

# Klebstoffe in der Kreislaufwirtschaft

Wie die Klebtechnik Produkte langlebiger macht und Ressourcen schont

## Zusammenfassung

Ein wesentliches Element des Green Deals der EU-Kommission ist der Aktionsplan Kreislaufwirtschaft, der den Übergang von der Linear- in eine Kreislaufwirtschaft skizziert. Leider wird sowohl in der landläufigen Betrachtung als auch in der politischen Bewertung der Begriff *Zirkuläre Wirtschaft* häufig auf das Thema *Recycling* reduziert. Dagegen erfordert der weit umfassendere Ansatz einer Kreislaufwirtschaft, wie auch der Aktionsplan vorgibt, die ganzheitliche Betrachtung eines Produktlebenszyklus hinsichtlich einer Ressourceneffizienz. Im Sinne dieser ganzheitlichen Betrachtung fungieren sowohl die EU-Abfallrahmenrichtlinie mit ihrer fünfstufigen Abfallhierarchie als auch das Kategorisierungssystem der EU-Kommission mit seinen neun **R-Strategien** als Wegweiser für die zirkuläre Wirtschaft und stellen so einen Bezug zwischen Ökodesign und Kreislaufwirtschaft her.

Kreislaufwirtschaft umfasst weit mehr als die Einzelthematik Recycling. Das Kerngerüst der Transformation hin zur Kreislaufwirtschaft sind die sogenannten R-Strategien: R0-Refuse, R1-Rethink, R2-Reduce, R3-Reuse, R4-Repair, R5-Refurbish, R6-Remanufacture, R7-Repurpose und R8-Recycle. Diese gehören nicht nur zu den wirksamsten Designstrategien im Rahmen der zirkulären Wirtschaft, sondern legen auch in der genannten Reihenfolge deren Prioritäten fest. Konsequenter Leichtbau, d. h. die langzeitige Erzielung der gleichen Funktionalität mit deutlich weniger Material, ist zweifellos die effektivste Strategie für Material- und Ressourceneffizienz im Sinn des Strategieelements **Reduce**. Die Strategieelemente **Rethink** und **Reduce/Repair** zielen ab auf eine Verbesserung der Langlebigkeit von Produkten durch längere Haltbarkeit oder durch Austausch/Reparatur. Durch die Strategieelemente **Reuse**, **Refurbish** sowie **Remanufacture** wird zusätzlich die Produkt-Ressourceneffizienz deutlich optimiert.

Obwohl moderne Produkte in der Form, wie wir sie im industriellen, handwerklichen oder privaten Umfeld kennen und nutzen, ohne Einsatz der Klebtechnik heute kaum mehr denkbar sind, sind die positiven Möglichkeiten der Klebtechnik als Verbindungstechnik im Zusammenhang mit dem EU-Aktionsplan Kreislaufwirtschaft nicht allgemein bekannt.

Dabei ist die Klebtechnik häufig als einzige Fügetechnik in der Lage, langzeitbeständig und sicher (Hochleistungs-)Werkstoffe zu kombinieren, ohne deren einzigartige und produktrelevante Eigenschaften zu beeinträchtigen. Damit wird sie zu einer der entscheidenden Technologien und somit zum Enabler des Leichtbaus. Da ihr Einsatz gleichzeitig eine gezielte Verbesserung der Langlebigkeit von Produkten ermöglicht, stellt sie so für die Kreislaufwirtschaft eine Schlüsseltechnologie dar. Dabei leistet sie insbesondere für die besonders wirksamen, in der Hierarchie weiter oben stehenden R-Strategien wichtige Beiträge.

Das Kleben ermöglicht häufig ein einfaches Reparieren von Produkten, um so deren Nutzungsdauer zu verlängern. Sollte dazu oder auch für einen Recyclingprozess eine Demontage der Produkte nötig sein, bieten sich viele Möglichkeiten zum Lösen der Fügeverbindung. Hierzu steht die DIN/TS 54405:2020-12 „Konstruktionsklebstoffe – Leitlinie zum Trennen und Rückgewinnen von Klebstoffen und Fügeteilen aus geklebten Verbindungen“ dem Anwender, und vor allem dem Produkt-

designer, als Leitlinie zum Trennen geklebter Verbindungen mit dem Ziel der Wiederverwendung von Bauteilen und Produkten zur Verfügung. Getrennte Werkstoffe geklebter Produkte stehen grundsätzlich auch einer Wiederverwertung zur Verfügung, wenn es einen entsprechenden Recyclingprozess gibt. Hierzu gehört jedoch, dass das End-of-Life-Konzept geklebter Produkte bereits in der Design- und Produktplanungsphase zum integralen Bestandteil der Produktentwicklung wird. Rohstoff- und Klebstoffhersteller, Klebstoffanwender, Produkthersteller, Endkunden und Recycler bilden und gestalten zusammen die Wertschöpfungskreisläufe entlang des Lebenszyklus geklebter Produkte.

Ein intelligentes Produkt-Ökodesign vereint somit zukünftig Anforderungen an die Sicherheit, technologische Leistungsfähigkeit, Ressourceneffizienz und Langzeitbeständigkeit geklebter Produkte, inklusive deren Reparatur- und Recyclingfähigkeit, mit den gesellschaftlichen Anforderungen einer nachhaltigeren Kreislaufwirtschaft. Die Klebtechnik besitzt in diesem Spannungsfeld sowohl technologisch als auch ökologisch das notwendige Leistungsvermögen und unterstreicht damit ihren Anspruch als führende Verbindungstechnik des 21. Jahrhunderts.

## 1 Einführung

Egal ob im industriellen, handwerklichen oder privaten Umfeld, die Klebtechnik kommt bei der Herstellung und Verarbeitung unterschiedlichster Produkte zum Einsatz. Moderne Produkte in der Form, wie wir sie kennen und nutzen, sind ohne den Einsatz der Klebtechnik heute technologisch, ökonomisch und auch ökologisch kaum mehr denkbar.

Um die verschiedenen Anforderungen an ein Produkt zu erfüllen, kombiniert man häufig gezielt unterschiedliche Werkstoffe mit jeweils spezifischen Materialeigenschaften. Die Aufgabe jeder Art von Füge-technik besteht darin, über das sichere und langzeitbeständige Verbinden hinaus diese ausschlaggebenden Werkstoffeigenschaften im Produkt und dessen Nutzung zu gewährleisten. Genau hier besitzt die Klebtechnik im Vergleich zu allen anderen Verbindungstechniken die einzigartige Fähigkeit, nicht nur gleiche, sondern insbesondere auch unterschiedliche Werkstoffe sowohl langzeitbeständig als auch sicher unter Erhalt produktrelevanter Füge- teil-Werkstoffeigenschaften zu verbinden. Gleichzeitig kann sie zusätzliche, über das reine Verbinden hinausgehende Funktionen (Wärme-, Geräusch- und Vibrationsdämmung, abdichten, isolieren, leitfähig verbinden etc.) in das geklebte Produkt integrieren. Erst der Erhalt der Werkstoffeigenschaften ermöglicht, steigenden Produktanforderungen wie beispielsweise Gewichtsreduzierung, Miniaturisierung, Funktionalisierungserweiterung, Designoptimierung etc. gerecht zu werden und explizit für ein Produkt anforderungsgerechte und innovative Bauweisen möglich zu machen.<sup>1</sup> Diese Bauweisen werden auch im 21. Jahrhundert zwangsläufig Multimaterialverbunde im Sinne von Differentialbauweisen sein müssen, da in der Regel ein einzelner Werkstoff allein die steigenden, immer komplexeren Produktanforderungen nicht erfüllen kann.<sup>2</sup>

## 2 Klebtechnik im Kontext von Kreislaufwirtschaft

Obwohl das Verbinden unterschiedlicher Materialien eine große Zahl von Vorteilen mit sich bringt, werden Monomaterialien häufig als ökologisch vorteilhafter angesehen. Gefügte Produkte stehen unter Verdacht, die Umsetzung des Aktionsplans Kreislaufwirtschaft unter dem Green Deal zu erschweren. Ein wesentlicher Grund für diese fachlich falsche Bewertung liegt u. a. darin verborgen, dass ein notwendiges Lösen der Verbindungen als technisch zu schwierig realisierbar angesehen wird.

Technisch ist es aber selbstverständlich möglich, jede Verbindung wieder zu lösen.<sup>3,4</sup> Für die Klebtechnik wurde dazu 2020 eigens die DIN/TS 54405 als Leitlinie zum Trennen geklebter Verbindungen veröffentlicht.<sup>5</sup> Der dazu notwendige technische Aufwand lässt sich optimieren, wenn man ein Trennen (z. B. für einen Recyclingprozess) schon beim Design der Produkte berücksichtigt.

Um die Kreislauffähigkeit gefügter Produkte zu ermitteln, ist eine ganzheitliche Betrachtung des Produktes zwingend notwendig. Bewertet werden müssen die Umweltauswirkungen sowie die Verringerung der Nutzung natürlicher Ressourcen während des gesamten Lebenszyklus eines Produkts. Diese dürfen weder getrennt voneinander noch linear in einzelnen Lebenszyklusphasen betrachtet und bewertet werden. Es ist die gesamte Produktlebenszeit, also die Summe aller Produktlebenszyklusphasen, zu berücksichtigen.<sup>6,7</sup>

### 3 Klebtechnik im Kontext von EU-Abfallrahmenrichtlinie und Ressourceneffizienz

Für diese ganzheitliche Betrachtung stellt die EU-Abfallrahmenrichtlinie mit ihrer fünfstufigen Abfallhierarchie den Wegweiser und die Gesetzgebungsgrundlage (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) dar (siehe Abb. 1). Die Hierarchie umfasst die fünf Stufen: 1. **Vermeidung**<sup>8,9,10</sup>, 2. **Vorbereitung zur Wiederverwendung**<sup>11,12</sup>, 3. **Recycling**<sup>13,14</sup>, 4. **Sonstige Verwertung**<sup>15,16</sup>, 5. **Abfallbeseitigung**<sup>17,18</sup>. Diese werden wiederum in die drei übergeordneten hierarchischen Schwerpunkte **Vermeidung**, **Verwertung** und **Beseitigung von Abfall** eingeteilt.

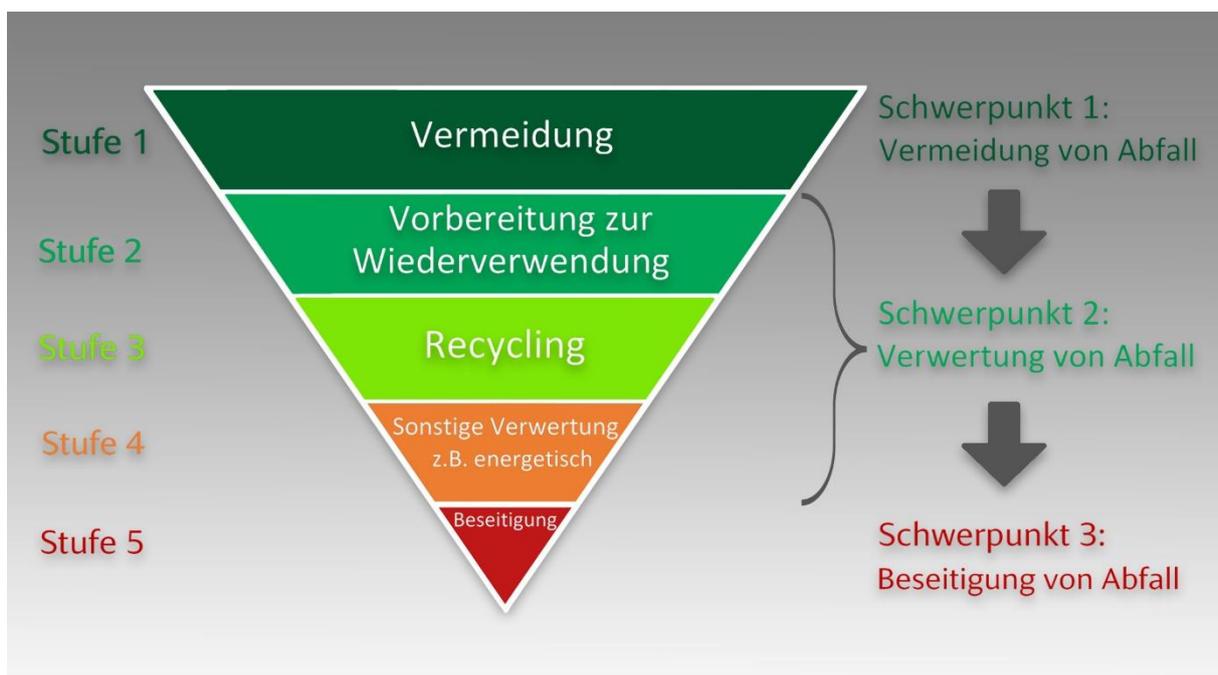


Abb. 1: Abfallhierarchie der EU

Durch die 5-stufige Abfallhierarchie wird gleichzeitig der Bezug zwischen Ökodesign und Kreislaufwirtschaft hergestellt. Grundlegend ist das Ziel der Kreislaufwirtschaft, eine Erhöhung der Ressourceneffizienz zu ermöglichen, indem Materialien und Produkte so lange wie möglich im Wirtschaftskreislauf gehalten werden. Durch diese materielle Kreislaufführung soll sowohl der Verbrauch natürlicher Ressourcen als auch die Entstehung von Abfall verringert werden. Ressourceneffizienz umfasst jedoch nicht nur die Materialeffizienz, sondern auch die Energieeffizienz. Wie bereits erwähnt, ist die Leichtbauweise die Schlüsseltechnologie, um Produkte während ihrer Lebensdauer energieeffizient zu gestalten.

## 4 Klebtechnik und R-Strategien

### 4.1 Allgemeines zu den R-Strategien

Als Kerngerüst der Transformation hin zur Kreislaufwirtschaft dienen die **R-Strategien**<sup>19,20,21</sup> **R0-Refuse**, **R1-Rethink**, **R2-Reduce**, **R3-Reuse**, **R4-Repair**, **R5-Refurbish**, **R6-Remanufacture**, **R7-Repurpose** und **R8-Recycle**. Sie steigern direkt oder indirekt die Ressourceneffizienz und tragen zur Verringerung negativer Umweltauswirkungen in der gesamten Wertschöpfungskette bei, indem beispielsweise CO<sub>2</sub>-Emissionen erheblich reduziert werden. Sie zählen nicht nur zu den wirksamsten Designstrategien im Rahmen der zirkulären Wirtschaft, sondern legen auch deren Prioritäten fest. Strategie R0-Refuse ist ein eher übergeordnetes Element. Die folgenden Ausführungen (Kapitel 4.2 - 4.5) beziehen sich daher auf die Strategieelemente R1 bis R8.

### 4.2 R1-Rethink

Die Verbesserung der Langlebigkeit von Produkten zum Erhalt der Rohstoffe innerhalb des Kreislaufsystems zählt im Sinne des Strategieelements **R1-Rethink**, d. h. die längere Nutzung eines Produkts, mit zu den wirksamsten ressourceneffizienten Ökodesignstrategien.

Durch die Langzeitbeständigkeit von Klebverbindungen verlängert sich die Nutzungsdauer geklebter Produkte. Die Lebensdauer eines Autos steigt stetig.<sup>22</sup> Schienenfahrzeuge fahren bis zu 40 Jahre. Das bedeutet für die projektierte Lebensdauer eines ICE, der eine Jahresfahrleistung von ca. 500.000 Kilometern aufweist, eine Gesamtfahrleistung von 20 Mio. Kilometern. Flugzeuge fliegen bis zu 30 Jahre und werden dafür regelmäßig überwacht und instandgesetzt.<sup>23,24</sup>

Die Vorderkanten von Rotorblättern an Windkraftanlagen sind im Betrieb aufgrund der hohen Umfangsgeschwindigkeiten von bis zu 390 km/h hohen abrasiven Belastungen ausgesetzt. Schon nach wenigen Jahren machen daher massive Schädigungen des Laminats, insbesondere im Bereich der sog. Leading Edge, Reparaturen erforderlich.<sup>25</sup> Die Reparatur muss möglichst schnell erfolgen, um die aus der Beschädigung resultierenden Verwirbelungen und somit die Verschlechterung der Aerodynamik und letztendlich den Verlust an erzeugter Energie zu minimieren. Insbesondere an Offshore-Anlagen sind Reparaturen jedoch aufgrund der schlechten Zugänglichkeit sehr aufwändig und nicht bei jedem Wetter möglich. Daher wird schon bei der Rotorblattherstellung eine Schutzschicht auf die besonders beanspruchte Leading Edge geklebt. Diese garantiert auch unter den extremen Offshore-Bedingungen eine dauerhaft glatte Oberfläche, die so durch andere Fügeverfahren nicht realisierbar wäre. Auch wenn sich Schrauben oder Nieten allein schon aufgrund der Beschädigung des Rotorblattlaminats verbieten, würden an den Unebenheiten der Schrauben- bzw. Nietköpfe wiederum erhebliche, die Energieausbeute verringernde Verwirbelungen auftreten. Zudem würde die Verbindung zwischen dem Kantenschutz und dem Rotorblatt zusätzlich mechanisch belastet und die Langzeitbeständigkeit der Rotorblätter massiv beeinträchtigt. Die beschriebene Klebung stellt dagegen nicht nur die projektierte Energieausbeute über die geplante Lebensdauer sicher, sondern verhindert auch den sonst aus der Laminatschädigung resultierenden Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt.

Die Langlebigkeit dieser in vielen Strukturen geklebten Produkte ist nachgewiesen. Aus ganzheitlicher Sicht ermöglicht das Kleben somit Bau- und Konstruktionsprinzipien, die deutlich verbesserte Ökobilanzen aufweisen.

Auch durch die ständige Verbesserung der Alterungsbeständigkeit verlängert sich die Produktlebenszyklusphase. Hierfür kommen u. a. optimierte Oberflächenbehandlungsverfahren zum Einsatz, die die Adhäsion zwischen den Fügeflächen und dem jeweiligen Klebstoff als einem essenziellen Langzeitbeständigkeitsfaktor verbessern.<sup>26,27,28,29</sup>

Klebstoffe als nichtleitende Verbindungselemente können darüber hinaus in Metallklebungen produktlebensdauererlängernd die Kontaktkorrosion verhindern.

Die Kenntnisse über die optimierten Eigenschaften sind in der Ökodesignphase zu berücksichtigen.

### 4.3 R2-Reduce

Die Leichtbauweise, d. h. die langzeitige Erzielung der gleichen Funktionalität mit weniger Material zählt zweifellos zu den wirksamsten Ökodesignstrategien zur Vermeidung von Abfall und zur Einsparung von Energie während der Nutzungsdauer des Produkts.<sup>30</sup> Die Klebtechnik ist aufgrund ihres Potenzials, Werkstoffeigenschaften zu erhalten, als eine der wichtigsten Füge-technologien zur Umsetzung des Leichtbaus anzusehen und stellt auch für die Kreislaufwirtschaft eine Schlüsseltechnologie dar:

- Nahezu alle Materialien können mit Hilfe der Klebtechnik verbunden werden. Insbesondere moderne Hochleistungsmaterialien kommen im Leichtbau zum Einsatz.
- Die Klebtechnik trägt durch die Realisierung gezielter Strukturen, z. B. durch Versteifungselemente wie Rippen, zum materialeinsparenden konstruktiven Leichtbau bei.
- Sie verbindet langzeitbeständig und sicher unterschiedliche Werkstoffe, die entsprechend den konkreten Anforderungen im Bauteil eingesetzt werden. Damit ermöglicht die Klebtechnik mittels Multimaterialbauweise ebenfalls einen materialsparenden werkstofflichen Leichtbau.

Im leichtbaurelevanten Transportmittelbereich ermöglicht der Einsatz der Klebtechnik u. a. das strukturelle Scheibenkleben, das Kleben von Versteifungsprofilen, das Kleben in der Karosserie und die Verwendung dünnerer Bleche zur Materialeinsparung in der Herstellungsphase. Dies wiederum führt zu erheblichen Energieeinsparungen in der Nutzungsphase. Die Verwendung dünnerer Bleche wird erst durch das Kleben mit seiner flächigen und deshalb vergleichsweise gleichmäßigen Kraftübertragung möglich. Bei der Verwendung moderner hoch- und höchstfester Stähle ist die wärmearme Füge-technik Kleben als einzige Verbindungstechnik in der Lage, diese noch dünner einsetzbaren Materialien unter Erhalt der Werkstoffeigenschaften zu fügen.<sup>31,32</sup> Der klebtechnisch realisierte Einsatz von Leichtbauwerkstoffen reduziert beispielsweise im Schienenfahrzeugbau beispielsweise den Energieverbrauch und damit die spezifischen CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Personen- oder Tonnenkilometer in der ökologisch entscheidenden Produktlebenszyklusphase „Nutzung“.<sup>33</sup>

Miniaturisierung ist neben Leichtbauweisen eine hocheffektive Möglichkeit, Ressourcen einzusparen. Es ist simpel: Je kleiner das Produkt, desto geringer der Materialeinsatz. Klebstoffe sind bei der Miniaturisierung (z. B. in der Elektronikfertigung), die aufgrund ständig steigender Funktionalitäten immer kleiner werdende Dimensionen erfordert, zwingend erforderlich. Für diesen Anwendungs-bereich speziell entwickelte Klebstoffe sind ideal geeignet, auf kleinstem Raum verschiedenste Werkstoffe schnell, sicher, und langzeitbeständig miteinander zu verbinden.<sup>34,35</sup> Würde bei diesen kleinen Dimensionen die bisherige Füge-technik Lötten eingesetzt, bestände die Gefahr, dass die Bauteile durch die hohen Temperaturen der Lotschmelze beschädigt würden. Die Klebtechnik ermöglicht bei der Miniaturisierung jedoch weit mehr als nur das werkstoffgerechte, hochpräzise Fügen von Miniaturbauteilen.<sup>36</sup> Die hochentwickelten Klebstoffe fixieren Spulen, dichten Gehäuse ab oder werden als Chipvergussmassen eingesetzt. Sie kürzen zudem Produktionsabläufe durch schnellstmögliche Aushärtung ab und können in Dosiermengen von Zehntel Milligramm verlässlich verarbeitet werden. Darüber hinaus werden Klebstoffe auch im Hochzuverlässigkeitsbereich beim Chipverguss eingesetzt. Nur mit ihrer Hilfe als geeignete Vergussmassen können die feinen Strukturen auf Chips und Drähten vor mechanischen Belastungen (Vibrationen, Temperaturschwankungen) und Umwelteinflüssen (Feuchtigkeit, Korrosion) produktlebensdauererlängernd geschützt werden. Dies kann mit anderen Füge-techniken nur mit deutlich höherem Aufwand oder gar nicht realisiert werden.<sup>37,38</sup>

#### 4.4 R3-Reuse, R4-Repair, R5-Refurbish, R6-Remanufacture

Das klebtechnische Produktdesign aus mehreren, grundsätzlich wieder voneinander trennbaren Bauteilen in der sogenannten Differentialbauweise weist zusätzlich die Fähigkeit zur Reparatur auf. Kleben ist schon heute, auch bei zuvor nicht geklebten Produkten, das am häufigsten eingesetzte Reparaturverfahren. Dies hat zur Folge, dass ein Produkt länger verwendet und dadurch Rohstoffe länger im Kreislauf gehalten werden. Klebtechnik und Reparatur stellen in vielen Fällen ein optimales System dar. Viele Reparaturen im privaten, handwerklichen und industriellen Bereich wären ohne Kleben nicht denkbar. Ein auch im privaten Bereich verbreitetes Beispiel ist die Reparaturklebung von Möbeln oder Möbelteilen, die nach intensiver Nutzung repariert werden müssen.

Bei sicherheitsrelevanten Bauteilen wird klebtechnisch nach detailliert ausgearbeiteten Reparaturvorschriften verfahren. Hierzu gehören insbesondere auch Faserverbundwerkstoffe, beispielsweise im Flugzeugbau oder bei Windenergieanlagen. Im Falle von Schäden, z. B. aufgrund von Steinschlag oder Hagel, wird nur ein Teil des Materials ausgeschnitten und ein genau passender Reparaturpatch eingeklebt. Danach sind die Bauteile in gleichem Maße belastbar wie vor dem Schaden. Gleiches gilt seit mehr als einhundert Jahren im Bereich des konstruktiven Holzbaus, wo entstandene Schäden durch Reparaturklebungen saniert werden können.

Industriell umsetzbare Demontageprozesse geklebter Produkte, die eine Reparatur beschädigter oder defekter Teile ermöglichen, sind wesentliche Schwerpunkte des Entwicklungsprozesses und der Produkt-erprobung. Sie tragen zur Verlängerung des Produktlebenszyklus bei und dienen gleichzeitig der Rückgewinnung der nicht mehr einsetzbaren Fügeartikelwerkstoffe. Von der Mikroelektronik bis hin zu Großstrukturen im Bauwesen: Die zukünftigen Anforderungen an kreislaufwirtschaftsgerechte Produktdesigns müssen den Aspekt der Demontage mitberücksichtigen.

Bereits seit mehreren Jahrzehnten werden in Autos und anderen Transportmitteln die Frontscheiben, und mittlerweile auch andere Scheiben, eingeklebt. Der Ausbau der Scheiben ist bereits konstruktiv berücksichtigt und erfolgt durch Zerschneiden der elastischen, dicken Klebfuge mit einem Schneidedraht. Der noch verbliebene Klebstoff wird beispielsweise mit einem Vibrationsspachtel abgetragen, um anschließend die neue Scheibe einzukleben. Die defekte Scheibe wird einem Glasrecyclingprozess zugeführt. Diese Reparatur wird in allen Autowerkstätten nach vorgegebenen Verfahren durchgeführt. Gleiches gilt für die Reparatur kleinerer Schäden an den Scheiben (z. B. durch Steinschlag) mit speziell dafür entwickelten, lichthärtenden Klebstoffen.

Auch Displayscheiben von Mobiltelefonen lassen sich oft mittels Reparaturkits austauschen. Für nahezu jeden Telefontyp gibt es im Internet Reparaturanweisungen, so dass auch der versierte Laie viele Reparaturen, einschließlich des Lösen der Klebverbindungen, selbstständig ausführen kann.

Grundsätzlich sind die angeführten Beispiele auf nahezu alle anderen klebtechnischen Anwendungsbereiche wie Schiffbau, Optik, (Zahn-)Medizin, Medizintechnik, Haushaltsgeräte, Akustikindustrie, Schuhindustrie, Sportartikel und viele mehr übertragbar.

Die Klebtechnik bietet vielfältige Möglichkeiten zum Lösen der Fügeverbindungen. Die DIN/TS 54405 stellt dem Anwender hierzu eine Leitlinie zum Trennen geklebter Verbindungen zur Verfügung. Daher wird in Zukunft die Klebtechnik sowohl für Produkte als auch für deren Materialien ein Schlüssel zur Sicherstellung der Reparatur- und Wiederverwendungsfähigkeit sein.<sup>5</sup>

#### 4.5 R8-Recycle

Ein intelligentes Produkt-Ökodesign ermöglicht eine hohe Material- und Energieeffizienz sowie eine lange Produktlebensdauer bei gleichzeitiger Reduzierung der Abfallmenge. Aber selbst das innovativste Design und eine optimierte Herstellung und Verwendung können in der Regel nicht verhindern, dass die Produkte oder Produktteile nach einem möglichst langen und ressourceneffizienten Lebenszyklus zu Abfall werden. Ab einer gewissen Nutzungsdauer wird der Aufwand für die Strategie-

elemente R3 bis R6 so hoch, dass dies weder ökonomisch und noch weniger ökologisch aufgrund zusätzlichen Verbrauchs an Materialien und Energie sinnvoll ist.

Jetzt stellt sich die Aufgabe, möglichst viele der im Produkt enthaltenen Ressourcen zurückzugewinnen. Hierbei hat sich folgende Hierarchie entwickelt:

- Stoffliche Verwertung (Materialrecycling)
- Energetische Verwertung (Verbrennung)
- Entsorgung (Deponie)

Bei der stofflichen Verwertung unterscheidet man zwischen mechanischem und chemischem Recycling.

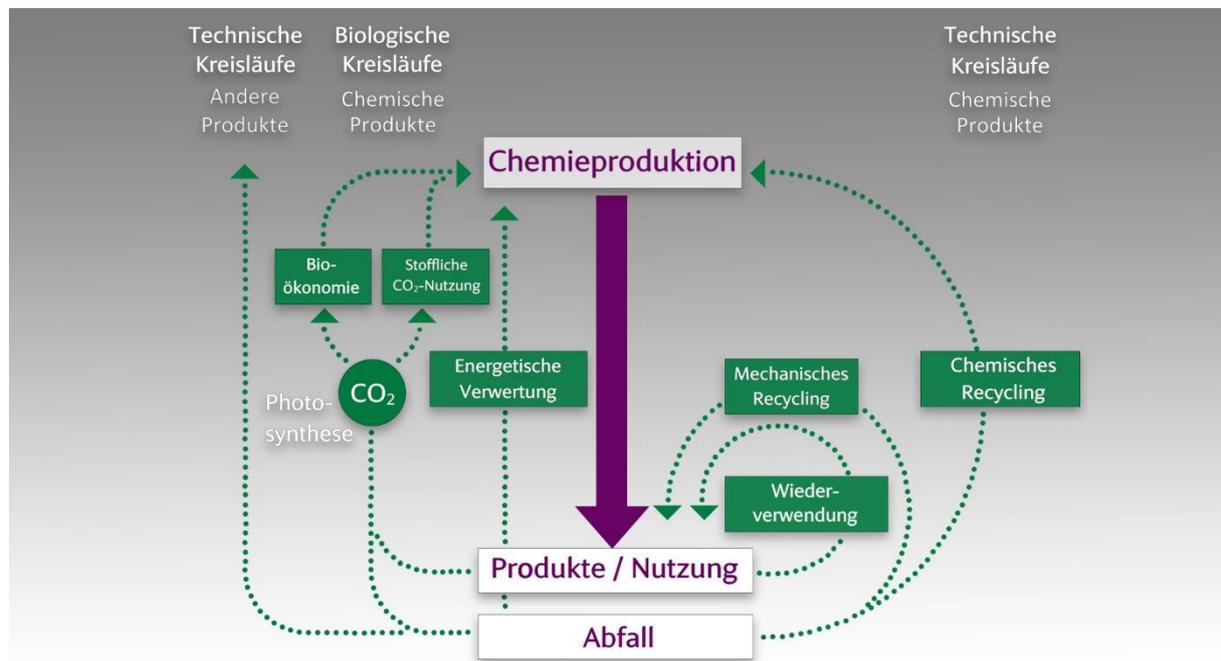


Abb. 2: Kreislaufwirtschaft und Recycling

Beim mechanischen Recycling (siehe Abb. 2) werden die Zielstoffe, d. h. die Materialien, die in den Kreislauf zurückgebracht werden sollen und für die es etablierte Recyclingprozesse gibt, von allen anderen Stoffen des Produkts so gut wie möglich getrennt. Das Trennen der Zielmaterialien von den nicht wiederverwertbaren Stoffen sollte am besten im gesamten Prozess der Rückgewinnung der Materialien, d. h. dem Sammeln, dem Sortieren und dem eigentlichen Recyclingprozess möglichst ökologisch sinnvoll etabliert sein. In der Regel gelingt das besonders gut, wenn man mit dem Trennen schon möglichst früh, z. B. beim getrennten Sammeln, beginnt. Das Trennen der in einem Produkt enthaltenen Materialien ist heute eine Schlüsselaufgabe in allen Recyclingprozessen, da, wie eingangs dargestellt, heute nahezu alle Produkte des täglichen Lebens aus einer Kombination unterschiedlichster Materialien bestehen. Zum Fügen der Materialien werden heute die unterschiedlichsten Fügeverfahren eingesetzt, wobei das Kleben aufgrund seiner in der Einführung beschriebenen Vorteile eine immer größere Bedeutung erfährt. Welches Fügeverfahren auch immer eingesetzt wird, schon beim Design der Verbindung muss das Trennen am Ende des Produktlebenszyklus bedacht werden. Dazu ist eine genaue Kenntnis des Recyclingprozesses der designten Produkte notwendig, da in den Recyclingprozessen jeweils spezifische Trenn- und Sortierprozesse integriert sind.

Kennt man die Anforderungen, kann man für alle Fügeverfahren, d. h. auch für das Kleben, entsprechende Lösungen entwickeln. Welche Trennprozesse für Klebungen möglich sind, wird z. B. in der DIN/TS 54405 aufgezeigt.<sup>5</sup>

Das Recycling verschiedenster Papierprodukte demonstriert beispielhaft, wie heute aus geklebten Produkten großtechnisch das gewünschte Zielmaterial gewonnen wird. Die Papierprodukte werden in wässrigem Milieu einer mechanischen Behandlung unterzogen, so dass die Zellulosefasern – also das Zielmaterial – in die wässrige Phase übergehen. Hydrophobe Klebstoffapplikationen werden anschließend durch mechanisches Separieren (Aussieben) von der Zellolosesuspension abgetrennt.

Das Recycling von Metall- und Glas-Produkten wird bei entsprechend hohen Temperaturen durchgeführt, genauer gesagt bei den Schmelztemperaturen der Zielmaterialien. Das Trennen der Zielmaterialien von Störstoffen erfolgt mittels der Technologien, die bereits aus der Herstellung der Materialien aus Primärrohstoffen bekannt sind. Um die Ausbeuten möglichst hochzuhalten, erfolgt hier vor dem eigentlichen Recyclingprozess in aller Regel eine Sortierung, damit möglichst wenig Fremdmaterial in den eigentlichen, hochenergetischen Recyclingprozess eingebracht wird. Klebungen werden getrennt<sup>5</sup>; Restanhaftungen von Klebstoffen stören bei den hohen Temperaturen der Recyclingprozesse im Allgemeinen nicht.

Beim chemischen Recycling werden verschiedene Verfahren eingesetzt, um durch Zuführung von Energie in Form erhöhter Temperatur und Druck die in den Materialien vorhandenen Kohlenwasserstoffe zurückzugewinnen. Die Spannbreite des chemischen Recyclings reicht von der Solvolyse homogener, sortenreiner Abfälle über die Pyrolyse definierter Abfallgemische bis hin zur Gasifikation breiter Abfallsortimente. Ob gefügte Produkte, die beispielsweise aus unterschiedlichen Kunststoffen bestehen, vorher getrennt werden müssen, kann nur bei Kenntnis des spezifischen chemischen Recyclingprozesses gesagt werden. Auch hier sollten anhaftende Reste von Klebstoffen auf Grund der geringen Menge und ihrer chemischen Zusammensetzung keine Probleme bereiten.

Aus den noch verbleibenden Resten, die nach dem Sortieren und Recycling geklebter Produkte im Rahmen eines Recyclingprozesses anfallen, wird in vielen Recyclinganlagen deren energetischer Gehalt durch Verbrennen zurückgewonnen, da ein Materialrecycling der Klebverbunde auf Grund der geringen Menge und der Heterogenität der eingesetzten Stoffe weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll ist. Die meisten Klebstoffe lassen sich sehr effektiv verbrennen, so dass der letzte Schritt in der Abfallverwertung, die Deponie, für verwendete Klebstoffe nicht relevant ist.

## 5 Ausblick: Kontrollierte Langlebigkeit

Die Klebstofftechnologie besitzt das Potenzial, ökologische Anforderungen mit technischen Innovationen zu beantworten. Zukünftig müssen die Wertschöpfungsketten geklebter Produkte grundsätzlich ganzheitlich und zusammenhängend in den Produktlebenszyklusphasen **Herstellung**, **Nutzung** und **Entsorgung** betrachtet werden. Dazu gehört insbesondere, dass unter besonderer Berücksichtigung der R-Strategieelemente R1 bis R6 (**Rethink**, **Reduce**, **Reuse**, **Repair**, **Refurbish** und **Remanufacture**) das End-of-Life-Konzept geklebter Produkte bereits in der Design- und Produktplanungsphase zum integralen Bestandteil der Produktentwicklung wird. Rohstoff- und Klebstoffhersteller, Klebstoffanwender, Produkthersteller, Endkunden und Recycler sind integraler Teil des Systems Kleben entlang der Wertschöpfungskreisläufe geklebter Produkte.

Im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung müssen – vor dem Hintergrund der Abfallhierarchiestufen 1 (Vermeidung von Abfall) und 2 (Vorbereitung zur Wiederverwendung von Abfall / siehe Abb. 1) – geklebte Produkte künftig im Sinne einer *kontrollierten Langlebigkeit* entwickelt werden. Diese verknüpft das Beherrschen der Produktintegrität während der möglichst langen Produktlebenszyklusphase **Nutzung** mit der gezielten Werkstofftrennung in der Produktlebenszyklusphase **Entsorgung**. Das Lösen einer Klebverbindung erfolgt dann durch mindestens einen äußeren Trigger,

der im normalen Gebrauch der Klebverbindung nicht vorkommt und daher die sichere Verwendung des geklebten Produkts nicht beeinträchtigt.

Das kontrollierte Lösen einer Klebverbindung ist für den Rück- und Umbau sowie für die Reparatur notwendig und dient damit im Sinne der Strategieelemente R2 bis R6 zur Erhöhung der Lebens- bzw. Nutzungsdauer eines Produkts. Dem Anwender sowie Recycler des geklebten Produkts muss hierzu jedoch die herstellerseitig vorgegebene Demontageoption bekannt sein; sinngemäß gilt dies auch für Reparaturprozesse. So ist beispielsweise 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. Die zugrundeliegenden Trenn-mechanismen sind auf andere klebtechnische Anwendungsgebiete übertragbar.

Chemisches Recycling stellt eine sinnvolle und notwendige Ergänzung zum mechanischen (werkstofflichen) Recycling dar (siehe Abb. 2). Es eröffnet als bevorzugte Alternative zur rein energetischen Verwertung eine zukunftsweisende Perspektive insbesondere für geklebte Kunststoff-produkte, die möglicherweise noch mit Klebstoff- oder Lackanhaftungen versehen sind.

Stand August 2023

## 6 Quellen

<sup>1</sup> A. Groß, B. Mayer, K. Haag, *adhesion ADHESIVES + SEALANTS 2022*, 14 - 17, Circular Economy and Adhesive Bonding Technology, Part 1

<sup>2</sup> O.-D. Hennemann, A. Groß, M. Bauer, *Spektrum der Wissenschaft* 1993, 9, 84 - 89, Innovationen durch vielseitige Fügetechnik.

<sup>3</sup> B. Mayer, A. Groß (Hrsg.) In *Kreislaufwirtschaft und Klebtechnik – eine Studie des Fraunhofer IFAM*, Fraunhofer Verlag: Stuttgart, 2020, S. 118 -121, Nichtlösbare Verbindungstechniken – ein mögliches Missverständnis, auch für die Kreislaufwirtschaft.

<sup>4</sup> M. Blassing, Lösbare Verbindungen. <https://www.metallbau-stahlbau.net/loesbare-verbinding> (Zugriff 28.08.23)

<sup>5</sup> DIN/TS 54405-04/2021, Konstruktionsklebstoffe – Leitlinie zum Trennen und Rückgewinnen aus geklebten Verbindungen, Beuth-Verlag Berlin, 2021

<sup>6</sup> Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament, Integrierte Produktpolitik – Auf den ökologischen Lebenszyklus-Ansatz aufbauen, KOM 2003 302 endg., S. 5

<sup>7</sup> J. Sanf elix, F. Mathieux, C. da la R ua, M.-A. Wolf, K. Chomkhamsri, *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.

<sup>8</sup> 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](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_20_420) (Zugriff 28.08.23)

<sup>9</sup> Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 7, Abs. 1

<sup>10</sup> Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 13, 24, 25

<sup>11</sup> Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 3, Absatz 21

<sup>12</sup> 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

<sup>13</sup> Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 3, Absatz 25

<sup>14</sup> 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>.

- <sup>15</sup> Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 3, Absatz 23
- <sup>16</sup> Umwelt-Bundesamt – UBA; Verwertung und Entsorgung ausgewählter Abfallarten, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten>, 18.09.2019 (Zugriff 28.08.23)
- <sup>17</sup> 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
- <sup>18</sup> Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), § 3, Absatz 26
- <sup>19</sup> J. Potting; E. Worrell, M. P. Hekkert, Circular Economy: Measuring innovation in the product chain. 2017, Hg. v. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. The Hague. (R-Nummerierung beginnt mit R0)
- <sup>20</sup> J. Kirchherr, D. Reike, M. Hekkert (2017): *Resources, Conservation and Recycling* 2017 Vol. 12, 221 - 232, Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. (R-Nummerierung beginnt mit R0)
- <sup>21</sup> European Commission, Categorisation System for the Circular Economy, 2020, [https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/categorisation\\_system\\_for\\_the\\_ce.pdf](https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/categorisation_system_for_the_ce.pdf) (Zugriff 28.08.23) (R-Nummerierung beginnt mit R1)
- <sup>22</sup> 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 28.08.23)
- <sup>23</sup> W. Wille In Frankfurter Allgemeine, Dreimal bis zur Sonne, 2005, <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/technik/ice-dreimal-bis-zur-sonne-1231182.html> (Zugriff 28.08.23)
- <sup>24</sup> L. Farwer In Focus online, Lebensdauer eines Flugzeugs – Infos zu Verschleiß und Haltbarkeit, 2018, [https://praxistipps.focus.de/lebensdauer-eines-flugzeugs-infos-zu-verschleiss-und-haltbarkeit\\_97834](https://praxistipps.focus.de/lebensdauer-eines-flugzeugs-infos-zu-verschleiss-und-haltbarkeit_97834) (Zugriff 28.08.23)
- <sup>25</sup> enercity AG, <https://www.enercity.de/windenergie/wissen-windenergie/windraeder/index.html> (Zugriff 28.08.23)
- <sup>26</sup> R. Wilken, H. Gleich, *adhäsion KLEBEN + DICHTEN* 2016, 11, 26 - 31, Kunststoffe richtig vorbehandeln Teil 1
- <sup>27</sup> R. Wilken, H. Gleich, *adhäsion KLEBEN + DICHTEN* 2016, 12, 28 - 33, Kunststoffe richtig vorbehandeln Teil 2
- <sup>28</sup> 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).
- <sup>29</sup> 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 CO<sub>2</sub> footprint reduction by analysis of surfaces exposed to laser and plasma treatment.
- <sup>30</sup> P. M. Skov Hansen, F. Andersen, K. Madsen, M. Rames, B. S. S. Hanswen, J. Viegand, C. Fischer, K. Graulich, R. Kemna, E. Maier, H. Couveée, R. van den Boorn, R. van Holstejn, D. Kemna, M. van Elsborg, P. Wesselman; Preparatory study for the Ecodesign and Energy Labelling Working Plan 2020 - 2024 / Task 2 Identification of Product Groups and Horizontal Initiatives – Final, ©European Union, April 2021, S. 29, [https://drive.google.com/file/d/1oLmBDyG\\_E6GBDI-Hu-RiUy1U3pW-UCgA/view](https://drive.google.com/file/d/1oLmBDyG_E6GBDI-Hu-RiUy1U3pW-UCgA/view) (Zugriff 28.08.23)
- <sup>31</sup> T. Heller, H.-J. Kaiser, A. Kern, H.-J. Tschersich, *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* 1998, 100, 664 - 668, Moderne hochfeste Stähle im Nutzfahrzeug- und Mobilkranbau.
- <sup>32</sup> A. Lutz, D. Symietz, *adhäsion KLEBEN + DICHTEN* 2008 (10), 52, 14 - 18, Gleiche Strukturfestigkeit trotz dünnerer Bleche, Kleben von hochfestem Stahl.
- <sup>33</sup> 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
- <sup>34</sup> J. Pfeiffer, *Konstruktionspraxis*, 2015, Zeitreise: Vom Alleskleber zum Multitalent, <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/zeitreise-vom-alleskleber-zum-multitalent-a-502008/> (Zugriff 28.08.23)
- <sup>35</sup> B. Mayer, A. Groß (Hrsg.) In Kreislaufwirtschaft und Klebtechnik – eine Studie des Fraunhofer IFAM, Fraunhofer Verlag: Stuttgart, 2020, S. 26 - 28, Neue Produktanforderungen – die Rolle der Verbindungstechnik „Kleben“.
- <sup>36</sup> A. Schröter, Kleben in der Elektronik- Aktuelle Trends, <https://evertiq.de/news/6385> (Zugriff 28.08.23)
- <sup>37</sup> B. Mayer, A. Groß (Hrsg.) In Kreislaufwirtschaft und Klebtechnik – eine Studie des Fraunhofer IFAM, Fraunhofer Verlag: Stuttgart, 2020, S. 100 - 117, Energieverbrauch und Materialeffizienz/Ressourceneffizienz.
- <sup>38</sup> B. Richter, *Konstruktionspraxis*, 2016, Hightech-Klebstoffe von heute machen Hightech-Fahrzeuge von morgen möglich. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/hightech-klebstoffe-von-heute-machen-hightech-fahrzeuge-von-morgen-moeglich-a-549129/> (Zugriff 28.08.23)