pfefferle, R. Bulander In Dialogmarketing Perspektiven 2018/2019, Tagungsband 13. Wissenschaftlicher interdisziplinärer Kongress für Dialogmarketing (Deutscher Dialogmarketing Verband e. V., Hrsg.), Springer Fachmedien: Wiesbaden, 2019, S. 243–260, Mega-Trend Individualisierung: Personalisierte Produkte und Dienstleistungen am Beispiel der Verpackungsbranche; <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25583-1> (Zugriff April 30, 2020)

Rahmen eines modularen Produktaufbaus die Verbindung mit zielgruppenindividuell gestalteten Fügeteilen zur Umsetzung optischer Elemente desselben technischen Kerns gewünscht sind (siehe auch Kapitel 5,2.6, 5.3.1–5.3.4, 5.4, 5.5). In Abbildung 64 ist dies in der Aufsicht auf ein dreiseitiges Gebäude skizziert, die in Anlehnung an die DIN EN ISO 14040 auf Umweltaspekte bezogen »eine Sachbilanz der Inputs und Outputs« über die gesamte Produktlebensphase darstellt.

Klebtechnische Lösungen ermöglichen sowohl geschickte und angepasste Produktionen als auch »End of Life«-Materialverwertungen.

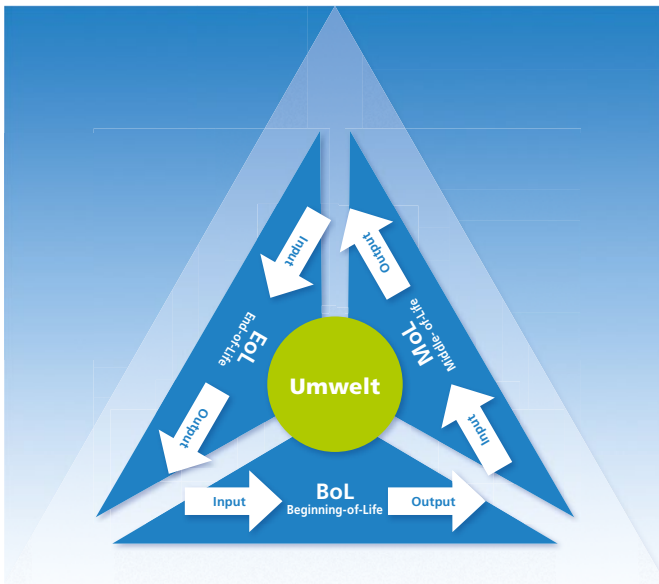


Abb. 64
Generations-
übergreifende
umweltbewusste
Kreislaufwirtschaft

Hier wird erkennbar, dass eine Reparatur, eine stoffliche Entsorgung oder ein Recycling organisatorischen Aufwand bedeuten. Wie ein Produkt genutzt und seiner »End of life«-Verwertung zugeführt wird, bestimmt einen Großteil seiner Umwelteinwirkungen (→ s. Abb. 65). Beides ist nur in vergleichbar geringem Maße beim Produktdesign vorherbestimmbar, wie Rebitzer et al.

Umweltauswirkungen [%]

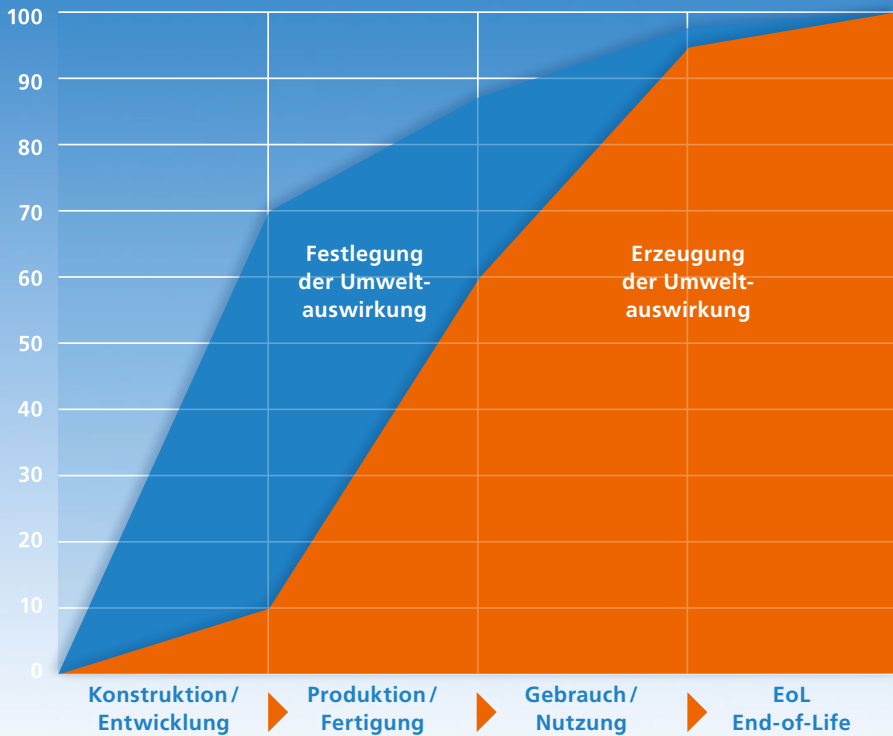


Abb. 65
Ermittlung der
Umweltauswirkungen
eines Produkts entlang
des Lebenszyklus

auch graphisch festhielten.²⁷⁹ Somit sind auch die Endverbraucher geklebter Produkte Akteure, die diese Produktlebenszyklusphase für eine Kreislaufwirtschaft aktiv begleiten müssen.

Auch der Verbraucher ist Beteiligter der Produktlebenszyklusphase »Entsorgung«.

²⁷⁹ G. Rebitzer, T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W.-P. Schmidt, S. Suh, B. P. Weidema, D. W. Pennington, Environment International 30, 2004, 5, S. 701–720, Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications.

3.4 Product Environmental Footprint (PEF) / Umweltfußabdruck und Environmental Product Declaration (EPD) / Umweltproduktdeklara- tion – Instrumente zur Ermittlung der geeignetsten Option zur Bestimmung der Kreislaufwirksam- keit geklebter Produkte

3.4.1 Product Environmental Footprint (PEF) / Umweltfußabdruck

Die Erstellung einer vollständigen Ökobilanz ist vor allem dann mit einem erheblichen Zeit- und Kostenaufwand verbunden, wenn vergleichende Aussagen zur relativen Umweltfreundlichkeit zweier Produkte P1 und P2 erzielt werden sollen. Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bedeutet dies eine »große Herausforderung«. ²⁵⁹ Selbst wenn zwei Produkte P1 und P2 zweier Unternehmen U1 und U2 derselben Produktgruppe angehören, haben bei der Festlegung ihrer Annahmen beide Unternehmen Freiheitsgrade. Die Ausgestaltung dieser Annahmen ist abhängig von der exakten jeweiligen Frage- und Zielstellung, für die sich im ersten LCA-Schritt bei der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens die Unternehmen entscheiden.

Vergleichende Aussagen der relativen Umweltfreundlichkeit zweier Produkte sind aufwändig.

Die Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 legt für Produktsysteme zwar Grundregeln für die ganzheitliche Betrachtung aller

relevanten Umweltwirkungen in allen Lebenszyklusphasen fest, doch bleibt Raum für subjektive Entscheidungen. Besteht vielfach noch ein Konsens, welche Arten von Umweltbelastungen in der Sachbilanz genau betrachtet werden sollen, so ist eine rechnerisch mögliche Gewichtung identifizierter Umweltaspekte »zunächst nicht vorgesehen. Dies bleibt letztlich eine subjektive oder politische Entscheidung«. ²⁵⁹ Eine Entscheidungsorientierung bieten in Deutschland Empfehlungen des Umweltbundesamtes mit Blick auf »Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien« ²⁸⁰ aus dem Jahre 1999.

Die Schwierigkeiten einer vergleichbaren Entscheidungsfindung mithilfe lebenszyklusbasierter digitaler Werkzeuge liegen in dem nicht überall gleich durchgeführten Szenario des Entscheidungswegs. Beispielsweise ermöglichen Pareto-Optimierungen (siehe Kapitel 3.2) multiattributive Analysen. Diese Analysen zum Vergleich zweier funktionsgleicher Produkte – z. B. von U1 für Produkt P1 und U2 für Produkt P2 – würden rechnerisch eine Gewichtung identifizierter und quantitativ erfasster Umweltaspekte anbieten.

Die Schwierigkeit vergleichender Aussagen liegt in uneinheitlich ausgeführten Szenarien.

Beiden Unternehmen sind aber subjektive Entscheidungsspielräume gegeben, wodurch die Gewichtung der Umweltaspekte nicht einheitlich gehandhabt würde. Trotz einheitlicher Metrik für die Einzelaspekte wäre während des datenbasierten Entscheidungsoptimierungsprozesses aufgrund der o. g. subjektiven Entscheidungsspielräume eine objektive Vergleichbarkeit zur relativen Umweltfreundlichkeit der Produkte P1 und P2 auf Basis eines aggregierten Gesamtwerts zumindest erheblich erschwert.

²⁸⁰ S. Schmitz, I. Paulini; »Bewertung in Ökobilanzen Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043 Version '99«; Berlin, 1999; verfügbar als Download unter <http://www.umweltbundesamt.de> (Zugriff April 30, 2020)

Dies gälte umso mehr dem Konsumenten. Er möchte die Produkte P1 und P2 vergleichend betrachten und findet zwei fundierte, wenngleich unterschiedlich gewichtete Aussagen der Unternehmen U1 und U2 vor.

Der Konsument möchte zwei Produkte verlässlich vergleichen.

Folglich war das Ergebnis einer LCA-Studie dreier auf Polyurethanklebstoffen beruhender Klebtechnologien (lösemittelbasiert, wässrig sowie in Pulverform/siehe Kapitel 3.3)²³⁷ auch nicht eine Rangliste unter Zugrundelegung aller beim Einsatz in der Schuhindustrie erreichbaren Umwelteinwirkungen, sondern eine Identifizierung technologischer Optimierungsoptionen für jede der drei Technologien in sich unter Zugrundelegung der gewonnen Einsichten für jeden einzelnen Umwelteinwirkungsaspekt.

Der Product Environmental Footprint – PEF soll nachvollziehbare Umweltvergleiche möglich machen.

Im Unterschied dazu soll der Product Environmental Footprint – PEF vergleichende Umweltaussagen zweier funktionsgleicher Produkte P1 und P2 nachvollziehbar ermöglichen. Im PEF-Leitfaden ist dazu die Festlegung produktgruppenspezifischer Bilanzierungsregeln (engl.: PEF category rules, PEFCR) vorgesehen. Zielgruppe für den PEF sind »Produzenten, Erzeuger und Händler im Lebensmittel- und Non-Food-Sektor, und hier insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen«. ²⁵⁹ Die Grundsätze und Verfahren aus der Norm DIN EN ISO 14025:2011-10 ²⁸¹ enthalten Grundregeln, die auch für die Aufstellung der PEFCR gelten.

281 DIN EN ISO 14025:2011-10 Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen – Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006).

Einschub: PEF-Kategorieregeln – bei Klebstoffen und Klebungen kein kalter Kaffee

Wie sich nach dem Ende der von 2013 bis 2019 andauernden Pilotphase des PEF zeigte, kamen gemäß einer Übersicht der Europäischen Kommission²⁸² in der begrenzten Periode der Pilotprojekte in etwa 90 % der Konsortien Festlegungen zustande. Als weißer Fleck in der Liste der im eng gesetzten Zeitrahmen ausgearbeiteten PEFCR-Entwürfe war ausgerechnet derjenige, der zum Ziel gehabt hätte, den Fußabdruck einer Tasse Kaffee standardisiert zu messen. In diesem Falle ergaben sich Aufgaben für eine Ausarbeitung von PEFCR, deren Bewältigung mehrere Jahre erfordern wird, weil hier im Lebensmittelsektor hochindividuell gewonnene, verarbeitete und konsumierte Naturprodukte zu betrachten sind und vollumfänglich mehrere mögliche Unterkategorien zu erfassen sind.²⁴⁹ Insbesondere das individuelle Verbraucherverhalten beim Kaffeegenuss erweist sich etwa für Hersteller von Röstkaffeeprodukten oft als das sprichwörtliche Lesen im Kaffeesatz.

Die Arbeiten des zuständigen Technischen Sekretariats (engl.: technical secretariat) zur Festlegung produktgruppenspezifischer Bilanzierungsregeln (PEFCR) sind noch nicht abgeschlossen. Im Beispiel des Pilotprojekts »Kaffee« (engl.: pilot coffee), an dem Kaffeeröster, Produzentenvereinigungen und Verpackungshersteller sowie weitere Anspruchsgruppen (engl.: stakeholder) mitwirkten, war dafür eine Reihe von »sehr grundsätzlichen und hochkomplexen Fragen«²⁴⁹ ausschlaggebend. Auf der einen Seite ist »die Umstellung auf einen ressourceneffizienten und umweltschonenden sowie sozialverträglichen Kaffeeanbau die wesentliche Herausforderung des Kaffeesektors.« Und Mitwirkende am technischen Sekretariat versprachen sich laut S. Dierks, dass »das Projekt einen Beitrag zur Erweiterung und Verbesserung der existierenden Datenpools und Methodensets leisten könne«. Auf der anderen Seite ergaben sich mehrere Herausforderungen, die auf die Unterschiedlichkeit und die teilweise mangelnde Datenverfügbarkeit im Ursprung (abhängig von den jeweiligen Naturräumen, Landwirtschaftssystemen oder der Weiterverarbeitung bis zum Transport in die Rösterei), die nicht bekannten Kundenpräferenzen bei der Zubereitung des Kaffeegetränks aus verschiedenen Röstkaffeeprodukten oder auch die zahlreichen Möglichkeiten bei der Zusammensetzung von Kaffeespezialitäten (in Mischung mit Milch oder Süßungsmitteln) zurückgehen. Drei dementsprechend diskutierte Ansätze waren im Technischen Sekretariat des PEFCR-Pilotprojekts »Kaffee« laut S. Dierks folglich:

- die Erstellung eines umfassenden Datensatzes zu Kaffeeanbau und -verarbeitung, wobei einzelne Röstkaffeeprodukte aus Geschmacksgründen ernteabhängig variierende Mischprodukte sein können;
- ein teilweiser Ausschluss der Nutzungsphase in der PEF-Berechnung und -Kennzeichnung, weil letztlich das individuelle Kundenverhalten bei der Zubereitung den PEF mitbestimmt;

282 Eine Übersicht ist zugänglich unter https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/ef_pilots.htm (Zugriff April 30, 2020)

- die Ausarbeitung von unterschiedlichen Regeln für unterschiedliche Subkategorien (engl.: sub-category rules), um die unterschiedlichen Zubereitungsmöglichkeiten abzubilden.

Klebstoffherstellern sind die Quellen ihrer Materiallieferanten und ihre eigenen Prozesse sehr gut bekannt, Kleber führen Klebarbeiten qualitätsgesichert und nachvollziehbar durch. Anwender geklebter Produkte tun ihre Erwartungen und Gewohnheiten im Umgang mit den Produkten kund. Dennoch ist dieser Umgang einem stetigen Wandel unterworfen, weil neben dem Produktproduzenten auch der Produktnutzer mit der Zeit geht.

Mit Blick auf Kategorie-Regeln (PEFCR) für den PEF (Umweltfußabdruck) von Klebstoffen und insbesondere klebtechnisch gefertigten Produkten ist es erforderlich, dass diese Regeln zeitnah ausgearbeitet werden. Sie würden somit für Klebstoffhersteller, Klebstoffanwender sowie Nutzer geklebter Produkte einen wesentlichen Beitrag zur Standardisierung der Erfassung der Umwelteinwirkung von Produkten, die unter Einsatz von Füge-technologien, Fügmaterialien und Fügeprozessen gefertigt werden, liefern. So finden sich denn auch unter den in der 2019 abgeschlossenen Pilotphase des PEF erfolgreich ausgearbeiteten PEFCR, zum Beispiel für meist zumindest teilweise klebtechnisch gefügte Materialverbunde, etwa Schuhe, Batterien und Akkumulatoren oder Wärmedämmung.

Die Kategorie-Regeln (PEFCR) für geklebte Produkte müssen für nachvollziehbare Umweltvergleiche zeitnah ausgearbeitet werden.

Für den Einsatz von Klebstoffen erscheint es aus folgenden Gründen erforderlich, den Blick nicht auf den eingesetzten Klebstoff, sondern ganzheitlich auf das geklebte Endprodukt zu richten:

1. In der Regel ist der Klebstoffanteil im geklebten Endprodukt gering.
2. Eine Fokussierung auf den Klebstoff würde die ökobilanzwirksamen Effekte (siehe Kapitel 1.3, 1.5, 1.7.2, 1.10, 2.5.3–2.5.5, 2.7), die das Kleben im Endprodukt erst möglich macht, außer Acht lassen und die Endproduktbewertung verfälschen.
3. Vorliegende Muster-EPDs von Kleb- und Dichtstoffen für den Baubereich unterstützen diese Argumentation.^{283,284}

Der Klebstoff selbst steht nicht im Mittelpunkt der Umweltbetrachtungen geklebter Produkte.

In Tabelle 1 sind die Anforderungen zur Definition der relevantesten Beiträge zusammengefasst. Diese Relevanzbetrachtung wird im sog. »Screening« bei der Entwicklung der PEFCR durchgeführt, um in den PEF-Analysen die relevanten Indikatoren, Substanzen, Werkstoffe etc. zu betrachten. Aus ökobilanzrelevanter Sicht stellen bei geklebten Produkten nicht die Klebstoffe den entscheidenden Faktor dar, sondern für die Produktlebenszyklusphase »Entsorgung« (»End of Life«) die geklebten Werkstoffe (Fügepartner) des zu betrachtenden (End-)Produkts.

283 <https://ibu-epd.com/veroeffentlichte-epds> (Zugriff April 30, 2020)

284 <https://www.feica.eu/our-priorities/edps> (Zugriff April 30, 2020)

Tabelle 1
Zusammenfassung der Anforderungen zur Definition der relevantesten Beiträge

Gegenstand der Zuordnung	Auf welcher Ebene muss die Relevanz identifiziert werden?	Schwelle
Relevanteste Wirkungskategorien	Normalisierte und gewichtete Ergebnisse	Wirkungskategorien, die kumulativ mindestens 80 % der gesamten Umweltbelastung ausmachen (ohne toxikologiebezogene Wirkungskategorien)
Relevanteste Lebenszyklusphasen	Für jede der relevantesten Wirkungskategorie	Alle Lebenszyklusstadien, die mehr als 80 % zu dieser Wirkungskategorie beitragen
Relevanteste Prozesse	Für jede der relevantesten Wirkungskategorie	Alle Prozesse, die mehr als 80 % zu dieser Wirkungskategorie beitragen
Relevanteste Elementarströme (für die Pilotphase ausgeschlossen)	Für jeden der relevantesten Elementarströme und jede relevanteste Wirkungskategorie	Alle Elementarströme, die mehr als 80 % zu dieser beitragen

Leitlinien für die Erstellung von PEF-Kategorieregeln (PEFCR) stellt die Europäische Kommission in regelmäßig aktualisierter Fassung zur Verfügung.^{285, 286}

Sobald einsetzbare PEFCR ausgearbeitet sind, folgen die Schritte im Rahmen einer PEF-Studie dem Ablauf einer Ökobilanz.²⁵⁹ Detaillierte Ausführungen finden sich auf den Internetseiten des

285 European Commission, PEFCR Guidance document, – Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3, December 2017; zugänglich unter https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEFCR_guidance_v6.3-2.pdf (Zugriff April 30, 2020)

286 Training on Product Environmental Footprint European Commission, Brussels, 13 and 14 January 2014; zugänglich unter <https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEF-training.pdf> (Zugriff April 30, 2020)

Umweltbundesamtes²¹⁶ oder der Europäischen Kommission²⁸⁷, die auch eine Präsentation eines übersichtlich präsentierten PEF-Trainings zur Verfügung stellt.²⁸⁵

Eine Übersicht über die Phasen einer PEF-Studie ist in Abbildung 66 aufgeführt. Darin sind auch die kosten- und zeitsparenden Erleichterungen veranschaulicht, die nach einer vorangegangenen, abgestimmten und vereinheitlichenden Entwicklung von PEFCR möglich sind. Sie erlauben dank einmaliger Standardisierung eine nachvollziehbare Erfassung der Umweltwirkungen jedes individuellen Produkts einer Produktkategorie.

Nachfolgend werden die graphisch dargestellten Schritte und Zusammenhänge eingehender betrachtet.

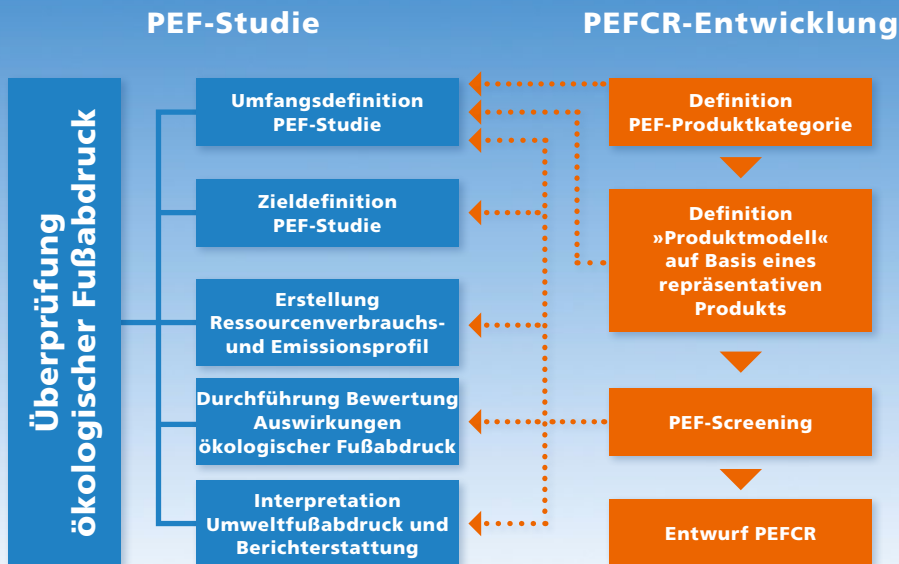
Die im ersten Schritt einer individuellen PEF-Studie festzulegenden Ziele legen die verfolgten Absichten, die Breite und Tiefe der Betrachtung fest.^{286, 287} Hierzu gehören:

- die beabsichtigten Anwendungen der Studie (z. B. Zurverfügungstellung von Produktinformationen für einen Kunden)
- die Gründe der Durchführung (z. B. Ausarbeitung einer Antwort auf eine Kundenanfrage)
- das Zielpublikum (z. B. eine externe und technisch versierte Zielgruppe im Rahmen der Geschäftsbeziehungen zwischen Unternehmen)
- die Entscheidung, ob die Studie veröffentlicht werden soll
- der Bevollmächtigte (engl.: commissioner) der Studie
- eine möglicherweise gewünschte Prüfung der Studie (z. B. durch externe Experten).

In den für dieses Stadium relevanten PEFCR sind die Anforderungen für die Prüfung einer PEF-Studie spezifiziert.

In jeder PEF-Studie wird für ein zu untersuchendes, geklebtes Produkt eine Produktkategorie definiert. Dadurch wird deutlich, welche anderen, möglicherweise auch anders gefügten Produkte

287 Product Environmental Footprint (PEF) Guide, Deliverable 2 and 4A of the Administrative Arrangement between DG Environment and the Joint Research Centre No N 070307/2009/552517, including Amendment No 1 from December 2010; Ref. Ares (2012) 873782 – 17/07/2012.



als vergleichbar und vom Konsumenten als Alternative zu diesem Produkt betrachtet werden können.²¹⁶ Die Produktklassifizierung erfolgt im entsprechenden PEFCR-Untersuchungsrahmen mithilfe des NACE/CPA²¹⁶-Codes (Statistische Güterklassifikation in Verbindung mit den Wirtschaftszweigen (engl.: Statistical Classification of Products by Activity, CPA). Deren Güterkategorien beziehen sich auf die in der Statistischen Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft (NACE) definierten Wirtschaftszweige. Dieser PEFCR-Untersuchungsrahmen definiert das repräsentative Produkt und die PEFCR spezifizieren die für die jeweilige Produktkategorie zu erfassenden Untersuchungseinheit(en) (engl.: unit(s) of analysis) und deren Detailgrad.

Abb. 66

Phasen einer PEF-Studie²⁸⁶:

- Festlegung der Ziele
- Festlegung des Untersuchungsrahmens
- Erstellung Ressourcenverbrauchs- und Emissionsprofil (Sachbilanz)
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung und Berichterstattung und ihr Bezug zur vorangegangenen, einmaligen und abgestimmten Entwicklung von PEFCR

Die PEF-Vorgehensweise vergleicht bei geklebten Produkten diese mit den durchschnittlichen Umweltwirkungen der zugeordneten Produktkategorie.

Bei der PEF-Vorgehensweise werden somit die Umweltwirkungen eines konkreten, beispielsweise geklebten Produkts mit den, unabhängig vom Fügeverfahren, durchschnittlichen Umweltwirkungen der zugeordneten Produktkategorie verglichen. Die betrachteten Produkte sind mit einem Produktmodell so zu umreißen, dass dieser Vergleich bezogen auf einen kategorietyptischen Bezugspunkt (engl.: benchmark) eines ökologisch durchschnittlichen Produkts im Rahmen der Untersuchungen erreicht werden kann. Hierfür ist davon auszugehen, dass die durchschnittlichen Umweltwirkungen der Produktkategorie wesentlich durch die Umweltwirkungen des Produkts mit dem höchsten Marktanteil verkörpert werden. Das Ergebnis der PEF-Studie wäre beispielsweise die vergleichende Aussage, dass Produkt P1 umweltfreundlicher als das durchschnittliche Produkt ist.

Mögliches PEF-Ergebnis: Produkt P1 ist umweltfreundlicher als das durchschnittliche Produkt.

Im zweiten Schritt der PEF-Studie eines individuellen Produkts werden Umfang und Anwendungsbereich der Studie, das zu bewertende System und die dazu erforderlichen analytischen Spezifikationen festgelegt. Bei funktionsbasiertem Herangehen, wie es auch in DIN EN ISO 14025²⁸¹ geregelt ist, werden die funktionelle Einheit und der Referenzfluss festgelegt. Zur Herleitung ersterer werden vier Aspekte definiert:

- Welche Funktion und welchen Einsatz soll die Untersuchungseinheit erbringen (was)?
- Welchen Umfang haben Funktion und Einsatz (wie viel)?
- Welche Qualität wird von der Untersuchungseinheit erwartet (wie gut)?
- Welche Beständigkeit und Lebensdauer soll das Produkt aufweisen (wie lange)?

Einschub

Im anschaulichen PEF-Training²⁸⁶ wird als Beispiel genau eine Matratze durchschnittlicher Größe genannt, die über zehn Jahre täglich eingesetzt werden und formstabil bleiben soll. Eine quantitative Beschreibung der Produktleistung ist oft eine Herausforderung, einfacher sind vergleichende qualitative Beschreibungen. Beispielsweise soll eine Matratze ein »bequemes« Liegen ermöglichen oder ein Waschmittel soll Wäsche »sauber« machen.

Was zum zweiten den Referenzfluss betrifft, so ist dieser diejenige Produktmenge, die zur Erfüllung der funktionellen Einheit zur Verfügung stehen muss²¹⁶, also in den betrachteten Beispielen 11 kg Federkernmatratze oder 75 Milliliter Flüssigwaschmittel mit der eingesetzten Verpackung.

Bei der Erstellung des Ressourcennutzungs- und Emissionsprofils unter Quantifizierung der Sachbilanz im dritten Schritt einer PEF-Studie werden Daten erhoben und für alle Lebenszyklusphasen die Stoffströme als Input und Output erfasst.²⁶⁸

Für die im vierten Schritt folgende Wirkungsabschätzung werden in Tabelle 2 aufgeführte umweltbezogene Wirkungskategorien mit dazugehörigen Wirkungsindikatoren verwendet.²¹⁶ Darüber hinaus können »zusätzliche Umweltinformationen« relevant sein, wie beispielsweise der Einfluss auf die Biodiversität, die noch nicht über anerkannte lebenswegbasierte Wirkungskategorien quantifizierbar sind.²⁶⁸ Die für die jeweilige Produktkategorie ausgearbeiteten PEFCR ermöglichen hier einheitlich eine Fokussierung auf die wichtigsten Umwelteinwirkungen während der relevantesten Lebensphasen²⁸⁶, deren Auswahl und die Gewichtung das Untersuchungsergebnis nicht tendenziös beeinflussen.²⁶⁸

Die Produktkategorie-spezifisch ausgearbeiteten PEFCR ermöglichen eine Fokussierung auf die wichtigsten Umweltwirkungen während der ausschlaggebenden Produktlebenszyklusphasen.

Tabelle 2
Umweltbezogene
Wirkungskategorien
und dazugehörige
Wirkungsindikatoren
für die Wirkungs-
abschätzung in einer
PEF-Studie

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator
Klimawandel (gesamt, biogen, Landnutzung und Transformation)	Erhöhung der Infrarotstrahlung
Stratosphärischer Ozonabbau	Ozonabbau-Potenzial
Humantoxizität, krebs-erregend und nicht-krebs-erregend	Vergleichbare Toxizitätseinheit für Menschen
Ökotoxizität, Frischwasser	Vergleichbare Toxizitätseinheit für Ökosysteme
Feinstaub	Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Ratio der Aufnahme von Feinstaub
Ionisierende Strahlung	Menschliche Expositionseffizienz bezogen auf U ²³⁵
Bildung von	Erhöhung des troposphärischen Ozons
fotochemischem Ozon	Kumulative Überschreitungen hinsichtlich versauernder Wirkung
Versauerung, terrestrisch	Kumulative Überschreitungen hinsichtlich eutrophierender Wirkung
Eutrophierung, terrestrisch	Kumulative Überschreitungen hinsichtlich eutrophierender Wirkung
Eutrophierung, aquatisch	Anteil der Phosphornährstoffe, die ins Kompartiment Frischwasser gelangen
Eutrophierung, marin	Anteil der Stickstoffnährstoffe, die ins Kompartiment Meer gelangen

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator
Landnutzung	Bodenqualitätsindex ²⁸⁸ , Biotische Produktion, Erosionswiderstand, Mechanische Filtrierung, Grundwasseranreicherung, Veränderungen im organischen Bodenmaterial
Wasserverbrauch	Potenzielle Einschränkungen für zukünftige Nutzer, Wassernutzung bezogen auf lokale Wasserknappheit
Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle	Abiotische Ressourcenaufzehrung

Damit als Ergebnis einer PEF-Studie jeder Wirkungsindikator, der den Umweltfußabdruck quantitativ beschreibt, angegeben werden kann, sind Charakterisierungsmodelle erforderlich und hinterlegt. Diese sind Rechenmodelle, die für die Umwandlung der Sachbilanzergebnisse in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet werden und so entwickelt werden müssen, dass sie in der praktischen Anwendung robust sind.²⁶⁸ In den PEFCR sind dann die wesentlichen Wirkungsfaktoren zu diskutieren und festzulegen sowie in einer folgenden Studie zu betrachten.

Eine Fassung der zyklischen Fußabdruckformel (engl.: circular footprint formula, CFF) aus dem Jahre 2018²⁸⁵ für Produkte ist eine Kombination von Material-, Energie- und Entsorgungsbeiträgen, wie in Abbildung 67 aufgeführt. Eine entsprechende Betrachtungsweise wurde in Kapitel 2.5 eingeführt. In der modularen Fassung dieser Formel, kurz CFF-M, werden zunächst die bei der Produktherstellung auftretenden Onera aufgeführt, die bei einer Betrachtung von der Wiege bis zum Werkstor berücksichtigt werden. Die verwendeten Parameter werden nachfolgend betrachtet. → s. **Abb. 67**

288 V. De Laurentiis, M. Secchi, U. Bos, R. Horn, A. Laurent, S. Sala, *Journal of Cleaner Production* 2019, 215, S. 63–74, Soil quality index: Exploring options for a comprehensive assessment of land use impacts in LCA; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.238> .

MATERIAL

$$(1-R_1)E_V + R_1 \times \left(AE_{\text{recycled}} + (1-A)E_V \times \frac{Q_{\text{Sin}}}{Q_P} \right) + (1-A)R_2 \times \left(E_{\text{recyclingEOL}} - E_V^* \times \frac{Q_{\text{Sout}}}{Q_P} \right)$$

ENERGIE

$$(1-B)R_3 \times (E_{ER} - LHV \times X_{ER,heat} \times E_{SE,heat} - LHV \times X_{ER,elec} \times E_{SE,elec})$$

BESEITIGUNG

$$(1-R_2-R_3) \times E_D$$

Abb. 67
Die zyklische
Fußabdruckformel
(engl.: circular foot-
print formula, CFF)²⁸⁵

Zunächst sei noch auf die modulare Fassung dieser Formel, kurz CFF-M, in Abbildung 68 verwiesen, in der zuoberst die bei der Produktherstellung auftretenden Onera aufgeführt sind, die bei einer Betrachtung von der Wiege bis zum Werkstor berücksichtigt werden.

Daraufhin werden die zusätzlichen Informationen von der End-of-Life (EoL) Lebenszyklusphase zusammengefasst. Diese umfassen Beiträge für Onera und Nutzen aus dem Input oder dem Output von Sekundärrohstoffen (engl.: secondary materials), für die Energierückgewinnung und für die Entsorgung (siehe hierzu auch Kapitel 2.5.1).

Onera Produktion

$$(1-R_1)E_V + R_1 \times E_{recycled}$$

Von-der-Wiege-zum-Werkstor

Onera und Vorteile beim Einsatz Sekundärwerkstoffe

$$-(1-A)R_1 \times \left(E_{recycled} - E_V \times \frac{Q_{Sin}}{Q_P} \right)$$

Onera und Vorteile bei der Produktion Sekundärwerkstoffe

$$(1-A)R_2 \times \left(E_{recycledEoL} - E_V^* \times \frac{Q_{Sout}}{Q_P} \right)$$

Energie-rückgewinnung

$$(1-B)R_3 \times \left(E_{ER} - LHV \times X_{ER,heat} \times E_{SE,heat} - LHV \times X_{ER,elec} \times E_{SE,elec} \right)$$

Beseitigung

$$(1-R_2-R_3) \times E_D$$

In der zyklischen Fußabdruckformel kommen zwei dimensionslose Zuordnungsfaktoren zum Vorschein: A aus einem Wertebereich zwischen 0,2 und 0,8 und B, welches bei PEF-Studien die Standardeinstellung (engl.: default) »Null« (»0«) haben sollte. Die weiteren Parameter sind in Tabelle 3 beschrieben.

Abb. 68
Modulare Form der zyklischen Fußabdruckformel (engl. CFF-M)²⁸⁵

Tabelle 3
Parameter in der
zyklischen
Fußabdruckformel

Parameter	Beschreibung
A	Zuordnungsfaktor für Onera und Nutzen beim Vergleich zweier Lebenszyklen mit dem Ziel, Marktgegebenheiten widerzuspiegeln; meist ist $0,2 \leq A \leq 0,8$
B	Zuordnungsfaktor für Energierückgewinnungsprozesse; Standardeinstellung $B = 0$
$Q_{S_{in}}$	Qualität des eingehenden Altmaterials, i.e. Qualität des wiederverwerteten Materials am Punkt der Substitution
$Q_{S_{out}}$	Qualität des ausgehenden Altmaterials, i.e. Qualität des wiederverwertbaren Materials am Punkt der Substitution
Q_p	Qualität des Ausgangsmaterials, i.e. Qualität des Rohmaterials
R_1	Anteil des Materials am Herstellungs-Input, der aus einem früheren System wiederverwendet wird
R_2	Anteil des Produktmaterials, der in einem späteren System wiederverwertet (oder wiederverwendet) wird; R_2 soll den Ineffizienzen in den Sammlungs- und Wiederverwertungs- (oder Wiederverwendungs-)prozessen Rechnung tragen. R_2 soll am Ausgang der Wiederverwertungsanlage gemessen werden.
R_3	Anteil des Produktmaterials, der zur Energierückgewinnung in der EoL-Phase verwendet wird
$E_{recycled} (E_{rec})$	pro funktioneller Einheit auftretende spezifische Emissionen und verbrauchte Ressourcen, die aus dem Wiederverwertungsprozess (engl.: recycling process) des wiederverwerteten (wiederverwendeten) Materials resultieren, wobei Sammlungs-, Sortierungs- und Transportprozesse einbezogen werden

Parameter	Beschreibung
$E_{\text{recyclingEoL}}$ (E_{recEoL})	pro funktioneller Einheit auftretende spezifische Emissionen und verbrauchte Ressourcen, die aus dem Wiederverwertungsprozess (engl.: recycling process) in der EoL-Phase resultieren, wobei Sammlungs-, Sortierungs- und Transportprozesse einbezogen werden
E_v	pro funktioneller Einheit auftretende spezifische Emissionen und verbrauchte Ressourcen, die aus der Einbringung und Vorbehandlung von Neumaterial resultieren
E^*_v	pro funktioneller Einheit auftretende spezifische Emissionen und verbrauchte Ressourcen, die aus der Einbringung und Vorbehandlung von Neumaterial resultieren, für das eine Substitution durch wiederverwertbares Material angenommen wird
E_{ER}	pro funktioneller Einheit auftretende spezifische Emissionen und verbrauchte Ressourcen, die aus dem Energierückgewinnungsprozess resultieren (z. B. Verbrennung mit Energierückgewinnung, Deponie mit Energierückgewinnung).
$E_{SE,heat}$ und $E_{SE,elec}$	pro funktioneller Einheit auftretende Emissionen und verbrauchte Ressourcen, die aus der spezifischen substituierten Energiequelle resultiert hätten, für Wärme (engl.: heat) und Elektrizität
ED	pro funktioneller Einheit auftretende spezifische Emissionen und verbrauchte Ressourcen, die aus der Entsorgung von Reststoffen in der EoL-Phase des analysierten Produkts resultieren, ohne Energierückgewinnung
$X_{ER,heat}$ und $X_{ER,elec}$	Effizienz des Energierückgewinnungsprozesses für Wärme (engl.: heat) und Elektrizität
LHV	unterer Heizwert des Produktmaterials, das zur Energierückgewinnung eingesetzt wird

Die Komplexität des Umwelt-Fußabdrucks (PEF) verdeutlicht – auch für geklebte Produkte – die Bedeutung der Entwicklung digitaler Werkzeuge.

Die Komplexität der Ermittlung des PEF (Produkt-Umweltfußabdruck), die in diesen Rechenregeln zutage tritt, macht noch einmal deutlich, wie viel Auftrieb die Fortschritte bei der Entwicklung digitaler Werkzeuge erfahren und mit zunehmender Dynamik auch zukünftig erhalten werden. Verantwortungsvolles unternehmerisches Handeln wird von nachvollziehbaren, standardisierten Verfahren zur Ermittlung der Produkt-Umwelteinwirkungen unterstützt und auf der Basis verfügbarer und fundierter Informationen den Menschen, die sich zunehmend weniger als Konsumenten und immer mehr als ebenfalls verantwortungsvoll Handelnde begreifen, anhand verständlicher Kennwerte vermittelbar. Denn regionale wie auch globale Märkte werden von immer stärker vernetzten und mitdenkenden Menschen getragen.

Standardisierte, nachvollziehbare Verfahren zur Ermittlung von Umwelteinwirkungen geklebter Produkte unterstützen verantwortungsbewusstes unternehmerisches Handeln.

3.4.2 Environmental Product Declaration (EPD)/ Umweltproduktdeklaration

Bei einer Umweltproduktdeklaration (Environmental Product Declaration – EPD) handelt es sich um ein Ökolabel des Typs III (→ s. Abb. 69), welches Umweltinformationen über den Produktlebenszyklus neutral bereitstellt und kommuniziert.²⁸⁹ Auf quantifizierter Basis dokumentiert eine solche EPD umweltbezogene Informationen über den Produktlebenszyklus und ermöglicht Vergleiche zwischen funktionsgleichen Produkten oder sog. »declared units«, z. B. pro kg. Ihr liegen unabhängig überprüfte und DIN EN ISO 14040²⁸¹-konforme Daten aus Ökobilanzen, Sachbilanzen oder Informationsmodulen zugrunde. Produktver-

289 D. Fischer, greenBUILDING 2017, Sonderausgabe BAU, S. 18–21, Umweltkennzeichnungen – eine Typfrage!. https://www.greenbuilding-magazin.de/fileadmin/user_upload/greenBUILDING/BAU2017/gB_BAU17_018.pdf (Zugriff April 30, 2020)

gleiche können angesichts unterschiedlicher weltweit zum Einsatz kommender EPD-Programme²⁹⁰ hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen dann von Anwendern oder Konsumenten durchgeführt werden, wenn ihre LCAs auf denselben Produktkategorie-Regeln (engl.: Product Category Rules, PCRs) basieren. In diesen Regeln sind spezifische Leitfäden und Anforderungen für die Entwicklung einer Ökobilanz ausgeführt. Es werden Parameter für Parameter Umweltindikatoren für unterschiedliche Wirkungskategorien entlang des Produktlebenszyklus generiert und zusammen mit weiteren Umweltinformationen in die EPDs einbezogen. Der europäische Verband der Kunststoffindustrie (PlasticsEurope)²⁹¹ und der Verband der europäischen Kleb- und Dichtstoffindustrie (FEICA)²⁹² haben auf dieser Basis EPD-Methodiken erarbeitet.²⁹³
 → s. Abb. 69²⁹⁴

Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declarations – EPDs) dokumentieren quantifiziert Umweltinformationen über den Produktlebenszyklus und ermöglichen Vergleiche zwischen funktionsgleichen Produkten oder sog. »declared units«.

- 290 M. D. Bovea, V. Ibáñez-Forés, I. Agustí-Juan; »7 – Environmental product declaration (EPD) labelling of construction and building materials«; in: Eco-efficient Construction and Building Materials Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering; Woodhead Publishing, 2014, Pages 125–150; <https://doi.org/10.1533/9780857097729.1.125>
- 291 PlasticsEurope, Brüssel / Frankfurt / London / Mailand / Paris, Life Cycle Thinking, <https://www.plasticseurope.org/en/resources/eco-profiles> (Zugriff April 30, 2020)
- 292 FEICA; Brüssel <https://www.feica.eu> (Zugriff April 30, 2020)
- 293 FEICA, Brüssel, <https://www.feica.eu/our-priorities/edps> (Zugriff April 30, 2020)
- 294 J. Laso, M. Margallo, P. Fullana, A. Bala, C. Gazulla, A. Irabien, R. Aldaco, MethodX 2017, 4, S. 143–152, Aiding eco-labelling and its implementation: Environmental Impact Assessment Methodology to define Product Category Rules for canned anchovies.

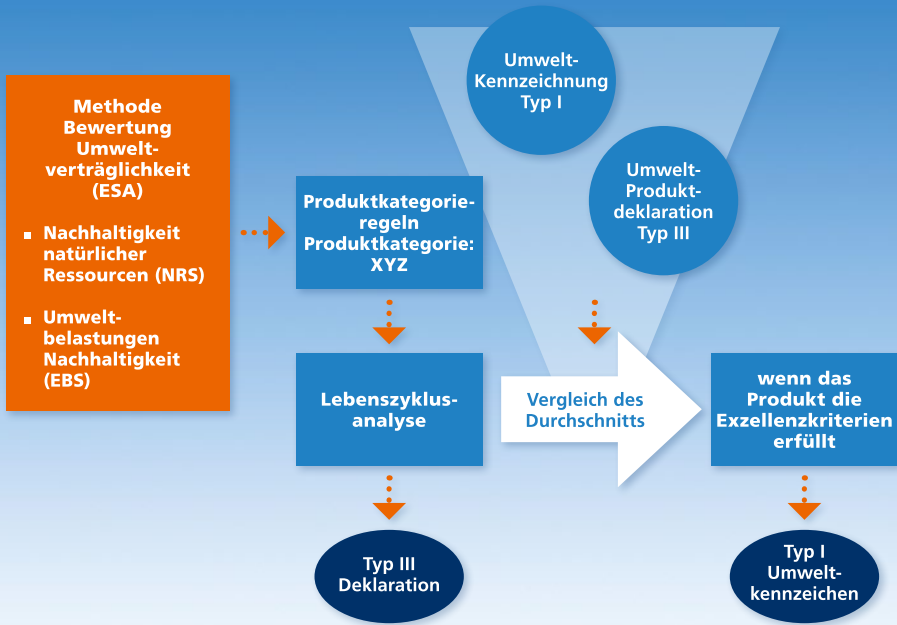


Abb. 69
Kombination von Typ-I- und Typ-III-Ökolabels unter Verwendung der Methode der Umweltverträglichkeitsprüfung (ESA) zur Definition von Produktkategorie-Regeln (PCRs)

Muster-EPDs (Model EPDs) für Klebstoffe fokussieren sich zwangsläufig auf den Klebstoff selbst.

Soweit relevant enthält eine typische EPD Informationen über die Umweltauswirkungen eines Klebstoffs und damit schließlich auch eines geklebten Produkts hinsichtlich Wirkungskategorien wie die globale Erwärmung, den Abbau der Ozonschicht, die Wasserverschmutzung, die Ozonbildung und die Treibhausgasemissionen. EPDs unterstützen Klebstoffhersteller, Klebstoffanwender und Nutzer geklebter Produkte, die nachhaltigkeitsrelevanten Eigenschaften und die Umweltwirkungen eines Produkts besser zu verstehen. Entwickler bekommen Kriterien zur umweltbewussten Materialauswahl an die Hand. Hersteller können auf zuverlässigem und transparentem Wege die Umweltleistung ihrer Produkte kommunizieren. Anwender können geklebte Produkte mit den von ihnen geforderten Umweltspezifikationen vergleichen, was die Kaufentscheidung erleichtert.

Der Klebstoffanteil in einem geklebten Produkt ist in der Regel eher gering.

Für die unterschiedlichen Industriebereiche (siehe Kapitel 3.1) sind bzw. werden Nachhaltigkeitskriterien eingeführt, die auf Basis fundierter Umweltdaten zu erfüllen sind. Für Bauprodukte und den Bausektor sind Grundregeln für die Erstellung von EPDs in der DIN EN 15804²⁹⁵ festgeschrieben. Es ist natürlich möglich, dass ein Klebstoffhersteller auf dieser Basis mit entsprechendem Aufwand eine EPD erarbeitet und veröffentlicht. Dies geschieht auch in Einzelfällen.²⁹⁶ Die vorliegenden Muster-EPDs²⁹⁷ (engl.: Model EPDs) für Bauklebstoffe und -beschichtungen sind eine pragmatische Antwort auf den damit verbundenen Aufwand und die Inflexibilität. Im Gegensatz zu den Standard-EPDs, die für jedes einzelne Klebstoffprodukt entwickelt werden müssten, was bei 33.000 unterschiedlichen Klebstoffen (siehe Kapitel 1.8) unverhältnismäßig wäre, und zu Durchschnitts-EPDs, die für Klebstoffe ungeeignet sind, da die chemische Zusammensetzung, selbst innerhalb einer Klebstoffklasse, sehr unterschiedlich ist, bieten sich für Klebstoffe solche Muster-EPDs an. Diese Muster-EPDs wurden im Rahmen einer von-der-Wiege-zum-Werkstor (engl.: cradle to gate) Betrachtung auf der Basis von Produktkategorieeregeln²⁹⁸, zum Beispiel für Reaktivharzprodukte (engl.: Reaction Resin Products) ausgearbeitet. Auf dieser Basis veröffentlichte die FEICA Muster-EPDs für mehrere Produktkategorien.²⁹⁹ Bei diesen Muster EPDs werden nicht spezifisch einzelne Produkte hochdetailliert erfasst, vielmehr wird für eine gesamte Produktkategorie einheitlich ein Szenario unter Zugrundelegung des ungünstigsten Falls (engl.: worst case scenario) betrachtet. Bei Hausbau oder -renovierung fließen auf dessen Grundlage ermittelte Umweltwirkungen

295 DIN EN ISO 15804:2014-07, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umwelterklärungen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Beuth Verlag: Berlin, 2014

296 <https://ibu-epd.com/veroeffentlichte-epds> (Zugriff April 30, 2020)

297 <https://www.feica.eu/our-priorities/edps> (Zugriff April 30, 2020)

298 <https://www.ul.com/offerings/product-category-rules-pcrs>

299 FEICA, Published European Core Model EPDs for adhesives and sealants, <https://www.feica.eu/our-priorities/edps> (Zugriff April 30, 2020)

fließen in die Ökobilanz eines Gebäudes als Beitrag zu den Ökobilanzen aller verwendeten Bauprodukte und -materialien mit ein.

Die Entwicklung von Standard-EPDs für jeden Klebstoff wäre angesichts der Vielzahl an Klebstoffprodukten und des geringen Klebstoffanteils im geklebten Produkt unverhältnismäßig.

Beispiel Bauindustrie³⁰⁰

Die Umweltfreundlichkeit, Ressourcenschonung oder Nachhaltigkeit bestimmter Produkte oder Materialien hängt wesentlich von den Gebäuden ab, in denen sie eingesetzt werden. Ein Iglu wird typischerweise manuell nur aus dem einzigen Baustoff Schnee hergestellt. Schnee ist natürlich, umweltfreundliches und vollständig recycelfähig. Somit sind der Baustoff Schnee und das Gebäude Iglu aus ökologischer Sicht nachhaltig. Das gilt allerdings nur unter gewissen Bedingungen. Würde man ein Iglu in anderen Klimazonen errichten, erfordert die Produktion und der Import des Baustoffs Schnee großen Energieaufwand und das Iglu würde, wenn der Schnee nicht gekühlt oder permanent ausgetauscht wird, schon nach kurzer Zeit schmelzen.

Das stark simplifizierte Beispiel zeigt deutlich, warum Bauprodukte keine Endprodukte sind und ihr Einfluss auf die Umwelt wesentlich davon abhängt, wie, wo und wofür sie verwendet werden. Deshalb sind auf den ersten Blick umweltfreundliche Baustoffe keine Garantie für Nachhaltigkeit. Das ist der Grund für EPDs: Sie enthalten die Daten, die zur Berechnung und Bewertung von Umwelteinflüssen im konkreten Fall benötigt werden. EPDs in diesem Kontext basieren auf Ökobilanzen für Bauprodukte. Diese summieren und analysieren die Umweltwirkungen eines bestimmten Produktes über seinen Lebensweg von der Rohstoffgewinnung bis zum einbaufertigen Produkt (engl. »cradle-to-gate«) und beziehen auch mit dem Produkt zusammenhängende Prozesse und Faktoren wie beispielsweise Verpackungen und Transporte mit ein. Zunehmend werden auch weitere Phasen des Produktlebenszyklus berücksichtigt, wie die Produktlebenszyklusphasen »Nutzung« und »Entsorgung«.

Ökobilanzen liefern keine singuläre Kennzahl oder Bewertung, sondern bilden eine Vielzahl verschiedener Umwelteinflüsse wie beispielsweise Treibhausgasemissionen Einfluss sauren Regens, Smogbildung, Verbrauch fossiler Ressourcen und Wasser oder den Recyclinganteil einzeln ab. Diese Informationen über weitgehend alle Umweltwirkungen ermöglichen nachhaltige Lösungen. Im Wesentlichen besteht die Ökobilanz eines Gebäudes aus den Ökobilanzen aller verwendeten Bauprodukte und -materialien und dem Energieverbrauch während der

300 Institut Bauen und Umwelt – IBU, <https://ibu-epd.com/was-ist-eine-epd> (Zugriff April 30, 2020)

Produktlebenszyklusphase »Nutzung«. Die Umweltwirkungen eines kompletten Gebäudes können ganzheitlich von der Gewinnung und Produktion der Materialien über den Bau und die Produktlebenszyklusphase »Nutzung« bis zur Produktlebenszyklusphase »Entsorgung« (Rückbau des Gebäudes) betrachtet und berechnet werden.

Die Berechnung der Gebäude-Ökobilanz während seiner Planungsphase ermöglicht aus ökologischer Sicht den Vergleich verschiedener Materialien und Konzepte und die Gebäudeoptimierung. Wie das Beispiel »Iglu« zeigt, ist der direkte Vergleich verschiedener Bauprodukten und deren Ökobilanzen in der Regel wenig sinnvoll. Im Rahmen von Gebäude-Ökobilanzen hingegen stellt ihr Vergleich eine wesentliche Grundlage für die Planung nachhaltiger Bauwerke dar. Deshalb sind in einigen Zertifizierungssystemen für nachhaltige Gebäude Ökobilanzen verpflichtend (z. B. bei der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB)).³⁰¹

Moderne Gebäude verbrauchen auf Grund ihrer werden optimierten Energieeffizienz weniger Energie in der Produktlebenszyklusphase »Nutzung«, was zu einem insgesamt geringeren Gesamtenergiebedarf führt. Dies führt zu einer prozentualen Energieanteilsverschiebung für die Produktlebenszyklusphasen »Nutzung« und »Herstellung« am Gesamtenergiebedarf und damit auch an den Umweltwirkungen des Gebäudes. Im Falle eines »Nullenergie-Gebäudes« würde die Produktlebenszyklusphase »Herstellung« die gesamten Umweltwirkungen ausmachen.

Die Lebenszyklusplanung im Bauwesen kann unterstützt durch die Nutzung der buildingSMART Ontologie³⁰² angelegt werden, welche das Gebäudeinformationsmodell, Umweltdaten, Daten des geographischen Informationssystems (engl.: geographic information systems, GIS) und Produktinformationen aus einer Materialdatenbank in einander verzahnt und durchdacht zusammenführt, wie in Abbildung 70 dargestellt.

301 Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), <https://www.dgnb.de/de/verein/syste>^m (Zugriff April 30, 2020)

302 H. Bell, L. Brørkhaug In ECPPM 2006: European Conference on Product and Process Modelling 2006: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction Valencia, Spain, September 13–15, 2006; Manuel Martinez, Raimar Scherer. Hrsg.; CRC Press: Boca Raton, (Florida (USA), A buildingSMART ontology«.



Abb. 70
Beiträge zur Lebenszyklusplanung in der buildingSMART Ontologie

3.4.3 Vergleich: Product Environmental Footprint (PEF) und Environmental Product Declaration (EPD)

EPDs allgemein eignen sich aufgrund unterschiedlicher Daten-Verdichtungsgrade (Granularitäten) in der Regel nur für einen direkten Produktvergleich, wenn sie nach den PCRs des gleichen Programmoperators erstellt wurden. Die o. g. Beispiele beziehen sich ausschließlich Klebstoffklassen für den Bereich Bauwesen. Diese Systematik leuchtet in diesem Zusammenhang ein, denn der Bau-Klebstoffhersteller kann nicht wissen, wie und wo genau das Haus gebaut wird, in dem sein Klebstoff eingesetzt wird. Er kann also lediglich zu seinem Material, welches aus Sicht des Hausbaus Teil der Lieferkette ist, Aussagen treffen.

EPDs eignen sich in der Regel nur für den direkten Produktvergleich.

Es gibt mehrere unterschiedliche Ansätze EPDs zu erstellen. Aus diesem Grund sind die GWP-Werte verschiedener EPD-Betrach-

tungen nicht miteinander vergleichbar.³⁰³ Die Ansätze für den Bereich Bauwesen stellen einen Spezialfall für die vom IBU²⁹⁹ gewählte funktionelle Einheit dar. Dieses akzeptierte und verifizierte System besteht aus festgelegten Kategorie-Regeln (CR), die die zu betrachtenden Wirkungskategorien definieren. Diese Betrachtung erfolgt einzeln für jede Wirkungskategorie. Die Auswahl der Kategorie-Regeln erfolgt analog zu den PEFCR aufbauend auf der ISO 14025 (siehe Kapitel 3.4.1), und aus Anwendersicht ist hier eine Einigung auf ein einheitliches Vorgehen und eine Harmonisierung erforderlich, etwa um Unstimmigkeiten im Falle mehrerer PCR für dieselbe Produktkategorie oder Verwirrung bei Produkthanwendern im Falle von »ähnlich-aber-unterschiedlich« (engl.: »similar-but-different«) Methoden zu vermeiden^{304,305,306,307}.

Entscheidend ist in allen Fällen die FAIRe Verfügbarkeit, Zugänglichkeit und Interoperabilität der zugrundeliegenden Datensätze, welche in Kapitel 5.6.4 als digitaler Umwelt-Zwilling thematisiert werden. Ob diese dann im Sinne eines Umweltzeichens, durch einen Satz von Kennwerten (wie bei einer LCA oder einer EPD) oder durch einen aggregierten Kennwert technisch weniger interessierten Anwendern kommuniziert werden, ist letztlich eine Frage der fortschreitenden Bewusstseinsbildung bei den Materialanwen-

-
- 303 F. Pacheco Torgal, L. F. Cabeza, J. Labrincha, A. Giuntini de Magalhaes; *Eco-efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies*; Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering; Woodhead Publishing: Cambridge (UK), 2014; ISBN 0857097725, 9780857097729
- 304 N. Minkov, L. Schneider, A. Lehmann, M. Finkbeiner, *Journal of Cleaner Production* 2015, 94, S. 235–246, Type III Environmental Declaration Programmes and harmonization of product category rules: status quo and practical challenges.
- 305 A. Del Borghi, L. Moreschi, M. Gallo, *International Journal Life Cycle Assess* 2019; *Communication through ecolabels: how discrepancies between the EU PEF and EPD schemes could affect outcome consistency*; <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01609-7> (Zugriff April 30, 2020)
- 306 V. Durão, J. Dinis Silvestre, R. Mateus, J. de Brito, *Resources, Conservation & Recycling* 2020, 156, *Assessment and communication of the environmental performance of construction products in Europe: Comparison between PEF and EN 15804 compliant EPD schemes*; 104703.
- 307 E DIN EN 15804/A2:2018-04, *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*, Beuth Verlag, Berlin, 2018

dern. Beim PEF wie auch bei einer Standard-EPD (siehe oben) kann jedes Produkt von einem technisch versierten Anwender umfassend hinsichtlich seiner Umweltwirkung beschrieben werden, und Muster-EPDs, die a priori die Umweltwirkungen von Produkten angesichts der verwendeten worst case-Szenarien sicher nicht unterschätzen, erlauben es Herstellern aus plausiblen Gründen, nicht jedes individuellen Wünschen entsprechend diversifizierte Produkt hochdetailliert betrachten zu müssen.

Die Sichtweise über den Klebstoff hinaus auf das geklebte Produkt ist zwingend erforderlich.

Notwendig ist eine erweiterte Sichtweise über den Klebstoff hinaus auf das geklebte Produkt, da die Verbindungstechnik Kleben über das reine Verbinden von Füge­teilen weitere umwelt-relevante Funktionen erfüllt (siehe Kapitel 1.5, 1.7.2, 1.10, 2.5.2–2.5.4, 2.7) und dadurch zu Kreislaufwirtschafts- und Öko-bilanzwirksamkeit entscheidend beiträgt.

Beispiel Verkehrsmittelbau

Im Schienenfahrzeugbau machen die Hersteller^{308,309,310,311,312} für ihre unter Einsatz der Klebtechnik gefertigten Produkte Umweltproduktdeklaration zugänglich, in welche die Produktlebenszykluseigenschaften von Klebstoffen mit einfließen. Gleiches gilt für den

-
- 308 Environmental Product Declaration AZUR; Bombardier Transport, St-Bruno, QC, Canada, 2015.
 - 309 Environmental Product Declaration DT5, Bombardier ALSTOM; https://www.alstom.com/sites/alstom.com/files/2018/07/12/alstom_dt5_metro_hamburg_-_environmental_product_declaration_-_aug_2013 (Zugriff April 30, 2020)
 - 310 Coradia Polyvalent Environmental Product Declaration, ALSTOM, <https://www.alstom.com/sites/alstom.com/files/2018/07/14/m-csr-18-Environmental Product Declaration – Coradia Polyvalent> (Zugriff April 30, 2020)
 - 311 Inspiro, Siemens Mobility, <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:87d8b8c66bd41961a415b2fa8318bca0f80458df/version:1492092654/metro-inspiro-environment-declaration-en.pdf> (Zugriff April 30, 2020)
 - 312 Life Cycle Analysis of Stadler Eurodual Locomotive Valencia, Stadler Rail, <https://www.ik-ingenieria.com/en/life-cycle-assessment-lca/project-life-cycle-analysis-eurodual-locomotive-stadler-valencia> (Zugriff April 30, 2020)

Automobilbau. Der Volvo S80 1998 war das erste Auto, welches eine EPD erhielt.³¹³ Der Hersteller publiziert seit 1998 für jedes neue Automodell eine EPD, deren Information auf einem LCA aufbaut und mit Informationen über Umweltmanagementsysteme und Recycling ergänzt wird.³¹⁴ Die Erklärungen wurden von dritter Seite verifiziert und entsprechen den Standards ISO 14040, ISO 14031, ISO 14021 und ISO 14001. Die Herangehensweise fokussiert dabei auf die drei Aspekte der Produktlebenszyklen »Herstellung«, »Nutzung« und »Entsorgung«.³¹⁵ Dabei sind die Aspekte Materialeinsatz bei der Fertigung, Treibhausgasemissionen beim Einsatz sowie die Kennzeichnung und Wiederverwendung von Kunststoffen beim Recycling besonders materialgeprägt. Zudem werden Händler und Zulieferer ins Umweltmanagement mit eingebunden. Auch für Lastkraftwagen dieses Herstellers sind EPDs verfügbar, deren Qualität wesentlich von der Qualität der Input-Daten, etwa mit Bezug auf die verwendeten oder bei Reparaturen vorgesehenen materiellen Ressourcen, abhängt³¹⁶. Angegeben werden als Umweltwirkungen etwa Effekte bezüglich Treibhausgasemissionen/globaler Erwärmung, Abbau der Ozonschicht oder Versauerungspotenzial. Aus EPD-Daten können etwa Daten für den PCF gewonnen werden.³¹⁷

Andere Automobilhersteller machen für ihre Produkte die Umweltzertifikate zugänglich, in welche ebenfalls die Produktlebenszykluseigenschaften von Klebstoffen mit einfließen.³¹⁸ Zum Beispiel veröffentlicht Mercedes-Benz produktbezogene Umweltinformationen in Übereinstimmung mit EN ISO 14020 und EN ISO 14021 in die klebstoffbezogene Informationen im Rahmen der relevanten Prozesspolymere eingehen.³¹⁹

-
- 313 Volvo Car Germany GmbH, <https://www.volvocars.com/de/volvo/innovationen/forschung-und-entwicklung> (Zugriff April 30, 2020)
- 314 E. Dahlqvist, A. Wendel, »LCA Working Procedures when Developing Environmental Product Declarations for Cars from Volvo,« SAE Technical Paper 2001-01-3731, 2001, <https://doi.org/10.4271/2001-01-3731>.
- 315 Paul Niewenhuis, Peter Wells; *The Automotive Industry and the Environment*; Woodhead Publishing in environmental management; CRC Press, 2003; ISBN 0849320720, 9780849320729
- 316 European Commission DG Environment; *Evaluation of Environmental Product Declaration Schemes; Final Report – Annex X: Examples of EPDs under the different schemes*; September 2002.
- 317 X. Li, *Possibilities for Volvo Trucks to Provide Carbon Footprint Information Derived from Environmental Product Declarations*, Chalmers Technische Universität, Göteborg, Schweden, 2009; ISSN No. 1404-8167.
- 318 Öko-TREND-Zertifikat für vier BMW Group Modell emit vorbildlicher CO₂-Reduktion, BMW Group, <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0004475DE/oeko-trend-zertifikat-fuer-vier-bmw-group-moedelle-mit-vorbildlicher-co2-reduktion?language=de> (Zugriff April 30, 2020)
- 319 Mercedes-Benz Modelle mit Umweltzertifikat, Daimler AG, <https://www.daimler.com/nachhaltigkeit/umweltzertifikate> (Zugriff April 30, 2020)

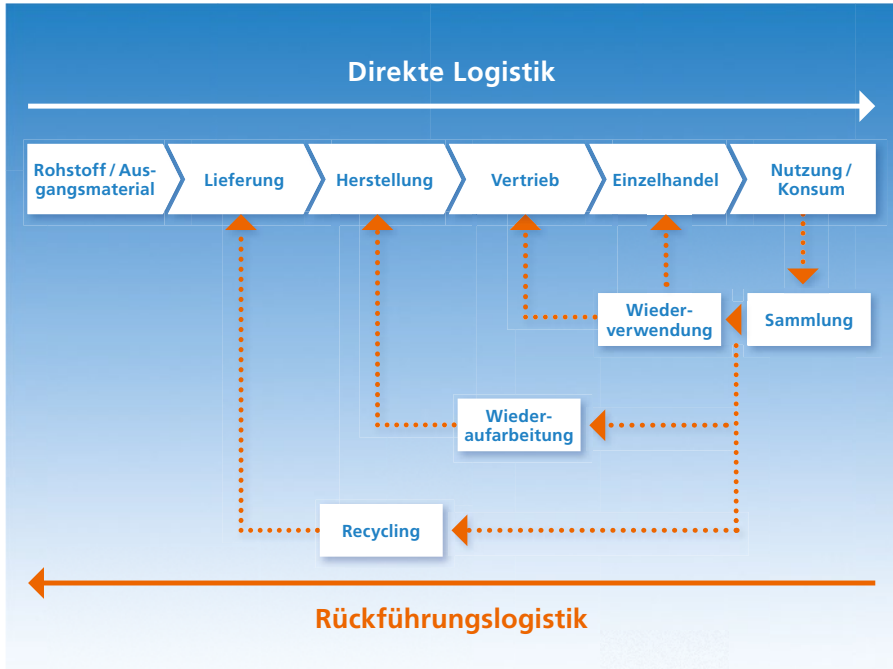


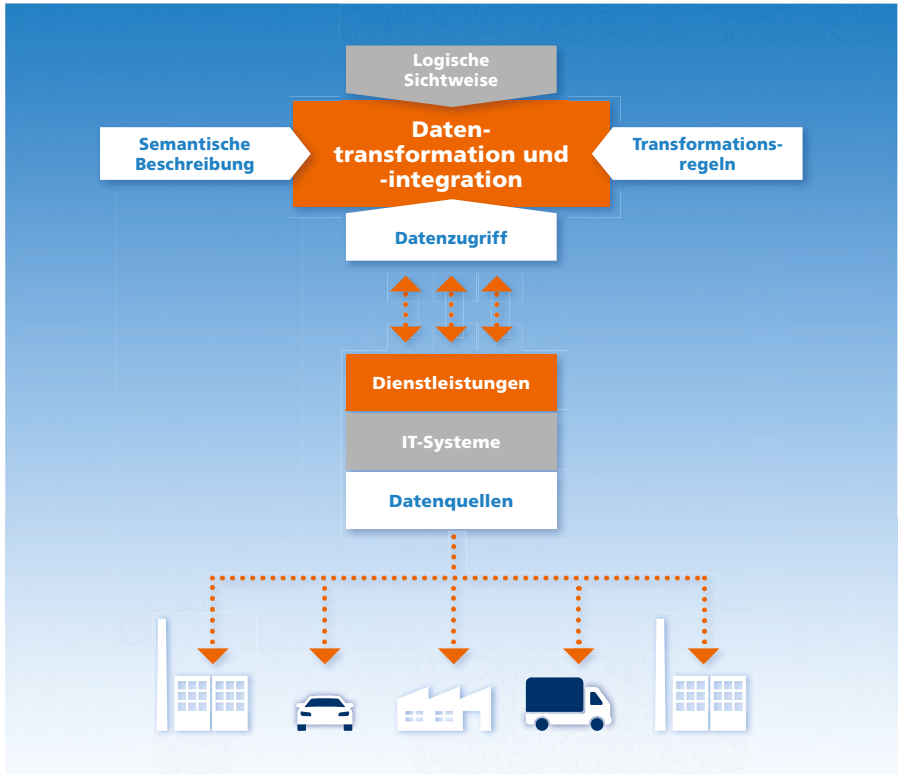
Abb. 71
Darstellung von
Materialflüssen
in der Rückführungs-
logistik am Produkt-
lebensende

In der Zukunft werden daher geklebte Produkte mit allen Phasen ihres Produktlebenszyklus zu berücksichtigen sein, was derzeit noch nicht in den EPDs aller Beteiligten der Liefer- und Entsorgungsketten → s. **Abb. 71**³²⁰ (etwa im Sinne eines Rückführungslogistik-Vorgehens^{319,321,322} / engl.: reverse logistic procedure) geschieht. Hier würde der PEF den Vorteil bieten, dass die in den Ökobilanzen gesammelten Datensätze in ihn mit einfließen können (→ s. **Abb. 72**).

320 M. A. Sellitto, *Journal of Cleaner Production* 2018, 187, S. 923–931, Reverse logistics activities in three companies of the process industry.

321 C. Hans, K. A. Hribernik, K.-D. Thoben, *International Journal of Product Lifecycle Management* 2010, 4, S. 338–359, Improving Reverse Logistics Processes Using Item-level Product Lifecycle Management. <https://doi.org/10.1504/IJPLM.2010.036488>

322 J. Daaboul, J. Le Duigou, D. Penciu, B. Eynard, *Journal of Remanufacturing* 2014, 4 (1), S. 1–15, Reverse logistics network design: a holistic life cycle approach.



Das gesamte geklebte Produkt und dessen gesamter Produktlebenszyklus sind zukünftig umfassend zu betrachten.

Abb. 72 Darstellung des integrierten Datenflusses im Produkt-Lebenszyklusmanagement³²⁰

3.5 Nachhaltige Geschäftsmodelle dank Kreislaufwirtschaftswirksamkeit geklebter Produkte

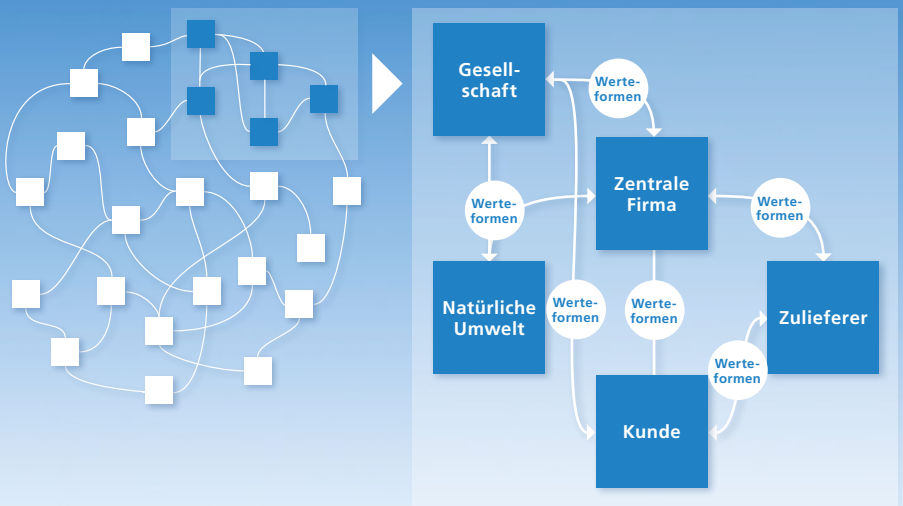
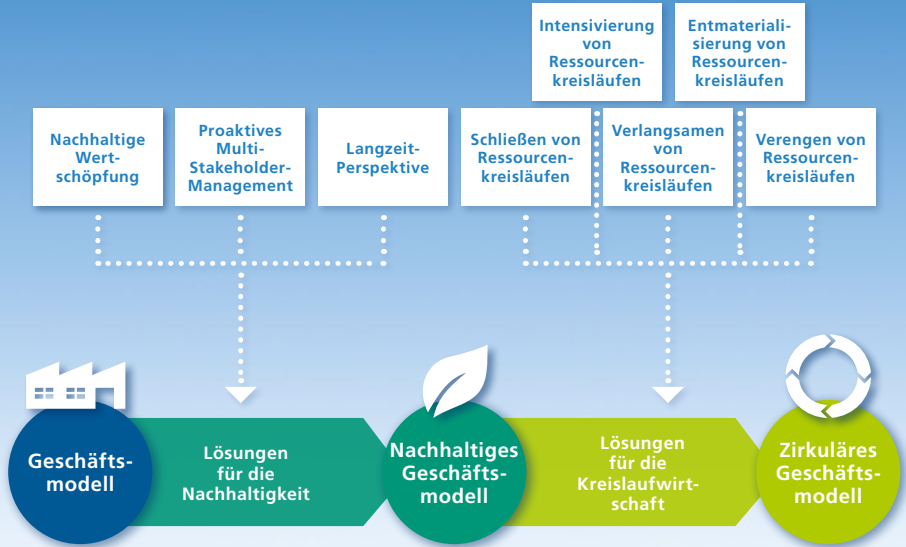
Aktuell werden zunehmend Geschäftsmodelle, welche geänderten marktrelevanten Rahmenbedingungen Rechnung tragen, als Forschungsgegenstand erkannt. Die Ergebnisse solcher Forschungsarbeiten werden die Kreislaufwirksamkeit von geklebten Produkten des 21. Jahrhunderts im Sinne einer nachhaltigen Geschäftsidee weiterhin befördern. Wie in Abbildung 73 dargestellt reicht dabei die Perspektive von nachhaltigen Modellen (engl.: Sustainable Business Models, SBM)^{323,324} bis hin zu Kreislaufgeschäftsmodellen³²⁵. Dies lässt die Bedeutung dieser Aufgabenstellung erkennen und die Vielfalt der Gestaltungspotenziale erahnen. Neue, nachhaltige Geschäftsmodelle für eine Kreislaufwirtschaft umfassen für eine langfristige Perspektive das proaktive Management einer großen Bandbreite von Interessengruppen (engl.: multi-stakeholder management) sowie die Schaffung monetärer und nicht-monetärer Werte.³²⁵

Neue Geschäftsmodelle umfassen die Nachhaltigkeit sowie monetäre wie nicht-monetäre Werte.

Rechts oben: Abb. 73
Zukünftige Entwicklung hin zu nachhaltigen und Kreislaufgeschäftsmodellen³²⁵

Rechts unten: Abb. 74
Zukünftige Entwicklung hin zu nachhaltigen Wertenetzen³²⁶

- 323 S. Schaltegger, E. G. Hansen, F. Lüdeke-Freund, *Organization & Environment* 2016, 29(1), 3–10, Business Models for Sustainability: Origins, Present Research, and Future Avenues; DOI: 10.1177/1086026615599806.
- 324 N. Dentchev, Romana Rauter, L. Johannsdottir, Y. Snihur, M. Rosano, R. Baumgartner, T. Nyberg, X. Tang, B. van Hoof, J. Jonker, *Journal of Cleaner Production* 2018, 194, 695–703, Embracing the variety of sustainable business models: A prolific field of research and a future research agenda. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.156>.
- 325 M. Geissdoerfer, D. Vladimirova, S. Evans; *Journal of Cleaner Production* 2018, 198, 401–416, Sustainable business model innovation: A review; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.240>.



Gleichzeitig wachsen, wie in Abbildung 74 skizziert, Wertnetzwerke heran. Ausschlaggebend, auch für geklebte Produkte, ist die Schaffung nachhaltiger Nutzwerte in wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Hinsicht.³²⁶

Ein nachhaltiges Geschäftsmodell hilft einem Unternehmen bei der Beschreibung, Analyse, Steuerung und Kommunikation in dreifacher Hinsicht: erstens hinsichtlich seines Wertversprechens für seine Kunden und für alle weiteren Interessengruppen, zweitens in der Art und Weise, wie es diesen Wert erzeugt, und drittens, wie es wirtschaftlichen Wert gewinnt und dabei natürliches, soziales und ökonomisches Kapital jenseits seiner Organisationsgrenzen bewahrt oder neu bildet.³²²

Auch für geklebte Produkte sind wirtschaftliche, soziale und ökologische Aspekte ausschlaggebend.

Anhand empirischer Untersuchungen praktischer Beispielfälle reichen die neuen Perspektiven von theoretisch und wissensbasiert konzeptuell neuen Vorgehensweisen und Schwerpunkten über den Einsatz neuer Ontologien zur Beschreibung und Strukturierung von Geschäftsmodellen hin zur Identifizierung mehrfacher Win-Win-Potenziale. Die Komplexität zukünftiger Entscheidungen für einen nachhaltigen Geschäftserfolg geklebter Produkte spiegelt sich im Facettenreichtum neuer Rechenmodelle und der ihnen zugrundeliegenden Ontologien wieder. Beispielsweise wird der Rahmen für Entscheidungen eines Unternehmens von der sozialen und gesetzlichen Definition seiner Randbedingungen bestimmt, von Systemen innerhalb des Unternehmens ausgefüllt und wesentlich vom Umfeld oder Ökosystem (engl.: ecosystem), in das das Unternehmen eingebettet ist, geprägt.³²⁷ Ausschlaggebend ist

326 S. Evans, D. Vladimirova, M. Holgado, K. Van Fossen, M. Yang, E. A. Silva, C. Y. Barlow, *Business Strategy and the Environment* 2017, 26, 597–608, *Business Model Innovation for Sustainability: Towards a Unified Perspective for Creation of Sustainable Business Models*; DOI: 10.1002/bse.1939.

327 A. Upward; P. Jones, *Organization & Environment* 2016, 29(1), 97–123, *An Ontology for Strongly Sustainable Business Models: Defining an Enterprise Framework Compatible With Natural and Social Science*; DOI: 10.1177/1086026615592933.

dabei weniger die statische Struktur des Rahmens und der Systembausteine, sondern vielmehr deren wechselseitige Beziehungen und deren dynamische Entwicklungen.

Den Akteuren ganzheitlich konzipierter, gefertigter und gehandhabter klebtechnischer Produkte ist bewusst, dass sich bei der Bewältigung der Gestaltungsaufgaben Klebstoffhersteller und Recycler als Teil des Ökosystems der Klebstoffanwendung noch stärker mit dem Klebstoffanwender vernetzen müssen. Im Rahmen eines Multi-Stakeholder-Managements jedes Netzwerkpartners kann sich eine produktorientierte, gemeinsame und ganzheitliche Herangehensweise entlang des Lebenszyklus geklebter Produkte ausbilden. Den Entscheidern in der Forschung & Entwicklung, Klebstoffherstellung sowie Klebstoffanwendung steht bei der zu erwartenden Weiterentwicklung und schrittweisen Veränderung gesellschaftlicher, politischer oder technischer Rahmenbedingungen und Märkte ein Gestaltungsspielraum für die Weiterentwicklung ihrer Geschäftsmodelle zur Verfügung, der zunehmend vom Denken, Austausch und Handeln in Netzwerken geprägt sein wird.

Klebstoffhersteller und Recycler müssen sich zukünftig noch stärker mit den Klebstoffanwender vernetzen.

Einschub

Das Wechselspiel mehrerer Treiber auf dem Weg zur Entwicklung nachhaltiger Technologien in Europa wird am Beispiel intelligenter Stromnetze deutlich. Intelligente Stromnetze dienen insbesondere im Falle regenerativer Energien dazu, die Abstimmung zwischen dem schwankenden Angebot an elektrischer Energie und der zeitlich und örtlich ebenso schwankenden Nachfrage zu steuern. Einerseits ist der Abgleich von Stromflüssen grundsätzlich eine ähnliche Herausforderung wie die Steuerung von Materialflüssen. Andererseits liegt es auf der Hand, dass eine gesicherte Verfügbarkeit von darüber hinaus noch günstiger und aus regenerativen Quellen stammender elektrischer Energie unmittelbar tiefgreifende Auswirkungen sowohl auf die Ökobilanz als auch auf die Kostenbilanz stofflicher Produkte haben wird. Deren Lebensbeginn und Lebensende kann unter Einsatz dieser Energie neugestaltet werden. Abläufe in Entscheider-Netzwerken, in denen aktuell Veränderungen auf dem europäischen Energiemarkt vorangetrieben werden, standen Pate für die in Abbildung 75 dargestellte Skizze, die einen Blick auf Prozesse in zukünftigen stoffbasierten Netzwerken eröffnet. Ein aufmerksames Verfolgen dieser Triebkräfte wirkt für die Entwicklungsperspektive klebtechnisch gefügter Produkte erhellend.

Heute ist deutlich absehbar, dass sich die gesetzlichen Rahmenbedingungen auch für Materialströme hin zu einer Kreislauforientierung in einem intelligenten Netzwerk ändern werden (→ s. Abb. 75). Zunehmend erkennbar wird, dass maßgebliche Änderungen angesichts der globalen Positionierung der EU-Politik mittelfristig erfolgen werden.

Geschäftsmodelle für geklebte Produkte werden zunehmend vom Denken, Austausch und Handeln in Netzwerken geprägt sein.

Die Klebstoffhersteller stellen sich auf neue Herausforderungen durch die Kreislaufwirtschaft durch intensive Kommunikation innerhalb der jeweiligen Wertschöpfungsketten, insbesondere mit Kunden und Recyclern, ein. Technische Innovationen bzw. Änderungen des Geschäftsmodells sind anzustoßen³²⁸. Die Fähigkeit hinsichtlich technischer Flexibilität, Anpassungsbereitschaft und Innovation ist in der Vergangenheit bereits bei vielen neuen Anforderungen unter Beweis gestellt worden. Beispiele hierzu im Hinblick auf stetig zunehmende regulatorische Anforderungen sind die Reduzierung bzw. der Ersatz bestimmter Substanzen (z. B. aus der Gruppe der Lösemittel, Weichmacher, Monomere und Biozide). → s. Abb. 75³²⁹

Die Klebstoffhersteller haben ihre Flexibilität, Anpassungsbereitschaft und Innovationsfähigkeit schon in der Vergangenheit gezeigt.

328 M. Bulmahn, Nachrichten aus der Chemie (Mai) 2020, 68, 42, Verklebt und ausgewaschen.

329 M. E. Biresselioglu, M. Nilsen, M. H. Demir, J. Røyrvik, G. Koksvik, Journal of Cleaner Production 2018, 198, 417–429, Examining the barriers and motivators affecting European decisionmakers in the development of smart and green energy technologies; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.308>.

Die Gesellschaft und die Politik formulieren beispielsweise für Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft neue branchenspezifische Rahmenbedingungen. Diese sind ganzheitlich und nicht auf Einzelaspekte fokussiert auszurichten (siehe Kapitel 2.5.1–2.5.5). Die Klebstoffentwicklung in der Forschung & Entwicklung sowie in der Klebstoffindustrie verfügt über das Potenzial, innerhalb geeigneter legislativer und ökologischer Randbedingungen technisch geeignete Lösungen zu entwickeln und anzubieten, die in einer Ökobilanz (LCA) über die Produktlebenszyklen »Herstellung«, »Nutzung« und »Entsorgung« geklebter Produkte zu messbar optimierten Lösungen führen.

Forschung & Entwicklung und Klebstoffindustrie verfügen über das Potenzial der Entwicklung geeigneter, Kreislaufwirtschafts- und ökobilanzwirksamer Lösungen.

Die Aufgabe der Klebstoffindustrie besteht darin, neuen Anforderungen, insbesondere zur Kreislaufwirtschaft, branchenspezifisch mit geeigneten Lösungen zu begegnen. Die erforderliche Anpassungs- und Leistungsfähigkeit der Klebtechnik- und Klebstoffentwicklung, ökobilanzgerechte Klebverbindungen zu konstruieren, ist heute schon durch die beteiligten Akteure in Forschung & Entwicklung sowie Klebstoffindustrie an vielen Beispielen belegt (siehe Kapitel 1.7.2, 2.5.3–2.5.5, 2.6–2.7, 4.2–4.6).

Die Leistungsfähigkeit von Klebtechnik- und Klebstoffentwicklung ist schon heute unter Beweis gestellt.

FORMALE SOZIALE EINHEIT



DIE EU

- Klare Definition von intelligenter Energietechnologie
- Mitgliedsstaaten einzeln betrachten und geeignete Maßnahmen ergreifen
- Berücksichtigung der Ressourcen jedes Landes bei der Entwicklung von Politik
- Transparente internationale / EU-Standards
- Bereitstellung allgemeiner und gemeinsamer Aktionen für alle Systeme (EU-28)
- Aktualisierung der Kommunikationsrichtlinien zu Umweltfragen
- Führungs- und Organisationsstruktur



MITGLIEDSTAATEN

- Richtlinien und Vorschriften
- Berücksichtigung der Interoperabilität von intelligenten Materialnetzwerken
- Förderung neuer Technologien
- Spezifizierung der Richtlinie für eine bestimmte Technologie
- Berücksichtigung der Sichtweise neuer und kleiner Akteure
- Beständig und langfristig
- Vermeidung Ad-hoc-Politik
- Förderung umweltfreundlichen Verhaltens
- Marktregulierung
- Verhaltensmuster im Haushalt berücksichtigen
- Anreize, Steuern, Subventionen
- Rückgriffsrechte für Anlagen
- Maßnahmen zur Verringerung der Unsicherheit/Risiken für die Industrie
- Verbesserung der Infrastruktur zur Unterstützung umweltfreundlichen Verhaltens



REGIONAL

- Lokale Netzwerke stärken
- Gemeinsame Vision, Aktivitätsniveau
- Arten von Organisationen
- Vertrauen und Akzeptanz in der Gemeinschaft entwickeln
- Verwirrungen aufklären, Informationen bereitstellen
- Öffentlichkeit und lokale Gemeinschaften einbeziehen
- Kommunikation verbessern
- Wortwahl, Ausdruck, Widerspruch prüfen
- Planung über verschiedene Zeiträume
- Vorteile intelligenter Technologien hervorheben
- Förderung von sozialer Gerechtigkeit, Wohlbefinden
- Eindämmung des Klimawandels
- Erhöhung des Umweltbewusstseins als politische Maßnahme
- Verwendung freiwilliger Vereinbarungen als politische Maßnahme
- Erleichterung schneller und effizienter Verhandlungen zwischen Infrastrukturentwicklern und lokalen Gruppen
- Aktive Marketing-Strategien
- Übermittelte Informationen sollten lokal relevant sein
- Betrachtung der demographischen Entwicklung der Politik



EINHEIT FÜR KOLLEKTIVE ENTSCHEIDUNGSFINDUNG

EINZEL- PERSONEN



FORSCHUNG / WISSENSCHAFT

- Institutionelle Einbettung von Systemen
- Ressourceneffiziente Lösungen und Möglichkeiten
- Analyse des Marktes, der Politik und der Vorschriften
- Interaktion von System und Individuen
- Die Forschungslücken verringern



INDUSTRIE

- Rolle der Industrie als Prosumer
- Stärkere Konzentration auf Endnutzer
- Bewusstsein für die Interaktion zwischen Benutzer und System
- Blick über kurzfristige finanzielle Kriterien hinaus
- Identifizierung von Herausforderungen und Entwicklung eines Ansatzes, der auf Unternehmensgröße, Aktivität, Sektor, Energieintensität, Rohstoffversorgung und Eigentumsstrukturen basiert
- Verbesserung der Energiedienstleistungen, des Vertrauens und der Information der Endverbraucher



EINZELPERSONEN

- Forschung darüber, wie Systeme institutionell eingebettet werden
- Lösungen und Möglichkeiten der Ressourceneffizienz aufzeigen
- Analyse des Marktes, der Politik, der Vorschriften auf verschiedenen Ebenen
- Verstehen der Interaktion von System und Individuen
- Die Forschungslücke verringern



LOKALE GEMEINSCHAFT

- Beteiligung der Gemeinschaft
- Akzeptanz der Gemeinschaft
- Kooperative Netze
- Methoden des Vorteilsausgleichs
- Bewusstsein und Wissen
- Materialien und Umwelt
- CO₂-Neutralität
- Lokale Ressourcen-Initiativen

Abb. 75
Ausblick auf zukünftige politische Entwicklung hin zu nachhaltigen intelligenten Materialnetzwerken (in Anlehnung an intelligente Stromnetze)

4

Klebtechnik und ihre
Funktion als
Partner zur Erfüllung
von Anforderungen
im Rahmen von
»Kreislaufwirtschaft«
und »Ökodesign«

4.1 Klebtechnik und Ökodesign: kein Widerspruch

Wie in Kapitel 1 bereits dargestellt, finden sich Klebstoffe in nahezu allen Produkten. Auch in der Natur ist Kleben die bevorzugte Verbindungstechnik. Im Sinne einer möglichst großen Produktsicherheit werden technische Klebverbindungen auf eine hohe Beständigkeit ausgelegt. An vielen Stellen sind sie aus diesem Sicherheitsgedanken heraus gegebenenfalls auch überdimensioniert. Dies beruht darauf, dass die tatsächliche Verwendung von Produkten durch den jeweiligen Anwender von der eigentlich vorgesehenen Nutzung im Realfall abweichen kann und somit die dann auftretenden Belastungen nur schwer vorherzusagen sind. Hinzu kommt, dass auch aus ökologischer Sicht die Gebrauchsdauer eines Produktes möglichst lang sein soll, selbst wenn neuere Produktgenerationen beispielsweise eine höhere Energieeffizienz aufweisen, da für die Neuproduktion oftmals ein bedeutenderer Energie- und Materialeinsatz notwendig ist. Die Substitution des noch voll funktionstüchtigen »Altproduktes« durch das der neueren Generation führt ganzheitlich betrachtet zu keinem ökologischen Einsparungseffekt.

Technische Klebverbindungen werden aus Produktsicherheitsgründen auf eine hohe Beständigkeit ausgelegt.

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist zu einem gegebenen Zeitpunkt aber auch die Demontage notwendig, um unterschiedliche Materialien zu trennen und auf einer möglichst hohen Wertschöpfungsstufe wiederzuverwenden. Dies gilt gleichermaßen für alle Verbindungstechniken zwischen unterschiedlichen Materialien.

Um den scheinbaren Widerspruch zwischen Langlebigkeit, Sicherheit und Beständigkeit auf der einen Seite sowie der Trennbarkeit andererseits geht es in diesem Kapitel. Man kann hier auch

von der »kontrollierten Langlebigkeit« eines Produktes sprechen. Gemeint ist damit, dass man über einen gegebenen, vorhersagbaren Zeitraum die Kontrolle über die Integrität der Verbindung besitzt und sie anschließend kontrolliert lösen kann. Obwohl sich am Produktlebensende schon heute alle Klebungen wieder lösen lassen (siehe Kapitel 2.6), wurden bisherige Klebverbindungen eher selten für den o. g. Ansatz der »kontrollierten Langlebigkeit« konzipiert, der die Kontrolle der Produktintegrität mit der Kontrolle der Werkstofftrennung vereint.

Die »kontrollierte Langlebigkeit« eines geklebten Produktes vereint die Kontrolle der Produktintegrität mit der Kontrolle der Werkstofftrennung.

Der gegenwärtige Stand dieses Konzepts wird in diesem Kapitel erläutert. Gleichzeitig wird aufgezeigt, welcher Forschungsbedarf sich ergibt, um mit Hilfe der Klebtechnik Produkte des täglichen Lebens sowohl aus ökologischer als auch punktuell aus ökonomischer Sicht signifikant weiter zu verbessern.

4.2

Lösbare Klebverbindungen

Auf den möglichen Widerspruch der landläufigen Betrachtung von »lösbaren« und »nichtlösbaren« Verbindungen ist bereits in Kapitel 2.6 hingewiesen worden. Auch nichtlösbare Verbindungen lassen sich grundsätzlich trennen. Inwieweit sich die Materialien von Produkten unter Beachtung ökologischer und ökonomischer Randbedingungen sortenrein trennen lassen, hängt in erster Linie von der Sortenreinheit der Produkte ab. Dies ist auch weitgehend unabhängig von der Art der Verbindungstechnik. Auf Fragen der Sortierlogistik soll im Rahmen dieser Studie jedoch nicht eingegangen werden.

| Auch nichtlösbare Verbindungen lassen sich trennen.

Wenn eine Mischung verschiedenster Altprodukte vorliegt, ist Schreddern mit anschließender Trennung der Fragmente praktisch die einzige Möglichkeit der Trennung. Jedoch ist die Qualität des Rezyklats entsprechend gering.

Liegen hingegen gleichartige Produkte in hoher Stückzahl vor, kann automatisiert zerlegt und sortenrein sortiert werden. Hier ließe sich im Prinzip für jedes Produkt eine Demontage-Linie aufbauen. Aus heutiger Sicht ist diese Extremlösung aufgrund des hohen Entwicklungsaufwands nur für wenige Produkte sinnvoll und erfordert die Berücksichtigung der Demontierbarkeit bereits bei der Produktgestaltung.

Das gezielte Lösen von (Kleb-)Verbindungen ist für die Reparatur und den Rückbau sowie für das Recycling eine Voraussetzung. Auch wenn dies noch selten gelebte industrielle Praxis ist, gibt es doch einige wissenschaftliche Literatur zum »Debonding« von Klebverbindungen. Viele der Ansätze kommen per se auf Grund hohen Ressourcenverbrauchs, der Notwendigkeit des Einsatzes gefährlicher Komponenten im Klebstoff oder beim Löseprozess für

eine breite Anwendung nicht in Frage. Ebenso ist eine zu geringe Sicherheit der Klebverbindung ein mögliches Ausschlusskriterium.

Das gezielte Debonding ist eine Voraussetzung für Reparatur, Rückbau und Recycling.

Im Folgenden soll eine Übersicht gegeben werden, bei der solche »No Go«-Kriterien keine Rolle spielen. Hierbei orientiert sich die Studie in erster Linie an einem kürzlich erschienenen Übersichtsartikel.³³⁰ Auf diesen beziehen sich nicht anderweitig zitierte Aussagen, diese werden mit eigenen Erfahrungen der Autoren aus der Praxis kombiniert. Wissenschaftler des Fraunhofer IFAM beschäftigen sich bereits seit Anfang der 1990er Jahre immer wieder mit Fragen der Reparatur und des Recyclings geklebter Produkte, was unter den Bedingungen des jeweiligen Zeitgeistes stets unkritisch war und nicht als wirkliche Fragestellung in Politik und Gesellschaft aufgefasst wurde. Publikationen beschäftigten sich beispielweise mit geklebter Elektronik³³¹ und geklebten Produkten im Allgemeinen.³³²

Das Lösen einer Klebverbindung erfolgt durch einen äußeren Trigger (also einem »Auslöser«), der im normalen Gebrauch der Klebverbindung nicht vorkommt und aus diesem Grund den sicheren Gebrauch des geklebten Produktes nicht beeinträchtigt. Gegebenenfalls werden zwei Trigger kombiniert, um ein unbeabsichtigtes Lösen auf jeden Fall zu verhindern. Dies ist schematisch in Abbildung 76 dargestellt.

330 N. Schüwer, R. Vendamme In Green Chemistry Series No. 60, Green Chemistry for Surface Coatings, Inks and Adhesives: Sustainable Applications, R. Höfer, A. Singh Matharu, Z. Zhang, Eds., RSC, London 2019, Chapter 13, 310–338, Debondable Adhesive Systems; <https://doi.org/10.1039/9781788012997-00310>.

331 A. Hartwig, R. Lüschen, F. Kriebel, T. Seidowski, O.-D. Hennemann, In Proc. Adhesives in Electronics 94, Berlin, Nov. 2–4, 1994, Comparison of soldered and adhesively bonded joints from the ecological point of view.

332 A. Hartwig, O.-D. Hennemann in VDI Berichte 1072 Fügen im Vergleich – Feinbleche, VDI Verlag Düsseldorf 1993, S. 225–235, Recycling geklebter Materialverbunde.

Die am universellsten einsetzbaren, aber unspezifischen Trigger sind mechanische Last sowie Wärme. Hiermit lassen sich grundsätzlich alle Klebverbindungen lösen. Andere Trigger, die in der Regel keinen auf sie angepassten Klebstoff benötigen, sind Wasser und weitere Medien wie Lösemittel, wobei das Lösen gegebenenfalls auch sehr lange dauert. Gegebenenfalls kann hier überhitztes Wasser in einem Autoklav bzw. Dampftopf sehr hilfreich sein. Es gibt jedoch auch Klebstoffe, bei denen sehr spezifische Trigger wie z. B. Licht mit bestimmten Wellenlängen, eine angelegte elektrische Spannung oder eine Erwärmung mit Mikrowellen oder Hochfrequenzfeldern zum Einsatz kommen. Die Wirksamkeit der einzelnen Trigger hängt zu einem großen Teil von der Zusammensetzung der Klebstoffe ab.

Das Lösen einer Klebverbindung erfolgt über einen Trigger, der in der Produktlebenszyklusphase »Nutzung« nicht auftritt.

Weiter häufig zitierte Konzepte beziehen auf eingebaute schwache oder reversible chemische Bindungen im Klebstoff, so dass diese bereits bei geringerer Temperatur ihre Festigkeit verlieren. In der Regel ist dies aber gleichzeitig mit einer geringeren thermischen Beständigkeit oder einer ausgeprägteren Neigung der Klebverbindung zur mechanischen Deformation (insbesondere Kriechen, d. h. einer irreversiblen Verformung bei mechanischer Belastung) verbunden. Dies kann aus ökonomischen und ökologischen Gründen auch auf einfacherem Wege realisiert werden, so dass derartige Konzepte bisher eher von akademischem Interesse sind.
→ s. **Abb. 76**

Ebenso wie beim ungewollten Versagen erfolgt der Bruch der Klebverbindung beim gezielten Lösen entweder adhäsiv (also zwischen Fügeteil und Klebstoff) oder kohäsiv (also im Klebstoff). Damit die Oberflächen nicht mit altem Klebstoff verschmutzt sind, was beispielsweise im speziellen Fall des Ersetzens einer Windschutzscheibe nicht stören muss, wird beim gezielten Lösen der Klebverbindung (in der Regel ein Adhäsionsbruch, also das Lösen des Klebstoffs von der Fügeteiloberfläche) angestrebt. Da die Festigkeit des Klebstoffes, und damit die des Klebverbundes, wesentlich

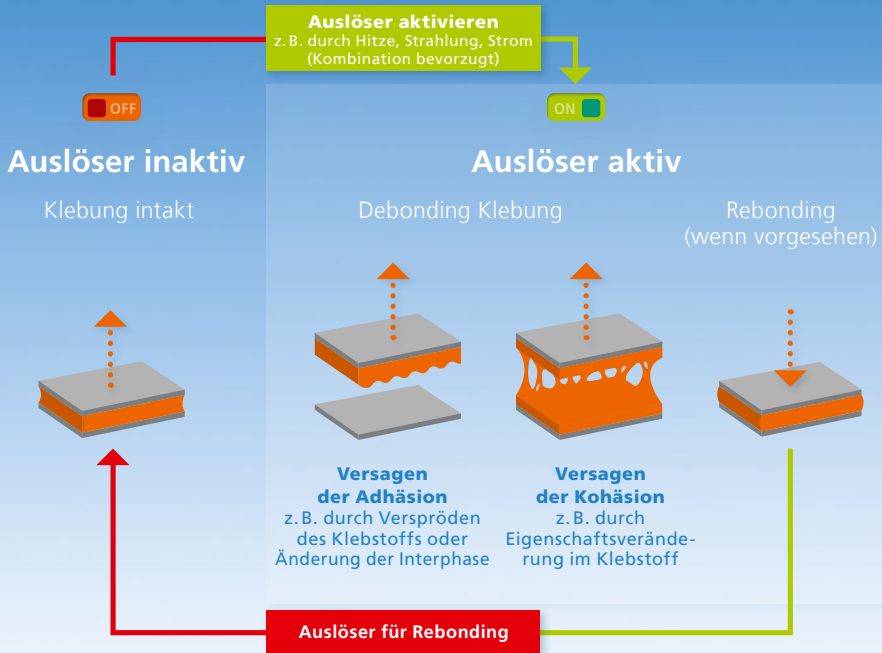


Abb. 76
Debonding aufgrund eines Triggers führt zum adhäsiven oder kohäsiven Lösen der Klebverbindung. In seltenen Fällen kann aufgrund eines weiteren Triggers ein Rebonding erfolgen.

besser kontrolliert werden kann als das jeweilige Adhäsionsniveau, erfolgt bisher aus sicherheitstechnischen Gründen die mechanische Auslegung einer Klebverbindung mit dem Ziel eines Kohäsionsbruchs: Der verfestigte Klebstoff reißt in sich und verbleibt adhäsiv auf den Füge­teilen. Ein »Rebonding« nach dem Lösen, also das erneute Fügen unter Verwendung desselben Klebstoffs, ist fast nie möglich. Da der jeweils vorliegende Zustand des Klebstoffs unbekannt ist, ist das bei den üblichen technischen Produkten allein aus den genannten Sicherheitsgründen nicht sinnvoll.

Aus Produktsicherheitsgründen wird ein kontrolliertes kohäsives Versagen beim Trennen geklebter Produkte angestrebt.

In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass in der Regel die Menge des eingesetzten Klebstoffs sehr gering ist (siehe Kapitel 3.4.1), so dass ein stoffliches Recycling des Klebstoffs selbst kaum einen ökologischen Impact hätte. Realisierbar wäre ein Rebonding beispielsweise mit Schmelzklebstoffen (sog. »Hotmelts«). Wenn es beispielsweise klebtechnisch funktionierende Laufmaschinen gäbe, wäre ein sehr häufiges Debonding und Rebonding für deren Funktionsfähigkeit notwendig. Dies stellt aber Ausnahmen dar und gehört zumindest heute noch in den Bereich des Science Fiction.

Ein stoffliches Recycling des Klebstoffs selbst hätte keinen ökologischen Impact.

In der Natur dagegen gibt es für die unterschiedlichsten Zwecke zahllose Klebverbindungen. Diese können permanent oder reversibel sein. Die Haftung von Seepocken oder Muscheln unter Wasser gehört in die erste Gruppe. Derartige Verbindungen lassen sich, ebenso wie in der Technik, nur zerstörend mechanisch lösen und ein Teil des Klebstoffs verbleibt dabei auf dem Substrat. Das gezielte Lösen permanenter Klebverbindungen mit einem spezifischen Debonding-Trigger kommt demnach auch in der Natur nicht vor. Hingegen gibt es in der Natur zahllose Beispiele reversibler Klebverbindungen. Diese dienen z. B. dem Beutefang oder dem Laufen an senkrechten Flächen oder gar über Kopf. Die reversible Adhäsion kann trocken durch van der Waals-Wechselwirkungen beispielsweise beim Fortbewegen der Geckos oder, wie z. B. beim Beutefang mit der Froschzunge oder beim Sonnentau, über Sekrete erfolgen.

Fast immer spielen Sekrete auch eine Rolle bei der Fortbewegung zahlreicher Insekten. Sehr häufig handelt es sich bei den Adhäsiven um viskoelastische Flüssigkeiten³³³, deren Zusammensetzung bisher nur in sehr wenigen Fällen bekannt ist. Oftmals sind

333 O. Betz, M. Frenzel, M. Steiner, M. Vogt, M. Kleemeier, A. Hartwig, B. Sampalla, F. Rupp, M. Boley, C. Schmitt, Biol. Open 2017, 6, 589–601, Adhesion and friction of the smooth attachment system of the cockroach *Gromphadorhina portentosa* and the influence of the application of fluid adhesives; doi: 10.1242/bio.024620.

Fette, Fettsäuren und Kohlehydrate enthalten, vereinzelt wurden aber auch Proteine detektiert.³³⁴ Da es sich um eine Kombination aus polaren, unpolaren und amphiphilen Substanzen handelt, ist davon auszugehen, dass es sich bei den Adhäsiven häufig um Emulsionen mit einem spezifischen rheologischen Verhalten handelt.³³⁵ Im Rahmen einer Analyse der Haftung und Enthftung bei der Fortbewegung wurde am Beispiel der Madagaskar Fauchschabe festgestellt, dass durch die fluide und morphologische Struktur der Tarsen («FüÙe») eine hohe Scherfestigkeit vorliegt, solange die Tarsen auf dem Substrat aufliegen und gegebenenfalls für ein längeres Verbleiben nachgedrückt werden. Sobald die Tarse aber beim nächsten Schritt abgerollt wird, wirken Schälkräfte, welche ein praktisch kraftloses Lösen der Verbindung erlauben.³³⁶

Bei Klebungen in der Natur ist der Lösemechanismus bereits integriert.

Aus technischer Sicht wurde somit der Lösemechanismus bereits konstruktiv berücksichtigt, und der viskoelastische Klebstoff unterstützt diesen. Es ist anzunehmen, dass dies ein allgemeines Prinzip ist. In Form des sogenannten Gecko®-Tape konnte das Prinzip auch technisch nachgestellt werden, allerdings ohne fluiden Klebstoff, den es auch beim Gecko nicht gibt. Das Tape besteht aus elastischem Silikon und weist eine hohe Dichte mikroskaliger Noppen

 334 O. Betz, A. Maurer, A. N. Verheyden, C. Schmitt, T. Kowalik, J. Braun, I. Grunwald, A. Hartwig, M. Neuenfeldt, Mol. Biol. 2016, 25, 541–549, First protein and peptide characterization of the tarsal adhesive secretions in the desert locust, *Schistocerca gregaria*, and the Madagascar hissing cockroach, *Gromphadorhina portentosa*; doi: 10.1111/imb.12241.

335 M. W. Speidel, M. Kleemeier, A. Hartwig, K. Rischka, A. Ellermann, R. Daniels, O. Betz, Beilstein J. Nanotechnol. 2017, 8, 45–63, Structural and tribometric characterization of biomimetically inspired synthetic »insect adhesives«; doi:10.3762/bjnano.8.6.

336 O. Betz, K. Albert, M. Boley, M. Frenzel, H. Gerhardt, I. Grunwald, A. Hartwig, M. Kleemeier, A. Maurer, M. Neuenfeldt, K. Rischka, B. Sampalla, C. Schmitt, M. Speidel, M. Steiner, N. Verheyden, M. Vogt, Mitt. Dtsch. Ges. Allg. Angew. Ent. 2018, 21, 159–164, Struktur und Funktion des tarsalen Haftsystems der Madagaskar-Fauchschabe *Gromphadorhina portentosa* (Blattodea).

auf (→ s. Abb. 77³³⁷). Es zeigt eine hohe Scherfestigkeit, lässt sich jedoch schälend praktisch ohne Kraftaufwand ablösen.

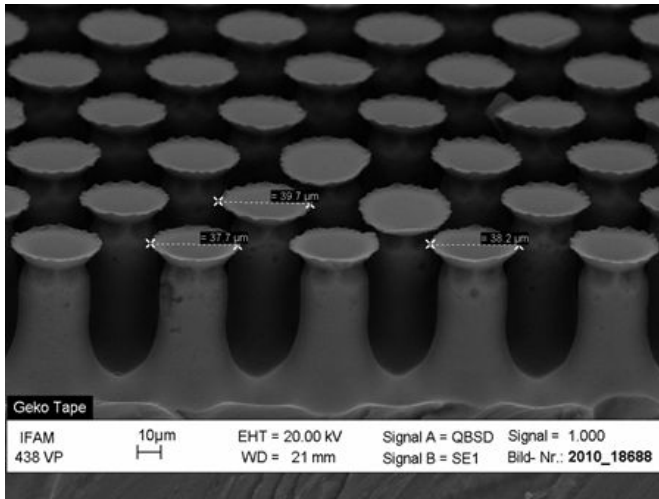


Abb. 77
Elektronenmikroskopische Aufnahme der Mikrostruktur des Gecko®-Tape

In den letzten Jahren wurden sehr viele Arbeiten zu Polymeren veröffentlicht, welche auf einen Trigger von außen ihre Struktur verändern, insbesondere diese abbauen oder ihren vernetzten Charakter verlieren. In einigen dieser Arbeiten wurde auch geprüft, inwieweit sich derartige Reaktionen für reversible Klebverbindungen eignen. Schüwer und Vendamme führen hierfür zahlreiche Beispiele auf.³³⁰ Ein möglicher Trigger ist die Bestrahlung mit Licht. Hierbei ist einzuschränken, dass einerseits die Fügeteile für die notwendige Wellenlänge transparent sein müssen, andererseits das jeweilige Licht beim Gebrauch auszuschließen ist, um die Sicherheit und Langlebigkeit des Produktes zu gewährleisten. Die Schwächung der Klebverbindung erfolgt insbesondere durch eine Versprödung des Klebstoffs oder einen Abbau der Struktur.

Es gibt auch Beispiele dafür, dass an Stelle des Klebstoffs selbst lediglich eine photodegradierbare Primerschicht, d. h. eine Art »Vorstrich«, der primär die Haftung des Klebstoffs verbessert, abgebaut wird. Die für die Photodegradation dieser Schicht beschriebenen Bestrahlungszeiten liegen zwischen wenigen Minuten und

337 Gecko®-Tape: Fa. Gottlieb Binder / Abbildung Fraunhofer IFAM

vielen Stunden. Für spezielle Reparaturen mögen wenige Minuten noch akzeptabel sein, längere Zeiten aber sind für praktische Anwendungen nicht hinnehmbar. Zusammen mit der erforderlichen speziellen chemischen Zusammensetzung der Klebstoffe, der erwähnten notwendigen Transparenz der Füge­teile und der notwendigen Dauerbeständigkeit bei Umgebungsbedingungen ist unschwer abzuschätzen, dass ein photochemisches Debonding für Recycling und Reparatur keinen Einsatz bei Massenprodukten haben wird.

Zum Lösen von Klebverbindungen können unterschiedliche Trigger eingesetzt werden.

Wärme ist ein universell einsetzbarer Trigger für das Debonding. Ab einer gewissen Temperatur erweicht jeder Klebstoff verbunden mit einem Festigkeitsabfall (vgl. Kapitel 2.6). Die Glasübergangstemperatur wird erreicht sowie bei teilkristallinen Klebstoffen zusätzlich noch die Schmelztemperatur. Ob dieser Trigger bereits für eine Demontage ausreicht, hängt vom Einzelfall ab. Die thermische Zersetzung erfolgt meist bei noch höheren Temperaturen und führt früher oder später zum Versagen der Klebverbindung.

Werden in ein Klebstoffsystem bewusst Bindungen eingebaut, die bereits bei vergleichsweise geringen Temperaturen gespalten werden, führt dies auch zwangsweise zu einer verringerten Temperaturbeständigkeit der Klebung. Trotzdem werden oftmals noch harsche Bedingungen für das Debonding benötigt. So berichtet Hashigara von einer 15- bis 60-minütigen thermischen Behandlung bei 260 °C für das Debonding eines dafür konzipierten Klebstoffs.³³⁸

Es gibt auch Arbeiten bei denen Träger aus Formgedächtnispolymeren³³⁹ (Shape Memory Polymere, SMP) mit Haftklebschichten versehen werden. Beim Überschreiten einer bestimmten Tempe-

338 T. Higashihara, M. C. Fu, T. Uno, M. Ueda, J. Polym. Sci. A: Polym. Chem. 2016, 54, 1153–1158, Synthesis and characterization of polycyanurates as dismantlable adhesives; <https://doi.org/10.1002/pola.27955>.

339 <https://www.chemie.de/lexikon/Formged%C3%A4chtnis-Polymer.html> (Zugriff April 30, 2020)

ratur verformen sich diese Klebebänder, wobei sich der Verbund löst. Hiermit lassen sich aber nur Verbindungen mit geringem Festigkeitsniveau realisieren, da die Deformationskraft eines SMP nicht ausreicht, um höherfeste Klebverbindungen zu lösen. Ebenso kann die Klebkraft, wiederum in erster Linie für Haftklebstoffe gezeigt, durch den Zusatz schmelzender Additive signifikant reduziert werden. Auch Verbindungen mit thermoplastischen Klebstoffen können oberhalb deren Schmelztemperatur mit verringertem Kraftaufwand gelöst werden.

Eine immer wieder verfolgte Idee zum Lösen von Klebverbindungen ist der Zusatz von Substanzen, die beim Erwärmen große Mengen Gas freisetzen. Dies reicht von normalen Treibmitteln über mikroverkapselte Flüssigkeiten, die verdampfen, bis hin zu Blähton. Durch die Expansion des Klebstoffs beim Erwärmen wird die Klebverbindung quasi aufgesprengt. Die typischen benötigten Temperaturen liegen aber im Bereich von 200 °C. Dies schränkt die Anwendbarkeit deutlich ein, vor allem auch, weil bei dieser Temperatur die meisten Klebstoffe ohnehin abgebaut werden.

Bei Klebstoffen mit reversiblen Bindungen, also solchen, die sich bei höheren Temperaturen öffnen und bei niedrigeren wieder schließen, dominieren die sogenannten Diels-Alder Reaktionen.³⁴⁰ Neben einer sehr eingeschränkten Rohstoffbasis sind zahlreiche Nebenreaktionen, die das Öffnen nicht wieder erlauben, die Hauptnachteile dieser Reaktionen. Übersichten über den Stand der Literatur zu reversibel vernetzten Polymeren, wie sie als Basis für hochmodulige Klebstoffe dienen können, wurden vor Kurzem veröffentlicht, weshalb für spezielle chemische Systeme auf diese Reviews verwiesen wird.^{341,342}

340 O. Diels, K. Alder, *Justus Liebigs Ann. Chem.* 1928, 460, 98–122, Synthesen in der hydroaromatischen Reihe; <https://doi.org/10.1002/jlac.19284600106>.

341 C. J. Kloxin, C. N. Bowman, *Chem. Soc. Rev.* 2013, 42, 7161–7173, Covalent adaptable networks: smart, reconfigurable and responsive network systems; DOI: 10.1039/C3CS60046G.

342 R. J. Wojtecki, M. A. Meador, S. J. Rowan, *Nat. Mat.* 2011, 10, 14–27, Using the dynamic bond to access macroscopically responsive structurally dynamic polymers; <https://doi.org/10.1038/nmat2891>.

Koschek entwickelte am Fraunhofer IFAM reversibel vernetzte Materialien auf Basis anderer Prinzipien. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Benzoxazine, eine für Hochtemperaturklebstoffe typische Basis, die mit Hilfe von Thiolen gespalten werden können.³⁴³ Für Klebverbindungen ist dies allerdings nachteilig, da ein zugesetztes Medium in die Klebfuge eindringen muss, was immer eine für Reparatur oder Recycling nicht akzeptable Zeit beansprucht. Koschek et al. präsentierten vor kurzem Systeme, die sich durch eine Kombination aus Wärme und Wasserdampf lösen lassen.³⁴⁴ Die zurück gewonnenen Bestandteile lassen sich erneut einsetzen. Bisher sind diese Polymere als Matrixharze für Faserverbundwerkstoffe vorgesehen, lassen sich aber auch für Klebstoffe einsetzen.

Durch starkes Abkühlen werden Klebstoffe spröd-hart (siehe Kapitel 2.6.), so dass die Verbindungen bei mechanischer Einwirkung brechen. Hierfür sind sehr tiefe Temperaturen notwendig, der Einsatz von flüssigem Stickstoff ist typisch. Da dies nicht energieeffizient ist und das Abkühlen nicht lokal auf die Klebverbindung beschränkt bleibt, handelt es sich um einen Lösungsansatz, der nur in speziellen Fällen einsetzbar ist. Dies gilt auch für den Einsatz von Lösemitteln für das Debonding, da die Diffusion in die Klebfuge sehr langsam ist.

Im Weiteren gibt es zudem Methoden, um die Klebfugen selektiv durch elektromagnetische Strahlung zu erwärmen. Hierzu wird der Klebstoff mit Partikeln modifiziert, die die elektromagnetische Strahlung absorbieren und sich dadurch erwärmen. So lässt sich beispielsweise Ruß spezifisch durch Mikrowellen erwärmen, und Hochfrequenz im Bereich einiger hundert Kilohertz bis in den Megahertzbereich ist geeignet, Klebstoffe mit magnetischen und superparamagnetischen Partikeln zu erwärmen. In Arbeiten am Fraunhofer IFAM konnte gezeigt werden, dass in vielen Fällen die Klebfuge selektiv soweit erwärmt werden kann, dass Klebstoffe mit diesen Energiequellen härten. Für die Demontage werden

343 T. Urbaniak, M. Soto, M. Liebeke, K. Koschek, *J. Org. Chem.* 2017, 82, 4050–4055, Insight into the Mechanism of Reversible Ring-Opening of 1,3-Benzoxazine with Thiols; <https://doi.org/10.1021/acs.joc.6b02727>.

344 T. Urbaniak, K. Koschek, *Polym. Chem.*, eingereicht, Reversible Crosslinking of Thermoplastic Polyesterpolyols with a Bifunctional Vicinal Tricarbonyl Compound to Thermosetting Materials.

meist deutlich höhere Temperaturen benötigt, und diese sind ungleich schwerer zu erzielen, weil die Wärme in die umgebenden Füge­teile übergeht, was den Vorteil der selektiven Erwärmung der Klebfuge zunichtemacht.

Sehr erfolgreich konnte hingegen eine angelegte elektrische Spannung zur Demontage verwendet werden. Hier ist man jedoch darauf angewiesen, dass die Füge­teile elektrisch leitfähig sind, es sich also um Metalle handelt. In dem Übersichtsartikel von Schüwer³⁴⁵ sind einige Lösungsansätze hierzu aufgeführt und es werden Spannungen zwischen 48 und 100 V für einige Minuten benötigt, um die Klebfestigkeit der Verbindungen um bis zu 90 % zu reduzieren. Durch eine Kombination aus leichter Erwärmung (65 °C) und einer Spannung von 48 V (maximale Spannung für Betrieb ohne Schutzmaßnahmen) wurde am Fraunhofer IFAM ein nahezu kraftloses Debonding innerhalb weniger Sekunden erzielt.³⁴⁵ Dieses Prinzip kann auf andere Anwendungen und Klebstoffe außer den erprobten Schmelzklebstoffen übertragen werden, was teilweise auch bereits im Rahmen von Industrieformulierungen gemacht wurde. Es bleibt aber einzuschränken, dass dieses Trennprinzip auch konstruktiv berücksichtigt werden muss und die Notwendigkeit der aufwändigen Kontaktierung es nur für das Entfernen wertvoller Bauteile oder Austausch häufig zu wechselnder Komponenten rechtfertigt. Letzteres könnten beispielsweise mit metallischen Bondingpads modifizierte Batteriepakete in Mobiltelefonen sein.

Auch Haftklebstoffe lassen sich so einstellen, dass sie relativ leicht abziehbar sind. Die damit verbundenen niedrigen Festigkeiten lassen aber keine Anwendungen mit sicherheitsrelevanten Anforderungen zu. Wenn ein doppelseitiges Klebeband sich jedoch gummielastisch deformieren lässt und einen sogenannten »Anfasser« zum Herausziehen aus der Klebfuge aufweist, können Haftklebverbindungen mit gleichzeitig leichter Lösbarkeit und für viele Anwendungen akzeptablen Festigkeitsniveaus erzielen (z. B. Powerstrips® der Fa. Tesa).

345 J. Kolbe, M. Stuve, Adhäsion – kleben & dichten 2006, 50, 16–19,
Die lös­bare Klebverbindung wird Wirklichkeit,
<https://doi.org/10.1007/BF03243670>

Prinzipiell können auch pastöse Klebstoffe, welche zu einem Elastomer aushärten, in ähnlicher Weise für lösbare Klebverbindungen genutzt werden. Hier muss dann ein »Anfasser«, der außerhalb der eigentlichen Klebfuge liegt, mit appliziert werden. Dies wurde vor einigen Jahren für wieder ablösbare Streuscheiben von Autocheinwerfern demonstriert.^{346, 347}

Der Review von Schüwer listet auch einige Klebstoffe, die speziell für das Debonding entwickelt wurden.³³⁰ Diese funktionieren nach den bereits beschriebenen Lösemechanismen und sind häufig für Anwendungen in der Elektronik konzipiert. Es findet sich zudem ein Beispiel zum schmerzfreien Ablösen von Pflastern.

Speziell für das Debonding entwickelte Klebstoffe werden in spezifischen Bereichen bereits eingesetzt.

Insgesamt zeigt sich, dass es bereits eine große Vielfalt von Möglichkeiten zum Lösen von Klebverbindungen durch spezifisch dafür konzipierte Klebstoffe gibt. Viele der gerade in der Grundlagenliteratur beschriebenen Prinzipien werden jedoch auf Grund der Einsatznotwendigkeit toxischer Rohstoffe, ihres Preises bzw. ihrer langsamen Wirkungsgeschwindigkeit kaum ihren Weg in die Praxis finden.

Andere Möglichkeiten zum Lösen von Klebverbindungen finden sich aber bereits in kommerziellen Produkten. Um das Lösen anzuwenden, ist es jedoch notwendig zu wissen, welcher lösbare Klebstoff zum Einsatz kam und wie mit diesem umzugehen ist. Dies wird nur für spezielle Produkte einsetzbar sein, welche sortenrein für Reparatur und Recycling gesammelt werden. Diese letztgenannte Voraussetzung wird sich, und zwar unabhängig von der eingesetzten Verbindungstechnik, kaum für alle Industrieprodukte umsetzen lassen. Gegebenenfalls bestehen hier Chancen, dies bei höherwertigen Produkten mit Hilfe eines

346 EP 1 108771 A2, Lösbare Klebstoffe zum Verbinden von Substraten, 21.11.2000

347 S. Schmidt, Adhäsion – kleben & dichten 2002, 5, 14–19, Recyclinggerecht dank lösbarer Klebverbindungen.

digitalen Zwillings («Digital Twin») oder anderer Methoden der Digitalisierung zu realisieren.

Im Folgenden werden daher Beispiele aufgeführt, bei denen bereits mit der heutigen Technik die Klebverbindungen für Reparatur oder Recycling gelöst werden können. Prinzipiell ist dies für alle Verbindungen möglich, sollte aber bereits in der Konstruktion und bei der Auswahl der Klebstoffe berücksichtigt werden.

4.3

Klebtechnik und Reparatur

Viele Reparaturen im privaten, handwerklichen und industriellen Bereich wären ohne Kleben nicht denkbar. Kleben dürfte das am häufigsten eingesetzte Fügeverfahren im Bereich der Reparatur sein und, obwohl es dann fast immer von ungeschulten Personen verwendet wird und für die jeweilige Verbindung nicht erprobt ist, funktioniert es erstaunlich häufig sehr gut und zuverlässig. Damit sorgt Kleben dafür, dass Gebrauchsgegenstände nach einem Defekt oftmals noch jahrelang weiterverwendet werden können, was ein signifikanter Beitrag zur Ressourcenschonung ist. Nahezu jeder Handwerker hat bestimmte Klebstoffe stets griffbereit (besonders häufig einkomponentige feuchtigkeitshärtende Klebstoffe), und auch im privaten Einsatzbereich nimmt die Zahl der unterschiedlichen Klebstoffe zu. Gerade Klebstoffe für den nicht-industriellen Bereich werden zunehmend so konzipiert, dass ihre Anwendung robust und damit wenig fehleranfällig ist. Die meisten dieser Reparaturen werden spontan aufgrund des vorgefundenen Schadens durchgeführt. Die Sicherheitsanforderungen sind hierbei meist gering.

Wahrscheinlich ist Kleben das am häufigsten eingesetzte Reparaturverfahren.

Demgegenüber werden sicherheitsrelevante Bauteile klebtechnisch nach genau ausgearbeiteten Reparaturvorschriften repariert. Hierzu gehören insbesondere auch Faserverbundwerkstoffe beispielsweise im Flugzeugbau oder bei Windkraftanlagen. Im Falle von Schäden, z. B. aufgrund von Steinschlag oder Hagel, wird ein Teil des Materials ausgeschnitten, geschäftet und dann ein genau passender Reparaturpatch eingeklebt. Danach sind die Bauteile in gleichem Maße belastbar wie vor dem Schaden.

Grundsätzlich stellt sich aber die Frage, wie Produkte mit geklebten Verbindungen repariert werden können. Wie oben

dargestellt kann im Prinzip jede Klebverbindung getrennt werden, und in den meisten Fällen bildet der gehärtete Klebstoff einen guten Untergrund für eine erneute Verklebung. Die Trennung muss in der Regel lokal erfolgen, ohne den Rest des Produktes zu schädigen. Sofern nicht besondere Trennmechanismen eingebaut sind, erfolgt die Trennung mechanisch, oft bei erhöhter Temperatur. Dies wird anhand folgender beider Beispiele erläutert, bei denen immer wieder in gleicher Weise eine gleichartige Reparatur durchgeführt wird. Hierfür gibt es genaue Beschreibungen, wie und mit welchen Geräten und Klebstoffen die Reparatur durchzuführen ist. Bereits beim Design sind die grundsätzliche Berücksichtigung der Reparatur und ihre Umsetzung in gültigen Vorschriften dann sinnvoll, wenn gleichartige Reparaturen immer wieder vorkommen. Bei Einzelschäden muss dagegen mit Kreativität und handwerklichem Geschick eine passende Lösung erarbeitet werden. In beiden Fällen sollte eine klebtechnische Personalqualifizierung gegeben sein.

Beispiel 1: Reparatur von Frontscheiben in Verkehrsmitteln

Bereits seit mehreren Jahrzehnten werden die Frontscheiben, und in der Folge auch die anderen Scheiben, in Autos und andere Transportmittel eingeklebt. Hierfür kommen elastische Dickschichtklebungen zum Einsatz, wodurch u. a. Toleranzen der Karosserie ausgeglichen werden. Dadurch, dass die Scheiben lastübertragend mit der Karosserie verbunden sind, werden sie zum konstruktiven Element des gesamten Fahrzeugs. Infolgedessen wird die Karosserie sicherer und gleichzeitig kann in erheblichem Maße Material eingespart werden. Blechdicken können verringert und leichtere Konstruktionen verwendet werden, was Energie beim Bau und Betrieb der Fahrzeuge einspart.

Der Ausbau der Scheiben ist bereits konstruktiv berücksichtigt und erfolgt durch Zerschneiden der »dicken« Klebfuge mit einem Schneidedraht. Nach dem Entfernen der Scheibe kann der noch verbliebene Klebstoff beispielsweise mit einem Vibrationsspachtel abgetragen werden, um anschließend die neue Scheibe einzukleben. Diese Reparatur wird in allen Autowerkstätten nach vorgegebenen Verfahren durchgeführt. Gleiches gilt für die Reparatur kleiner Schäden an den Scheiben selber. Hierfür wurden spezielle lichthärtende Klebstoffe entwickelt, welche besonders gut in die feinen Risse einer Schadensstelle eindringen können. Hier-

durch brauchen die Scheiben nur bei größeren Schäden komplett ausgetauscht werden, was wiederum Ressourcen in erheblichem Maße spart.

Beispiel 2: Reparatur von Displayscheiben bei Mobiltelefonen

Auch bei den Displayscheiben von Mobiltelefonen gibt es öfter Schäden, so dass diese ausgetauscht werden müssen. Sofern vom Hersteller durch die Wahl ungeeigneter Konstruktionen oder Klebstoffe nicht bewusst verhindert, lassen sich die Scheiben meist tauschen. Hierfür gibt es Reparaturkits, die ähnlich funktionieren wie bei der Autoscheibe, nur dass häufig zusätzlich eine Erwärmung, beispielsweise mit einem Haushaltsfön, erfolgen soll, um den Klebverbund zu lösen. Eine Reparatur ist auch durch handwerklich geschickte Laien möglich, jedoch ist das Verfahren noch nicht so etabliert wie bei den Autoscheiben, trotzdem aber bereits gängige Praxis.

4.4 Klebtechnik und Recycling

Im Prinzip lassen sich auch für das Recycling alle Klebverbindungen lösen. Dieses sollte nach Möglichkeit aber bereits beim Produktdesign berücksichtigt werden, was heute noch sehr selten der Fall ist.

Die Lösbarkeit einer Klebverbindung ist bereits im Produktdesign zu berücksichtigen.

Grundsätzlich gilt, dass die Demontage für das Recycling umso gezielter ablaufen kann, je gleichartiger die zu recycelnden Produkte sind. Für diesen Fall können auch automatisierte Linien für den Rückbau aufgebaut werden. Es muss bewusstgemacht werden, dass dies mit ähnlichen Kosten verbunden ist wie die Montage der Produkte. Auch das ist grundsätzlich unabhängig von der verwendeten Füge-technik. Bei einer eingeschränkten Zahl von Produkten kann die Demontagelinie gegebenenfalls auch erkennen, welches Produkt gerade vorliegt und wie dieses zu demontieren ist. In der Regel dürfte für das Debonding eine Kombination aus lokaler Wärme und mechanischer Kraft zum Einsatz kommen. Letzteres bevorzugt in Form von Schälkräften, gegenüber denen Klebverbindungen empfindlicher und signifikant weniger beständig sind als gegenüber anderen Kräfteinleitungen.

Heute werden Klebverbindungen häufig in Kombination mit anderen Fügeverfahren wie z. B. Schweißpunkte, Schrauben oder Niete etc. eingesetzt. Die zusätzlichen Fügepunkte dienen einerseits als Montagehilfe und verhindern das Abrutschen der Bauteile bei noch nicht verfestigtem Klebstoff in der Klebfuge und andererseits als Rissstopper, wenn unbeabsichtigt schälende Kräfte auf die Klebverbindung wirken. Bei kombiniert gefügten Verbunden wie z. B. beim Kleben in Kombination mit Punktschweißen, Nieten oder Schrauben ist es der Klebstoff, der die langfristige und sichere Kraftübertragung und die Dauerbeständigkeit der Verbindung gewährleistet. Die o. g. weiteren Verbindungstechniken sind in

diesem Zusammenhang als Hilfsfügetechniken zu betrachten. Sie verhindern eine gezielte Demontage, dies gilt auch für Schrauben als Hilfsfügetechnik. Es ist zu erforschen, wie auf sie in Zukunft verzichtet werden kann, ohne die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Produkte zu beeinträchtigen.

In Zukunft ist zu erforschen, wie die Klebtechnik auf unterstützende Montagehilfen o.ä. verzichten kann.

Bei einer sehr heterogenen Mischung unterschiedlicher Produkte wird die Trennung der Materialien nur nach dem Schreddern erfolgen können, da keine Informationen zu den verwendeten Materialien, Konstruktionen und Fügetechniken der verschiedenen Produkte vorliegen. Dies ist etablierter Stand der Technik. Eine Vorab-Demontage einzelner Komponenten, wie beispielsweise Batterien, Scheiben oder größere Kunststoffteile, kann sinnvoll sein. Kunststoffbestandteile aus heterogenen Produktmischungen können nach der Trennung nur auf einer niedrigen Qualitätsstufe weiterverwendet werden.

In der Regel verbleiben die Klebstoffe – ebenso wie Lacke und die verschiedensten Verunreinigungen – auf den getrennten Materialien oder bilden einen Teil der Leichtfraktion. Bei Materialien, die beim Recycling einen Heißprozess durchlaufen, wie Metalle oder Glas, ist dies unkritisch. Bei Kunststoffen hingegen führen die Anhaftungen zu einem Qualitätsverlust. Da bei heterogenen Produktmischungen jedoch immer gealterte Mischkunststoffe einschließlich anhaftender Klebstoffe und Lacke, welche stofflich nicht mehr verwertbar sind, vorkommen, ist auch dies unkritisch. Bei der rohstofflichen Verwertung bzw. heute gegebenenfalls noch thermischen Verwertung, sollte dies nicht weiter stören.

Im Folgenden wird die rohstoffliche Trennung für das Recycling beispielhaft an drei unterschiedlichen Produkten gezeigt. Diese sind zu großen Teilen geklebt und wurden bewusst aus drei sehr unterschiedlichen Produktgruppen ausgewählt, nämlich

- Beispiel 1: Autos
- Beispiel 2: Mobiltelefone
- Beispiel 3: Weichverpackungen.

Beispiel 1 – Recycling von Autos

Autos werden heute, nach dem Entfernen der Betriebsstoffe, zunächst teilmontiert, um so große Kunststoffteile, die Kabel (da Kupfer als besonders wertvoller Rohstoff gilt, der zudem das Recycling von Stahl und Aluminium stört) sowie die Scheiben zu separieren. Gerade bei den Scheiben werden hierfür auch die Klebverbindungen gelöst. Wie bereits erläutert werden hierfür die »dicken« Klebfugen mit einem speziell konzipierten Draht zerschnitten. Die Klebstoffreste und Kunststoffanteile der Glasscheiben zersetzen sich thermisch beim Glasrecycling und stören daher nicht.

Wenn der Anteil von Autos mit hohem Kunststoffanteil in der Karosserie steigt (z. B. Beplankung von Karosserierahmen mit Faserverbundkunststoff), wird es notwendig sein, diese vor den weiteren Prozessschritten zu entfernen. Im Sinne einer Leichtbauweise, jedoch ohne Einschränkungen bei der Sicherheit, und damit ressourcenschonenden Fahrzeugen bei Produktion und Betrieb, werden die Verbindungen in erster Linie durch Kleben realisiert werden müssen (siehe Kapitel 1.3). Die Demontage kann hier ähnlich wie bei den Glasscheiben erfolgen. Dies wird durch in der Produktion oder im Crash-Fall als Rissstopper für den sicheren Betrieb benötigten Hilfsbefestigungen (etwa Schrauben, Nieten) stark eingeschränkt. In diesen Fällen würden die Teile durch eine hohe, gezielt angesetzte Kraft abgerissen. Falls eine Nutzung dieser Teile als Ersatzteile gewünscht ist, müssen die Hilfsbefestigungen mit relativ hohem Aufwand (z. B. Ausbohren) zuvor entfernt werden.

Die restliche, weitgehend aus Stahl und Aluminium bestehende Karosserie wird geschreddert und dann in Fraktionen mit seit langem bewährten Verfahren getrennt. Reste von Klebstoffen und Lacken befinden sich weiter am Metall, stören dort aufgrund der hohen Temperaturen beim Metallrecycling jedoch nicht. Der größere Teil findet sich zusammen mit anderen in kleinen Anteilen in der Karosserie verbleibenden Kunststoffen in der Leichtfraktion und kann aus heutiger Sicht nur thermisch zur Energiegewinnung genutzt werden – zukünftig ist aber denkbar, diese Fraktion rohstofflich zu verwerten, indem sie zusammen mit anderen Kunststoffabfällen in niedermolekulare Grundstoffe zersetzt wird.

Die Darstellung zeigt, dass sich Autos weitgehend in ihre Bestandteile zerlegen lassen. Dies wird durch Klebverbindungen nur wenig beeinträchtigt, wenngleich es hier deutlichen Verbesserungsbedarf gibt. Klebverbindungen lassen sich bereits heute weitgehend trennen, dies sollte sich aber signifikant verbessern, wenn die Demontage bereits bei der Konstruktion des Fahrzeugs berücksichtigt wird. Hierzu besteht hoher Forschungsbedarf, wobei auch die Klebstoffentwicklung zu berücksichtigen ist.

Beispiel 2 – Recycling von Mobiltelefonen

Mobiltelefone einschließlich Smartphones gelten gemeinhin als nicht reparabel und nur auf niedriger Wertschöpfungskette recycelbar. Oftmals wird dafür als Grund angegeben, dass die Geräte in hohem Maße geklebt sind. Es ist seitens des Herstellers zweifellos möglich, auf diese Weise die Aufbereitung dieser Produkte zu erschweren, genauso wie ihre Nicht-Reparierbarkeit durch die Nicht-Bereitstellung von Ersatzteilen. Beides sind aber keine technischen Notwendigkeiten.

Eine systematische Demontage und ein Recycling der Einzelbestandteile können automatisiert erfolgen und setzt wirtschaftlich das Sammeln der Geräte voraus. Apple hat ein Verfahren entwickelt mit dem iPhones vollständig demontiert werden können, unabhängig von der verwendeten Fügetechnik.³⁴⁸ Der Demontageroboter wird Liam genannt. Dies ist gekoppelt mit einem Rückkaufsystem beim Kauf eines neuen Gerätes.³⁴⁹ Bereits 2018 wurde der Recyclingroboter Liam durch das Nachfolgesystem Daisy ersetzt. Daisy ist in der Lage, die verschiedenen iPhones zu erkennen und 200 Smartphones pro Stunde zu zerlegen.³⁵⁰ 2019 wurde zur Kapazitätserweiterung eine zweite Linie aufgebaut, so dass nun bis zu 2,4 Millionen Geräte pro Jahr demontiert werden können.³⁵¹ Dies ist unabhängig davon, ob die Komponenten geschraubt, geklipst oder geklebt sind.

348 <https://www.youtube.com/watch?v=AYshVbcEmUc> (Zugriff April 30, 2020)

349 <http://apple.co/1SdvFbJ> (Zugriff April 30, 2020)

350 <https://www.youtube.com/watch?v=2Bu-gl7v-P8> (Zugriff April 30, 2020)

351 <https://www.crn.de/telekommunikation/apple-baut-iphone-recycling-aus.119757.html> (Zugriff April 30, 2020)

Es gibt aber auch semiautomatische Verfahren zur Demontage von Mobiltelefonen. Dies zielt teilweise auf das Recycling von Komponenten, teilweise aber auch auf die Reparatur im professionellen Bereich. Das iPhone X soll als Beispiel für das Vorgehen bei der Demontage mit einem speziellen Werkzeugsatz dienen und ist als Video verfügbar.³⁵² Die meisten Demontageanweisungen zielen auf eine Reparatur, demzufolge dem höchstmöglichen Level des Recyclings, ab. Für nahezu jeden Telefontyp gibt es im Internet Reparaturanweisungen, so dass auch versierte Laien viele Reparaturen, einschließlich des LöSENS der jeweiligen Klebverbindungen, selbstständig ausführen können. Dies zeigt, dass die Demontage möglich ist, unabhängig davon, ob das Gerät, einzelne Bauteile oder lediglich die Materialien später wiederverwendet werden.

Es gibt zudem auch umfassendere herstellerunabhängige Konzepte zum Recycling von Mobiltelefonen. Eines wurde 2019 im Rahmen eines Studierenden-Wettbewerbs der Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen im VDI erarbeitet. Hierbei werden zunächst automatisch leicht zu recycelnde Smartphones aussortiert und dann u. a. in Behindertenwerkstätten gezielt demontiert, um so Einzelkomponenten zu recyceln. Gerade bei steigenden Mengen könnten Typen, für die die automatische Demontage etabliert ist, in Demontageprozessen, wie dies oben beispielhaft beschrieben wurde, zerlegt werden. Ebenso könnten noch brauchbare Geräte ausgeschleust und repariert werden, sofern es gelingt einen Markt hierfür aufzubauen.

Bei den schwer zu demontierenden Smartphones, die über die eigentliche Notwendigkeit hinaus versiegelt wurden und bei denen die Demontage beim Design keine Berücksichtigung fand sowie bei seltenen Typen, ist vorgesehen, diese zu schreddern und in einem mehrstufigen Verfahren die Wertstoffe zu separieren. Im ersten Schritt wird in eine Metall-, Glas- und Kunststofffraktion getrennt. Die Edelmetalle werden dann in einem biotechnologischen Verfahren mittels Cyan-bildender Bakterien separiert, um

352 <https://de.ifixit.com/Teardown/iPhone+X+Teardown/98975>
(Zugriff April 30, 2020)

anschließend Aluminium und Wolfram (sowie weitere Schwermetalle) in metallurgischen Prozessen abzutrennen.³⁵³

Beispiel 3 – Recycling von Weichverpackungen

Weichverpackungen, insbesondere auch bekannt unter dem Handelsnamen Tetra Pak®, gelten aufgrund des flächigen Verbundes von Papier (ca. 75 %), Kunststoff (ca. 20 %, Polyethylen, PE) und Aluminium (ca. 5 %) oftmals als nicht recycelbar. Eine manuelle Zerlegung ist schon aufgrund der geringen Dicke der Kunststoff- und Metallschichten praktisch nicht möglich.

Es wurden jedoch industrielle Prozesse entwickelt, in denen die Trennung sehr wohl möglich ist und auch in hohem Maße durchgeführt wird.³⁵⁴ Der Prozess startet, ähnlich wie beim Papierrecycling, indem die Kartons zusammen mit Wasser in einem sogenannten Pulper mechanisch behandelt werden. Hierbei lösen sich die Papierfasern heraus und werden beispielsweise zu Wellpappe verarbeitet. Der Anteil aus Polyethylen (PE) und Aluminium wird hierbei abgetrennt und dient heute etwa als Rohstoff in der Zementindustrie. Zukünftig ließe sich diese Restfraktion aber auch rohstofflich verwerten, indem das Polyethylen (PE) in entsprechenden Anlagen zu Basisrohstoffen gecrackt wird. Die dabei entstehende, aluminiumreiche Fraktion ließe sich als Metall aufschmelzen und verwerten.

Es stellt sich zudem die Frage nach einem gezielteren Trennprozess. Dies könnte beispielsweise über die Schmelze des Polyethylens (PE) in der Mischfraktion funktionieren, aus der das Aluminium herausgefiltert wird. Hierzu gibt es noch einen hohen Forschungsbedarf. Die Aufgabe scheint technisch jedoch lösbar zu sein, und es stellt sich die Frage ab wann dies ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist.

353 N. N., CITplus 2019, 22, S. 11, Das chemPhone wird recycelt; www.vdi.de/chemplant (Zugriff April 30, 2020)

354 <https://www.tetrapak.com/de/clevereverpackung/recycling>, <https://www.youtube.com/watch?v=cAf8lY9IyaA> (Zugriff April 30, 2020)

4.5 Klebtechnik und Ressourceneffizienz

Die Klebtechnik ist eine Schlüsseltechnologie, um Produkte effizienter herzustellen als mit anderen Methoden oder ggf. neue Bauweisen und Produkte überhaupt erst zu ermöglichen. Dies wurde in Kapitel 1 bereits ausführlich erläutert. Es lassen sich universell alle Materialien miteinander verbinden, und die Kraftübertragung erfolgt flächig anstelle punktuell, wie z. B. beim Nieten oder Schrauben. Hierdurch können, weil deren Werkstoffeigenschaften erhalten bleiben, dünnere Halbzeuge und leichtere Materialien eingesetzt werden, ohne dass die Sicherheit des Produktes leidet. Dies führt zu einer Material- und damit auch Energieeinsparung bei der Fertigung der Produkte. Zudem ist Kleben eine Schlüsseltechnologie für den Leichtbau, was zu einer Verringerung des Energiebedarfs beim Betrieb führt.

Kleben ist eine Schlüsseltechnologie für den Leichtbau.

Auch die Langlebigkeit von Produkten kann durch den Einsatz des Klebens signifikant gesteigert werden. So lässt sich durch den Klebstoff z. B. die elektrische Isolierung von Metallen voneinander erreichen und dadurch die Kontaktkorrosion verhindern. Durch eine leichtere Konstruktion ist auch die mechanische Last beim Betrieb geringer, was zu einer geringeren kumulierten Belastung im Dauerbetrieb führt. Insgesamt hat dies zur Folge, dass sich ein Materialnutzungszyklus für die Kreislaufwirtschaft verlängert und demzufolge, über mehrere Zyklen betrachtet, der Abfallanteil bzw. der Materialanteil («Onus Ressourceninput« bzw. »Aufwand Güter Materialinput«/siehe Kapitel 2.5), der nur auf einer niedrigen Wertschöpfungsstufe wiederverwendet werden kann, minimiert wird. Die Materialeinsparung durch das Kleben soll anhand einer Lebensmittelverpackung und eines Fahrzeugs als sehr unterschiedliche Produkte erläutert werden.

Kleben kann die Langlebigkeit von Produkten steigern.

Lebensmittelverpackung

Die üblichen Lebensmittelverpackungen bestehen aus Mehrschichtverbunden, wobei jeder Schicht eine bestimmte Funktion zufällt. Die Schichten sind zwar nicht mit Klebstoff im eigentlichen Sinne geklebt, es ist jedoch trotzdem eine gute Adhäsion zwischen den Schichten notwendig. Wenn erforderlich, wird diese mit Haftvermittlerschichten (sogenannte Tie-Layern) bei der Koextrusion der Multischichtfolien realisiert; die Basisfolie besteht beispielsweise aus Polyethylen. Dieses ist preiswert herstellbar und kann die mechanischen Lasten tragen, so dass eine Beschädigung der Verpackung, die dazu führen würde, dass das Lebensmittel nicht mehr verkaufsfähig und damit Abfall wäre, nicht auftritt. Eine Schicht aus Polyvinylalkohol wirkt als Permeationsbarriere, insbesondere um das Eindringen von Sauerstoff in die Packung zu vermindern. Auch Metall- oder dünne Glasschichten verhindern Permeation, vor allem auch um den Verlust von Aromen und das Eindiffundieren ungewünschter Substanzen zu verhindern. Deckschichten aus weiteren Polymeren sorgen wiederum dafür, dass die Verpackungen hermetisch verschweißt werden können, um mikrobiologischen Verderb zu unterbinden und die Aromen in den Lebensmitteln zu halten.

Somit sorgen die Multischichtfolien dafür, dass die damit verpackten Lebensmittel über einen gegebenen Zeitraum sicher verzehrt werden können. Prinzipiell könnte dies auch durch ein homogenes Material erreicht werden, welches einen Kompromiss aus den verschiedenen Funktionsmaterialien des Verbundes darstellt. Dies würde aber erheblich dickere Verpackungen erfordern, und anstatt Folienverpackungen würde man eher Dosen verwenden. Dies hätte einen erheblichen Mehrbedarf an Verpackungsmaterial zur Folge, was in erheblichem Konflikt zu dem notwendigen, möglichst sparsamen Materialeinsatz stünde.

Fahrzeug

Bei Fahrzeugen ist Kleben die Schlüsseltechnologie, um Leichtbau zu ermöglichen. Dies beinhaltet nicht nur die Möglichkeit des Einsatzes neuer Strukturwerkstoffe mit geringerer Dichte und

geringerem Gewicht der daraus gefertigten Bauteile und Produkte. Insbesondere erlaubt es auch eine Reduktion von Blechdicken bei konventioneller Stahlbauweise. Bei konventionellen Stählen, welche schweißbar sind, ist das Kleben ein alternatives Fügeverfahren und wird, meist in Kombination mit Punktschweißen als schnelle Fixierung und Rissstopper, mit flächiger anstelle punktueller oder linearer Kraftübertragung eingesetzt. Durch Aufdoppelungen, die beispielsweise ein Flattern des Bleches vermeiden etc., erlaubt das Kleben hier die Verwendung der dünneren Bleche.

Bei den modernen hoch- und höchstfesten Stähle können prinzipiell noch dünnere Bleche verwendet werden.³⁵⁵ Diese lassen sich aber nicht sinnvoll schweißen, da die innere Struktur des Stahls beim Aufschmelzen des Stahls zerstört wird. Gerade diese innere Struktur (Morphologie) ist aber für die hohe Festigkeit verantwortlich, wodurch die Schweißstelle der schwächste Punkt des Bauteils würde. Demzufolge lassen sich derartige Bleche nur in Transportmitteln einsetzen, wenn sie geklebt werden.³⁵⁶ Durch die Verringerung der Blechdicke wird vor allem viel Material und damit auch Energie für dessen Erzeugung beim Bau der Fahrzeuge eingespart, dann sekundär durch das geringere Fahrzeuggewicht auch während des Betriebs.

Darüber hinausgehend ist ohne das Kleben die Erschließung alternativer Energiequellen, im Gegensatz zur konventionellen Energieerzeugung durch Verbrennungskraftwerke oder Atomkraftwerke, nicht denkbar. Dies beginnt bei alternativen Energiequellen mit der Versiegelung von Solarzellen sowie dem Aufbau von Solarmodulen und geht hin bis zum Fügen der Rotorblätter von Windkraftanlagen (siehe Kapitel 1.7.2). Hier werden bis zu etwa 1 Tonnen Klebstoff zum Fügen der beiden Halbschalen eines Rotorblattes benötigt. Nur durch den Einsatz des Klebens, welches beim Verbinden der beiden Rotorblatthalbschalen die benötigten Werkstoffeigenschaften der FVK-Rotorblätter erhält, sind diese Produkte hinreichend langlebig und leicht. Letzteres

355 T. Heller, H.-J. Kaiser, A. Kern, H.-J. Tschersich, ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 1998, 100, 664–668, Moderne hochfeste Stähle im Nutzfahrzeug- und Mobilkranbau.

356 A. Lutz, D. Symietz, Adhäsion – Kleben & dichten 2008 (10), 52, 14–18, Gleiche Strukturfestigkeit trotz dünnerer Bleche, Kleben von höchstem Stahl.

ist zudem mit einem geringeren Materialverbrauch und zumindest, wenn die Teile bewegt werden, höheren Energieausbeuten verbunden. Das Kleben führt auch hier zu einer hohen Ressourceneffizienz und macht moderne Anlagen zur alternativen Energiegewinnung erst möglich.

Die Erschließung alternativer Energiequellen ist ohne das Kleben nicht denkbar.

Auch bei der Speicherung und Wandlung alternativer Energien ist die Klebtechnik unverzichtbar. Neben wiederum Leichtbauaspekten – hohe Material- und Energieeffizienz durch geringes Gewicht – macht Kleben die serientauglichen und langlebigen Batterien und Brennstoffzellen erst möglich. Elektromobilität wäre z. B. ohne Kleben nicht denkbar. Bei einer beispielhaften Aufzählung beginnt dies mit dem Aufbau der Magnetkerne für die Elektromotoren aus Elektropaketierblechen, geht über das Abdichten der Batteriezellen bis hin zum Wärmemanagement der Batterien mit Wärmeleitklebstoffen.³⁵⁷ Ähnliches gilt für Brennstoffzellen. Diese müssen nicht nur hermetisch abgedichtet werden und als Module montiert werden, auch die Bipolarplatten müssen miteinander verbunden werden. Hier konnte gezeigt werden, dass dies durch elektrisch leitfähiges Kleben besonders effizient ist.³⁵⁸ Gerade die Abdichtung ist eine Herausforderung, unabhängig davon, ob Wasserstoff oder Methanol als Brennstoff dient, da beide hoch permeabel sind.

Elektromobilität ist ohne das Kleben nicht denkbar.

Die wenigen Beispiele zeigen, dass Kleben einen eminenten Beitrag dazu leistet, Produkte leichter zu machen um damit in den

357 F. Kerstan, Adhäsion – kleben & dichten 2019 (12), 63, 4–5, Zukunftsweisende Rolle der Klebstoffe für emissionsarme Mobilitätskonzepte.

358 K. Dilger, E. Stammen, M. Weber, S. Brokamp, P. Beckhaus, A. Heinzl, Adhäsion – kleben & dichten 2014 (7–8), 58, 36–41, Vereinfachte Montage von Brennstoffzellen, Bipolarplatten elektrisch leitfähig kleben.

Produktlebenszyklusphasen »Herstellung« und »Nutzung« Material und Energie einzusparen. Ebenso sind auch alle Technologien zur alternativen Energieerzeugung, -speicherung und -wandlung unmittelbar auf den erfolgreichen Einsatz des Klebens angewiesen. Die zuverlässige Energieerzeugung mit alternativen Technologien im großen Maßstab ist ohne Kleben unmöglich. Damit ist Kleben integraler Bestandteil einer erfolgreichen Energiewende.

| **Kleben ist integraler Bestandteil der Energiewende.**

4.6 Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Klebstoffen

Nachwachsende Rohstoffe sind eine Möglichkeit, die CO₂-Bilanz eines Produktes signifikant zu verbessern, da über die Photosynthese bei der Degradation des Produktes abgegebenes CO₂ wieder in Form der natürlichen Rohstoffe gebunden wird. Kritisch ist aber zu sehen, dass zumindest die einfach zu nutzenden nachwachsenden Rohstoffe (z. B. pflanzliche Öle, Stärke) in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen. Dies gilt entweder direkt oder indirekt, weil die verfügbare Ackerfläche nicht zeitgleich für beides zur Verfügung steht. Im Sinne der Gesamtbilanz der Volkswirtschaft ist es zudem auch bei nachwachsenden Rohstoffen anzustreben, den Kreislauf auf möglichst hohem Niveau zu schließen, also beispielsweise Biopolymere wieder zu verwerten und nicht nur darauf zu setzen, dass das finale Degradationsprodukt CO₂ wieder gebunden wird. Demzufolge ist die Kompostierung bioabbaubarer Polymere nur bedingt sinnvoll, da durch den mikrobiologischen Abbau die gleichen Endprodukte Kohlendioxid und Wasser gebildet werden wie bei der Verbrennung, jedoch mit dem Unterschied, dass die im Stoff gebundene Energie nicht genutzt wird.

In dem Zusammenhang sei aber auch auf die Begrifflichkeiten hingewiesen. Oftmals wird biobasiert und bioabbaubar gleichgesetzt. Dies ist nicht der Fall! Es gibt bei den biobasierten Polymeren ebenso wie bei den synthetischen Polymeren solche, die bioabbaubar sind und solche die es nicht sind.

Klebstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe werden bereits seit vielen Jahrtausenden von Menschen verwendet. Birkenpech dürfte der älteste Klebstoff sein und wurde bereits in der Steinzeit zur Befestigung von Sperrspitzen genutzt. In allen Frühkulturen wurden zahlreiche Gegenstände mit natürlichen Klebstoffen hergestellt. Ein herausragendes Beispiel sind z. B. die ägyptischen Langbögen, welche durch ein aufwändiges Laminierverfahren hergestellt wurden. Dieses ist bis heute nicht im Detail bekannt und nicht nachmachbar. Es war ein Beitrag zur Stabilisierung und

Ausbreitung der ägyptischen Kultur im Altertum und eines von vielen Beispielen, wie die Klebtechnik Kulturgeschichte maßgeblich beeinflusste (und es auch heute immer noch tut).

Klebstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe werden seit langem eingesetzt.

Auch in späteren Zeiten wurden zahlreiche Klebstoffe auf der Basis nachwachsender Rohstoffe entwickelt und werden teilweise bis heute praktisch unverändert verwendet. Beispiele sind Glutinleime wie beispielsweise Knochenleim und Fischleim aus Schlachtabfällen – vor allem zum Kleben von Holz – oder Stärkekleister, welche oftmals zum Kleben von Papier oder Pappe eingesetzt wurden und als Etikettenklebstoff oder in Form von Stein-Hall-Klebstoffen zur Herstellung von Wellpappe und anderen Pappprodukten noch eingesetzt werden. Seit der Erfindung der synthetischen Polymere vor 100 Jahren kamen immer mehr neue synthetische Klebstoffe hinzu. Hierbei wurden die meisten der heute üblichen Klebstoffklassen in der Mitte des 20sten Jahrhunderts entdeckt und permanent weiterentwickelt. Insgesamt stieg dadurch die Bedeutung der Füge-technik Kleben rasant, gleichzeitig ging der Einsatz nachwachsender Rohstoffe aber beständig zurück. Es ist anzumerken, dass auch heute noch sehr wichtige Klebstoffe wie vor allem die cellulosebasierten Tapetenklebstoffe und stärkebasierte Klebstoffe zur Produktion von Pappprodukten in großen Mengen auf der Basis nachwachsender Rohstoffe produziert werden. Es stellt sich die Frage, warum es den Rückgang des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe gibt und wie man sinnvoll gegensteuern kann.

Wie bereits näher erläutert, wurde es in den letzten Jahrzehnten durch den Einsatz neuer Klebstoffe möglich

- Produkte beständiger und sicherer zu machen
- unter dem Verbrauch geringerer Materialmengen zu produzieren (z. B. Verwendung dünnerer Bleche im Automobil, Miniaturisierung)
- wirtschaftlicher zu produzieren
- Produkten ein ansprechenderes Design zu geben oder
- gar erst neue Produkte zu ermöglichen.

Beispiele werden in dieser Studie zahlreich diskutiert und dabei auch deutlich gezeigt, dass die Gesamtbilanz der ökologischen Aspekte durch das Kleben in der Regel positiv ist.

Durch das Kleben ist die ökologische Gesamtbilanz geklebter Produkte in der Regel positiv.

Am Beispiel einer geklebten Autokarosserie sei dies noch einmal kurz erläutert: Durch das Kleben werden Kräfte nicht nur punktuell sondern flächig übertragen, womit insgesamt dünnere Bleche (oder auch alternative Materialien mit geringerem Gewicht, die gegebenenfalls auch aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen können; auf die weiteren Details soll hier nicht nochmals eingegangen werden) einsetzbar werden und eine weitere mechanische Stabilisierung durch definierte Formen der Blechbauteile und gegebenenfalls lokale, nur mit Kleben wirksame Aufdoppelung erfolgt. Die Möglichkeit, die Karosserie mit signifikant dünneren Stahlblechen zu bauen, spart Material und damit auch Energie im Produktlebenszyklus »Herstellung« und führt zu einem geringeren Energiebedarf im Produktlebenszyklus »Nutzung« des Fahrzeuges. Allerdings ist es bis heute nicht möglich, hierfür geeignete Klebstoffe auf der Basis nachwachsender Rohstoffe zur Verfügung zu stellen. Wie auch für sehr viele andere Reaktivklebstoffe ist hierfür noch ein hoher Forschungsbedarf notwendig.

Um auf die oben gestellte Frage der Gründe für den Rückgang des Anteils nachwachsender Rohstoffe zurückzukommen: Moderne Klebstoffe sind darauf ausgerichtet, komplexe Produkte mit hoher Sicherheit und hoher Produktivität herzustellen. Mit den seit langem bekannten Klebstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ist dies meist nicht möglich. Es stellt sich die Frage, wie man neuartige Klebstoffe ohne zu viele Syntheseschritte, bei welchen biobasierter Kohlenstoff in den Produkten reduziert und Energie benötigt wird, auf der Basis nachwachsender Rohstoffe entwickeln kann.

Bekannte Klebstoffe auf der Basis nachwachsender Rohstoffe lassen sich also grundsätzlich nicht im Automobilrohbau oder vielen anderen Anwendungen einsetzen. Es gibt zudem Beispiele, bei denen biobasierte Klebstoffe aus jeweils guten Gründen direkt

durch synthetische ersetzt wurden. Holzklebungen wurden über sehr lange Zeit mit Glutinleim* hergestellt. Dieser wurde praktisch komplett durch Weißleim auf der Basis von Polyvinylacetat ersetzt. Die Gründe hierfür sind vielfältig: Zunächst muss der traditionelle Leim heiß aufgetragen werden. Hierfür gab es in traditionellen Tischlereien einen Leimtopf auf dem vorhandenen Ofen. Gerade bei größeren Flächen kann der Heißauftrag schwierig sein und beim langen Warmhalten kann der Leim leicht anbrennen bzw. die enthaltene Wassermenge ist nicht konstant zu halten. Zudem kommt es im unverarbeiteten Zustand sowie bei geklebten Holzprodukten leicht zur mikrobiologischen Zersetzung. Darüber hinaus ist die Wasserbeständigkeit der Klebungen nur bedingt gegeben. Sie ist bei Weißleim nicht nur signifikant besser, sondern durch die Beigabe von Zusatzstoffen, den sogenannten Härtern, noch weiter steigerungsfähig. Die so modifizierten Leime werden mit D3 oder D4 bezeichnet und erfüllen die höchsten Anforderungen an die Wasserbeständigkeit von Holzklebungen. Mittelfristig stellt sich also eigentlich nicht die Frage, wieder Glutinleim* einzusetzen, sondern wie ein Klebstoff auf der Basis nachwachsender Rohstoffe aussehen muss, damit er dem Weißleim mindestens ebenbürtig ist.

* Glutinleim, auch Knochenleim genannt, wird aus Schlachtabfällen hergestellt. Gelatine ist eine lebensmittelreine Form von Glutinleim.³⁵⁹

Für die Weiterentwicklung der Eigenschaften von Klebstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe besteht noch Forschungsbedarf.

Es lassen sich jedoch sehr viele Substanzen chemisch identisch aus nachwachsenden Stoffen gewinnen. Hierfür ist das Polyvinylacetat des Weißleims ein gutes Beispiel.³⁶⁰ Das als Ausgangsstoff benötigte Vinylacetat wird großtechnisch in der Gasphase aus Essigsäure und Ethylen unter oxidierenden Bedingungen hergestellt. Bei dem heutzutage vorherrschenden Prozess für Ethylen und Essig-

359 <https://www.chemie.de/lexikon/Glutinleim.html> (Zugriff April 30, 2020)

360 <https://www.farbeundlack.de/Markt-Branche/Unternehmen-und-Maerkte/Wacker-erhaelt-Zertifizierung-von-Bindemitteln-auf-Basis-nachwachsender-Rohstoffe> (Zugriff April 30, 2020)

säure werden fossile Rohstoffe eingesetzt, die Rohstoffe lassen sich jedoch prinzipiell relativ einfach aus Biomasse gewinnen, z. B. Ethylen aus Bioethanol und Essigsäure als Nebenprodukt der Holzverarbeitenden Industrie.

Wie bereits dargestellt, basieren diverse Klebstoffe auf nachwachsenden Rohstoffen. Das betrifft auch gerade solche, die in großen Volumina produziert werden, wie beispielsweise Tapetenkleister auf Basis von Cellulosederivaten oder stärkebasierte Klebstoffe für die Produktion von Wellpappe und anderen Pappprodukten. Zudem werden gerade Kohlehydratderivate als Additive eingesetzt; auch in synthetischen Klebstoffen. Cellulosederivate finden häufig Ihren Einsatz als Verdicker und Rheologiehilfsmittel. Pflanzliche Öle sind eine weitere Klasse nachwachsender Rohstoffe mit zunehmendem Einsatz. Rizinusöl wird häufig in Polyurethanen einschließlich Polyurethanklebstoffen eingesetzt und erfreut sich zunehmender Beliebtheit. Es stellt sich jedoch die Frage, inwieweit die verfügbaren Mengen weiter gesteigert werden können, da deren Anbau nur in großen Monokulturen in tropischen Regionen möglich ist. Dies ist vor dem Hintergrund zu betrachten, dass Rizinusöl aufgrund der chemischen Struktur ein sehr interessanter Rohstoff für zahlreiche Anwendungen ist. Es ist das einzige in großen Mengen verfügbare pflanzliche Öl mit Hydroxylgruppen und Doppelbindungen. Hiermit lassen sich viele Folgereaktionen durchführen, was mit den einfacher verfügbaren Fetten und Ölen nicht der Fall ist. So wird Ricinusöl auch für die Produktion von Polyamiden auf Basis nachwachsender Rohstoffe eingesetzt (z. B. Vestamid® Terra³⁶¹). Hierbei ist anzumerken, dass hochwertige Schmelzklebstoffe auch aus Polyamiden bestehen können, so dass Rizinusöl hierfür die Basis sein könnte.

Pflanzliche Öle mit ungesättigten oder mehrfach ungesättigten Fettsäuren lassen sich vielfältig in Stoffe umwandeln, die potenziell als Klebstoffe einsetzbar sind. Da die meisten tierischen Fette – die wesentliche Ausnahme sind Fischöle – nur zu einem geringen Anteil ungesättigte Fettsäuren enthalten, kommen sie als Rohstoff für technische Anwendungen deutlich weniger in Frage als pflanzliche. Aufgrund der langen flexiblen Kohlenwasserstoffkette der

361 <https://www.vestamid.com/product/vestamid/en/products-services/VESTAMID-terra/> (Zugriff April 30, 2020)

Öle ist es nur schwer möglich, feste Polymere aus diesen modifizierten Ölen zu gewinnen. Hier müssen Modifikationen gemacht werden, um hart-zähe Materialien zu entwickeln, welche auch als höhermodulige Klebstoffe geeignet wären. Diese Entwicklungen stehen noch am Anfang. Im Wesentlichen muss es gelingen, die Morphologie der gehärteten Klebstoffe gezielt einzustellen, wobei die benötigten zähelastifizierenden Zusatzstoffe bisher nur vereinzelt auf der Basis nachwachsender Rohstoffe verfügbar sind.

Die Öle selber konnten in den letzten Jahren in vielfältiger Weise modifiziert werden. Teilweise sind die Methoden hierfür auch deutlich älter als 50 Jahre, und manche der Reaktionen sind immer noch industriell etabliert. Vieles ist jedoch in Vergessenheit geraten. Wiederum in anderen Fällen wird man bessere Methoden erarbeiten müssen, einschließlich neuer Strukturvarianten von im Prinzip existierenden Fettmodifikationen, um damit die Eigenschaftsprofile abdecken zu können, welche an moderne Hochleistungsklebstoffe gestellt werden. Im einfachsten Fall lassen sich mehrfach ungesättigte Öle in unmodifizierter Form einsetzen. Sie härten durch Reaktion mit Luftsauerstoff in Form einer oxidativen Trocknung, wenn entsprechende metallische Katalysatoren (Sikkative) zugegen sind. Einsatzbereiche sind vor allem Zeitungsdruckfarben, Ölfarben, Holzschutzöle und Kitt. Gerade Letzterer ist ein Kleb- und Dichtstoff mit hervorragender Alterungsbeständigkeit. Im Vergleich zu den synthetischen Materialien, die ihn ersetzt haben, ist die Verarbeitung aber signifikant schwieriger und die Durchhärtung dauert sehr lange.

Insbesondere mehrfach ungesättigte pflanzliche Öle lassen sich mit Maleinsäureanhydrid, das bisher nicht auf Basis nachwachsender Rohstoffe verfügbar ist, umsetzen. Man spricht von Maleinisierung, und es werden pflanzenbasierte Anhydride erhalten, welche prinzipiell für die Härtung von Epoxidharzen einsetzbar sind.³⁶² Ebenso ist eine Polymerisation der maleinisierten Öle mit Polyolen möglich. Jedoch sind die erzielbaren mechanischen Eigenschaften, wie bei den meisten anderen ölbasierten Klebstoffen auch, nach heutigem Entwicklungsstand noch verbesserungsbedürftig.

362 V. Fombuena, R. Petrucci, F. Dominici, A. Jordá-Vilaplana, N. Montanes, L. Torre, *Polymers* 2019, 11, 301–319, Maleinized Linseed Oil as Epoxy Resin Hardener for Composites with High Bio Content Obtained from Linen Byproducts; doi: 10.3390/polym11020301.

Die Doppelbindungen der ungesättigten Öle lassen sich auch epoxidieren. Die hierbei gebildeten Epoxide sind Zwischenstufen unseres Fettstoffwechsels und lassen sich für zahlreiche weitere Reaktionen einsetzen. Insbesondere epoxidiertes Sojabohnenöl wird in großen Mengen produziert und beispielsweise als Weichmacher eingesetzt. Hierbei kommt es nicht zu einer chemischen Reaktion. Für den Einsatz in Klebstoffen ist es eher günstig, Öle mit einem höheren Anteil Doppelbindungen einzusetzen, um so eine höhere Vernetzungsdichte bei der Härtung zu erzielen. Die Härtung kann mit Anhydriden, einschließlich der gerade beschriebenen biobasierten, erfolgen oder auch durch kationische Polymerisation; Amine sind hingegen für die Härtung wenig geeignet. In einem kürzlich abgeschlossenen Vorhaben konnte gezeigt werden, dass durch den Einbau neuartiger Polymilchsäure-basierter Polyole die Zähigkeit von kationisch härtenden epoxidierten Ölen signifikant erhöht werden konnte.³⁶³ Die mechanischen Eigenschaften verbesserten sich zudem deutlich mit dem Epoxidgehalt der Öle. Es konnten so fast komplett aus nachwachsenden Rohstoffen bestehende Klebstoffe vorgestellt werden, welche zu hohen Klebfestigkeiten mit Kunststoffen und Metallen als Substrate führten.

Die epoxidierten Öle dienen auch der Synthese von Folgerohstoffen. Durch Hydrolyse entstehen ölbasierte Polyole, welche für die Bildung von Polyurethanen einsetzbar sind. Wenn die epoxidierten Öle mit Acrylsäure umgesetzt werden, entstehen multifunktionelle Acrylsäureester, mit welchen sich photohärtende Klebstoffe und Beschichtungen herstellen lassen. Aber ebenso wie bei den vorherigen Rohstoffarten ist es auch hier bisher kaum möglich, mechanische Eigenschaften zu erzielen, die denen der synthetischen Klebstoffe ebenbürtig sind. Es spricht nichts dagegen, dass dies erreichbar ist, aber dafür sind entsprechende Forschungsanstrengungen notwendig.

Zahlreiche als Klebrohstoffe bzw. für die Synthese von Klebrohstoffen potenziell geeignete Substanzen werden inzwischen biotechnologisch hergestellt. Diese weichen strukturell von den heute üblichen Substanzen ab, so dass bis dato weitgehend

363 Abschlussbericht »KLEBSTOFFE AUF BASIS EPOXIDIERTER PFLANZLICHER ÖLE UND HYDROXYFUNKTIONELLER POLYESTER AUS NATÜRLICHEN MONOMEREN« (BioDur), 2018, gefördert durch Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e. V.

unbekannt ist, wie Klebstoffe und demzufolge die daraus formulierten Klebstoffe chemisch aufgebaut sein müssten, um ein aus klebtechnischer Sicht möglichst gutes Eigenschaftsprofil zu erzielen. Beispiele für solche prinzipiell verfügbaren Rohstoffe sind Itaconsäure, Milchsäure, Polyhydroxybutyrat, Isosorbit, Bernsteinsäure und Sorbitol.

Die bisher erwähnten nachwachsenden Rohstoffe lassen sich vielfältig einsetzen. Das Wertschöpfungsniveau ist sehr unterschiedlich – von der Nutzung als Lebensmittel bis hin zur Gewinnung von Biogas. Die Nutzung für Klebstoffe ist hier sicher im mittleren Bereich anzusiedeln. Vorteilhafter wäre der Einsatz echter Abfallstoffe, also Stoffe, für die heute nur Deponierung oder Verbrennung möglich sind. Diese Stoffe sind in der Landwirtschaft und den Folgeindustrien sehr selten, im Zweifelsfall lässt sich vieles als Futtermittel oder in Biogasanlagen einsetzen. Durch die Nutzung als nachwachsender Rohstoff besteht jedoch die Möglichkeit, bei solchen bereits verwerteten Stoffen das Wertschöpfungsniveau zu heben. Selbst Federn werden als Federhydrolysat als (minderwertige) Proteinquelle genutzt. Sie wären aber durchaus eine Basis für Klebstoffe oder könnten als Pulver ein verstärkender Füllstoff sein. Für Kaffeesatz, wie er bei der Herstellung von Koffein und Instantkaffee anfällt, gibt es bisher keine gute Verwertung und es ist auch keine absehbar. Ein in großen Massen anfallender Abfallstoff ist Lignin als Nebenprodukt aus der Papier- und Zellstoffproduktion. Die chemischen Bausteine wären für vielerlei Anwendungen sehr interessant, alleine es ist bisher nicht gelungen, das Lignin so in Bruchstücke zu spalten, dass die Substanzen in größeren Mengen unter ökologisch und ökonomisch sinnvollen Rahmenbedingungen isoliert werden könnten. Lignin wäre eine Quelle für aromatische Baustein, wogegen alle anderen nachwachsenden Rohstoffquellen in erster Linie aliphatische Rohstoffe liefern können. Es hat bisher zahlreiche nationale und internationale Forschungsanstrengungen gegeben, Lignin stofflich zu nutzen. Neben vielen Ansätzen für die Nutzung von Lignin gibt es aber bei weitem noch keinen Durchbruch. Insgesamt ist die stoffliche Nutzung von Holzbestandteilen ein interessantes Forschungsgebiet³⁶⁴, im Moment ist eine breite industrielle Nutzung aber noch nicht absehbar.

364 <https://xylochemistry.com/portal/>, (Zugriff April 30, 2020)

Es gibt viele Ansätze, das Eigenschaftsprofil biobasierter Klebstoffe in Richtung der Charakteristika synthetischer Klebstoffe zu entwickeln.

Die Darstellung zeigt, dass es nach wie vor einige in Massen- anwendungen eingesetzte biobasierte Klebstoffe gibt und dass viele Ansätze existieren, um bereits heute passable Eigenschaften erzielen. Es ist aber bei weitem nicht soweit, dass man komplexe Eigenschaftsprofile in ähnlicher Weise erfüllen kann wie mit synthetischen Klebstoffen. Dies betrifft die Kombination aus technischen Eigenschaften, Produktivität, Produktsicherheit, Ökonomie und Ökologie. Gerade Klebstoffe sind eine ideale Produktgruppe, um nachwachsende Rohstoffe zu verwenden. Die Mengen sind im Vergleich zu Massenkunststoffen moderat, aber ausreichend, dass die Rohstoffsynthese wirtschaftlich durchführbar und der ökologische Impact groß genug sind. Zudem sind sie bezüglich der chemischen Zusammensetzung sehr vielseitig und mit Kreativität lassen sich viele verfügbare neue Stoffe einsetzen ohne existierende Produkt- und Recyclingströme zu stören. Letzteres ist der Fall, wenn bei den typischen Massenpolymeren neue Polymere hinzukommen, die üblicherweise mit den bisherigen Kunststoffen nicht verträglich sind.

Auf internationaler Ebene gibt es viele Bestrebungen, nachwachsende Rohstoffe in Klebstoffen einzusetzen.

Folgerichtig gibt es international viele Anstrengungen, nachwachsende Rohstoffe in Klebstoffen einzusetzen. Dies zeigt sich bei einem Blick in die Literatur und die Tagungsprogramme der internationalen Klebtagungen. Demzufolge wurden und werden entsprechende Arbeiten auch gefördert (national vor allem durch die Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft), um die Abhängigkeit von internationalen Rohstoffquellen zu reduzieren. Entsprechend wurden Ergebnisse auch schon auf mehreren auf das Thema nachwachsende Rohstoffe in Kleb-

stoffen und Bindemitteln fokussierten Tagungen in Deutschland verbreitet.^{365, 366, 367}

Die Ausführungen zeigen, dass man auf einem guten Weg ist, nachwachsende Rohstoffe zunehmend in Klebstoffen nutzen zu können. Sie zeigen aber auch deutlich den noch enormen Forschungsbedarf, um das Level der vollsynthetischen Klebstoffe zu erreichen. Dies wird in Kapitel 5 nochmals aufgegriffen.

Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Klebungen ist auf einem guten Weg, zeigt aber auch den noch enormen Forschungsbedarf.

365 Workshop VALORIZATION OF BIO BASED RAW MATERIALS, Fraunhofer IFAM, Bremen, 18.-19.10.2017

366 Gülzower Fachgespräche Band 59: Abschlussworkshop Klebstoffe und Bindemittel, Dresden 18.-19.9.2019 <https://mediathek.fnr.de/broschuren/nachwachsende-rohstoffe/biowerkstoffe/band-59-abschlussworkshop-klebstoffe-und-bindemittel.html> (Zugriff April 30, 2020)

367 1. Branchentreff Klebstoffformulierung, Klebstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe, Fraunhofer IFAM, Bremen, 15. -16. Mai 2019.

5

Strategien für die
Klebtechnik zur
Unterstützung von
Kreislaufwirtschaft
und Ökodesign

5.1 Einleitung

Das Kleben steht für wärmearmes Fügen von gleichen oder unterschiedlichen Füge­teilen unter Erhalt der Füge­teile­eigen­schaf­ten (siehe Kapitel 1.3), die für das jeweilige Produkt gefordert sind. Da, von wenigen Ausnahmen abgesehen, der Klebstoff selbst bei der Herstellung einer Klebung keinen schädigenden Einfluss auf die zu verbindenden Füge­teile ausübt, stellt die Temperatur, die die Klebfuge während des Fügens erreicht, die ausschlaggebende intensive Größe dar. Die Verfestigung des Klebstoffs erfolgt in der Regel bei Temperaturen unterhalb der Glasübergangs- oder Schmelztemperat­uren der Füge­teile, so dass der Erhalt der Füge­teile­eigen­schaf­ten beim wärmearmen Fügen durch Kleben gegeben ist.

Die Klebtechnik unterstützt Kreislaufwirtschaft und Ökodesign.

Im Sinne einer ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung für die Kreislaufwirtschaftswirksamkeit geklebter Produkte sind sowohl die Kriterien zur Erfüllung der Produktsicherheitsanforderungen als auch die »End-of-Life«-Szenarien in die Materialauswahl sowie in die Auslegung der Klebung einzubeziehen. Für beide Aspekte gewinnt der Begriff der »kontrollierten Langlebigkeit« (siehe Kapitel 4.1) an Bedeutung. »Kontrollierte Langlebigkeit« führt beide Aspekte zusammen: Während der Produktlebenszyklusphase »Nutzung« erfüllen die Klebungen die Anforderungen an Sicherheit und Ökobilanzwirksamkeit, bei der Produktlebenszyklusphase »Entsorgung« ermöglichen sie die Kreislaufwirtschaftswirksamkeit.

Es gibt zwei grundsätzliche Wege, diese »kontrollierte Langlebigkeit« zu realisieren:

- (1) über die Einstellung/Beeinflussung der Adhäsion
- (2) über die Einstellung/Beeinflussung der Kohäsion

Beide Wege finden sich in den in diesem Kapitel aufgeführten Konzepten wieder. Hierbei ist grundsätzlich zwischen Klebverbindungen mit und ohne die Hauptfunktion der Übertragung mechanischer Lasten zu differenzieren (siehe hierzu insbesondere Kapitel 5.2.9).

Der Schwerpunkt der Ausführungen in diesem Kapitel liegt auf Weg 2, d. h. der Beeinflussung der Kohäsion im Klebstoff. Nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik bedarf Weg 1 (Beeinflussung der Adhäsion des Klebstoffs zu den Fügepartnern) noch erheblicher Forschungsarbeiten, auch im Bereich der Grundlagenforschung, sowie anschließend umfangreicher Nachweisführungen und Praxiserprobungen. Dies betrifft insbesondere Klebungen, die Sicherheitsanforderungen gemäß der klebtechnischen Qualitätsnormen^{39,71–77} zu erfüllen haben.

Im Sinne der »kontrollierten Langlebigkeit« geklebter Produkte wird bei deren Trennung das kohäsive Klebstoffversagen favorisiert.

Klebungen bieten grundsätzlich die Möglichkeit zum wärmearmen Trennen (siehe Kapitel 2.6.1, auch 1.6, 3.2–3.4) ohne Beeinflussung der Füge Teileigenschaften. Da Klebungen über die Funktion »Verbinden« hinaus auch zusätzliche Funktionen integrieren können (siehe Kapitel 1.5/ Abbildung 14), impliziert das Trennen eine Desintegration dieser Funktionen. Dagegen in Verbindungen, bei denen die Funktion »Verbinden« z. B. durch Schrauben realisiert und die zusätzliche Funktion »Dichten« z. B. durch elastisch vorgespannte, zusätzliche Kunststoffdichtungen gegeben ist, erfolgt das Lösen und Trennen in mehreren, oft manuellen Arbeitsschritten. Die Schrauben werden geöffnet und entfernt, die freigelegte Dichtung wird entnommen und zumindest eines der beiden Füge Teile verbleibt irreversibel mit Durchgangslöchern.

Als notwendige Ergänzung zum mechanischen (werkstofflichen) Recycling³⁶⁸ und als bevorzugte Alternative³⁶⁹ zur rein energetischen Verwertung, also der Verbrennung der Abfälle mit Energierückgewinnung, eröffnet für Klebungen mit Fügepartnern aus Kunststoff das chemische (rohstoffliche) Recycling (siehe Kapitel 2.4.2) eine zukunftsweisende Perspektive.^{370,371} Dies gilt insbesondere für Kunststoffabfälle mit duromerer, nicht schmelz- oder lösbarer Polymerbasis, für Verbundwerkstoffe mit duromerer Matrixharzbasis, für nicht sortierfähige Kunststoffabfälle sowie für verunreinigte Kunststoffe unabhängig von ihrer Polymerbasis. Der Begriff »verunreinigte Kunststoffe« schließt in diesem Kontext Kunststofffügeteile, auf denen nach dem mechanischen Trennen der Klebung noch (restlicher) Klebstoff haftet, ein.

Beim chemischen Recycling werden Kunststoffabfälle anhand chemischer Verfahren wie Pyrolyse, Vergasung oder Solvolyse in ihre chemischen Bestandteile zerlegt. Diese können anschließend ohne Einsatz neuer fossiler Rohstoffe und ohne Qualitätseinbußen für die Herstellung neuer Kunststoffe/Kunststoffprodukte wiederverwendet werden. Der entscheidende Entwicklungsschritt sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologiebilanztechnischer Sicht besteht darin, die energieerfordernden, endothermen chemischen Vorgänge des chemischen Recyclings zu überwinden. Dieses wird durch Einsatz mittelfristig ausreichend vorhandener, regenerativer Energie und/oder durch die Entwicklung katalytischer Methoden, die bei milden Temperaturen und mit hoher Selektivität arbeiten, erreicht. Das chemische Recycling würde sowohl unter Optimie-

368 Fraunhofer Umsicht, Chemisches Recycling von Kunststoffen, <https://www.um-sicht-suro.fraunhofer.de/de/unsere-loesungen/chemisches-recycling.html> (Zugriff April 30, 2020)

369 Umweltbundesamt – UBA; Recycling: Verbesserungsbedarf bei Kunststoffabfällen, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/recycling-verbesserungsbedarf-bei> (Zugriff April 30, 2020)

370 M. Crippa, B. De Wilde, R. Koopmans, J. Leyssens, J. Muncke, A.-C. Ritschkoff, K. Van Doorselaer, C. Velis, C. M. Wagner; Eine Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe – Erkenntnisse aus Forschung und Innovation als Grundlage für politische und finanzielle Entscheidungen, 2019 (M. De Smet, M. Linder, Hrsg.). Europäische Kommission, Brüssel, Belgien.

371 A. Lechleitner, D. Schwabl, T. Schubert, T. et al., Österr Wasser- und Abfallw 2020, 72, 47–60, Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. <https://doi.org/10.1007/s00506-019-00628-w> (Zugriff April 30, 2020)

rung der Ökobilanz als auch unter Minimierung der Abhängigkeit von nicht erneuerbaren Energieträgern zu globalen ökonomischen Einsparungen in Milliardenhöhe [€] führen.³⁷²

Das chemische Recycling ist zukünftig als Ergänzung zu den anderen Recyclingverfahren zu betrachten.

Demontagestrategien bei geklebten Verbunden sind dann besonders zielgerichtet, wenn sie auf der lokalen Einwirkung von Stimuli beruhen. Nach Überschreiten eines für die Nutzungslebensphase nicht zu erwartenden Schwellenwerts einer Demontage-auslösenden Beanspruchung (engl.: Trigger) verändern sich die Eigenschaften von Klebungen im Bereich der Klebschicht. Ein Beispiel für die Auslösung eines solchen Trigger-Ereignisses ist beispielsweise die Kombination aus mechanischer Überbeanspruchung und gleichzeitiger Temperaturerhöhung. Wie dies auch beim Lösen einer Schraube zur Demontage einer Schraubverbindung der Fall ist, werden das vorgesehene Trigger-Ereignis und dessen Schwellenwert im Sinne der Nachhaltigkeit bei der Entwicklung sowohl des Klebstoffs als auch der jeweiligen Klebung durch eine geeignete Materialauswahl und ein wohlüberlegtes Verbunddesign mit Blick auf den gesamten Lebenszyklus gezielt verankert. Die zuverlässige Wirkung sowie die bezüglich der produktgerechten Anwendung robuste Auslegung werden durch die Verfügbarkeit von Daten sichergestellt. Dazu werden sowohl materialbezogene als auch für die im gesamten Lebenszyklus ablaufenden Prozesse charakteristische Informationen genutzt.

Demontagestrategien sollten auf lokalen Auslösern basieren.

Bei chemisch härtenden Klebstoffen, deren Verfestigung (Kohäsionsbildung) auf die chemischen Reaktionen von Harz und

372 A. Rahimi, J. M. Garcia, Nature Reviews 2017, 1, 1–11, Chemical recycling of waste plastics for new material production; <https://doi.org/10.1038/s41570-017-0046>.

Härter in der Klebfuge zurückgeht, kann neben einem thermisch bedingten Erweichen der polymeren Klebschicht dieses auch durch Quellung erreicht werden. Eine andere Möglichkeit ist der Abbau (Degradation) des Polymernetzwerks. Hierbei werden entweder die Harz-Härter-Reaktionen rückgängig gemacht oder aber in Molekülketten werden Kettenbrüche erzielt.

Dem Anwender des geklebten Produkts muss zur Kenntnis gegeben werden, welche Demontageoption herstellereitig vorgegeben ist. Sinngemäß gilt dies auch für Reparaturprozesse. Umgekehrt betrachtet bedeutet dies, dass Hersteller geklebter Produkte gegenüber nachhaltig handelnden Anwendern und Verbrauchern einen Wettbewerbsvorteil erlangen, wenn sie das laut Produktdesign sachgemäße Verbraucherverhalten vorab berücksichtigen und dieses dem Verbraucher zur Kenntnis bringen. Wenn Dauerhaftigkeit, Reparaturfähigkeit und/oder Recyclingfreundlichkeit die Marktchancen geklebter Produkte beeinflussen, so ist es vorteilhaft, diese zu Zwecken der Vergleichbarkeit anhand möglichst einfach verständlicher und repräsentativer Zahlenwerte erfassbar zu machen.

In der Abbildung 78 ist schematisch skizziert, wie eine im Produktlebenszyklus »Nutzung« sichere und beständige Klebung von einem Recycler gelöst werden kann, was sinngemäß auch für den Reparateur gilt. Diese verfügen über ein für die Klebung spezielles Trennungswerkzeug, dessen Einsatz die Klebstoffexperten sowie die Designer der Klebung ganzheitlich denkend in den Verbund integriert haben.

Anwender, Reparateure und Recycler müssen über die seitens des Klebstoffherstellers vorgesehene Demontagemöglichkeit informiert sein.

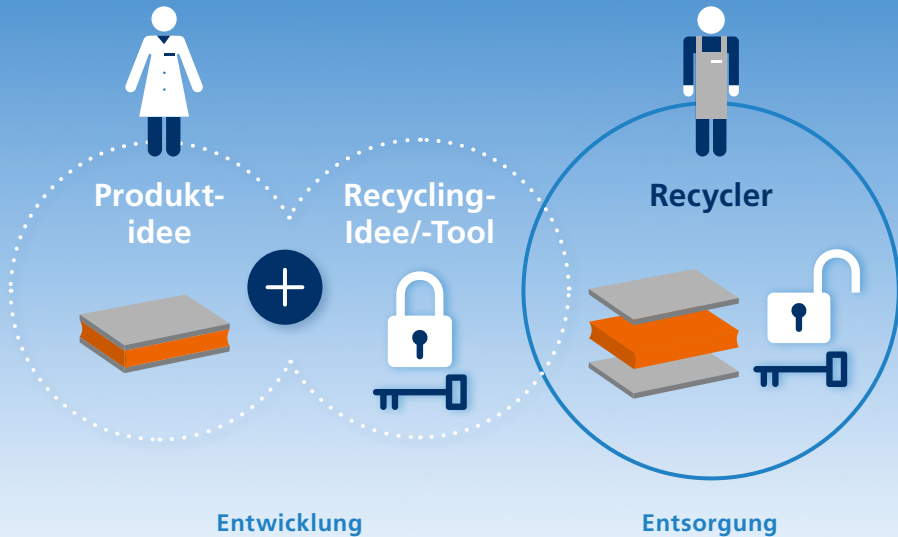


Abb. 78
Prozessschritte
und Akteure in der
Demontage nachhaltig
geklebter Verbunde

Digitale Informationsquellen ermöglichen technisch die Weitergabe der Vorgaben zum Trennen der geklebten Verbindung an den im Produktzyklus »Entsorgung« tätigen Recycler. Welche materialbezogenen trennenden Ideen und Vorgaben im Bereich der Klebtechnik zukünftig zum Einsatz kommen könnten, ist in Kapitel 5.2 im Detail ausgeführt.

Der Produkthanwendende und somit das Herz des Marktes, der Entwickelnde von Produktideen mit Blick auf diesen Markt und auf kommende Generationen, der zwischen Markt, Ideen und ganzheitlichem Denken vermittelnde Experte und damit alle nachhaltig handelnden Akteure sind somit stets Menschen, denen FAIRe Daten einen Zugang in die für sie relevanten Aspekte der materiellen Produktwelt eröffnen.

Im Folgenden werden die aktuellen bzw. zukünftig notwendigen Beiträge der Klebtechnik zur Kreislaufwirtschaft schrittweise erläutert.

5.2 Klebstoffformulierungen im Rahmen der Kreislaufwirtschaft

5.2.1 Klebrohstoffe aus Polymer-Recyclaten

Beim Recycling von Massenpolymeren können Fraktionen anfallen, die direkt nicht wieder zu den ursprünglichen Massenpolymeren umgesetzt werden können, da es sich um andere chemische Strukturen handelt, oder es sind die Mengen für die Investition in eine auf dem Recyclat aufbauenden Anlage zu gering.

Da Klebstoffe typischerweise in mittelgroßen Mengen benötigt werden, können derartige Recyclate geeignete Rohstoffe für Klebstoffe sein. Es können beispielsweise Polyethylenterephthalat (PET) aus Flaschen, Polyamid (PA) aus Alttextilien oder Polyurethane (PUR) aus Matratzen oder Autopolstern partiell durch Reaktion mit Polyolen umgesetzt werden. Dabei bilden sich Oligomere* mit Alkoholendgruppen. Gegebenenfalls können hier sogar die »Stickies« verwendet werden, welche beim Papierrecycling anfallen und teilweise aus Papierklebstoffen stammen. Diese lassen sich als Rohstoffe für verschiedene Klebstoffe einsetzen. Beispiele hierfür sind:

- reaktive sowie nicht reaktive Polyurethane
- Schmelzklebstoffe
- Epoxidharze, vor allem kationisch härtende, oder
- Polyacrylate.

* Bei Oligomeren handelt es sich um Makromoleküle, die sich im Gegensatz zu »Monomeren«, aus bis zu 30 strukturell gleichen oder ähnlichen Einheiten aufbauen. Oligomere haben, im Gegensatz zu »Polymeren«, eine definierte Anzahl von Einheiten.³⁷³

Eine gleichbleibend konstante Rohstoffqualität ist hierbei eine essentielle Voraussetzung. Da Klebstoffe auf einer höheren Wertschöpfungsstufe stehen als Massenkunststoffe, entspricht diese Vorgehensweise sogar einem Upcycling. Alternativ kann aus

373 <https://www.chemie.de/lexikon/Oligomer.html> (Zugriff April 30, 2020)

Kunststoffabfällen ein Pulver erzeugt werden, welches anstelle mineralischer Komponenten wie z. B. Kreide oder Quarzmehl als Leichtbau-Füllstoff für Klebstoffe eingesetzt wird. Dies verringert zusätzlich die Dichte der Klebstoffe und fördert damit den Leichtbau.

Die konstante Qualität der Klebstoffrohstoffe aus Polymer-Recyclaten ist eine grundsätzliche Voraussetzung für die Klebstoffqualität.

5.2.2 Binden von Kohlendioxid

Kohlendioxid ist meist das finale Endprodukt bei der Nutzung von kohlenstoffbasierten Stoffen. Unter Energieeinsatz lässt sich wieder in höherenergetische und vielfältig nutzbare Stoffe umwandeln. In der Natur geschieht dies durch Photosynthese. Es gibt bereits einige wenige Möglichkeiten, Kohlendioxid direkt in Stoffen zu binden, die als Klebrohstoff geeignet sind. Am besten untersucht ist hierbei die Addition von CO_2 an Epoxide, wobei sich cyclische Carbonate bilden. Diese lassen sich anschließend mit Aminen zu Polyurethanen umsetzen. Diese Reaktionen benötigen jedoch hohe Temperaturen und beim Binden des CO_2 auch Druck, so dass sie bei der Herstellung von Klebverbindungen nur eingeschränkt nutzbar sind.

Durch geeignete Katalysatoren sollte es gelingen, derartige Reaktionen unter deutlich mildereren Bedingungen durchzuführen. Es geht aber auch darum, weitere Wege zu erforschen, um Polyurethane sowie Polyharnstoffderivate mit einem hohen Anteil gebundenem CO_2 bereitzustellen. Hierfür gibt es in der Grundlagenliteratur Ansätze.

Geeignete Katalysatoren würden das Binden von CO_2 in Klebstoffformulierungen unter milden Bedingungen ermöglichen.

Die als Zwischenprodukt anfallenden cyclischen Carbonate lassen sich zudem mit weiteren Substanzen wie Alkoholen oder Thiolen umsetzen. Auch hier entstehen Strukturen, die für Klebstoffe geeignet sind. Es werden aber ebenso Katalysatoren benötigt, die es erlauben, die Additionsreaktionen unter milden Bedingungen durchzuführen.

Auch Polycarbonate, für Klebstoffe besonders geeignet aliphatische Polycarbonatpolyole, können gebundenes CO₂ enthalten. Diese können anschließend ebenso zu Polyurethanen umgesetzt werden, wobei der Anteil an gebundenem CO₂ deutlich höher ausfällt als wenn lediglich die Urethangruppen auf der Basis von Kohlendioxid präpariert wurden.

In der Basischemie werden viele Möglichkeiten untersucht, Kohlendioxid zu reduzieren. Meist sind Methan oder Methanol die Zielprodukte. Selbstverständlich sind auch diese Wege geeignet, Klebstoffe bereit zu stellen. Da es sich aber um generelle, nicht klebstoffspezifische Wege der Grundstoffchemie handelt, soll darauf nicht näher eingegangen werden.

5.2.3 Kohlenstoffmanagement in Klebstoffen: Minimierung des Kohlenstoffgehaltes und Klebstoffe in hohem Oxidationszustand

Wie gezeigt, lässt sich Kohlendioxid unter Energieeinsatz wieder zu nutzbaren Stoffen binden. Je weiter es reduziert wird, umso höher ist die Energie, die hierfür benötigt wird. Wenn man umgekehrt von Stoffen mit stark reduziertem Kohlenstoff ausgeht, egal ob fossile Kohlenstoffquellen oder pflanzliche Öle, kann nutzbare Energie bei der Oxidation gewonnen werden. Wenn man komplett oxidiert, handelt es sich meist um eine Verbrennung, so dass keine verwertbaren Stoffe gebildet werden. Bei einer partiellen Oxidation, wie sie vielfältig bei der Synthese organischer Substanzen durchgeführt wird, können jedoch als Klebstoffe verwertbare Stoffe entstehen. Dies bedeutet aber auch, wenn der Anteil stark reduzierten Kohlenstoffs, also vor allem in Form aliphatischer und aromatischer Kohlenwasserstoffeinheiten, in Klebstoffen minimal ist, der energetische Impact besonders niedrig ist. Der Energiebedarf, um die Klebstoffe aus höher oxidiertem Kohlen-

stoff (vor allem aus Kohlendioxid) zu generieren, ist minimal. Allerdings werden für die Fließfähigkeit und Flexibilität gewisse Mengen aliphatischer Ketten benötigt, und es ist selbstverständlich, dass nicht der gesamte Kohlenstoff in hohem Oxidationszustand vorliegen kann. Wie bereits erwähnt, ist der Einsatz höher oxidiert Kohlenstoffspezies in Klebstoffen ausgehend von fossilen Kohlenstoffquellen nur dann sinnvoll, wenn der Energiegehalt bei der Oxidation des fossilen Kohlenstoffs genutzt wird oder Recyclate mit Kohlenstoff in höher oxidiertem Zustand eingesetzt werden. Bei der Reduktion von Kohlendioxid ist es für eine günstige Energiebilanz immer sinnvoll so vorzugehen.

Wenn der Gehalt organischen Kohlenstoffs in Klebstoffen so gering wie möglich ist, ist dies für die Gesamtbilanz ebenfalls günstig. Dies kann durch Füllstoffe realisiert werden und wird bereits heute aus technischen und ökonomischen Gründen umgesetzt. Durch den Einsatz von Rheologie-Hilfsmitteln und den passenden polymeren Anteilen lässt sich dies noch weiter optimieren.

5.2.4 Nachwachsende Rohstoffe

Nachwachsende Rohstoffe wurden in der Vergangenheit bereits zu einem hohen Anteil in Klebstoffen eingesetzt. Ihr Anteil ist aus technischen und ökonomischen Gründen zurückgegangen (siehe Kapitel 3.6). Es wird jedoch verstärkt daran gearbeitet, diesen Anteil wieder zu erhöhen. Als kritisch erweist sich immer die Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion. So sind nach Möglichkeit Rohstoffpflanzen anzubauen, die Vegetationslücken nutzen oder auf Böden gedeihen, welche für die Lebensmittelproduktion wenig geeignet sind. Hierzu bedarf es Forschung vom Agrarbereich bis hin zu den Klebstoffen.

Ebenso existieren nur wenige echte Abfallstoffe, d. h. solche, für die es bisher keinerlei stoffliche Verwertungsmöglichkeiten auf akzeptablem Wertschöpfungsniveau gibt. Hierzu gehört, trotz erheblicher Forschungsanstrengungen, Lignin, aber auch Kaffeesatz aus der Produktion von Koffein und löslichem Kaffee oder Federn. Im Gegensatz dazu lassen sich für viele Zwecke Stärke, Cellulose, Fette oder Proteine für die Präparation von Klebstoffen einsetzen. Eine Modifikation ist fast immer notwendig.

Darüber hinaus lassen sich viele Substanzen, die als Klebstoffe geeignet sind, durch Fermentation erzeugen, wobei oftmals bestimmte Stoffe bereitgestellt werden können. Es ist zu überlegen, wie man diese Stoffe in Klebstoffen nutzen kann. Nur in seltenen Fällen werden konventionell verwendete Rohstoffe durch Fermentation hergestellt, Beispiele sind Ethanol und Essigsäure, welche zu Klebstoffen weiterverarbeitet werden können.

In diesem Zusammenhang sei ebenfalls darauf verwiesen, dass die Nutzung von Seitenströmen der Lebensmittelproduktion ebenfalls als Option betrachtet werden kann.

Auf jeden Fall stellt für den industriellen Einsatz nachwachsender Rohstoffe die Sicherstellung der gleichbleibenden Qualität³⁷⁴ generell eine wesentliche Voraussetzung dar. Dies gilt in uneingeschränkter Weise auch für deren Verwendung in der Herstellung industrieller Klebstoffe.

Die konstante Qualität nachwachsender Rohstoffe muss für deren Einsatz in Klebstoffen gegeben sein.

Der Forschungsbedarf für den (wieder) stärkeren Einsatz nachwachsender Rohstoffe in Klebstoffen geht in zwei Richtungen:

- Die eine Richtung besteht in den bekannten Rückgewinnungen synthetischer Klebstoffe. Hierfür muss die Performance verbessert werden, so dass z. B. die gleiche Produktivität wie bei den synthetischen Folgeprodukten erreicht wird. Hierbei geht es meist um nichtreaktive Klebstoffe, welche unter anderem in der Papierindustrie oder für Etikettierungen zum Einsatz kommen.
- Bei der anderen Richtung geht es um die Entwicklung reaktiver Klebstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe, vor allem zum Einsatz im Kleben mit der Hauptfunktion der Übertragung mechanischer Lasten. Klebstoffe auf dieser Basis

374 J. Geldermann; In Nachhaltigkeit; H. Corsten, S. Roth, Hrsg.; Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2012; Planung der Produktion und Wertschöpfungsnetzwerken für nachwachsende Rohstoffe, DOI 10.1007/978-3-8349-3746-9_10.

und mit dieser Funktion sind bisher vergleichsweise selten. Sie bestehen oftmals nur zum Teil aus nachwachsenden Rohstoffen und zeigen meist eine schlechtere Performance als vergleichbare synthetische Produkte. Ein Beispiel, bei dem bereits relativ gute Eigenschaften erzielt wurden, ist das sogenannte BioDur System³⁷⁵. Hierbei werden epoxidierte Fettsäuren mit Polyolen auf der Basis von Polymilchsäure kationisch polymerisiert, so dass bis zu 99 % der eingesetzten Rohstoffe solche auf nachwachsender Basis sind. Allerdings sind weitere Verbesserungen im Hinblick auf die Wärmebeständigkeit und einer niedrigeren Aushärtetemperatur notwendig.

Forschungsbedarf für den stärkeren Einsatz nachwachsender Rohstoffe in Klebstoffen besteht sowohl bei nichtreaktiven als auch bei reaktiven Klebstoffen.

5.2.5 Abbaubare Klebstoffe

Kompostierbarkeit ist in den seltensten Fällen ein sinnvolles Entwicklungsziel für Klebstoffe und andere Polymere, da es die »Wegwerfmentalität« einer Linearwirtschaft verstärkt und die Materialien im Komposter oder der Natur, ebenso wie beim Verbrennen, in Kohlendioxid und Wasser umgewandelt werden, ohne die enthaltene Energie zu nutzen. Unter »Kompostierbarkeit« wird hier nicht die Normdefinition verwendet, nach der eine reine Sichtkontrolle gemacht wird, in Realität aber größere Mengen Mikroplastik gebildet werden können, die nicht weiter abbaubar sind. An dieser Stelle wird der komplette mikrobiologische Abbau unter »Kompostierbarkeit« verstanden.

Es gibt jedoch Anwendungen, bei denen Kompostierbarkeit sinnvoll sein kann. Hierzu gehören Haftklebstoffe, mit denen Etiketten auf Lebensmittel wie Obst oder Gemüse geklebt werden. Heute werden dafür u. a. Polyacrylate mit geringem Tack verwendet, so

³⁷⁵ Schlussbericht FNR Projekt »Klebstoffe auf Basis epoxidiertes pflanzlicher Öle und hydroxyfunktioneller Polyester aus natürlichen Monomeren« 14NR205, Juni 2018.

dass sie vergleichsweise einfach von dem Lebensmittel entfernbar sind, da sie oftmals mit den Schalen oder sonstigen Überresten entsorgt werden. Dies ist in diesem Zusammenhang natürlich nur dann sinnvoll, wenn die Etiketten selber auch kompostierbar sind. Dies kann auch für andere Dinge sinnvoll sein, welche in der Natur verbleiben wie z. B. Markierungen im Garten- und Landschaftsbau.

Die Klebstoffe könnten auf der Basis verschiedener nachwachsender Rohstoffe aufgebaut werden und sollten für die meisten der angedachten Anwendungen haftklebrig sein. Hierfür werden länger-kettige Kohlenwasserstoffeinheiten enthalten sein müssen, wie sie z. B. in Pflanzenölen vorkommen, unabhängig davon, ob die Klebstoffbasis auf Stärke, Cellulose oder Proteinen beruht. Ebenso wäre auch der Einsatz von Naturlatex denkbar – eine Lösung, die auch kurzfristig zur Verfügung stehen könnte. Da es sich hierbei um einen reinen Kohlenwasserstoff handelt, wäre der Abbau relativ langsam, wogegen er z. B. bei den o. g., stärkebasierten Klebstoffen verhältnismäßig schnell erfolgen würde.

5.2.6 Klebstoffe mit hoher Verträglichkeit zu den Substratmaterialien

Das Recycling verwendeter Klebstoffe ist in der Regel ebenso unsinnig wie die Wiedergewinnung der Druckerschwärze beim Papierrecycling. Wichtig demgegenüber aber ist, dass der Klebstoff das Recycling der geklebten Materialien möglichst wenig stört. Wie in Kapitel 4 erläutert, stellt dies bei heiß zu recycelnden Materialien, vor allem bei Metallen und Glas, kein Problem dar, kann aber insbesondere beim stofflichen Recycling von Kunststofffügeteilen sehr wohl problematisch sein. Um dieser Hürde zu begegnen, sollte der Klebstoff daher eine möglichst hohe Verträglichkeit mit den Kunststoffen aufweisen. Dies betrifft in erster Linie die Mischbarkeit. Diese ist gewährleistet, wenn der Klebstoff dem Substratmaterial möglichst ähnlich ist.

Das Recycling verwendeter Klebstoffe ist so sinnvoll wie das Recycling von Druckerschwärze bei der Papierrückgewinnung, weshalb der Klebstoff das Fügeteilrecycling tunlichst wenig beeinträchtigen sollte.

Umgesetzt werden kann dies beispielsweise in Form von Schmelzklebstoffen mit der gleichen Basis wie der zu klebende Fügeilekunststoff. Die Klebrigkeit würde durch eine niedrigere Molmasse oder den Zusatz von Tackifiern erzielt werden. Dies ließe sich auch bei Verbundfolien, wie sie vielfältig in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden, umsetzen. Da oft Schichten aus unterschiedlichen Polymeren benötigt werden, wäre hier noch eine weitere Schicht sinnvoll, welche aus einem Klebstoff besteht, der unter speziellen Bedingungen wasserlöslich ist. In diesem Fall könnte die Folie nach dem Sammeln geschreddert werden, um dann die Schichten mit heißem Wasser voneinander zu lösen. Die Trennung der entstehenden Mischfraktion würde z. B. konventionell über die Dichte erfolgen.

5.3 Kreislaufwirtschaftsgerechtes Produktdesign

5.3.1 Demontagegerechtes Design

Während bisher die Produktlebenszyklusphase »Nutzung« für die Konstruktion eines Produkts ausschlaggebend war, ist künftig zusätzlich die Produktlebenszyklusphase »Entsorgung«, d. h. die Demontage des Klebverbundes und die Wiederverwertbarkeit der eingesetzten Werkstoffe bereits in die Produktlebenszyklusphase »Entwicklung« zu integrieren. Hierfür müssen zukünftig in Konstruktionsrichtlinien für verschiedene Werkstoffkombinationen sowie Bauteile unterschiedlicher Größen die Anforderungen »demontagegerecht« unter Berücksichtigung von »Repair« und »Re-Use« integriert sein. Dies gilt von der Mikroelektronik bis hin zu Großbauteilen im Bauwesen. Die Realisierung dieser Anforderungsintegration erfordert vor dem Hintergrund der Produktsicherheit in Verbindung mit der Kreislaufwirtschaftswirksamkeit ein vertieftes Verständnis der vorliegenden Lastfälle und den klebgerichten Umgang damit.

Zusätzlich zur Produktlebenszyklusphase »Nutzung« ist zukünftig die Produktlebenszyklusphase »Entsorgung« in der Produktlebenszyklusphase »Entwicklung« zu berücksichtigen.

Je nachdem, welches Konzept zur Demontage verfolgt werden soll, muss beispielsweise die Zugänglichkeit der Klebung für Spaltungsreagenzien oder Strahlung während der Demontage ermöglicht sein, so dass diese Konzepte greifen können (siehe Kapitel 5.5). Hierfür können etwa konstruktive Elemente vorgesehen werden, die die Einleitung der Demontage steuern. Denkbar sind Strukturen, die ähnlich wie Schmiernippel zum Einbringen von Schmiermittel in Baugruppen ein Spaltungsreagenz über die Klebfuge verteilt einbringen, jedoch während der Produktlebenszy-

klusphase »Nutzung« verschlossen sind. Ähnliche Ansätze könnten für strahlungsinduzierte Demontagekonzepte verfolgt und in das Produktdesign integriert werden.

Bei der Auslegung von Klebverbindungen wird für den Produktlebenszyklus »Nutzung« das Auftreten von Schälbeanspruchungen grundsätzlich vermieden, da der Klebstoff in der auf flächige Lastübertragung und Scherbeanspruchung ausgelegten Klebfuge diesen linear auftretenden mechanischen Belastungen nicht standhalten kann. Ein demontagerechtes Design kann jedoch so gestaltet werden, dass die im Gebrauch zu vermeidenden Schälkräfte in der Demontage gezielt eingebracht werden können. Ein Beispiel dafür sind sog. Sprengschrauben, die bewusst zum schälenden Trennen geklebter Füge­teile führen. Wichtig ist es, bei diesen Ansätzen zu berücksichtigen, dass der Lastfall, der zur Demontage der Füge­teile führt, während der Nutzungsphase nicht eintreten kann.

Im demontagerechten Produktdesign sind die Demontageauslöser integriert, sind aber während der Produktlebenszyklusphase »Nutzung« definitiv wirkungslos.

5.3.2 Produktdesigns

Die Klebtechnik kann als »Enabler« des Leichtbaus angesehen werden:

- Einerseits trägt sie durch klebtechnische Realisierung gezielter Strukturen, z. B. Versteifungselemente wie Rippen, zum konstruktiven Leichtbau bei.
- Andererseits, durch die Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe, die entsprechend der konkreten Anforderungen im Bauteil eingesetzt werden, kann die klebtechnische Verbindung in der Multimaterialbauweise werkstofflichen Leichtbau realisierbar machen.

Konsequenter Leichtbau ermöglicht Materialeinsparungen und eine erhöhte Ressourceneffizienz in allen Phasen des Produktlebenszyklus (siehe Kapitel 2.5).

Klebtechnik kann als »Enabler« des Leichtbaus betrachtet werden.

Das Design eines Produkts aus mehreren, wieder voneinander trennbaren Bauteilen in der sog. Differentialbauweise weist zusätzlich zum Leichtbaupotenzial weitere Vorteile auf:

Reparaturfähigkeit

Sollte während der Produktnutzungsphase ein Element des Produkts beschädigt werden, kann dieses ausgetauscht werden, ohne das gesamte Produkt austauschen zu müssen.

Anpassungen im Design

Auch kleinere Anpassungen im Design, wie zum Beispiel die Individualisierung von Produkten je nach Kundenwunsch können in der bestehenden Prozesskette vorgenommen werden, ohne eine komplett neue Produktlinie mit entsprechender Infrastruktur aufbauen zu müssen. Kombiniert mit einem zunehmenden Grad an Digitalisierung wird die Klebtechnik moderne, zukunftsfähige Prozessketten und Produkte ermöglichen.

5.3.3 Auslegung und Klebstoffapplikation

Im Produktentwicklungsprozess muss die eingesetzte Menge an Ressourcen stets kritisch hinterfragt werden. Dies betrifft die Frage, welche Menge von welchem Werkstoff tatsächlich benötigt wird, damit das Produkt seine Funktion sicher erfüllt. Hierfür ist die »Definition realistischer Anforderungsprofile« entscheidend. Zur Verhinderung von Überdimensionierung von Klebungen müssen die Anforderungsprofile, auf deren Basis die Auslegung einer Klebung erfolgt, realistisch, d. h. angepasst an die wirklich auftretenden Lastfälle, definiert werden. Sind die Lastfälle bekannt, können beispielsweise verbesserte Simulationswerkzeuge dazu beitragen, den experimentellen Aufwand zu verringern. Zuverlässige Materialmodelle sind aktuell vielfach noch Stand der Forschung, können aber zukünftig dazu beitragen, die Test- und Prüfanforderungen an eine Klebverbindung deutlich zu reduzieren. Sind diese Anforderungen überzogen und realitätsfern, führt das zu einem »Over-Engineering«.

Ein klebtechnisches »Over-Engineering« wird durch die Definition realistischer Anforderungsprofile vermieden.

Der Einsatz der Klebtechnik kann zur Steigerung der Langlebigkeit von Produkten, also der Verlängerung der Produktlebenszyklusphase »Nutzung«, beitragen. Dies kann auch durch die »Entwicklung geklebter Produkte mit optimierter Alterungsbeständigkeit« erfolgen. Hierfür können u. a. optimierte Oberflächenbehandlungsverfahren zum Einsatz kommen, die die Adhäsion zwischen den Fügeiteiloberflächen und dem Klebstoff gezielt einstellen bzw. verbessern.^{376, 377, 378, 379, 380, 381, 382} Die Kenntnis über die optimierten Eigenschaften kann dann wiederum in der Auslegung berücksichtigt werden.

Die Optimierung der Alterungsbeständigkeit von Klebungen verlängert die Produktlebenszyklusphase »Nutzung«.

-
- 376 H. Gleich, A. Hartwig, H. Lohse, adhäsion KLEBEN + DICHTEN 2016, 9, 34–38, Warum das Vorbehandeln so wichtig ist.
 - 377 R. Wilken, H. Gleich, adhäsion KLEBEN + DICHTEN 2016, 11, 26–31, Kunststoffe richtig vorbehandeln – Teil 1.
 - 378 R. Wilken, H. Gleich, adhäsion KLEBEN + DICHTEN 2016, 12, 28–33, Kunststoffe richtig vorbehandeln – Teil 2.
 - 379 M. Noeske, D. Jost, S. Strudthoff, U. Lommatzsch, International Journal of Adhesion and Adhesives 2004, 24, 171–177, Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: surface modifications and the relevance for adhesion; <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2003.09.006>.
 - 380 S. Ebnesajjad, C. Ebnesajjad, Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding, Elsevier, 2014, <https://doi.org/10.1016/C2013-0-12914-5> (Zugriff April 30, 2020)
 - 381 J. Comyn, International Journal of Adhesion and Adhesives 1990, 10/3, 161–165, Surface treatment and analysis for adhesive bonding; [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(90\)90099-J](https://doi.org/10.1016/0143-7496(90)90099-J).
 - 382 U. Lommatzsch, K. Thiel, M. Noeske, J. Ihde, R. Wilken; Abstracts of Papers of The American Chemical Society 258 (2019) / Meeting Abstract 245, ACS Fall National Meeting and Exposition (August 25–29, 2019), San Diego, USA, Solutions for lightweight construction and CO₂ footprint reduction by analysis of surfaces exposed to laser and plasma treatment

Nach genauer Kenntnis der Lastfälle sowie der Oberflächeneigenschaften der zu fügenden Teile ist der nächste logische Schritt eine »Applikationstechnik«, welche an den verwendeten Klebstoff und die spezifischen Anforderungen des Produkts wie Prozesszeiten, Geometrie, etc. angepasst ist. Kombiniert mit optimierter konstruktiver Auslegung durch präzisierte Design- und Fertigungsvorgaben können Überdimensionierungen der jeweiligen Klebfläche bzw. Klebfuge vermieden werden. Wird mit optimierten Applikationstechniken lediglich an konstruktionstechnisch definierten Stellen exakt die notwendige Menge an Klebstoff aufgetragen, kann die eingesetzte Klebstoffmenge reduziert und optimal genutzt werden. Dies resultiert in Material- und Gewichtseinsparung und erhöht die Ressourceneffizienz.

Die auf Klebstoff und Produkthanforderungen abgestimmte Applikationstechnik vermeidet Überdimensionierungen von Klebflächen und Klebfugen.

5.3.4 Gradierte Klebfugen

Bei der Applikation von Flüssigklebstoffen befindet sich auf beiden Substraten der gleiche Klebstoff. Die Kohäsion ist damit über die Klebfuge gleich, die Adhäsion zu den beiden unterschiedlichen Substraten aber verschieden. Beim Trennen der Verbindung ist es bisher nicht planbar, wo der Bruch erfolgt. Bei doppelseitigen Klebebändern beispielsweise wird teilweise an beiden Seiten ein unterschiedlich stark haftender Klebstoff eingesetzt, so dass der Bruch bei der Demontage der Klebverbindung systematisch adhäsiv an einer Seite erfolgt. Im Idealfall bleibt der Klebstoff hier vollständig auf dem Substrat, dessen Recycling er am wenigsten stört.

Bei gradierten Klebfugen erfolgt der Bruch der Klebung systematisch adhäsiv an einer Seite.

Prinzipiell ließe sich das auch mit flüssigen Klebstoffen realisieren. Dies ist aber bei weitem nicht Stand der Technik. Hier könnten z. B. Klebstoffschichten mit unterschiedlichen Eigenschaften überein-

ander oder unterschiedliche Klebstoffe, die miteinander verträglich sind, auf den beiden Füge­teilen appliziert werden. Aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften könnte dann die Sollbruchstelle bei der Reparatur und dem Recycling an eine bestimmte Stelle der Klebfuge gelegt werden. Dies wäre auch in Anpassung an die Eigenschaften der Substrate möglich. Ein ähnliches Konzept wurde vor geraumer Zeit vom Fraunhofer IFAM zum Kleben höchstfester Stähle erprobt, jedoch mit dem Ziel einer möglichst hohen Festigkeit der Verbindung durch gezieltes Platzieren festerer und elastischerer Schichten in den Klebfugen.³⁸³

5.3.5 Einsparen von Sekundärverpackungen durch Kleben

Im Handel liegen Einzelverpackungen meist als Bündel vor (z. B. sechs Getränkeflaschen). Diese Sekundärverpackungen nehmen einen wesentlichen Anteil der Gesamtverpackung ein. Dabei kann es sich beispielsweise um Kartons oder Ummantelungen mit Kunststofffolien handeln. Grundsätzlich ist es möglich, die Einzelverpackungen stattdessen mit leicht lösbaren Klebpunkten zu verbinden, um so Sekundärverpackungen einzusparen.

Hierfür bieten sich zunächst Schmelzklebstoffe an, im Besonderen sollten Hafts­melzklebstoffe geeignet sein. Dies ist mit heute verfügbaren Klebstoffen bereits grundsätzlich möglich. Die Umsetzung mit höchstmöglichem ökonomischen und ökologischen Impact bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit erfordert aber noch diverse Verbesserungen.

383 A. Hartwig, K. Albinsky, S. Gramsch-Kempkes, P. L. Geiß, Bericht IGF-Projekt 319ZN, 2012, Entwicklung einer Systematik zur Anpassung von Klebstoffen und Klebverbindungen an die Anforderungen beim Kleben hochfester Stähle

5.4 Lösbare Klebverbindungen

5.4.1 Vorbemerkung

Wie in Kapitel 3.2 gezeigt wurde gibt es zahlreiche Ansätze, lösbare Klebverbindungen zu realisieren; ganz abgesehen davon, dass grundsätzlich jede Klebverbindung lösbar ist. Wie dort beschrieben, gibt es fast immer signifikante Hürden für den praktischen Einsatz. Diesen Hürden liegen oftmals auch ökologische Gründe wie z. B. der notwendige Einsatz toxischer Substanzen zugrunde. Vor allem aber sind es ökonomische Gründe wie etwa sehr teure Komponenten, geringe Produktivität, sehr langsame Trennung oder Trennung unter Bedingungen, bei denen die Klebverbindung ohnehin degradiert. Für die Nutzung geklebter Produkte gibt es zudem sicherheitsrelevante Gründe, wenn beispielsweise Trigger zum Lösen der Verbindung auch bei Gebrauch des Produkts vorkommen können.

Im Folgenden sollen daher kurz einige Ansätze skizziert werden die Hürden zu überwinden, sofern dies nicht in Kapitel 3.2 schon beschrieben wurde. Hinzu kommen wenige, noch nicht so weit untersuchte Ansätze.

5.4.2 Lösen von Klebverbindungen mit der Hauptfunktion der Lastübertragung

Die meisten Arbeiten in der Literatur beziehen sich auf Klebverbindungen (siehe Kapitel 3.2), die oft sicherheitsrelevant sind. Über die bisher bekannten Maßnahmen hinaus wäre ein Lösen mit der sogenannten E-FAST Methode denkbar. Diese wurde eigentlich für die schnelle Härtung von Klebverbindungen entwickelt.³⁸⁴ Die Klebverbindungen lassen sich also schnell härten, was den Einsatz

384 https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/de/documents/Klebtechnik_Oberflaechen/Klebstoffe_Polymerchemie/e-fast-verfahren_zur_schnellh%C3%A4rtung_fraunhofer_ifam.pdf (Zugriff April 30, 2020)

wirtschaftlich interessant macht. Später dann lassen sie sich auch wieder gezielt lösen.

Die E-FAST-Methode wäre ein zum Lösen von Klebverbindungen mit der Hauptfunktion der Lastübertragung denkbares Verfahren.

Bei dieser Methode wird ein beidseitig mit Klebstoff beschichteter Metallstreifen mit hohem elektrischem Widerstand zum Kleben verwendet. Der Metallstreifen wird elektrisch kontaktiert und erwärmt sich durch den fließenden Strom. Der Widerstand ist dabei temperaturabhängig, so dass mit dieser Messgröße die Temperatur in der Klebfuge gesteuert werden kann. Für die Klebstoffhärtung wird eine niedrigere Temperatur eingestellt, für das spätere Lösen der Verbindung dann eine entsprechend höhere. Solange der Metallstreifen im Gebrauch der Verbindung nicht elektrisch kontaktiert wird, ist ein frühzeitiges Lösen der Verbindung ausgeschlossen, d. h. der Trigger zum Lösen kommt im realen Gebrauch nicht vor.

Gleiches gilt für das elektrochemische Trennen von Klebverbindungen, welches für Klebverbindungen mit metallischen Bauteilen geeignet ist. Hier werden, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, gleichzeitig ein elektrischer Strom und eine moderate Temperatur angelegt, wobei es innerhalb sehr kurzer Zeit zu einem adhäsiven Versagen der Verbindung kommt. Das Verfahren kann breit auf viele Klebstoffarten übertragen werden und sollte sich entsprechend vielfältig einsetzen lassen.

Bei metallischen Fügeteilen eignet sich das elektrochemische Trennen bei Klebverbindungen mit lastübertragender Hauptfunktion.

Unter den vielen Ansätzen für lösliche Klebstoffe scheint ein erst kürzlich vorgestelltes und auch in Kapitel 4.2 bereits kurz erwähntes System hohes Potenzial zu haben.³⁴⁴ Das vernetzte Polymer ist langzeitstabil und lässt sich mit überhitztem Wasser-

dampf wieder lösen. Dies geschieht in der Weise, dass die entstandenen Produkte nach Trocknung wieder einsetzbar sind. Zum einen ist der notwendige Trigger zum Lösen im normalen Einsatz auszuschließen, zum anderen liegt hier echte Reversibilität vor.

Das Trennen lastübertragender Klebungen mit überhitztem Wasserdampf scheint ebenfalls ein hohes Potenzial zu haben.

5.4.3 Lösen von Klebverbindungen ohne die Hauptfunktion der Lastübertragung

Klebverbindungen dieser Art kommen beispielweise häufig bei Verpackungen und anderen Massenprodukten zum Einsatz. Hier ist es nicht möglich, einzelne Verbindungen manuell oder halbautomatisiert zu lösen. Deshalb kommen die meisten beschriebenen Verfahren nicht infrage. Vielmehr ist an Möglichkeiten zu denken, bei denen sich etwa die Einzelschichten von Verpackungen in großen Rührreaktoren voneinander lösen und dann getrennt werden können. Dies wird beispielsweise bei Weichverpackungen (z. B. Tetra Pak®) eingesetzt, um den Karton von den übrigen Bestandteilen zu trennen (siehe Kapitel 3.4).

Bei Klebungen ohne Lastübertragung – z. B. die o. g. Weichverpackungen – sind Trennungsmöglichkeiten in großen Rührreaktoren denkbar.

Speziell Schichten aus verschiedenen Kunststoffen oder zwischen Kunststoffen und Aluminium lassen sich auf diese Weise bisher nicht trennen. Wenn jedoch Klebstoffe eingesetzt würden, welche wasserlöslich oder mindestens wasserquellbar wären, so wäre dies nach dem Schreddern und bei mechanischer Agitation in wässrigen Bädern möglich. Bedenken mögen bestehen, dass Packstoffe vor allem für Lebensmittel wasserbeständig sein müssen. Trotzdem werden aber bereits heute Schichten aus grundsätzlich wasserlöslichem Polyvinylalkohol als Barrierschichten eingesetzt. Es besteht jedoch hoher Forschungsbedarf für solche Konzepte, da potenziell geeignete Basisklebstoffe nicht in der Lage sind, die typischen Verbundmaterialien, vor allem Polyolefine, Polyamide und Alumi-

nium, miteinander zu kleben oder gar als Coextrudat verarbeitet zu werden.

Um den Abbau der Klebstoffschicht in feuchtem Zustand zu beschleunigen, wäre es auch denkbar, den Klebstoffen Enzyme oder andere Aktivsubstanzen beizusetzen, welche erst aktiv werden, wenn die Klebschicht genügend Wasser aufgenommen hat. Dies kann dann nur bei kleinen Schnipseln im Recyclingprozess erfolgen. Gegebenenfalls könnten diese Aktivsubstanzen auch verkapselt werden, vorzugsweise anhand natürlicher Umhüllungsmaterialien. Hierzu wurden am Fraunhofer IFAM Verkapselungen in Pollen und Hefezellen entwickelt.

Ein geklebtes Produkt, welches in großen Mengen als bisher nicht recycelbarer Abfall anfällt, sind Windeln. Aufgrund des hohen Feuchtegehalts ist auch deren Verbrennung ungünstig. In einem Recyclingprozess müssten zunächst die Fäkalien abgewaschen und einer Kläranlage zugeführt werden. Die Klebfugen selber sind relativ leicht zugänglich, so dass sie durch den Angriff mit geeigneten Agenzien von außen lösbar wären. Wenn für das Fügen Klebstoffe eingesetzt würden, welche mit heißem Wasser quellen und dann relativ schnell abgebaut würden, ließen sich die verwendeten Folien, Fliese und der Superabsorber voneinander trennen und separat recyceln. Im Idealfall wäre alle Folien und Fliese, sowie Tapes zum Verschließen aus dem gleichen Basismaterial, so dass sie gemeinsam wiederverwertet werden könnten. Als Klebstoffe kämen beispielsweise modifizierte (thermoplastische) Stärke oder Proteine in Frage. Wie bereits oben beschrieben ließe sich der Abbau und das Lösen möglicherweise durch den Einsatz von Enzymen oder anderen, ggf. mikroverkapselten Agenzien beschleunigen. Um ein solches System zu entwickeln, wäre noch ein relativ hoher Forschungsbedarf nötig und zusätzlich wären die Logistik des Sammelns bzw. Trennens aus dem Restmüll, sowie der Bau entsprechender Anlagen notwendig.

5.5 Demontageprozesse

In aktuellen Entwicklungsprozessen geklebter Produkte stehen die Reparatur und die Demontage von Produkten nicht im ökonomischen Fokus. Die Maßgaben der Kreislaufwirtschaft werden diesen Fokus jedoch verschieben. Es ist anzunehmen, dass Demontageprozesse von Produkten zur Rohstoffrückgewinnung oder Reparatur wesentliche Punkte im Entwicklungsprozess und in der Produkterprobung sein werden. In den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels wurde dazu bereits verdeutlicht, welche stofflichen und konstruktiven Modifikationen die Demontage einer Klebung begünstigen. Besonders relevant sind dabei Demontage-Enabler wie Trigger, konstruktive Maßnahmen und Demontagehilfsmittel, die ein Lösen der Klebung begünstigen. Auch beim Einsatz dieser Demontage-Enabler bleibt die Aufgabenstellung den Demontageprozess wirtschaftlich und großtechnisch umzusetzen sowie seine Funktionalität am Gesamtbauteil und bei großen Stückzahlen zu prüfen. Dazu sind die Demontageprozesse zu konzipieren, anwendungsnah technisch zu prüfen und anlagentechnisch umzusetzen. Für jedes konkrete Produkt und für jede Vorbereitung durch Demontage-Enabler muss ein individuell passender Demontageprozess entwickelt werden.

Für Demontageprozesse sind Demontage-Enabler ausschlaggebend.

Der folgende Abschnitt zählt unterschiedliche Demontageprozessvarianten auf und ergänzt diese durch einen Verweis auf spezifisch vorteilhafte Demontage-Enabler:

Das »Zerstückeln« von Produkten kann in vielen Fällen eine passende Methode zur Rückgewinnung von Werkstoffen sein. Ein Variantenreichtum an verschiedenen Bauteilgeometrien, kleine Bauteilmaße und hohe Stückzahlen reduzieren die Möglichkeit zur gezielten Demontage und begünstigen den Einsatz der

unspezifischen Zerteilung. Durch das Zerstückeln werden Füge­teile und Klebverbindung in kleine Bruchstücke zerlegt, so dass eine Sortierung nach Materialsorte möglich ist. Zur Zerstückelung von großen Bauteilmengen ist der Einsatz von entsprechenden Schreddern möglich. Es ist zu prüfen, ob das Schreddern beim Zerteilen der Fügezone die Klebverbindungen aufbricht oder ob auch nach dem Schredder Bruchstücke aus geklebten Mischverbindungen verbleiben. Der Schredderprozess ist ggf. so zu optimieren, dass die Menge an geklebten Bruchstücke reduziert wird. Zu berücksichtigen ist, dass die Fügeflächen und damit auch der Masseanteil an gefügten Bruchstücken im Vergleich zur Gesamtmasse im Allgemeinen sehr gering sind. Sollen die Bruchstücke intakter Teilflächen ebenfalls getrennt werden, dann bieten sich aufgrund der guten Zugänglichkeit der Klebflächen dieser Bruchstücke ein Angriff durch mediale Einflüsse oder eine Nutzung medialer Demontage-Enabler an.

Bei einer Vielzahl verschiedener Bauteilgeometrien, kleinen Bauteilmaßen und hohen Stückzahlen kann das Zerstückeln von Produkten vielfach eine geeignete Methode zur Werkstoffrückgewinnung sein.

Große Bauteilmaße mit einem hohen Eigengewicht der material­sortenreinen Komponenten begünstigen die Anwendung des »mechanischen Lösens« von Klebverbindungen. Gerade bei metallischen Bauteilen ist die polymere Klebung eine Schwach­stelle der Verbindung gegenüber absichtlich eingebrachter Fehl­lasten. Das Aufhebeln der Fügezone durch das Einbringen von schälenden oder dynamischen Lasten kann hier genutzt werden. Auch das Einbringen von dynamischen Drucklasten direkt auf die Klebung, beispielsweise über Meißelhammer, kann zum Anlösen von steifen und eher spröden Klebverbindungen genutzt werden. Bei weichen, elastischen Klebverbindungen ist ein Einschneiden beispielsweise durch ein Vibrationsmesser oder eine heiße Klinge effektiver. Eine weitere mechanische Demontage der Klebung ist durch die Ausnutzung der Schällastanfälligkeit der Klebung möglich. Die im Fahrzeugbau oder in der »Weißen Ware« häufig vorzufindenden Hybridfügeverbindungen als Kombination des Klebens mit dem Schweißen, dem Clinchen, dem Falzen oder

Nieten sind für derartige Demontagemethode weniger geeignet, da die Fügepunkte der hybriden Verbindung als Rissstopper eine schälende Demontage verhindern. Reine Klebverbindungen sind daher in diesen Konstruktionen als vorteilhaft für die Demontage zu bewerten.

Beim mechanischen Lösen von Klebverbindungen sind reine Klebungen, die ohne zusätzliche Füge-techniken eingesetzt sind, vorteilhaft.

Die arbeitsintensiven Prozesse der mechanischen Demontage können durch Demontage-Enabler, konstruktive Maßnahmen, Hilfsmittel oder Prozessautomatisierungen erleichtert werden. Zur Demontage von breiten Klebfugen mit elastischen Klebstoffen hat sich die Nutzung von heißen Drähten oder anderen Schneidwerkzeugen als vorteilhaft erwiesen. Das heiße Hilfsmittel verbrennt oder erweicht lokal den Klebstoff und lässt sich sukzessive umlaufend bei geringerem Kraftaufwand durch die Klebung führen. Konstruktiv sollte eine Zugänglichkeit der Klebung für derartige Demontage-Hilfsmittel sichergestellt werden. Ebenfalls ist zu überlegen, ob eine Trennvorrichtung nicht bereits im Produkt integriert werden kann. Ein beheizbarer Draht könnte beispielsweise in die elastische Klebung einer PKW-Frontscheibe als Einlegeteil zur Demontage integriert sein.

Demontage-Enabler, Konstruktionsmaßnahmen, Hilfsmittel oder Prozessautomatisierungen erleichtern die mechanische Demontage.

Zum mechanischen Lösen von Großserienprodukten ist der Einsatz von Automatisierungstechnik denkbar. Kraftaufwendige Prozesse können mechanisiert durch Automaten oder Roboter durchgeführt oder unterstützt werden. Die Kombination des mechanischen LöSENS nach einer Schwächung der Klebverbindung durch mediale, thermische Einflüsse oder die Ausnutzung von Triggern kann zur Minderung des Kraftaufwands hilfreich sein. Der Aufbau von produktspezifischen Demontagelinien ist jedoch bisher weitgehend

unerprobt. Prinzipiell sind solche automatisierten Linien jedoch parallel zu den Fertigungslinien der Produktherstellung zu denken. Automatisiert geführte Werkzeuge und Fixiervorrichtungen ermöglichen in Kombination mit thermischen Einflüssen oder Triggern die geplante stufenweise mechanische Demontage eines Produkts. Die Roboter-unterstützte Demontage eines Apple iPhones ist eindrucksvoll in einem Video³⁸⁵ beschrieben. Demontagelinien sind jedoch kostenintensiv und daher zunächst nur für Produkte mit hochwertigen Werkstoffen geeignet, die in großen Stückzahlen produziert wurden.

Beim Lösen geklebter Großserienprodukte ist der Einsatz von Automatisierungstechnik denkbar, jedoch ist der Aufbau produkt-spezifischer Demontagelinien noch unerprobt.

Das »Lösen durch Wärmeeintrag« ist sowohl in der Kombination mit dem mechanischen Lösen als auch eigenständig ein Mittel zur Demontage von Produkten. Dabei sollte der Wärmeeintrag bevorzugt unmittelbar in die Klebschicht erfolgen, um polymere Substrate nicht zu beschädigen und bei metallischen Substraten den Energieaufwand zu reduzieren. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, um einen Klebstoff bei hohen Temperaturen zu verbrennen oder ihn bei niedrigeren Temperaturen zumindest zu erweichen. Das Erweichen oder Verbrennen kann ein effektives mechanisches Lösen vorbereiten. Der lokale Wärmeeintrag kann durch Methoden erfolgen, die nach dem Stand der Technik bereits zur Schnellhärtung von Klebstoffen verwendet werden. Hierzu gehören unter anderem die Induktion und die Mikrowellenstrahlung. Vorteilhaft ist, dass der Wärmeeintrag im Gegensatz zum Schnellhärten nicht exakt geregelt werden muss, um den Klebstoff zu schonen. Der Eintrag von Wärme kann mit Triggern im Klebstoff kombiniert werden. Dazu bieten sich verschiedene Füllstoffe an, die auf den Eintrag von elektrischem Strom, Magnetfeldern oder elektromagnetischer Strahlung mit einer Aufheizung reagieren. Ebenso kann die Aufheizung der Klebschicht als Trigger für chemische Komponenten agieren, die ihrerseits eine Schwächung der Klebschicht

385 <https://www.youtube.com/watch?v=29leuyC3rgY> (Zugriff April 30, 2020)

bewirken. Dazu könnten beispielsweise Treibmittel eingesetzt werden, die ein Aufschäumen von Klebstoffen bei Überschreiten einer bestimmten Temperatur bewirken und so die Klebung massiv schwächen. Besonders geeignet für das Lösen von Klebverbindungen durch Wärmeeintrag sind die sogenannten physikalischen Hotmelts, die sich reversibel bei Wärmeeintrag von der festen in die flüssige Phase umwandeln und hierdurch die Kohäsion des Klebstoffs aufheben.

Das Lösen durch Wärmeeintrag ist ein eigenständiges Demontagemittel, kann aber auch mit dem mechanischen Lösen kombiniert werden.

Als letztes Beispiel für Demontageprozesse ist das »Lösen durch medialen Einfluss« zu nennen. Klebverbindungen können mit Medien besprüht, bedampft oder in Medien eingetaucht werden, die eine Schwächung oder das Auflösen des Klebstoffs beziehungsweise eine Schwächung der Adhäsion bewirken. Das Lösen durch medialen Einfluss ist besonders für wässrige Klebstoffdispersionen geeignet und wird in diesem Bereich sowohl im Handwerk, beispielsweise zum Lösen von Tapeten, als auch bei Serienprodukten, beispielsweise beim Ablösen von Etiketten von Pfandflaschen, erfolgreich angewendet. Der mediale Einfluss muss jedoch nicht auf Wasser beschränkt sein. Spezielle chemische Bäder können auch das Lösen von selektiv empfindlichen eingestellten Klebstoffen bewirken, ohne die Fügeiteile zu schädigen. Insbesondere können verschiedene Säuren, Laugen oder Oxidationsmittel stark schädigend auf die polymeren Klebstoffe wirken. Sie können, bei passender Wahl, vorteilhaft als Medien zum An- oder Auflösen spezifischer Klebstoffe genutzt werden. Der mediale Einfluss kann gut mit dem mechanischen Lösen kombiniert werden. Die Klebung wird durch das Wirkmedium geschwächt und kann daher bereits durch geringe Kräfte zerstört werden.

Die gezielte mediale Beeinflussung einer Klebung kann ebenfalls mit dem mechanischen Lösen kombiniert werden.

Insgesamt ergibt sich eine breite Palette an praktikablen Möglichkeiten für Demontageprozesse von Klebverbindungen, die auf unterschiedliche Produktklassen anzusetzen ist. Die wirtschaftliche Anwendbarkeit dieser Palette erweitert sich stark, wenn bereits bei der Produktentwicklung Trigger oder konstruktive Möglichkeiten zur Demontage berücksichtigt werden. Das Kleben verhindert dabei nicht die Demontage von Produkten, sondern bietet einen Ansatzpunkt zum Lösen der Fügeverbindungen. Für eine wirtschaftliche Demontage muss jedoch die Demontagefähigkeit bereits in einer frühen Phase der Produktentwicklung in das Lastenheft der Planung aufgenommen werden.

**Das Kleben bietet einen Ansatzpunkt
zum Lösen des Materialverbundes.**

5.6

Digitalisierung in der kreislaufwirtschaftswirksamen Klebtechnik

5.6.1 Vorbemerkung: Klebtechnik – Digitalisierung und Kreislaufwirtschaft

Neben den in den vorausgegangenen Absätzen dargestellten Ansätzen zur Nutzung der Klebtechnik in der Kreislaufwirtschaft wird zunehmend diskutiert, in welchem Verhältnis ein anderer Megatrend, die Digitalisierung, zu den gesellschaftlichen Zielen der Kreislaufwirtschaft steht. Das Beispiel der Kreislaufwirtschaft zeigt, dass mithilfe der Digitalisierung bestehende Informationsdefizite überwunden werden können und dadurch eine zuverlässigere Basis für Entscheidungen zur Verfügung steht. Somit können neue Märkte mit konkreten Anwendungsfällen auch für die Klebtechnik entstehen.

Digitalisierung hilft, bestehende Informationsdefizite auch für die Klebtechnik zu überwinden.

Die Vernetzung der Industrie, auch als Industrie 4.0 bekannt, schafft cyber-physische Systeme, die Produkt- und Prozessinformationen digitalisieren und diese entlang von Produktionsprozessen weitertragen. Digitale Zwillinge – das digitale Abbild der Produkte – können unter anderem Umweltinformationen weitertragen, beispielsweise die stoffliche Zusammensetzung der Produkte. Darüber hinaus sind im Kontext der Klebtechnik Informationen für ein späteres Lösen von Klebverbindungen in den digitalen Zwillingen zusammenzuführen. Somit wird zu einer Verringerung des bestehenden Informationsdefizits rund um die Kreislaufwirtschaft beigetragen.

Sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene werden umfangreiche Anstrengungen unternommen, material- und produktionsrelevante Daten zu selektieren, zu strukturieren und

diese in virtuellen Marktplätzen den Nutzern zur Verfügung zu stellen (siehe dazu die Ausführungen in Kapitel 3). Unabhängig davon können die Informationen auch selektiv, d. h. hersteller- bzw. produktbezogen zugänglich sein, insbesondere im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft. Beispielsweise können dies gezielte Angaben der Produkthersteller sein, die das Recycling und die Demontage der Produkte betreffen. In diesem Kontext werden sich neue Geschäftsmodelle etablieren, die auch für die Hersteller und Anwender von Klebstoffen von hoher Relevanz sind. In den nachfolgenden Abschnitten werden die wesentlichen Aspekte weiter ausgeführt.

5.6.2 Simulation zur Reduzierung des experimentellen Aufwands

Um einen Prozess in die Fertigung zu integrieren, ist ein großer experimenteller Aufwand zur Verifizierung notwendig. Mithilfe digitaler Werkstoff-Modelle kann der experimentelle Aufwand reduziert werden. Dies kann bis hin zu Lebensdauervorhersagen führen, die eine adäquate Auslegung des Bauteils ermöglichen. Auch können validierte Modelle kürzere Produktentwicklungszyklen mit geringerem experimentellem Aufwand und damit auch die schnellere Aufnahme von neuen Werkstoffen und Bauweisen, die den Anforderungen der Kreislaufwirtschaft entsprechen, ermöglichen.

Digitale Werkstoff-Modelle können den experimentellen Aufwand reduzieren.

5.6.3 Langzeitüberwachung von Klebungen mittels Structural Health Monitoring – SHM

Viele lasttragende Klebverbindungen beispielsweise in Automobil-, Windkraft- und Luftfahrtindustrie unterliegen langfristigen zyklischen Belastungen, die zu lokaler Materialermüdung und somit einem frühzeitigen Versagen der Strukturen führen

können.³⁸⁶ Eine vollständige Überprüfung (siehe Kapitel 1.9.2) des Zustands einer Klebverbindung ist mit gängigen Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung (non-destructive testing – NDT) nicht möglich.³⁸⁷ Daher ist die Erforschung und Entwicklung von Systemen zur Strukturüberwachung für Klebverbindungen mit der Hauptfunktion der Übertragung mechanischer Lasten ein wichtiges Forschungsthema. Dies gilt insbesondere für Klebungen mit Sicherheitsanforderungen gemäß den Klebnormen zur Qualitätssicherung.^{39,71–77} Diese Strukturüberwachungssysteme werden als SHM-Systeme bezeichnet. SHM steht für »Structural Health Monitoring« und wird von der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) als eine »kontinuierliche oder periodische und automatisierte Methode« für die Überwachung von Strukturen beschrieben.³⁸⁸ Dafür werden Sensoren permanent in die zu überwachende Struktur integriert.³⁸⁹ Die Integration eines SHM-Systems in eine Struktur bedeutet eine Reduktion von Wartungskosten, einen ressourcenschonenderen Austausch von Verschleißteilen und einen deutlichen Sicherheitszugewinn.³⁸⁵ Vor diesem Hintergrund trägt das Structural Health Monitoring – SHM zur Kreislaufwirtschaftswirksamkeit geklebter Strukturen bei.

Die Entwicklung von SHM-Systemen ist ein wichtiges Forschungsthema und trägt zur Kreislaufwirtschaftswirksamkeit geklebter Strukturen bei.

- 386 T. Augustin; J. Karsten; B. Kötter; B. Fiedler In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 105, DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.11.015; 2018; 150–155, Health monitoring of scarfed CFRP joints under cyclic loading via electrical resistance measurements using carbon nanotube modified adhesive films.
- 387 T. Löbel; D. Holzhüter; M. Sinapius; C. Hühne, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016, 68, 229–238. A hybrid bond-line concept for bonded composite joints; <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.03.025>.
- 388 <http://www.dgzfp.de/Fachaussch%C3%BCsse/Zustands%C3%BCberwachung> (Zugriff April 30, 2020)
- 389 A. Trilaksono; N. Watanabe; H. Hoshij; A. Kondo; Y. Iwahori; S.-I. Takeda, *OJCM* 03 (03) 2013, 63–87, Continuous Damage Monitoring of a Thin Composite Structural with Mismatched Stiffener in a Combined Joint Using Fiber Bragg Grating under Tension and Three-Point Loading; doi: 10.4236/ojcm.2013.33008.

5.6.4 Digital Twin

Die Digitalisierung ermöglicht es, dass relevante Produktdaten, die beispielsweise Informationen zur Demontage und zum Recycling enthalten, in einem virtuellen Spiegelbild des Produkts, dem sog. »Digital Twin« gespeichert werden können. Alle Klebstoffe bzw. geklebte Komponenten (siehe unten) sind mit einem »Digital Twin« zu versehen, der die Auswahl des bestmöglichen Demontageprozesses ermöglicht. Dafür bedarf es konkreter Angaben zu physikalischen Bedingungen wie z. B. Temperatur, Strahlung etc.

Geklebte Produkte werden beispielsweise mit einem RFID-Chip, der die genannten interoperablen Daten enthält, versehen. Dazu gehört die mechanische Belastung der Klebung, die zum Versagen führt. Zusätzlich sind über den RFID alle Daten der Werkstoffe und Klebstoffe abrufbar, die z. B. für die Demontage notwendig sein können. Zusätzlich ist es denkbar, dass beispielsweise eine Lebenszeitabschätzung oder potenziell kritische Ereignisse, die die Struktur »erlebt« hat, durch entsprechende SHM-Systeme aufgezeichnet und zusätzlich gespeichert werden. Die dafür notwendige Sensorik und Wege, wie diese Informationen gespeichert und ausgelesen werden können, sind aktuell Stand der Forschung (siehe Kapitel 5.6.4).

Für die Entwicklung geeigneter Modelle müssen die komplexen Zusammenhänge zwischen Adhäsion und Kohäsion im Bereich der Klebung, Fügeiteileigenschaften, Geometrie und Lastfälle (einschließlich überlagerter Lastfälle wie z. B. Temperatur, Feuchte und mechanische Belastung, Dauerbelastung) verstanden werden. Je tiefer das Verständnis hier ist, von der atomaren bis zu makroskopischen Ebene, desto besser ist die Vorhersagegenauigkeit der Modelle und desto effizienter können sie in der Produktentwicklung eingesetzt werden.

Die Verständnistiefe über die komplexen Zusammenhänge im Bereich einer Klebung bestimmt die Effizienz in der Produktentwicklung.

5.6.5 Verknüpfung der Entwicklung kreislaufwirtschaftsgerecht geklebter Produkte mit der Digitalisierung (Daten)

Wie in Kapitel 4 dargestellt und in Abbildung 79 veranschaulicht, wird einerseits die weltweite digitale Transformation der Produktforschung und -entwicklung, der Wirtschaft und der Gesellschaft durch die Verfügbarkeit sicherer, energieeffizienter, finanziell tragbarer und qualitativ hochwertiger Kapazitäten für die Erhebung, Verarbeitung und Bewertung von Daten aus unterschiedlichen Quellen (engl.: data-driven innovation) vorangetrieben. Andererseits unterliegt die Nutzung der verfügbaren digitalen Plattformen und ihrer Infrastruktur regional unterschiedlichen Regulierungen und Standardisierungen. Diese zusammenzuführen setzt Interoperabilität und die Einbeziehung aller Akteure und Interessenvertreter (engl.: stakeholder) voraus. Dieses stellt, vergleichbar zu der Einführung von Innovationen auf Basis Künstlicher Intelligenz (KI), insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) vor große Herausforderungen.³⁹⁰

Mit Blick auf den Lebenszyklus tragen erforderliche und erzeugte Daten zum europäischen Kreislauf-Datenraum (engl.: European Circular Dataspace) bei und sind aus diesem verfügbar (→ vgl. Abb. 79).

Für den Datenaustausch ist eine gemeinsame Sprache zu entwickeln.

Es steht zu erwarten, dass für den Datenaustausch die Verfügbarkeit und Verwendung einer gemeinsamen Sprache zum Zuge kommt. Diese gemeinsame Sprache baut technisch wie auch regulatorisch auf standardisierenden Ontologien auf (siehe Kapitel 3.2).

390 T. Daubenfeld, Nachrichten aus der Chemie 2020, 68 (2), 29, KI-Wüste Mittelstand?.

Bei der Umsetzung des europäischen Green Deal^{391,392}, welcher mit einer Mobilisierung und Förderung der (Material- oder Umwelt)Forschung einhergeht, trifft dies etwa beim Informationsaustausch zwischen und in kooperierenden Netzwerken aus Repräsentanten der Wirtschaft, der Zivilgesellschaft und lokalen, regionalen oder nationalen öffentlichen Behörden zu.

Ein Ziel entsprechender Bestrebungen ist es, Produkterwerbern verlässliche, vergleichbare und nachprüfbar Informationen beim Kauf eines Produkts, d. h. auch eines geklebten Produkts, zur Verfügung zu stellen. Diese Informationen ermöglichen einerseits nachhaltige Kaufentscheidungen, andererseits beugen sie einem »Grüntönen« (engl.: ›green washing‹) von Produkten durch Produkthanbieter vor. Dafür sollen standardisierte Methoden zur Absicherung von Ansprüchen, »grün« zu sein (engl.: ›green claims‹), etabliert werden. Dazu wird die Einführung eines elektronischen Produktpasses erwogen, in welchem explizit

- der Ursprung
- die Zusammensetzung sowie
- die Hinweise zu Reparatur, zu Demontage und zur Handhabung nach der Nutzungsphase (engl.: end of life handling)

ausgeführt sind.

**Ziel ist, für (geklebte) Produkte
Informationen verlässlich, vergleichbar
und nachprüfbar bereitzustellen.**

391 E. Maire; »Implementing the Circular Economy in the EU«; Vortrag präsentiert anlässlich der 10th ISCC Global Sustainability Conference; Brussels, Belgium; 12 February 2020; zugänglich unter <https://www.iscc-system.org/stakeholders/annual-issc-global-sustainability-conference/>.

392 European Commission, »The European Green Deal«; Brüssel, Belgien, 11.12.2019, zugänglich über https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf.

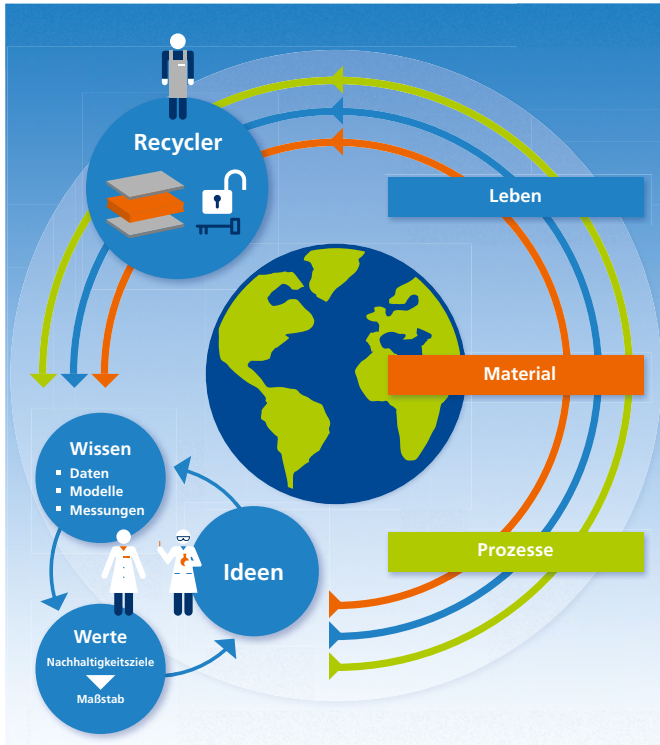


Abb. 79
Nachhaltige Materialentwicklung für ideenreiche klebtechnische Produkte mit lebenslang integrierter und digital jederzeit verfügbarer Demontageidee



Abb. 80
Die produktbezogene Übersetzung (engl.: translation) im Wechselspiel der Akteure des klebtechnischen Lebenszyklus

Im Zuge der digitalen Transformation wird, wie in Abbildung 80 skizziert, die Schulung von Übersetzern (engl.: translator) von hoher Bedeutung sein. Diese Übersetzer sind einerseits mit den Standards vertraut, andererseits agieren sie hinsichtlich des (geklebten) Produkts unparteilich. Ihre Aufgabe ist die eines Vermittlers beim Austausch von material-, regulierungs- und datenbasierten Informationen zwischen Akteuren nachhaltiger Entwicklungsprozesse. Eine offene Übersetzungsumgebung (engl.: Open Translation Environment) als digitales Werkzeug zur Unterstützung ihrer Arbeit wird beispielsweise im Horizon 2020 Verbundprojekt OntoTRANS erarbeitet³⁹³. Die Integration der Übersetzer/Vermittler in klebtechnische Entscheidungsfindungen und anwendungsbezogene Produktausgestaltungen erhält zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit, insbesondere von KMU, strategisch eine hohe Priorisierung. Die oben dargestellte »Vermittlungsfunktion« kann jedoch nur erfolgreich umgesetzt werden, wenn die Kompetenz der Übersetzer hinsichtlich ihrer Konformität zu den europäischen digitalen Marktplätzen und deren Ontologien direkt verknüpft ist mit technologiespezifischen Qualifikationen, was für diesen Zusammenhang die Erarbeitung klebtechnischer Qualifizierungen und deren Umsetzung erfordert.

Die Aufgabe von »Übersetzern« besteht im unparteilichen Vermitteln material-, regulierungs- und datenbasierter Informationen zwischen den Beteiligten nachhaltiger Entwicklungsprozesse.

Im Zuge der digitalen Transformation wird andererseits die Umsetzung von Ideen zur Entwicklung zukunftsweisender, nachhaltiger und klebtechnisch gefügter Produkte im Rahmen iterativer Prozesse von Folgendem abhängen:

- Material- und prozessbezogene Daten sowie Metadaten müssen FAIR (findable (auffindbar), accessible (zugänglich), interoperable (verträglich, zusammenpassend) and reusable (wiederverwendbar) sein.

³⁹³ Ontology driven Open Translation Environment – OntoTRANS; Grant agreement ID: 862136; 1 April 2020 – 31 March 2024; <https://cordis.europa.eu/project/id/862136> (Zugriff May 30, 2020).

- Sie müssen so weit wie möglich schon im Zeitraum der Designphase eine Berücksichtigung der zu erwartenden Anforderungen und Beanspruchungen während der Herstellungs-, Nutzungs- und End of Life-Phase ermöglichen.

Eine skalen- und prozessschrittübergreifende Modellierung und Simulation wird zukünftig erheblich weiter gefasste Raumbereiche und Zeitspannen spatiotemporal, also vierdimensional, umfassen. Der Aufbau und die Zusammenführung der dafür erforderlichen digitalen Werkzeuge und Infrastrukturen erfordern gemeinsame Anstrengungen, die domänenübergreifend in vorwettbewerblich oder wettbewerblich agierenden Netzwerken bewältigt werden. Aktuell liegt die interdisziplinäre Materialmodellierung in Deutschland, siehe beispielsweise große Forschungsaktivitäten an Universitäten und Forschungseinrichtungen, europaweit in der Spitzengruppe, und mittelfristig werden die Materialcharakterisierung sowie die Verfahrenstechnik folgen.

Bei den Forschungsaktivitäten interdisziplinärer Materialmodellierungen liegt im europäischen Kontext Deutschland in der Spitzengruppe.

5.6.6 Integration von vor- bzw. nachgeschalteten Fertigungsschritten in die Prozessketten-Modellierung und -Optimierung

Wie in Kapitel 4 dargestellt und in Abbildung 81 veranschaulicht, beinhaltet ein Klebprozess nicht nur eine Kette einzelner Prozessschritte. Er umfasst mehrere, in gezielter relativer zeitlicher Abfolge durchzuführende Prozessschritte genauso wie eine gezielte räumliche Anordnung und Struktur aufeinander aufbauender Materialien, die als Operanden im Prozess verändert werden. Bislang ist der Blick sowohl auf jeden einzelnen der erforderlichen Prozessschritte als auch auf die dafür notwendigen Materialien, Energieaufwendungen sowie auf die menschlichen oder maschinellen Operator-Handlungen, die die Operanden verändern, im Rahmen einer lokalen Optimierung möglich.

Der Einsatz digitaler Werkzeuge und die Verfügbarkeit von material- und prozessbezogenen Daten entlang der gesamten Prozesskette im Rahmen FAIRer Datenkonzepte erlaubt es den Entwicklern von Klebungen zukünftig, lebenszyklusübergreifend im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung auch Optima im Hinblick auf

- Materialeffizienz
- Kosteneffizienz und
- Energieeffizienz

bei gleichzeitiger Umweltschonung zu identifizieren. Unabhängig ist hier, dass alle der zu betrachtenden Kombinationen die sicherheitstechnischen und materialbezogenen technologischen Anforderungen erfüllen. Dieses setzt eine detaillierte Materialkenntnis voraus.

Digitale Werkzeuge sowie material- und prozessbezogene Daten erlauben zukünftig bei einer ganzheitlichen Betrachtung und langzeitbeständiger Adhäsion ein Identifizierungshöchstmaß hinsichtlich Material-, Kosten- und Energieeffizienz.

In der Klebtechnik gehört zu diesen Anforderungen die sichere Handhabung des Aufbaus einer langzeitbeständigen Adhäsion. Dazu ist im Bereich der Klebfuge eine fachgerechte Behandlung und Qualitätskontrolle der verschiedenen Fügeiteiloberflächen vorzusehen. Diese ist vielfach durch den Einsatz lokaler und trockener Prozessschritte z. B. mittels Laser oder Atmosphärendruckplasma erreichbar. Die dabei erreichte Adhäsionsqualität ist vergleichbar mit nasschemischen Prozessschritten, die in der Regel nicht lokalisiert einzusetzen sind und somit das gesamte Fügeiteil umfassen. Für diese Betrachtung sind im Sinne einer nachhaltigen Material- und Prozessentwicklung auch Kostenaspekte zu berücksichtigen. Der Einsatz z. B. prozessbegleitender Messmethoden zur Qualitätssicherung liefert zusätzliche Prozessinformationen und ermöglicht die signifikante Reduzierung des Ausschusses.

Für einen PEF-basierten Überblicksblick auf den Gesamtprozess »Kleben« mit Fokus auf die Umweltwirkungen (s. Kapitel 3.3) ist

zudem die standardisierte und in Gemeinschaftsgremien vorgesehene Ausarbeitung von Produktkategorie-Regeln (PEFCR) durchzuführen. Diese steht insbesondere für Materialoberflächen und deren Einbindung in eine allgemeine PEF-Systematik noch offen. Unter Einbeziehung von Fügeiteilvorbehandlungsschritten werden in aktuellen Projekten des Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik – GAK Lebenszyklusbetrachtungen von Klebungen lediglich im Hinblick auf Treibhausgasemissionen (Product Carbon Footprint – PCF) betrachtet.

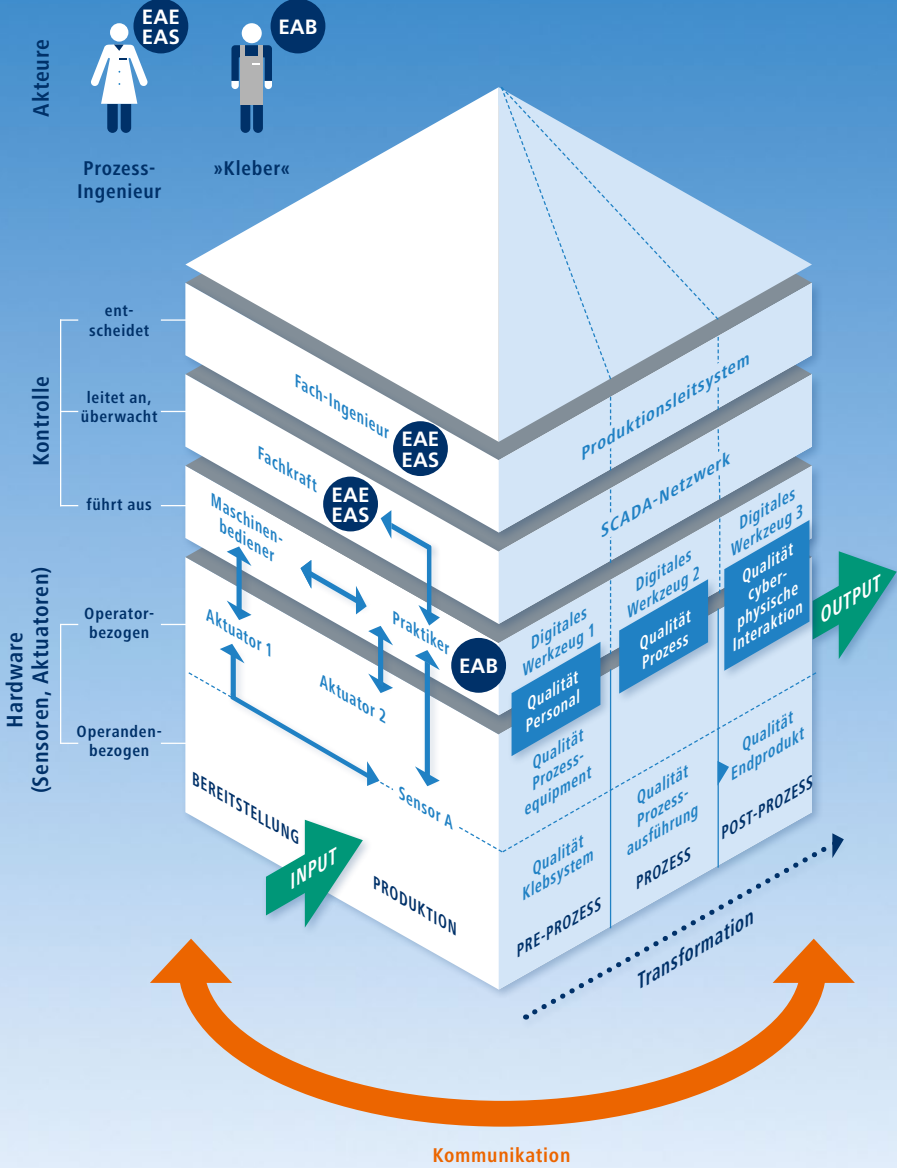
Produktkategorie-Regeln für den Umweltfußabdruck (PEFCR) sind noch auszuarbeiten.

Die Ontologie-basierte Erarbeitung und Einarbeitung von Kostenaspekten, Umweltaspekten und Materialdatenaspekten in klebtechnische Prozessschritte, die zum Adhäsionsaufbau beitragen, wird für trockene und nasschemische Reinigungs- und Vorbehandlungsverfahren am Fraunhofer IFAM in Zusammenarbeit mit externen Kooperationspartnern vorangetrieben. Zukünftig wird die Entwicklung entsprechender Technologie im Wechselspiel vielfältiger Daten und Datenbanken im Bewusstsein der Nachhaltigkeit für Produkte und Produktionsschritte im Lebenszyklus erfolgen. In diese wird bereits bei der Planung eine Modellierung z. B. hinsichtlich der zu erwartenden Alterung oder der möglichen Recyclingoptionen auf der Basis der umfassenden Material- und Prozessschritte integriert.

→ s. Abb. 81³⁹⁴

Zukünftige, nachhaltige Entwicklungen geklebter Produkte und klebtechnischer Produktionen werden Alterungs- und Recyclingmodellierungen beinhalten.

394 M. Noeske, W. Leite Cavalcanti, H. Brüning, B. Mayer, A. Stamopoulos, A. Chamos, T. Krousarlis, P. Malinowski, W. Ostachowicz, K. Tserpes, K. Brune, R. Ecault; In Adhesive Bonding of Aircraft Composite Structures Non Destructive Testing and Quality Assurance Concepts; W. Leite Cavalcanti, K. Brune, M. Noeske, K. Tserpes, W. Ostachowicz, M. Schlag, Hrsg.; Springer International Publishing: Basel, 2020.



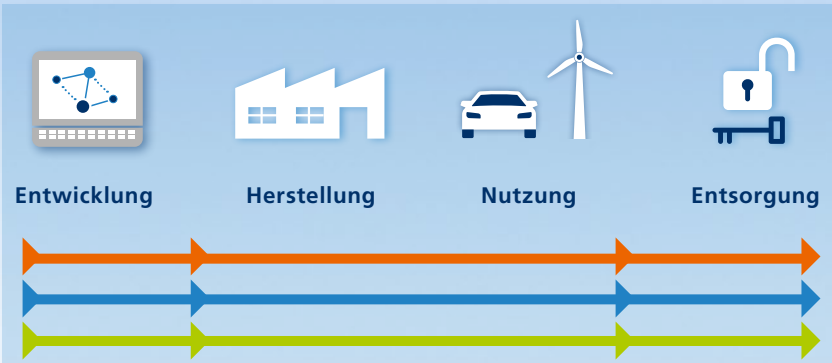
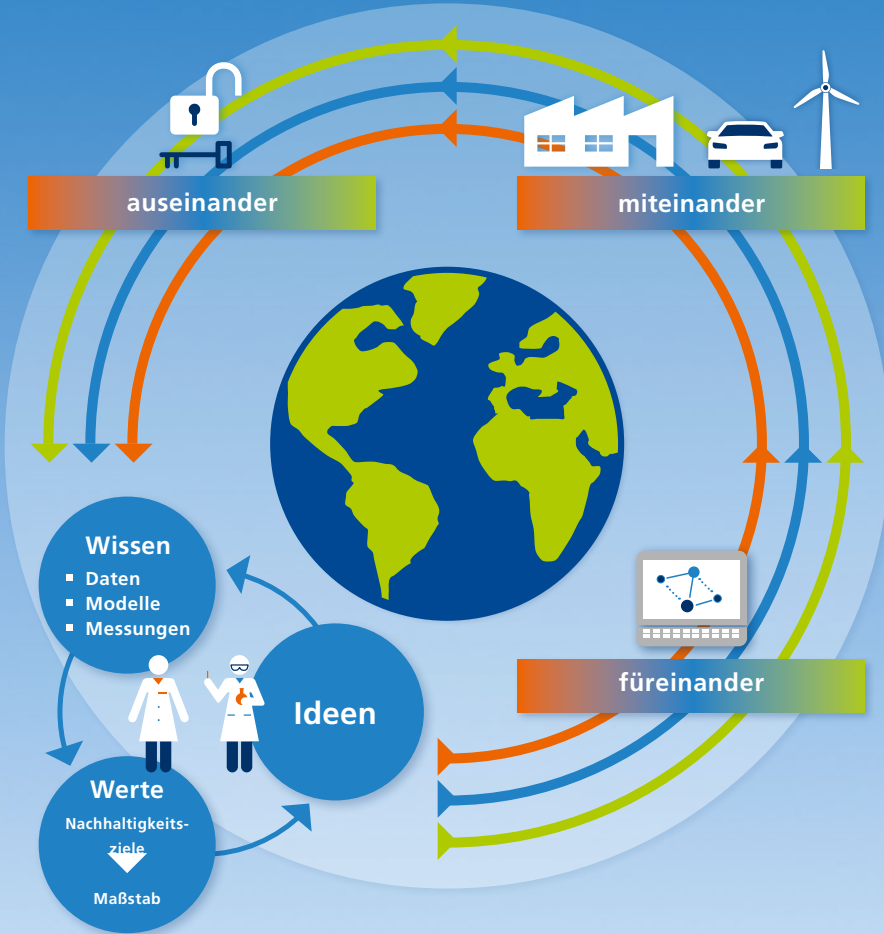
5.7 Ausblick hinsichtlich der Digitalisierung in der kreislauf- wirtschaftswirksamen Klebtechnik

Links: Abb. 81
Prozessschritte und
Akteure in der quali-
tätsgesicherten kleb-
technischen Fertigung

In modernen und zukunftsgerichteten, geklebten Multimaterialverbunden des 21. Jahrhunderts zeigen Materialien mehr als ihre designbedingte physische Präsenz oder ihre konstruktionsbedingte relative geometrische Anordnung. Zusätzlich zu ihren Werkstoffeigenschaften werden sie in Klebungen im Verbund mit ihren Daten und vor allem Metadaten eingesetzt. Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung macht dies die Einbeziehung von »End of Life«-Prozeduren schon in den Produktlebenszyklen »Entwicklung« und »Herstellung« sichtbar. Eine generationsüberspannende Kommunikation FAIRer (Meta-)Daten ist durch die standardisierte Zusammenfassung textlich-begrifflicher und räumlich-bildlicher Informationen in Ontologien sichergestellt, welche zudem die zeitliche Dimension umfassen.

Werkstoffe werden im 21. Jahrhundert über ihre materielle Präsenz oder räumliche Anordnung zusätzlich in Verbindung mit ihren (Meta-)Daten unter Einbeziehung von »End of Life«-Szenarien sichtbar.

Im Gegensatz zur Vergangenheit wird die historisch gewachsene material- oder akteurbezogene Information zukünftig digitalisiert tradiert. Standen bislang die Materialien im Vordergrund, so wird zukünftig deren untrennbare Verknüpfung mit Daten für alle Produktlebenszyklusphasen an Bedeutung gewinnen. Nicht nur der ökologische Wert, auch der ökonomische Wert dieser Zusammenhänge übersteigt den Materialwert bei Weitem, insbesondere auch im klebtechnischen Sinne. Zudem verleiht der Blick »vom Material zum sicheren Produkt« im Sinne der Nachhaltigkeit auch Umweltaspekten und gesellschaftlichen Entwicklungschancen eine



langfristige zeitliche Dimension. Diese kommt in einer Betrachtung geklebter Verbunde zum Tragen, die Kreislaufwirtschaftswirksamkeit mit Produktsicherheit sowie -beständigkeit vereint. Und die maßgeblichen Akteure nehmen ihre Verantwortung in Zusammenarbeit wahr (→ s. Abb. 82).

Links: Abb. 82
Alle Akteure im Lebenszyklus nutzen digitalisierte Informationen zur ganzheitlichen Gestaltung, Anwendung und Verwertung geklebter Materialverbunde

Materialien werden zukünftig untrennbar mit Daten über alle Produktlebenszyklusphasen in Zusammenhang gestellt, wodurch der ökonomische Wert dieser Zusammenhänge den Materialwert, auch im klebtechnischen Kontext, bei Weitem übersteigt.

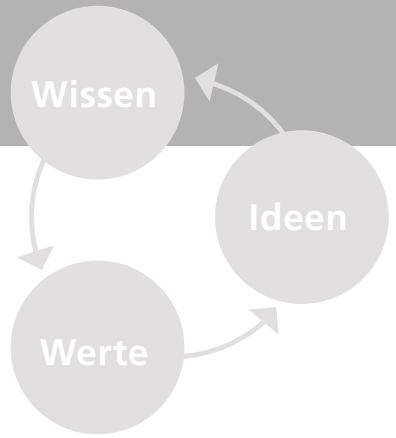
Die Kreislaufwirtschaftsbetrachtung wohnt geklebten Produkten auch heutzutage schon implizit inne. Zukünftig wird sie für den jeweiligen Akteur – sei es in der Fertigung, der Anwendung, der Reparatur oder sorgfältigen Entsorgung geklebter Verbunde – in den jeweils für ihn relevanten Aspekten interaktiv erfahrbar und für vergleichende Betrachtungen zugänglich gemacht.

Der Blick auf eine nachhaltige Klebtechnik bezieht auf diese Weise die drei gleichberechtigt tragenden Säulen der Nachhaltigkeit mit ein (→ s. Abb. 83). Wirtschaftliche, ökologische und soziale Aspekte kommen in nachhaltigen Produkten in einer ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung zum Tragen.

Im Sinne der Nachhaltigkeit verleiht der Blick »vom Material zum sicheren Produkt« bei geklebten Verbunden Umweltaspekten und gesellschaftlichen Entwicklungen eine langfristige Dimension, die Kreislaufwirtschaftswirksamkeit mit Produktsicherheit und -beständigkeit vereint.



Abb. 83
 Tripoden-Modell nachhaltiger Klebtechnik



WWW.IFAM.FRAUNHOFER.DE

In fast allen Lebensbereichen, also von A wie Auto bis Z wie Zug wird geklebt. Grund ist die einzigartige Fähigkeit der Klebtechnik, unterschiedliche Werkstoffkombinationen langzeitbeständig und sicher unter Erhalt produktrelevanter Füge­teil-Werkstoffeigenschaften zu verbinden und zusätzliche, über das reine Verbinden hinausgehende Funktionen in das geklebte Produkt zu integrieren. Kleben ist längst integraler Bestandteil innovativer Technikentwicklung und führt in Deutschland zu einer indirekt generierten Wert­schöpfung von jährlich ca. 450 Mrd. € (Stand 2018).

Die vorliegende Studie beschreibt branchenübergreifend und umfassend die Rolle der Klebtechnik im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft und ordnet sie in die politischen Rahmenbedingungen aus globaler und europäischer Sicht ein. Dieses schließt ökobilanzrelevante Aspekte ein, die in geklebten Produkten erzeugt werden und über die Kreislaufwirtschaftswirksamkeit hinausgehen. Gleichzeitig wird das technologische wie ökologische Leistungsvermögen der Klebtechnik dargestellt – sowohl als Partner zur Erfüllung der Anforderungen einer Kreislaufwirtschaft als auch zur führenden Verbindungstechnik des 21. Jahrhunderts.

ISBN 978-3-8396-1636-9



9 783839 616369