

A large, white industrial robotic arm is the central focus, positioned vertically. It is surrounded by various mechanical components, cables, and structural elements of a factory or industrial environment. The background is slightly blurred, showing more of the industrial setting with metal frames and other equipment.

Die Zukunft im Blick:

Technologie-Trends im Nexus
von Ressourceneffizienz und
Klimaschutz

Für Mensch & Umwelt

Umwelt 
Bundesamt

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet I 1.1 Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien
und -szenarien, Ressourcenschonung
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

Autorinnen und Autoren:

Sarah Hackfort
Melanie Degel
Edgar Göll
Kai Neumann

Redaktion:

Ullrich Lorenz

Satz und Layout:

Consideo GmbH

Publikationen als pdf:

www.umweltbundesamt.de/publikationen

Bildquellen:

Titel: © Apple Pressestelle; S.8 © pexels.com; S.13 © pexels.com; S.14 © pexels.com; S.15 © pexels.com; S.16 © pexels.com; S.21 © K. Neumann; S.23 © pexels.com; S.26 © K. Neumann; S.30 © pexels.com; S.31 © K. Neumann; S.34 © pexels.com; S.35 © Apple Pressestelle; S.38 © pexels.com; S.40 © K. Neumann; S.41 © K. Neumann

Stand: November 2019

ISSN (Print) 2363-8311

ISSN (Online) 2363-832X

Die Zukunft im Blick:

Technologie-Trends im Nexus
von Ressourceneffizienz und
Klimaschutz



Inhaltsverzeichnis

1	1 Einleitung	4
2	2 Systemische Zukunfts- und Trendforschung.....	5
3	3 Technologietrends - Trendprofile	7
	Trendthema 1 – Rohstoffwandel in der Chemieindustrie - am Beispiel von Biokunststoffen	8
	Trendthema 2 – Carbon Recycling - Kohlendioxid als Baustein für Produkte.....	11
	Trendthema 3 – Nutzung der Biotechnologie am Beispiel von Agrarkraftstoffen.....	14
	Trendthema 4 – Leichtbau - Nachhaltigkeit durch Konzeptleichtbau und neue Verbundwerkstoffe..	18
	Trendthema 5 – Das Lernen von der Natur - Ressourcenentlastungseffekte durch Bionik	21
	Trendthema 6 – Sortier- und Trenntechniken in der Recyclingindustrie.....	24
	Trendthema 7 – Urban Mining - Die Stadt als Rohstoffmine für Baustoffe	28
	Trendthema 8 – „Green Photonics“ als Wachstumsmarkt.....	31
	Trendthema 9 – Automatisierung und Robotik - Einsatz von Industrierobotern	34
	Trendthema 10 – „The Internet of Things“ als Baustein für die Industrie 4.0	37
4	4 Schlussfolgerungen.....	40
5	5 Literatur und Quellen	42

1 Einleitung

Neben der notwendigen Umsetzung von Treibhausgasminderungen ist auch die Senkung des Ressourcenverbrauches ein wichtiges Ziel der Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik. Bislang fehlt die systematische Untersuchung darüber, welchen Einfluss Maßnahmen des einen Politikfeldes auf das andere Politikfeld haben. Der Nexus-Ansatz von Klima- und Ressourcenpolitik will genau diese Lücke schließen. Dafür braucht es eine Politik, welche die Wechselwirkungen sowohl der unterschiedlichen Herausforderungen (wie etwa den Schutz des Klimas, den Erhalt der Biodiversität, die nachhaltige Nutzung von natürlichen Ressourcen wie Boden oder Rohstoffe) als auch der jeweiligen Politikfelder berücksichtigt, konkret also kohärente Lösungsstrategien der Wirtschaftspolitik und Umweltpolitik entwickelt (Kristof et al. 2015: 4; Gandenberger et al. 2017). Ressourcenschonendes Wirtschaften und Klimaschutz gehören zusammen und müssen auch in der Politik zusammen gedacht werden. Nur so lassen sich Widersprüche und ambivalente Entwicklungen einerseits (wie etwa ein erhöhter Bedarf an Rohstoffen durch die Energiewende) sinnvoll bearbeiten und auflösen und andererseits Synergien unterschiedlicher Handlungs- und Politikfelder nutzen (Umweltbundesamt 2019: 12). Auch international werden Ressourcen- und Klimaschutzpolitik zunehmend als zusammenhängende umweltrelevante Politikfelder begriffen (z. B. UNEP 2017: 8).

Studien im Auftrag des UBA zeigen, dass Ressourceneffizienzpolitik signifikant zu Klimaschutz beitragen kann, indem Treibhausgasemissionen aus Rohstoffabbau, -verarbeitung und -transport eingespart werden (Hirschnitz-Garbers et al. 2018, Umweltbundesamt 2019). Andersherum kann Klimapolitik durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien zwar den Bedarf an fossilen Rohstoffen reduzieren, aber gleichzeitig die Nachfrage nach spezifischen Technologiemetallen erhöhen und damit den Ressourcenbedarf strukturell verändern. Beide Politikfelder können durch ihre Wechselwirkungen also sowohl Zielkonflikte als auch

Synergien erzeugen, die es zu erfassen und politisch zu steuern gilt (Hirschnitz-Garbers et al. 2018: 43).

Das Projekt KliReX untersucht daher systematisch den Nexus zwischen Klima- und Ressourcenpolitik mit einer Kombination aus systemischer Ursache-Wirkungsmodellierung, Zukunfts- und Trendforschung und Politikanalyse.

Diese Broschüre beschreibt zu ausgewählten Technologieentwicklungen den Nexus zwischen Klima- und Ressourcenpolitik. Das Ziel ist es auszuloten, welche Effekte bestimmte technologische Entwicklungen unter bestimmten Bedingungen haben können und die Ambivalenzen und potentiellen Synergien innerhalb dieser Entwicklungen aufzuzeigen. Ein besseres Verständnis der verschiedenen Wirkungszusammenhänge liefert mögliche Ansatzpunkte für Politikinstrumente und hilft diese so auszurichten, dass die Synergien der beiden Politikfelder Ressourceneffizienz und Klimaschutz besser genutzt werden können.

Die sozio-ökonomischen und sozio-kulturellen Dimensionen, Trends und Entwicklungen mit Relevanz für Ressourcenschonung sind Gegenstand des ergänzenden Parallelprojekts „Trendradar Ressourcenpolitik: Sozio-ökonomische und sozio-kulturelle Treiber der Ressourcennutzung und Potenziale nicht-technischer Maßnahmen und Instrumente der Ressourcenschonung“ (FKZ: 317 31 102 0).¹

1 | Das Projekt FKZ 31731102 „Trendradar Ressourcenpolitik: Sozio-ökonomische und sozio-kulturelle Treiber der Ressourcen-nutzung und Potenziale nicht-technischer Maßnahmen und Instrumente der Ressourcenschonung“ komplementiert das Projekt KliReX indem systematisch gesellschaftliche Trends untersucht werden. Durchgeführt von: Ecologic Institut, IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung und sociodimensions - Institute for Socio-cultural Research.

2 Systemische Zukunfts- und Trendforschung

Die wissenschaftlich fundierte Zukunftsforschung bietet mit ihrem vielfältigen Methodenspektrum leistungsfähige Instrumente, die es ermöglichen auch langfristige Entwicklungen in komplexen Systemen aufzuzeigen und zu analysieren (Sheate et al. 2007; Wehnert et al. 2007; GCB 2013; Scharp et al. 2014; Behrendt et al. 2015). Als Systeme bezeichnet man ein aus mehreren Einzelteilen zusammengesetztes Ganzes. Die miteinander verbundenen Einzelteile können als eine aufgaben-, sinn- oder zweckgebundene Einheit angesehen werden und grenzen sich von anderen Systemen ab (Bertalanffy 1950). Eine systemische Trendforschung betrachtet in diesem Fall die Trends jeweils im System und das Wechselspiel der verschiedenen „Trendsysteme“ miteinander in einem sozio-ökonomischen oder sozio-ökologischen Kontext. So können wichtige Erkenntnisse geliefert werden, um übergreifende gesellschaftliche und technologische Zusammenhänge in ihren zukünftigen Dimensionen und Wechselwirkungen zu erfassen. Dabei liefert bereits die qualitative Betrachtung von Wechselwirkungen, Ambivalenzen, verzögerten Effekten und Rückkopplungen wichtige Informationen über denkbare Entwicklungen oder mögliche Effekte dieser Trends (vgl. Lorenz & Haraldsson 2014). In einer vorausschauenden Politikgestaltung geben systemische Trendanalysen Aufschluss darüber, wo es sich lohnt genauer hinzuschauen und wo politische Stellschrauben liegen könnten, um Ressourcen und Klima schonende Entwicklungen zu stärken.

Der Begriff Trend stammt aus dem Englischen und kann übersetzt werden mit: „sich neigen“, „sich erstrecken“, „in einer bestimmten Richtung verlaufend“ oder „bewegend“ (Sheate et al. 2007: v). Ein Trend ist keine Vorhersage einer Entwicklung, vielmehr gibt die Identifikation und Analyse von Trends Hinweise darüber, welche Entwicklungen sich langfristig durchsetzen können. Bei Trends handelt es sich um übergreifende gesellschaftliche Veränderungen, die einen längeren Zeithorizont, eine große Reichweite

sowie eine hohe Wirkungsmacht und Stabilität aufweisen.

Megatrends sind Trends, bei denen die genannten Merkmale oder ein wesentlicher Teils dieser Merkmale als besonders bedeutend angesehen werden. Sie beinhalten langfristige und umfassende Transformationsprozesse, die sich auf der gesellschaftlichen, wirtschaftlichen, politischen oder technologischen Ebene manifestieren (vgl. Naisbitt 1982).

Merkmale von Trends:

Dauer: Trends sind dynamisch gerichtet, in Bezug auf spezifische Quantitäten oder Qualitäten und Trends haben einen zeitlichen Verlauf und sind kurz, mittel- oder langfristig oder auf Dauer gestellt.

Richtung: Trends besitzen eine Dynamik und eine Richtung ohne Teil eines Zyklus zu sein, sie können aber durchaus auch Ambivalenzen, Gegentrends und Brüche aufweisen.

Beschreibbarkeit: Trends entfalten Wirkung in allen oder einigen Lebensbereichen, die qualitativ oder quantitativ beschrieben werden können.

Spezifische Relevanz: Trends erhalten Bedeutung durch ihre Relevanz für ein natürliches oder gesellschaftliches System anhand der Betrachtung eines konkreten Themas oder einer Fragestellung.

Wechselwirkungen: Gegenläufige Trends beeinflussen sich gegenseitig verstärkend oder abschwächend.

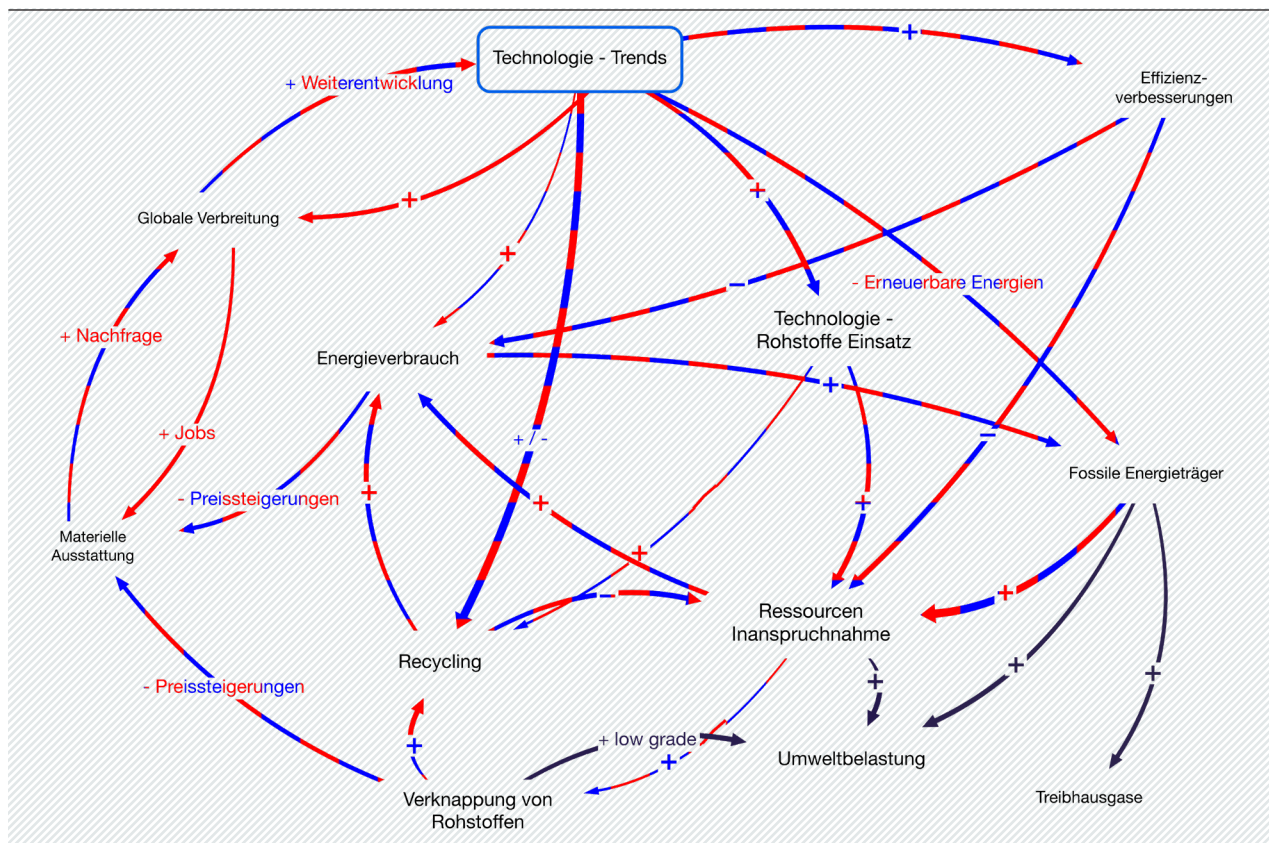
Die folgende Abbildung gibt einen Überblick darüber, wie bezogen auf Technologietrends im Allgemeinen der Nexus Klimaschutz und Ressourcenschonung als System dargestellt werden kann. Das qualitative Ursache-Wirkungsmodell zeigt generelle Faktoren und deren erhöhende (+) oder mindernde (-) Wirkung. Die Wirkungen können anhand der Pfeildicken unterschieden werden und ein zusätzliches Symbol auf den Pfeilen kann etwaig eine zu- oder abnehmende Wirkung im Zeitverlauf darstellen, wie beispielsweise die zunehmende Verknappung von einigen Rohstoffen durch die Ressourceninanspruchnahme. Technologietrends können über eine globale Verbreitung über so genannte selbstverstärkende Wirkungsschleifen zu technologischen Weiterentwicklungen einerseits, und über wirtschaftliche Aktivität, Skaleneffekte und Produktivitätssteigerungen zum Anstieg der materieller Ausstattung als Teil von gesellschaftlichem Wohlstand andererseits führen. In

ausgleichenden Wirkungsschleifen wird deutlich, wie jede Technologie Energie braucht und damit kostet, gleichzeitig aber viele dieser Entwicklungen zu Effizienzverbesserungen, sowohl im Energieverbrauch als auch bei der Ressourceninanspruchnahme führen können. Andererseits werden mit jedem Gerät auch Rohstoffe gebunden. Die Anlagen bzw. Geräte lassen sich am Ende ihrer Lebenszeit dann unterschiedlich gut oder schlecht recyceln. Je nach Rohstoff sind mit dem Abbau der Primärrohstoffe Umweltbelastungen und mit dem Recycling Energiebedarfe verbunden.

Der so vereinfachte Nexus beschreibt bereits 26 selbstverstärkende und ausgleichende Wirkungsschleifen, die einen ersten Überblick über die hohe Komplexität und die sich überlagernden selbstverstärkenden und ambivalenten Effekte des Sachverhalts geben.

Abbildung 1

Ursache-Wirkungsmodell zum Nexus aus Technologietrends, Rohstoffen und Treibhausgasen



Quelle: Screenshot aus dem Modell, eigene Darstellung

3 Technologietrends - Profile

In den folgenden Abschnitten werden zehn Technologietrends näher vorgestellt, die auf Grundlage der systemischen Trendanalyse als besonders relevant für den Nexus Klima und Ressourcennutzung identifiziert wurden.

Hierbei standen folgende Fragen im Zentrum:

- ▶ Hat der Trend direkte oder indirekte Auswirkungen auf die Entnahme von Rohstoffen?
- ▶ Sind konkrete Rohstoffe besonders relevant (z. B. Metalle, biotische Rohstoffe)?
- ▶ Gibt es Rohstoffe, die zur Herstellung eines bestimmten Vorproduktes benötigt werden (z. B. Chemikalien in der Industrie, die nicht direkt erkennbar sind, wenn das Produkt betrachtet wird)?
- ▶ Wie ist die grundsätzliche Klima- und Ressourcenwirkung der Trends und der Wechselwirkungen?

Technologietrends dieser Broschüre

Trends der Biotechnologie

- 1 Rohstoffwandel in der Chemieindustrie - am Beispiel von Biokunststoffen
- 2 „Carbon Recycling“ - Kohlendioxid als Baustein für Produkte
- 3 Nutzung der Biotechnologie am Beispiel von Agrarkraftstoffen

Trends der Bau- und Werkstoffe und Konstruktion

- 4 Leichtbau- und Nachhaltigkeit durch Konzeptleichtbau und neue Verbundwerkstoffe
- 5 Das Lernen von der Natur - Umwelt- und Ressourcenentlastungseffekte durch Bionik

Trends der Recyclingindustrie

- 6 Sortier- und Trenntechniken in der Recyclingindustrie
- 7 Urban Mining - die Stadt als Rohstoffmine für Baustoffe

Trends der Prozesstechnik

- 8 „Green“ Photonics als Wachstumsmarkt
- 9 Automatisierung und Robotik
- 10 „The Internet of Things“ als Baustein für die Industrie 4.0

2 | Dazu wurden Fachliteratur ausgewertet sowie ExpertInnengespräche geführt.

Trend 1

Rohstoffwandel in der Chemieindustrie - am Beispiel von Biokunststoffen

Entwicklung

Biobasierte Biokunststoffe, wie z. B. Polyethylen oder Polymilchsäure, bestehen zu einem wesentlichen Anteil oder ausschließlich aus nachwachsenden statt aus fossilen Rohstoffen. Die Entwicklung von Biokunststoffen ist neben den Bioverbundwerkstoffen oder Bioschmierstoffen als Hilfs- und Betriebsstoffe (Hydrauliköl, Getriebeöl) in der industriellen Produktion oder von Grund- und Plattformchemikalien, ein Kernbereich des Rohstoffwandels in der Chemieindustrie (Behrendt 2017; Saulich 2016: 12). Die zunehmende Nutzung von Biokunststoffen soll so den Bedarf an fossilen Rohstoffen verringern und die Umstellung der Ökonomie auf die Nutzung biobasierter Rohstoffe (Bioökonomie) voranbringen.

Anwendungsgebiete von Biokunststoffen sind Verpackungen (hier biobasiert je 47 % und 21 %), darunter Flaschen, Folien und Plastikbeutel, gefolgt von Textilien (11 %), Konsumartikel (7 %), Landwirtschaft und Gartenbau (6 %), Automobile und Transport (5,5 %), Gebäude und Mobiliar (1,2 %), Elektrik und Elektronik (0,4 %) und andere (0,4 %) (Saulich 2016: 27). Einschätzungen gehen davon aus, dass theoretisch bis zu 90 % der Anwendungen von Kunststoff mit biobasierten Materialien ersetzt werden könnten (Thielen 2016: 53).

Der globale Kunststoffmarkt insgesamt weist mit jährlich ca. 3 % (Yellishetty et al. 2016) bis 8 % (Geyer et al. 2017; Wilts et al. 2014: 16) hohe Wachstumsraten auf. Die Wachstumsrate im Verpackungs- und Gebrauchsbereich, dem größten Bereich, liegt bei 4 - 6 %. Der Markt für konventionelle Kunststoffe wächst

ebenso wie der für biobasierte Kunststoffe. Dabei stellen letztere immer noch ein Nischenprodukt dar. Derzeit besitzen Biokunststoffe lediglich einen Anteil von 0,5 % - 2 % am gesamten Kunststoffmarkt (Saulich 2016: 25). Insgesamt wird den Produktionskapazitäten für Biokunststoffe aber ein Wachstum prognostiziert, von 4,2 Mio. t im Jahr 2016 auf 6,1 Mio. t bis 2021. Marktschätzungen gehen von einer Steigerung des Anteils biobasierter Produkte im gesamten Chemiemarkt von derzeit 1 % bis 5 % auf 20 % bis 50 % in den Jahren 2025 bis 2030 aus (Zweck et al. 2015: 18). Das größte Wachstumspotenzial wird bei den dauerhaften Biokunststoffen (also nicht-abbaubaren Biokunststoffen) gesehen. Sie machten 2016 den größten Anteil mit ungefähr 77 % aus. Nur ca. 23 % stellen die biologisch abbaubaren Biokunststoffe dar (Aeschelmann und Carus 2017: 7).

Treiber

Besonders im Bereich der Verpackungen und Flaschen wirken verschiedene große Firmen durch die Umstellung auf Biokunststoffe als treibende Kräfte. Ein weiterer Anwendungsbereich ist der der konsumentennahen Produkte, wie Gehäuse von Elektronikgeräten, wo ein hoher Anreiz besteht, biobasierte Kunststoffe auch für „grünes Marketing“ zu nutzen. Im technischen Bereich entlang den Zuliefererketten dagegen zählen v.a. Preis und Performance des Materials und weniger die CO₂-Bilanz oder die Ressourcenschonung, weshalb hier weniger Biokunststoffe zum Einsatz kommen (ExpertInnenangaben).

Als starker bremsender Einflussfaktor für die flächendeckende Durchsetzung von Biokunststoffen wirkt der niedrige Ölpreis. Bis heute ist die Produktion biobasierter Kunststoffe teurer als die konventioneller Kunststoffe. Niedrige Preise für Erdöl ermöglichen der Chemieindustrie eine günstige fossile Rohstoffbasis. Chemiefirmen nutzen Erdöl zudem steuerbegünstigt, wenn sie daraus Chemikalien herstellen (Behrendt 2017). Bremsend für den deutschen Kontext wirken auch die zögerlichen Investitionen in dem Bereich der Bioraffinerien. Größenwirksame Kooperationen zwischen chemie- und biomasseverarbeitender Industrie, wie insbesondere in Frankreich oder den USA üblich,



wo ein Joint Venture zwischen Agrar- und Chemieindustrie die Polymilchsäure entwickelt hat, stehen in Deutschland größtenteils noch aus (ExpertInnenangaben).

Wirksame Treiber für einen höheren Anteil biobasierter Kunststoffe wären politische Maßnahmen auf der Nachfrageseite, etwa nach dem Vorbild des „biopreferred program“ in den USA. Währenddessen orientiert sich die Beschaffung in Deutschland noch vornehmlich am Preis. Solche gezielten Programme zur Nutzung biobasierter Produkte stimulieren die Nachfrage und Produktionskapazitäten, welche wiederum Preisreduktionen und Qualitätsverbesserung nach sich ziehen (ExpertInnenangaben). Auch die Einführung von Subventionen für die stoffliche Nutzung von Biomasse vergleichbar derer für Agrarkraftstoffe, oder auch eine weltweite und signifikante Steuer auf fossile Rohstoffe und damit eine Preissteigerung bei den konventionellen Kunststoffen, könnten als Treiber wirken. Insgesamt präferieren Förderinstrumente der EU und auf nationaler Ebene die energetische Nutzung von Biomasse (ExpertInnenangaben). Trotz politischem Vorrang und trotz existierender Forschungs- und Entwicklungsförderung stagniert die stoffliche Nutzung, während die energetische Nutzung von Biomasse expandiert (Behrendt 2017).

Relevanz für Klimaschutz und Ressourcenschonung

Durch die Nutzung von Biokunststoffen kann sich die Inanspruchnahme von fossilen Rohstoffen reduzieren und langfristig könnten die fossilen Rohstoffe ersetzt werden. Bei der Verbrennung der Produkte am Lebensende entstehen im Wesentlichen nur CO₂-Emissionen, die zu Beginn von der Pflanze gebunden wurden (CO₂-Neutralität). Wenn also fossile Rohstoffe substituiert werden, kann das zu einer Verringerung der Netto-Emissionen führen. Bei Betrachtung und Bilanzierung des gesamten Lebenswegs inklusive aller Vorketten hat dies jedoch nicht zwingend eine Verbesserung anderer Umweltwirkungen zur Folge, etwa wenn sich der Pestizideinsatz durch die Produktion erhöht und der Flächenverbrauch ansteigt (Saulich 2016: 31). Denn ein erhebliches Problem stellt die Verfügbarkeit der Biomasse dar. Schon heute werden ca. 65 % der in Deutschland stofflich und energetisch eingesetzten nachwachsenden Rohstoffe importiert (Schiller et al. 2016: 11). Allein in der Chemieindustrie werden 2/3 der nachwachsenden Rohstoffe impor-

tiert, ein Großteil des Polylactid (PLA) kommt aus den USA, Brasilien oder Asien. Dort wirkt sich der Landnutzungswandel negativ auf die Öko- und Umweltbilanzierung aus, wenn Flächen in die intensive landwirtschaftliche Nutzung genommen werden, durch u.a. erhöhte Nährstoffeinträge und versauerte Böden. Steigt der Bedarf nach Biomasse im Rahmen der auch weltweit forcierten Umstellung auf biobasierte Produkte können sich zudem bestehende Flächennutzungskonflikte weiter verschärfen bzw. neue Flächennutzungskonflikte hinzukommen. Entsprechend wird insbesondere auch von Seiten der Nichtregierungsorganisationen Kritik an der Bioökonomie formuliert (Zivilgesellschaftliches Aktionsforum Bioökonomie

„Die Chemieindustrie ist preissensibel, wenn der Ölpreis steigt, wächst sicherlich auch der Anteil biobasierter Materialien.“

Dr.-Ing. Stephan Kabasci, Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik Oberhausen, VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. Düsseldorf - Fachbereich Biotechnologie

2019). Allerdings ist der Anteil an der Fläche, die für die stoffliche Nutzung von Biomasse benötigt wird, insgesamt eher gering im Vergleich zu der Fläche, die etwa für die Textilindustrie (Baumwolle), den Anbau von Futtermitteln für die Fleischindustrie oder auch für die Produktion von Agrarkraftstoffen in Anspruch genommen wird (ExpertInnenangaben). Die benötigte Fläche, die für die jährliche Produktion von Biokunststoffen prognostiziert wird, entspricht ungefähr 0,02 % der 5 Mrd. ha der insgesamt landwirtschaftlich genutzten Fläche (Zahl für 2016; Thielen 2016: 53). Dennoch gilt: Auch wenn der Anteil gering ist, addiert er sich zu allen anderen Faktoren, die die Ressourcen Fläche und Biomasse beanspruchen, was Nutzungskonkurrenzen verstärken kann. Eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Antwort darauf ist die Kaskadennutzung bei der Verwertung von Biomasse, also die sequentielle Nutzung für stoffliche und energetische Anwendungen. Allerdings hat auch die Kaskadennutzung, im Unterschied zu einer Kreislaufwirtschaft, wo Kreisläufe weitestgehend geschlossen werden, natürliche Systemgrenzen. Eine weitere Möglichkeit den Druck auf die Flächen zu verringern, ist der verstärkte Einsatz von Reststoffen aus der Landwirtschaft (z. B. Weizenstroh, Kartoffelabfälle oder faserige Rückstände aus der Zuckerpro-

duktion) für biobasierte Kunststoffe (Fehrenbach et al. 2017). Eine solche Nutzung steht aber teilweise in Konkurrenz zum Erhalt des Humusgehalts im Boden. Grundsätzlich sinnvoll wäre eine regulative Nachhaltigkeitsverordnung bzw. Zertifizierungssystematik für stofflich genutzte Biomasse, wie sie für die energetische Nutzung flüssiger und gasförmiger Biomasse auf europäischer und deutscher Ebene existiert; diese steht bisher noch aus.

Wirkungszusammenhänge

Wechselwirkungen bestehen mit Entwicklungen in der Recyclingwirtschaft. Durch neue Trenn- und Sortiertechniken können zahlreiche Kunststoffe, auch Biokunststoffe, theoretisch erkannt und Wiederverwertungsprozessen zugeführt werden. Praktisch jedoch stellen die Vielzahl der unterschiedlichen Biokunststoffe sowie die geringen Absatzmengen am Markt Hürden für die Anwendung und Weiterentwicklung von Recyclingverfahren dar, obwohl sie technisch realisierbar sind. Unternehmen sind zwar zunehmend z. B. an innovativen Biokunststoffen wie

Aeschelmann, Florence; Carus, Michael (2017): Bio-based Building Blocks and Polymers. Global Capacities and Trends 2016 - 2021. Hg. v. Nova Institut European Bioplastics. Hürth.

Behrendt, Siegfried (2017): Feedstock Change in der Chemieindustrie. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Arbeitspapier im Rahmen des Projekts Evolution2Green. IZT. Berlin.

Fehrenbach, Horst; Köppen, Susanne; Kauertz, Benedikt; Detzel, Andreas; Wellenreuther, Frank; Breitmayer, Elke et al. (2017): Biomassekaskaden. Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse - von der Theorie zur Praxis. Hg. v. UBA. Dessau-Roßlau.

Geyer, Roland; Jambeck, Jenna R.; Law, Kara Lavender (2017): Production, use, and fate of all plastics ever made. Supplementary Materials. In: Sci. Adv. 3 (7), S. e1700782.

Saulich, Katja (2016): Ressourceneffizienz biobasierter Materialien. VDI ZRE Publikationen. Kurzanalyse Nr. 15. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE). Berlin.

Schiller, Johannes; Aicher, Christoph; Feresin, Emiliano (2016): Weiße Biotechnologie Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie: Umwelt- und Nachhaltigkeitspotenziale. Innovationsanalyse Teil II. Unter Mitarbeit von Bernd Klauer, Bernd Hansjürgens, Arnold Sauter. Hg. v. TAB Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin.

Polylactid interessiert, aber das Rezyklieren lohnt sich wirtschaftlich noch kaum (Fehrenbach et al. 2017: 57). Die thermische Verwertung am Ende der Kaskadennutzung kann das Recyclingaufkommen verringern.

Weitere Wechselwirkungen bestehen mit Entwicklungen im Leichtbau. Aufgrund der dort zunehmenden Verwendung von neuen Verbundwerkstoffen - sowohl biobasiert als auch fossilen Ursprungs - in der technischen Konstruktion kann der Bedarf an Biokunststoffen weiter zunehmen.

Ökonomische Effekte können sich auch durch andere technologische Entwicklungen ergeben, die auf Kohlenstoffquellen angewiesen sind wie etwa fortschrittliche Agrarkraftstoffe, wenn sie ambivalent um dieselbe Rohstoffbasis konkurrieren einerseits, oder wenn sie synergetisch Bio-Raffinerien gemeinsam nutzen andererseits.

Quellen

Thielen, Michael (2016): Biokunststoffe - Pflanzen, Rohstoffe, Produkte. Hg. v. Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Gülzow-Prüzen.

Umweltbundesamt (Hg.) (2015): Alternative Kraftstoffe. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/kraft-betriebsstoffe/alternative-kraftstoffe#text-part-3>, zuletzt aktualisiert am 09.04.2015, zuletzt geprüft am 23.03.2017.

United States Department of Agriculture – USDA (Hg.) (2002): What is BioPreferred? Online verfügbar: <https://www.biopreferred.gov/BioPreferred/faces/pages/AboutBioPreferred.xhtml>, zuletzt geprüft am 23.03.2018.

Wilts, Henning; Lucas, Rainer; Gries, Nadja von; Zirngiebl, Marthe (2014): Recycling in Deutschland - Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze. Wuppertal: Wuppertal Institut.

Yellishetty, Mohan; Mudd, Gavin M.; Ranjith, P. G.; Tharumaraja, A. (2016): Plastics - the facts 2016. An analysis of European plastics production, demand and waste data. Hg. v. Plastics Europe. Brüssel.

Zweck, Axel; Holtmannspötter, Dirk; Braun, Matthias; Cuhls, Kerstin; Hirt, Michael; Kimpeler, Simone (2015): Forschungs- und Technologieperspektiven 2030. Ergebnisband 2 zur Suchphase von BMBF- Foresight Zyklus II. Hg. v. VDI. Düsseldorf.

Trend 2

Carbon Recycling - Kohlendioxid als Baustein für Produkte

Entwicklung

Das Ziel von Kohlenstoffrecycling besteht darin, Kohlenstoffdioxid, das als Treibhausgas zum anthropogenen Klimawandel beiträgt, abzuscheiden und als Rohstoff zu nutzen. Analog zum natürlichen Prinzip und wie bei der Photosynthese von Pflanzen soll CO₂ in einen Kreislauf überführt werden, um direkt oder nach chemischer Umwandlung als Kohlenstoffquelle für neue Anwendungen zu dienen. Nutzungsformen sind physikalischer Art (z. B. als Kohlensäure in Getränken), stofflich (z. B. für Kunst- und Baustoffe und als Energieträger) oder auch für Kraftstoffe im Rahmen von Power-to-Liquid (PtL) oder Power-to-Gas (PtG) (Piria et al. 2016).

„Zu berücksichtigen ist bei den verschiedenen CCR-Optionen, wo und wie das abgeschiedene C weiterverwendet wird. Bei einer Nutzung als Kraftstoff würde der schädliche Eintrag in die Natur nur minimal verzögert (mehrere Monate), während das C für die Herstellung von Kunststoff deutlich länger gebunden wäre (mehrere Jahre). Von einer dauerhaften Speicherung des C kann in den meisten Fällen nicht ausgegangen werden.“

Dr.-Ing. Thomas Fröhlich, Projektleiter am ifeu
Institut für Energie und Umweltforschung,
Heidelberg

Um CO₂ nutzbar zu machen, muss es eingangs durch entsprechende Abscheidungstechnologien eingefangen werden. Es gibt mehrere Quellen, die für die Abscheidung in Betracht kommen. Als Quellen kommen theoretisch sogenannte Punktquellen, also industrielle Anlagen (z. B. Stahlwerk) oder Kraftwerke (z. B. Kohlekraftwerk) in Betracht, die in ihren Rauchgasen hohe CO₂-Konzentrationen aufweisen. CO₂ an fossilen Kraftwerken abzuscheiden muss jedoch kritisch gesehen werden. Der Wirkungsgrad des Kraftwerks verringert sich erheblich und es gibt keinen Entlastungseffekt für das Klima. Auch die Atmosphäre kann als CO₂-Quelle dienen. Dafür finden auf biologischem Weg Algen und auf technischem Weg z. B. künstliche

Bäume oder spezielle Filteranlagen Verwendung. Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit ist dieser Weg der CO₂-Nutzung zwar noch schwer umsetzbar, aber es gibt bereits verschiedene Pilotprojekte, die versuchen diesen Weg der CO₂-Abscheidung zu kommerzialisieren (Olfe-Kraeutlein et al. 2016; Piria et al. 2016).

Es ist bereits heute theoretisch möglich aus Punktquellen große Mengen von CO₂ in verschiedenen Reinheitsgraden zugänglich zu machen. Die geringe Nachfrage nach CO₂ als Rohstoff behindert bislang jedoch die weitere Verbreitung der Technologien, die zudem noch sehr kosten- und energieintensiv ist (Piria et al. 2016; Olfe-Kraeutlein et al. 2016).

Treiber

Als Treiber für die Nutzung von CO₂ kann die zunehmende Umstellung auf biobasierte Rohstoffe z. B. in der Chemieindustrie (→ Biokunststoffe) im Rahmen der Bioökonomie wirken, die langfristig zu einer wachsenden Nachfrage nach Kohlenstoffquellen führt, die nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen. Hinzu kommen Bestrebungen nach Unabhängigkeit von Rohstoffimporten. Schon heute importiert Deutschland ungefähr 65 % der stofflich (10 %) und energetisch (90 %) genutzten Biomasse (Bringezu 2014; Schiller et al. 2016: 11; Fehrenbach et al. 2017: 7).

Unternehmen wie Covestro (Deutschland), ECONIC Technologies (Großbritannien) oder Novomer (USA) wenden bereits auf industrieller Ebene Kohlenstoffrecycling-Technologien an und produzieren Kunststoffe, entwickeln Katalysatoren oder verkaufen ganze Anlagen. Das deutsche Unternehmen Covestro hat 2016 eine Produktionsstraße errichtet, die es ermöglicht pro Jahr 5.000 t Polyole aus 1.000 t CO₂ zu produzieren. Polyol ist einer von zwei Grundstoffen für die Produktion von Polyurethan. Polyurethan wird europaweit sehr stark nachgefragt und lässt sich zu allen Kunststoffgruppen (Duroplaste, Thermoplaste und Elastomer) und auch zu Schaum verarbeiten. Covestro produziert und verwendet Polyurethan-Schaum zunächst zur Produktion von Matratzen. Denkbar und bereits möglich ist aber auch die Verwendung als Dämmstoff im Bausektor, in der

Textilindustrie oder als Gehäuse von Konsumgütern (Olfe-Kraeutlein et al. 2016; ExpertInnenangaben).

Ein Hemmnis für die Entwicklung von Kohlenstoffrecycling -Technologien ist der enorme Energiebedarf. Demnach hängt der Erfolg der Technologie wesentlich vom Strompreis ab. Um dem entgegenzuwirken, gibt es bereits die Idee, die Schwankungen im Stromangebot auszunutzen und nur dann zu produzieren, wenn Strom für einen niedrigen Preis oder ggf. sogar kostenfrei (für Großabnehmer) zu haben ist (ExpertInnenangaben).

Perspektivisch könnte zudem der Preis für CO₂-Zertifikate so steigen, dass sich die Nutzung der Kohlenstoffrecycling -Technologien seitens der Betreiber der Punktquellen ökonomisch lohnt. Auch könnte die Nachfrage etwa nach synthetischen, nachhaltigen Kraftstoffen für Fahrzeuge steigen und die Mehrkosten tragen.

Mittel- bis langfristig ebenfalls relevant dürfte der Ausblick sein, viele oder sogar alle Punktquellen für CO₂ aus fossiler Energieerzeugung durch erneuerbare Energien ersetzt zu haben. Demgegenüber steht das Szenario, dass die Kohlenstoffrecycling -Technologien solche Anlagen ‚reinwaschen‘ und deren Laufzeit oder sogar Neubau rechtfertigen. Ansonsten bliebe langfristig nur die thermische Verwertung von Abfällen, insbesondere Kunststoffen, in Müllverbrennungsanlagen als letzte Stufe einer Kaskadennutzung als Kohlenstoffquelle. Denkbar ist langfristig aber auch hier, dass selbst diese Punktquelle für CO₂ wegfällt, etwa wenn Kunststoffen durch ein Downcycling für Straßenbelägen und Mauerwerken genutzt werden (Attanasio et al. (2018)

Relevanz für Klimaschutz und Ressourcenschonung

In der Gesamtschau bleibt festzustellen, dass der Einsatz von Kohlenstoffrecycling -Technologien nicht zu einer effektiven Reduktion der Treibhausgasemissionen führt. Schätzungen gehen davon aus, dass beim Kohlenstoffrecycling höchstens 6 % der anthropogenen CO₂-Emissionen für eine Nutzung in Frage kommen. Das entspricht 2,22 Mrd. t des jährlich emittierten CO₂ (37 Gt), die hauptsächlich für Kraftstoffe und in geringerem Anteil für Chemikalien genutzt werden könnten (Olfe-Kraeutlein et al. 2016: 8). Demnach sind die Potenziale sehr begrenzt und vor allen Dingen abhängig von der für den Prozess

aufzubringenden Energie. Der Energieeinsatz ist so hoch, dass die Nutzung von CO₂ als Kohlenstoffquelle für Rohstoffe in der chemischen Industrie nur dann klimatechnisch sinnvoll sein kann, wenn die Energie für den Prozess aus regenerativen Energien gewonnen wird. Aber auch hier sind wieder Folgeeffekte auf die Rohstoffinanspruchnahme durch den Ausbau von Erneuerbaren Energieanlagen zu berücksichtigen. Hinzukommt, dass die Effizienz eines Kraftwerks deutlich (um ungefähr 11 %) zurückgeht, wenn es mit einer Anlage zur Abscheidung (Aminwäsche) ausgerüstet wird (Olfe-Kraeutlein et al. 2016: 16). Bei Kohlenstoffrecycling handelt sich also weniger um eine Methode zur Reduktion der Treibhausgasemissionen als vielmehr um den Versuch, einen Wertschöpfungsprozess im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu schließen und die Rohstoffbasis zu erweitern (Styring und Jansen 2011).

Je nach Abscheidungsverfahren und der daran beteiligten Stoffe können unabhängig vom CO₂ auch andere Luftschadstoffe, krebserregende Substanzen, bodennahes Ozon und sekundäre Aerosole freigesetzt werden. Dies ist etwa bei der Aminwäsche der Fall, einem bereits etablierten Verfahren zur Abscheidung von CO₂ aus Gaskraftwerken, Ölraffinerien oder bei der Aluminiumproduktion. Außerdem bestehen Risiken beim Umgang und der Entsorgung der Aminlösung, die als Abfallprodukt anfällt (Olfe-Kraeutlein et al. 2016: 16 ff).

Zudem steht die Anwendung an Kohlekraftwerken ebenso wie Carbon Capture and Storage in der Kritik, indirekt zur „Lebensverlängerung“ fossiler Industrie beizutragen. Kraftwerksbetreibern wird demnach ein Argument geliefert, mit dem sie legitimieren können ihre Kraftwerke weiter zu betreiben, um die CO₂-Abscheidung praktizieren zu können. Neben den großen Emittenten der fossilen Industrie (Kohlekraftwerke), gibt es noch andere Industriebereiche, wie Eisen- und Stahlproduktion, Zementherstellung oder Raffinerien, die (wenn auch in geringerem Umfang) CO₂ emittieren und als Punktquellen für die Kohlenstoffrecycling dienen können (Olfe-Kraeutlein et al. 2016: 15, 84).

Da es sich bei vielen Anwendungen lediglich um eine temporäre Speicherung des CO₂ handelt (wie bei Kraftstoffen nur wenige Tage), empfehlen ExpertInnen sich auf die Herstellung von dauerhaften Produkten mit Senkenfunktion zu konzentrieren (also etwa auf Kunststoffe mit bis zu mehreren Jahren

oder Jahrzehnten Lebensdauer). Der wichtigste Fokus sollte aber auf der Vermeidung von CO₂-Emissionen an der Quelle liegen (ExpertInnenangaben).

Wirkungszusammenhänge

Im Zuge der Entwicklung der Bioökonomie wird der Bedarf an Kohlenstoff als Rohstoffquelle deutlich ansteigen. Allein die chemische Industrie verarbeitete im Jahr 2015 ca. 20 Mio. t Kohlenstoff (in Form von Naphtha, nachwachsenden Rohstoffen, Erdgas und Kohle).

Quellen

Attanasio, Agnese; Alessandro Largo; Raffaele Vinai; Marios Soutsos; Jeanette Visser; René van Gijlswijk; Chrysanthi Panagiotopoulou; Maria Taxiarchou; Francesco Sonzogni; Marco Preda; Massimo Pugliese (2018): Towards Greener Concrete: The Challenges of SUS-CON Project. In: Hordijk D., Luković M. (eds) High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet. Springer, 2373-2381.

Bringezu, Stefan (2014): Carbon Recycling for Renewable Materials and Energy Supply. Recent Trends, Long-Term Options, and Challenges for Research and Development, in: Journal of Industrial Ecology 18/3, 327-340.

Fehrenbach, Horst; Köppen, Susanne; Kauertz, Benedikt; Detzel, Andreas; Wellenreuther, Frank; Breitmayer, Elke et al. (2017): Biomassekaskaden. Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse - von der Theorie zur Praxis. Hg. v. UBA. Dessau-Roßlau.

Sollte die Entwicklung im Bereich des → Leichtbaus entsprechend voran schreiten, dürfte auch mit jenem Trend die Nachfrage nach Kohlenstoff weiter steigen.

Je nach Ausrichtung von Kohlenstoffrecycling könnte es womöglich zu technischen bzw. prozessorientierten oder auch regulativen Synergieeffekten mit → Urban Mining sowie mit → Sortier- und Trenntechniken kommen.

Olfe-Kraeutlein, Barbara; Naims, Henriette; Bruhn, Thomas; Lorente Lafuente, Ana Maria (2016): CO₂ als Wertstoff. Herausforderungen und Potenziale für die Gesellschaft. IASS Study. Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS). Potsdam.

Piria, Raffaella; Naims, Henriette; Dr. Lorente Lafuente, Ana Maria (2016): Carbon Capture and Utilization (CCU). Klimapolitische Einordnung und innovationspolitische Bewertung. Hg. v. adelphi. Berlin.

Schiller, Johannes; Aicher, Christoph; Feresin, Emiliano (2016): Weiße Biotechnologie Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie: Umwelt- und Nachhaltigkeitspotenziale. Innovationsanalyse Teil II. Unter Mitarbeit von Bernd Klauer, Bernd Hansjürgens, Arnold Sauter. Hg. vom TAB Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin.

Styring, Peter; Jansen, Daan (2011): Carbon Capture and Utilization in the Green Economy. Using CO₂ to manufacture fuel, chemicals and materials. The Centre for Low Carbon Futures 2050. York.



Trend 3

Nutzung der Biotechnologie am Beispiel von Agrarkraftstoffen

Entwicklung

Kraftstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe (auch Bio- oder Agrarkraftstoffe) sind hinsichtlich der produzierten Menge ein wichtiges Produkt der industriellen Biotechnologie. Vor allem die Agrarkraftstoffe der ersten Generation (auf Basis von Pflanzenöl hergestellter Biodiesel oder Bioethanol auf der Basis von Zucker- und Stärkepflanzen) aus Brasilien oder den USA dominieren den globalen Agrarkraftstoffmarkt (Aichinger et al. 2016). In Deutschland wird etwa Biodiesel an über 30 Produktionsstandorten gewonnen (BMBF 2015). Agrarkraftstoffe der ersten Generation sind jedoch in den letzten Jahren deutlich in die Kritik geraten, Flächennutzungskonflikte und Umweltschäden aufgrund des umweltschädlichen monokulturellen Anbaus zu verschärfen. Die Nutzung fruchtbaren Bodens zum Anbau von Energiepflanzen für die Kraftstoffproduktion statt für Nahrungsmittel (Tank vs. Teller - Konflikt) hatte in einigen Ländern zudem zu deutlichen Preissteigerungen bei Grundnahrungsmitteln (Mais) und für heftige Proteste gesorgt („Tortilla-Krise in Mexiko“).



Neuere Generationen von Agrarkraftstoffen sollen nun diese Konflikte entschärfen. Eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates in 2015 unterstreicht die Bedeutung von solchen „fortschrittlichen“ Agrarkraftstoffen (EU 2015). Dieser Terminus löst die Bezeichnungen Agrarkraftstoffe 2. und 3. Generation ab. Ihr Charakteristikum liegt darin, dass sie keine Konkurrenz zu Nahrungsmitteln darstellen, zu Treibhausgasemissionseinsparungen und zu Ressourcenschonung beitragen sollen und in vorhandenen Infrastrukturen genutzt werden können. Dabei han-

delt es sich um Kraftstoffe auf Basis von lignocellulosehaltigen Materialien, verschiedenen nicht-essbaren Pflanzen oder Rest- und Abfallstoffen wie Stroh, Holz und Abfallprodukten aus der Agrarwirtschaft. Außerdem können einige der Pflanzen auf Anbauflächen kultiviert werden, die nicht als Fläche für die Nahrungsmittelproduktion geeignet sind. Auch Mikroalgen können theoretisch zur Kraftstoffproduktion genutzt werden, denn sie wandeln das Sonnenlicht wesentlich effizienter in Biomasse um als Grünpflanzen (ExpertInnenangaben). Neben den Kraftstoffen aus Abfall- und Reststoffen zählen auch noch dazu: Strom für Elektroautos sowie die strombasierten, nicht-biogenen Kraftstoffe Methan und Wasserstoff.

Treiber

Derzeit werden verschiedene Verfahren erprobt und weiterentwickelt, um unterschiedlichste landwirtschaftliche Nebenprodukte und Reststoffe (u.a. Weizenstroh, Maisstroh, Bagasse oder Reisstroh) effizient umzuwandeln. Bisher ist der Produktionsmaßstab von fortschrittlichen Agrarkraftstoffen in den existierenden Pilotanlagen allerdings noch sehr gering. Für die Ausweitung der kommerziellen großtechnischen Umsetzung mit nennbaren Produktionsmengen von Kraftstoffen ist noch ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf notwendig (Schiller et al. 2016: 80 f.).

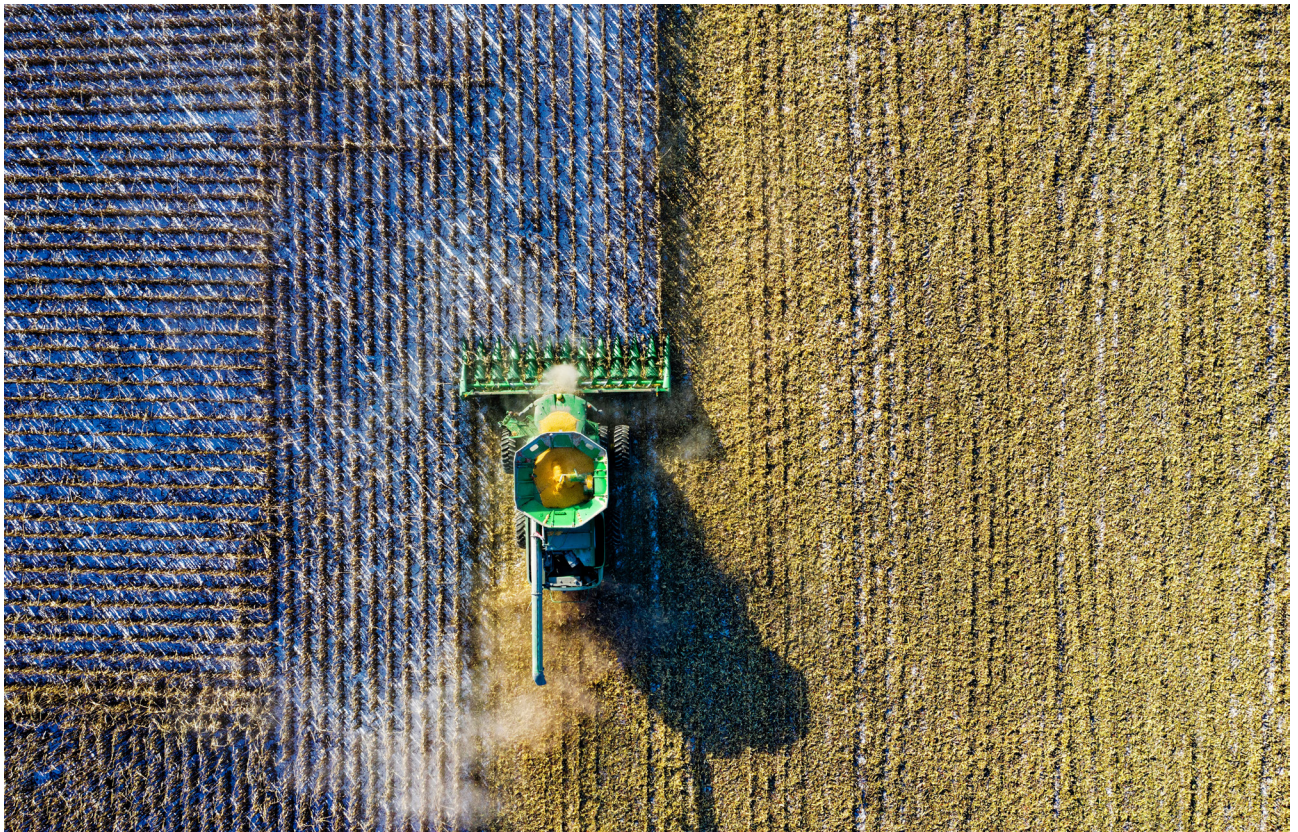
Das theoretisch-technische Potenzial dieser Kraftstoffe ist jedoch beachtlich: Eine internationale Studie kam zu dem Ergebnis, dass sich 16 % des Kraftstoffbedarfs lokal in der EU 27/28 mit Kraftstoff auf Basis von Rest- und Abfallstoffen decken ließe. Würden die Rohstoffe technisch voll ausgeschöpft, könnten jährlich bis 2030 300.000 zusätzliche Arbeitsplätze entstehen. Sofern sie nachhaltig produziert werden, könnten sie zudem zum Klimaschutz und zur lokalen Wertschöpfung beitragen (Malins et al. 2014). Die EU will die Treibhausgasemissionen im Kraftstoffsektor bis 2020 um sechs Prozent reduzieren und den Anteil erneuerbarer Energien im Verkehrssektor auf mindestens zehn Prozent steigern. Nach Biokraft-NachV wird den Kraftstoffherstellern ab Januar 2018 nicht mehr wie bisher durch das Biokraftstoffquotengesetz

(BioKraftQuG) ein Mindestanteil von Agrarkraftstoffen am gesamten Kraftstoffabsatz vorgeschrieben. Seit diesem Stichtag werden CO₂-Emissionsreduktionen von 50 % verlangt, die auch anders erbracht werden können, etwa durch komprimiertes Erdgas, biogenes Flüssiggas sowie strombasierte, nicht-biogene Kraftstoffe Methan und Wasserstoff (BMJV 2009) und schließlich die Elektromobilität. Für die Agrarkraftstoffe soll es ab 2020 eine Mindestquote geben, die laut Verordnung zunächst 0,05 Prozent beträgt und bis 2025 schrittweise auf 0,5 % steigen soll (38. BImSchV 2017). Nach Expertenmeinung ist diese Quote für eine wirkliche Transformation hin zu Agrarkraftstoffen im Kraftstoffbereich viel zu gering (ExpertInnenangaben).

Nach Ansicht von ExpertInnen fehlen hier, neben einem unterstützenden politischen und regulativen Umfeld, Investitionen, um die Produktion wirtschaftlich zu machen. Hemmnisse in der Entwicklung liegen noch in technologischen Herausforderungen bei der Verarbeitung von Lignocellulose, in den verhältnismäßig hohen Produktionskosten sowie der geringen Produktivität etwa bei der Herstellung von Celluloseethanol (Margeot et al. 2009: 372). Pilotanlagen wie in Straubing, wo die Firma Clariant bereits seit knapp 4 Jahren in einem Demonstrator auf Basis von Stroh bis zu 1000 Tonnen Ethanol pro Jahr für

Kraftstoffe und Konsumgüter (Reinigungsmittel) produziert, sind noch eher selten. Zudem sorgen der niedrige Ölpreis sowie die geringe Besteuerung von konventionellen Kraftstoffen wie Kerosin für relative wirtschaftliche Nachteile. Aktuelle politische Programme und Anreizinstrumente sind derzeit stärker auf die Förderung von Elektromobilität ausgerichtet und müssten neu justiert werden, um hier fördernd zu wirken (ExpertInnenangaben).

Mit Aufkommen des VW-Abgasskandals und anhaltender Luftbelastung in vielen deutschen Städten, wird jetzt zudem über entsprechend regulative Umsetzungen diskutiert und Einschränkungen für Verbrennungsmotoren in Zukunft immer wahrscheinlicher. Das könnte die Kraftstoffentwicklung zugunsten der Elektromobilität weiter ausbremsen. Selbst BranchenvertreterInnen sehen fortschrittliche Kraftstoffe eher als Teil der Lösung, die auf Kombination statt auf Konkurrenz von Technologien setzt. Dabei ergänzen sich dann innerstädtische E-Mobilität und Verbrennungsmotoren auf Basis von fortschrittlichen Agrarkraftstoffen für den Langstrecken- und Gütertransport. Aufgrund der erforderlichen Kraftstoffqualitäten und der heute diskutierten Bedarfe werden fortschrittliche Agrarkraftstoffe vor allem für den LKW-Fernverkehr als relevant betrachtet, schon allein da hier eine Elektrifizierung unwahrscheinlich



ist. Sowohl beim Flugverkehr als auch bei der Schifffahrt gibt es alternative und einfachere Möglichkeiten der Kraftstoffsubstitution (ExpertInnenangaben).

Relevanz für Klimaschutz und Ressourcenschonung

Bei der Verbrennung von Kraftstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe wird nur das vorher durch die Pflanze gebundene CO₂ freigesetzt. Jedoch sind Agrarkraftstoffe deshalb nicht zu 100 % klimaneutral. Die Ressourceneffizienz, Klimawirkung und Umweltbilanz von biobasierten Kraftstoffen müssen vielmehr entlang des gesamten Lebenszyklus betrachtet werden. Es fallen Emissionen in den Vorketten an, also solche, die beim Anbau, Transport und Verarbeitung der Biomasse entstehen. Die Emissionen hängen von der verwendeten Ausgangsbiomasse und den Produktionsbedingungen ab. So werden bei der Verbrennung von Biodiesel aus Raps ungefähr 48 % Treibhausgase gegenüber fossilen Kraftstoffen eingespart. Wird der Biodiesel jedoch aus Abfällen produziert, können 86 % Treibhausgase eingespart werden, bei der Verbrennung von Ethanol aus Weizenstroh lassen sich sogar 88 % einsparen (FNR 2014: 6 ff). Bei einigen Agrarkraftstoffen, wie etwa auf Basis von Palmöl, ist die Ökobilanz aufgrund von intensiven Landnutzungsänderungen (v.a. Waldrodungen für Plantagen) sehr

schlecht: hier liegen die Kohlendioxid-Einsparung aufgrund nicht-nachhaltiger Produktionsbedingungen und langen Transportwegen nur bei etwa einem Drittel (31 %) (FNR 2014: 7).

Zur Gewährleistung der Nachhaltigkeit wurden bereits vor einigen Jahren über die Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 und die deutsche Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (BMJV 2009) Kriterien und Standards eingeführt und damit verbindliche Ziele und Standards für flüssige und gasförmige Biomassenutzung formuliert. Demnach müssen die in Verkehr gebrachten Agrarkraftstoffe nachweislich die Nachhaltigkeitskriterien während ihres gesamten Herstellungsprozesses erfüllen und ab dem Jahr 2017 mind. 50 % Treibhausgasemissions-Reduktionen gegenüber konventionellen Kraftstoffen erreichen. Einige fortschrittliche Agrarkraftstoffe schneiden in den Ökobilanzierungen bei vielen Umweltwirkungskategorien besser ab als Agrarkraftstoffe der ersten Generationen, sofern die verwendeten Abfälle und Reststoffe aus nachhaltiger Produktion stammen (Schiller et al. 2016: 81). Dann können die Treibhausgas-Einsparungen auf den Lebenszyklus gerechnet sogar bei 60 % liegen (Malins et al. 2014: 4).



Optimistische Stimmen versprechen sich von den fortschrittlichen Agrarkraftstoffen zudem Potenziale für die Luftreinhaltung, da neue Kraftstoffe neue Spielräume bei der Optimierung der Verbrennungsmotoren ermöglichen würden. Verglichen mit den Möglichkeiten Biomasse in Kraft-Wärme-Kopplung stationär zu verstromen, ist die Verwendung von Biomasse als Kraftstoff jedoch weiterhin die ineffizienteste Nutzungsoption (UBA 2015; Schiller et al. 2016: 80 f.). ExpertInnen sind zudem skeptisch, dass bei fortschrittlichen Agrarkraftstoffen tatsächlich weniger Flächennutzungskonflikte und Nutzungskonkurrenzen entstehen als bei den Agrarkraftstoffen der ersten Generation (ExpertInnenangaben).

Wenig diskutiert ist zudem der Umstand, dass Reststoffe vom Acker und auch Gärreste zwar in Teilen ohne etwaige Fermentation physikalisch zersetzt zu CO₂ würden, aber zum Teil eben auch zum Humusaufbau und zur dauerhaften Speicherung von Kohlenstoff in Böden führen würde. Könnten die Kraftstoffe durch anderweitig sinnvolle erneuerbare

Energiequellen ersetzt werden, wäre ein Verbleib auf dem Acker gar mit Fermentation und Vererdung (Kohlenstoffbindung in Form von Humus durch Würmer, die fermentierte Reststoffe verdauen) der sicherlich effektivere Klimaschutz mit positiven Nebenwirkungen auf den Erhalt und Förderung von Bodenfruchtbarkeit und auf die globale Ernährungssituation. Insgesamt gibt es also verschiedene weitere auch energetische Nutzungsmöglichkeiten und vielfältige Ansprüche an die verschiedenen Reststoffe, von denen viele miteinander konkurrieren.

Wirkungszusammenhänge

Wechselwirkungen ergeben sich mit den →Biokunststoffen, da hier um den Kohlenstoff als Rohstoffbasis konkurriert wird und der Druck auf die Biomasse steigt. Kohlenstoffrecycling könnte dies in Zukunft entschärfen, wenn der abgeschiedene Kohlenstoff aus Industrieprozessen für die Kraftstoffproduktion genutzt wird. Bio-Raffinerien hingegen könnten synergetisch für →Biokunststoffe und →Agrarkraftstoffe entwickelt und betrieben werden.

Quellen

Aichinger, Heike; Hüsing, Bärbel; Wydra, Sven (2016): Weiße Biotechnologie. Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie: Verfahren, Anwendungen, ökonomische Perspektiven. Informationsanalyse – Teil 1. Hg. v. TAB Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin.

Biofuelwatch (2017): Microalgae Biofuels. Myth and Risks. September 2017. Online verfügbar: <http://www.biofuelwatch.org.uk/2017/report-microalgae-biofuels-overhyped-pose-risks-to-ecosystems-and-public-health/>.

Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (2009): Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung - Biokraft-NachV). Online verfügbar: <http://www.gesetze-im-internet.de/biokraft-nachv/index.html>.

Bundesministerium für Bildung und Forschung - BMBF (2015): Weiße Biotechnologie. Chancen für eine biobasierte Wirtschaft. Hg. v. BMBF. Berlin.

Europäische Union (2015): Änderung der Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren und zur Änderung der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Online verfügbar: https://www.ufop.de/files/2914/4258/1924/150915_Aenderungsrictlinie_EU_Amtsblatt.pdf.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hg.) (2014): Biokraftstoffe. Online verfügbar: https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/r/brosch_biokraftstoffe_web.pdf.

Malins, Chris; Searle, Stephanie; Baral, Anil; Turley, David; Hopwood, Lucy (2014): Wasted. Europeans untapped resource. An Assessment of Advanced Biofuels from Wastes and Residues. Hg. v. ICCT, IEEP, NNFFC. Online verfügbar: <https://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2014/02/WASTED-final.pdf>

Margeot, Antoine; Hahn-Hagerdal, Bärbel; Edlund, Maria; Slade, Raphael; Monot, Frédéric (2009): New Improvements for lignocellulosic ethanol. In: Current opinion in biotechnology 20 (3), S. 372-380.

Umweltbundesamt (Hg.) (2015): Alternative Kraftstoffe. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/kraft-betriebsstoffe/alternative-kraftstoffe#text-part-3>.

Schiller, Johannes; Aicher, Christoph; Feresin, Emiliano (2016): Weiße Biotechnologie Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie: Umwelt- und Nachhaltigkeitspotenziale. Innovationsanalyse Teil II. Unter Mitarbeit von Bernd Klauer, Bernd Hansjürgens, Arnold Sauter. Hg. v. TAB Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin.

38. BImSchV (2017): Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Treibhausgasminimierung bei Kraftstoffen. Online verfügbar: http://www.gesetze-im-internet.de/bimsv_38_2017/BjNR389200017.html.

Trend 4

Leichtbau - Nachhaltigkeit durch Konzeptleichtbau und neue Verbundwerkstoffe

Entwicklung

Leichtbau ist eine Querschnittsanwendung mit dem Ziel der Gewichts- und Materialreduktion, die in unterschiedlichen Bereichen zur Anwendung kommt. Im Bauwesen oder im konstruktiven Automobil- und Maschinenbau werden leichtere Werkstoffe schon heute verstärkt eingesetzt und ersetzen zunehmend z. B. klassischen Stahl (Thielmann und Seeliger 2014; Kaiser et al. 2016).

Im produktbezogenen Leichtbau lassen sich drei Einsatzfelder unterscheiden: die Materialsubstitution durch den Einsatz von Werkstoffen mit geringerer Dichte, der Konzeptleichtbau durch die Reduzierung von Werkstoffeinsatz mittels Produktgestaltung und ohne einen Wechsel der Materialien, und die Fügetechnik durch das Kleben, Verzahnen, Umformen oder Einpressen (z. B. durch Reduzierung von Schrauben). Auf diese Weise ergeben sich in verschiedenen Bereichen über Gewichtsreduktionen und den reduzierten Treibstoffbedarf oder eine Reduktion des Materialaufwands Potenziale für Ressourceneffizienz und Treibhausgaseinsparungen (Kaiser et al. 2016).

Die Dynamik im Leichtbau lässt sich zum einen materialeseitig erfassen, dann zeigt sich: Bereits etabliert sind der Metall-Leichtbau sowie der Bereich der faserverstärkten Kunststoffe. Beide weisen solide Wachstumsraten auf, letzterer hat aber bisher noch geringe Marktanteile (Thielmann und Seeliger 2014: 6). Faserverstärkte Kunststoffe (inklusive karbonfaserverstärkte Kunststoffe, CFK) sind Teil des Zukunftsfeldes der neuen Hybrid- und Verbundwerkstoffe, also Kombinationen von Metallen und Kunststoffen auch auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen (Thielmann und Seeliger 2014: 6). Die Dynamik lässt sich zum anderen aber auch branchenspezifisch erfassen. Dort zeigt sich, dass insbesondere Fahrzeug- und Maschinenbau nach der Metallverarbeitungsbranche sehr wichtig für den

Leichtbau sind und im Transport-Sektor große Potenziale gesehen werden (Thielmann und Seeliger 2014: 11).

„Leichtbau als Prinzip hat Potenziale sowohl für die Rohstoffeffizienz als auch für den Klimaschutz. Die größten Potenziale liegen vermutlich (nicht im Materialeleichtbau durch Massenreduktion), sondern im Konzeptleichtbau.“

Dr. Wolfgang Seeliger, Leichtbau BW GmbH, Stuttgart

Im Transport- und Automobilbereich wächst der Leichtbau um 24 % (Thielmann und Seeliger 2014: 31). Hier geht es vor allem um Materialsubstitution durch hochfeste Stähle oder faserverstärkte (Kohlenstoff- und Glasfaser) Kunststoffe, die z. B. klassische Stähle zunehmend ersetzen (Kaiser et al. 2016: 8). Ferner wird in der Bauwirtschaft großes Potenzial gesehen. Die Branche besitzt durch ihre Größe und ihre Materialintensität einen enormen Hebel beim Materialmassenumsatz. Jährlich werden in Deutschland rund 550 Mio. t mineralische Rohstoffe verbaut (Kaiser et al. 2016: 7).

Treiber

Ökonomische Treiber der Entwicklungen im Leichtbau sind vor allem die Wirtschaftlichkeit und Rentabilität: Sobald Leichtbau-Lösungen kostensenkend wirken, greifen die Unternehmen es auf. Auch ein ersichtlicher Mehrwert für gewerbliche KundInnen, etwa durch Produktivitätssteigerungsmöglichkeiten, erhöht die Bereitschaft zu investieren (Hanssmersmann et al. 2016). Als weitere Treiber für den Leichtbau könnten politische Maßnahmen wirken, etwa gesetzliche Verpflichtungen wie strengere Emissions-Limits im Verkehr oder auch verbindliche Verpflichtungen zum Einsparen von Gewicht im

2 | Allerdings sind die Recycling-Kapazitäten in der EU schon jetzt nahezu ausgeschöpft und bieten kaum noch Optimierungspotenzial (Kaiser et al. 2016: 19).

Maschinenbau. Zentrale Hemmnisse für die Durchsetzung von Leichtbau sind die damit verbundenen Kosten, das Recycling sowie eine geringe Nachfrage aufgrund fehlender Kundenakzeptanz (Thielmann und Seeliger 2014: 16; Kaiser et al. 2016: 37)

„Die Digitalisierung und auch der 3D-Druck bieten große Potenziale für den Leichtbau.“

Dr. Wolfgang Seeliger, Leichtbau BW GmbH, Stuttgart

Relevanz für Klimaschutz und Ressourcenschonung

Materialsstitution durch Leichtbau bietet ökologische Vorteile durch Senkung der Primärrohstoffinanspruchnahme. Nach Aussage von ExpertInnen können durch die Substitution von Stahl im Durchschnitt ca. 30 % Massenreduktion erreicht werden. Hochfeste Stähle bieten die Möglichkeit, mit geringeren Wandstärken die gleichen Anforderungen wie traditionelle Stähle zu erreichen. Wird bei Automobilen das Fahrzeuggewicht durch den Einsatz hochfester Stähle um 100 kg gesenkt, können 0,35 Liter Kraftstoff auf 100 km eingespart werden. Hochgerechnet auf die 600 Mrd. km, die die Autos in Deutschland im Jahr 2020 zurücklegen werden, ergibt sich eine potentielle CO₂-Reduktion von 11 Mio. t (Kaiser et al. 2016: 20).

Leichtbau bei Verkehrsträgern kann die Nutzungsphase effizienter gestalten. Gewichtsersparnisse bei Bauteilen ermöglichen Kraftstoffverbrauchseinsparungen, die direkt zu THG-Emissionsminderungen in der Nutzungsphase führen. Leichtbau ist daher seit langem in der Luftfahrttechnik relevant, um den Kerosinverbrauch zu reduzieren.

„Der Leichtbau weist deutliche Schnittmengen auf mit der Bionik.“

Dr. Wolfgang Seeliger, Leichtbau BW GmbH, Stuttgart

Insbesondere den karbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) wird eine wachsende Bedeutung als Werkstoff prognostiziert (e-mobil BW GmbH 2012: 13). Karbonfasern werden zunehmend auch aus biobasierten Materialien wie Lignin oder Cellulose hergestellt (naturfaserverstärkte Kunststoffe, NFK) (Kaiser et

al. 2016: 41). Hochfeste CFK treten zunehmend in Konkurrenz zu Stahl und Aluminium und werden beispielsweise im Luftfahrzeugbau oder in der Automobilindustrie verwendet. So wurde beispielsweise die Karosserie des BMW i3 aus 100 % CFK hergestellt. CFK bieten Masseneinsparungen von ungefähr 79 % gegenüber Referenzbauteilen aus herkömmlichem Stahl (Kaiser et al 2016: 38). Auch für die Ausweitung der Elektromobilität spielen ein reduziertes Fahrzeuggewicht und der damit verbundene verringerte Energieverbrauch eine wichtige Rolle.

Auch faserverstärkte Kunststoffe (FVK) bergen ökonomische und ökologische Potenziale, sie weisen eine hohe Festigkeit und Steifigkeit bei geringer Bruchdehnung auf (e-mobil BW GmbH 2012: 13). Leichtere Bauteile aus FVK weisen in der Nutzungsphase eine gute, weil niedrige Energiebilanz auf. Allerdings sind sie in der Herstellung sehr energieintensiv, mehr sogar noch als Stahl und Aluminium (e-mobil BW GmbH 2012: 5).

Stahl weist aber mit 50 % eine sehr hohe Recycling-Quote auf, dadurch werden schon große Mengen an Primärrohstoffen eingespart. Dabei sinken auch die Vorketten- und prozessbedingten Treibhausgasemissionen ab dem sechsten Lebenszyklus (also Rohstoffmining, Produktion, Nutzung und Entsorgung) auf unter 1 Tonne CO₂-Äquivalent pro Tonne produzierten Stahl (Kaiser et al. 2016: 19).² Der Substitutionseffekt von Stahl durch faserverstärkte Kunststoffe ist eher gering. Auf Millionen von Tonnen Stahl kommen in der Regel ein paar Tonnen karbonfaserverstärkte Polymere in der Autoindustrie. Das macht sich ressourcenseitig kaum bemerkbar. Eine deutliche Ausweitung von CFK in der Autoindustrie wäre also sowohl energie- als auch kostenintensiv.

Einige Leichtbauanwendungen durch Materialsstitution sind deshalb mit Blick auf ihre Ressourcen- und Umweltauswirkungen ambivalent zu bewerten. Wird der gesamte Lebensweg eines leichten CFK-Bauteils mittels Ökobilanzierung betrachtet, fallen vor allem der hohe Energieeinsatz in der Produktion der Kohlenstofffasern, die gegenüber Stahl und Aluminium-Bauteilen verschlechterte Reparierbarkeit und die bisher wenig entwickelte Infrastruktur eines werkstoffgerechten Recyclings negativ ins Gewicht (Kaiser et al. 2016: 38). Wenn die Zahl der eingesetzten Materialien und Werkstoffvarianten zunimmt, erschweren die neuen Materialmixe die Recycling-Möglichkeiten nach der Nutzungsphase. Verbundmaterialien auf

Basis verschiedener Komponenten stellen Herausforderungen für die Trenn- und Sortiertechnologien zur Rückgewinnung sortenreiner Werkstoffe dar. Manche Leichtbaumaterialien wie etwa CFK weisen gegenwärtig schlechtere Ökobilanzen als konventionelle Materialien auf und können noch nicht recycelt werden, womit sich der Zusatznutzen verliert (ExpertInnenangaben). Die Bewertung von Ressourceneffizienz- und Klimaschutzpotenziale erfordert also die Berücksichtigung des gesamten Lebenswegs bis hin zur Entsorgung neuer Werkstoffe.

Einige ExpertInnen sehen auch deshalb die größten Potenziale für Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung nicht in der Materialsubstitution, sondern im Konzeptleichtbau, wo Leichtbau als konstruktives Prinzip schon bei der Produktgestaltung berücksichtigt wird (ExpertInnenangaben). Im elektromobilen Fahrzeugbau demonstriert das der „street scooter“ der Post; das E-Auto ist viel leichter, kleiner, und von Beginn an für den städtischen Lieferverkehr konzipiert (Clausen 2017).

Quellen

Clausen, Jens (2017): Der Post-Streetscooter. Fallstudie im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Borderstep. Berlin.

e-mobil BW GmbH (2012): Leichtbau in Mobilität und Fertigung. Ökologische Aspekte. Hg. v. e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst. Stuttgart.

Hansmersmann, Anna; Birenbaum, Christoph; Burkhardt, Jochen (2016): Leichtbau im Maschinen-, Anlagen- und Gerätebau. Herausforderungen-Potentiale-Mehrwerte-Beispiele. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. Stuttgart.

Kaiser, Oliver; Krauss, Oliver; Seitz, Heike; Kirmes, Stefan (2016): VDI ZRE Kurzanalyse 17: Ressourceneffizienz im Leichtbau. VDI Zentrum Ressourceneffizienz. Berlin.

Wirkungszusammenhänge

Wechselwirkungen und Schnittstellen gibt es mit Entwicklungen in der Bionik, einige Leichtbau-Anwendungen gehen auf bionische Prinzipien zurück (Kaiser et al 2016: 63).

Ferner bietet das Anknüpfen an den Trend der additiven Fertigung und den 3D-Druck neue Möglichkeiten, nach dem Vorbild der Natur unnötige Materialinanspruchnahme zu vermeiden – etwa in Anlehnung an die innere poröse Struktur von Knochen, wo nur dort dichte Struktur existiert, wo Kräfte tatsächlich wirken (Leichtbau BW 2016).

Insgesamt bietet die Digitalisierung gute Perspektiven für die gesamten Produkt-Entwicklungsketten.

Auch Biokunststoffe besitzen eine wachsende Bedeutung im Leichtbau. Nachwachsende Rohstoffe bieten Chancen für Ressourceneffizienz, sie können große Teile des mineralölbasierten Kunststoffes ersetzen (Kaiser et al. 2016: 42).

Leichtbau BW (2015): Trends und Märkte im Leichtbau. Weiterführende Auswertungen der Studie: „Leichtbau-Trends und Zukunftsmärkte“. Hg. v. Leichtbau BW. Stuttgart.

Leichtbau BW (2016): ThinkKing November-Kombination von Topologieoptimierung und Additiver Fertigung ermöglicht 3D-Druck poröser Strukturen. Online verfügbar: <http://www.leichtbau-bw.de/leichtbau/thinking/detailansicht-thinking/article/thinking-november-kombination-von-topologieoptimierung-und-additiver-fertigung-ermoglicht-3d-druck.html>

Thielmann, Axel; Seeliger, Wolfgang (2014): Leichtbau – Trends und Zukunftsmärkte und deren Bedeutung für Baden-Württemberg. Eine Studie im Auftrag der Leichtbau BW GmbH. Koordination Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Hg. v. Leichtbau BW GmbH. Stuttgart.

Trend 5

Das Lernen von der Natur - Ressourcenentlastungseffekte durch Bionik

Entwicklung

Die Bionik bezeichnet die Integration von Biologie und Technik. Sie beschäftigt sich mit der Übertragung natürlicher Prinzipien auf technische Lösungen und umfasst sowohl die Gestaltung von Oberflächen und Beschichtungen als auch von Materialien und Strukturen oder Prozessen und Verfahren (Nachtigall 2002).



Die Entwicklung der Bionik reicht mehrere hundert Jahre zurück, einige der bekanntesten Beispiele sind der Klettverschluss nach dem Vorbild der Klettenfrucht oder der Selbstreinigungseffekt nach dem Vorbild der Lotus-Pflanze (Bertling 2014: 143 ff.). Darüber hinaus gibt es verschiedene innovative neuere Entwicklungen: Giftfreie Antifouling-Anstriche nach dem Prinzip der Haifischhaut, die unerwünschten Bewuchs bei Frachtschiffen verhindern und somit den Treibstoffbedarf reduzieren. Ferner kommen bionische Prinzipien zum Einsatz bei Prozessoptimierungen in der Steuerungssoftware von modernen Fabriken oder bei der Zusammenarbeit von autonomen Robotern bei komplexen Routenplanungen nach dem Prinzip des Ameisenalgorithmus (Oertel und Grunwald 2006; Niebaum und Seitz 2017). Auch wölbstrukturierte Oberflächen in der Industrie, die der Struktur von Bienenwaben nachgeahmt sind und durch die Materialeinsparungen mit verbesserter Langlebigkeit, Hitzeresistenz, Beständigkeit, Formstabilität und Flexibilität kombiniert werden können, verdeutlichen die Multifunktionalität, die charakteristisch ist für den Ansatz der Bionik (BIO-KON 2014).

Treiber

Es gibt zahlreiche Anwendungsbeispiele bionischer Prinzipien, u.a. in der Architektur und im Leichtbau, in der Robotik und Produktionstechnik, in der Entwicklung von Anstrichen und Beschichtungen, der Sensorik und Informationsverarbeitung oder auch in Organisation und im Management (VDI Richtlinie 6220; Niebaum und Seitz 2017). Die fortschreitende Integration von Funktionen und das Verschmelzen von Disziplinen wirken als Treiber für die Bionik. Die Identifikation biologischer Strukturen durch elektronenmikroskopische Verfahren, das Nachbauen durch nanotechnologische Verfahren oder die Verschmelzung von Bionik und Biotechnologie bei der Herstellung hochtechnologischer Oberflächen sind Innovationssprünge. Große Potenziale werden im Leichtbau gesehen oder auch bei mikro- und nanostrukturierten Oberflächen, etwa um Reinigungsmittel einzusparen. Besondere Fortschritte werden auch durch neue Mess- und Dokumentationsmethoden möglich, indem durch moderne Kameras und mikroskopische Verfahren bionische Prinzipien erst verstanden werden konnten. So wurde lange angenommen, die Haftungsfähigkeit und der Ablösemechanismus des Geckos lägen an seinen saugnapfartigen Füßen. Tatsächlich fand man schließlich durch neue Dokumentationsmethoden heraus, dass es sich hier um sehr feine Haare handelt, die die enorme Haftung ermöglichen.

Die Bionik gilt als Innovationstreiber. Allerdings sind bionische Prinzipien keineswegs eine Garantie für Nachhaltigkeit oder Umweltentlastung. Tatsächlich handelt es sich bei bionischen Lösungen häufig um Nischenprodukte, sodass selten reale Substitutionseffekte eintreten, die im großen Maßstab entlastend wirken.

Relevanz für Klimaschutz und Ressourcenschonung

Grundsätzlich hat die Bionik das Potenzial Ressourceneffizienz und Umweltentlastung zu befördern. Naturinspirierte und naturverträgliche Ansätze erweitern den Such- und Lösungsraum und können Paradigmenwechsel einleiten. Die konkreten

Umwelteffekte hängen jedoch vom Anwendungsfall ab, Bionik hat allgemein keine Wirkungen in eine bestimmte Richtung. Die Natur dient als Vorbild dafür, das Potenzial vorhandener Materialien, Stoffe und Strukturen vielseitig zu nutzen, um Umwelt- und Ressourcenentlastungseffekte zu erreichen.

So sind Lacke mit einer Haifischhautstruktur als Antifouling-Anstriche prinzipiell (Niebaum und Seitz 2017: 92) sowohl auf den Rümpfen von Frachtschiffen, als auch auf Flugzeugen anwendbar. Durch die Auftragung des Lacks wird der Strömungswiderstand deutlich verringert. Noch stellt die mechanische Empfindlichkeit dieser Lacke ein Problem dar, weshalb sich ebenfalls nach bionischen Prinzipien bei Schiffen ein Lack mit Hydrogeleigenschaften durchzusetzen scheint.

Spannend aus Sicht der Ressourcenschonung sind auch die Prinzipien der „Selbsteilung“ für die Lebensdauererlängerung von Produkten durch Selbstreparatur. Hier liegt großes Potenzial in einzelnen Technologien, wie beispielsweise Membrananwendungen, Schäume bei Autoreifen oder Dichtungsmaterialien. Modifizierte Elastomere, die sich immer wieder vernetzen können, also ein homogenes aber selbstheilendes Material darstellen und so für Dichtungs- und Dämmanwendungen geeignet sind, können Leckage-Verlusten vorbeugen. Aber auch hier muss über Ökobilanzierungen immer geprüft werden, auf welcher stofflichen Basis die selbstheilenden Effekte gewonnen werden und, ob der Primäreinsatz an Energie, Rohstoffen oder toxischen Elementen nicht tatsächlich kompensiert wird (ExpertInnenangaben).

Für viele Anwendungsbereiche sind auch Wölbstrukturen interessant. In der Produktion wird im Vergleich zu konventionellen Verfahren bei der Technik nur ein Zehntel der Umformenergie benötigt, da hier das Prinzip der Selbstorganisation des Materials genutzt wird (Rudow 2017). Darüber hinaus können wölbstrukturierte Bleche wesentlich einfacher verformt und weiterverarbeitet werden. Sie finden sich deshalb bereits in der Architektur und im Bau, im Automobil- und Motorradbau oder in der Lichttechnik in den unterschiedlichsten Produkten, wie Katalysatoren, Waschmaschinen oder Lampen (Mirtsch 2017). Wölbstrukturen können so 30-40 % Material- und Gewichtseinsparungen (bei Biegebelastung) ermöglichen. Eingesetzt in Beleuchtungslösungen kann die Gewichtsersparnis beim Gehäuse bis zu

80 % betragen, wenn das formsteife und blendarme Material gleichzeitig als Gehäuse und Reflektor der Lampe dient (VDI ZRE 2017).

„Bionik ist keine Technologie im eigentlichen Sinn, sondern eine Wissenschaftsdisziplin, die das Potenzial hat, innovative und nachhaltige Lösungen für alle Branchen zu liefern.“

Dr. Anke Niebaum & Dr. rer. nat. Heike Seitz,
VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences
Düsseldorf - Fachbereich Bionik

Bei jedem dieser Anwendungsfälle muss über eine Ökobilanzierung oder andere Verfahren geprüft werden, ob der Primärrohstoff- oder Energieaufwand über die Nutzungsphase tatsächlich wieder kompensiert wird. Fallstudien zeigen hier unterschiedliche Nachhaltigkeitseffekte, so haben einige Anwendungen positive andere negative Effekte auf die Rohstoffinanspruchnahme (ExpertInnenangaben). Bionische Verfahren können dabei auch schlechter abschneiden als konventionelle Verfahren: So zeigten adhäsive Oberflächen eine deutliche Entlastung bei CO₂-Emissionen. Bei der Produktion eines Radträgers mit halbem Gewicht wären allerdings erst ab theoretischen (und unrealistischen) 5 Mio. Fahrkilometern die energiebedingten Treibhausgasemissionen in der Nutzungsphase wieder kompensiert. Auch die Herstellung eines bionischen Stuhls mittels 3D-Druck-Verfahren wies im Vergleich zum herkömmlichen Spritzgieß-Verfahren einen 60-fach höheren Material-Input (MIPS-Wert, Material Input Per Service Unit) auf und erwies sich als hochgradig ressourcenineffizient. Zudem kann die Ausweitung von Anwendungen und Technologien auch zu Rebound-Effekten führen und den Rohstoffbedarf und die Umweltbelastung letztendlich noch steigern (Bertling 2017).

Wirkungszusammenhänge

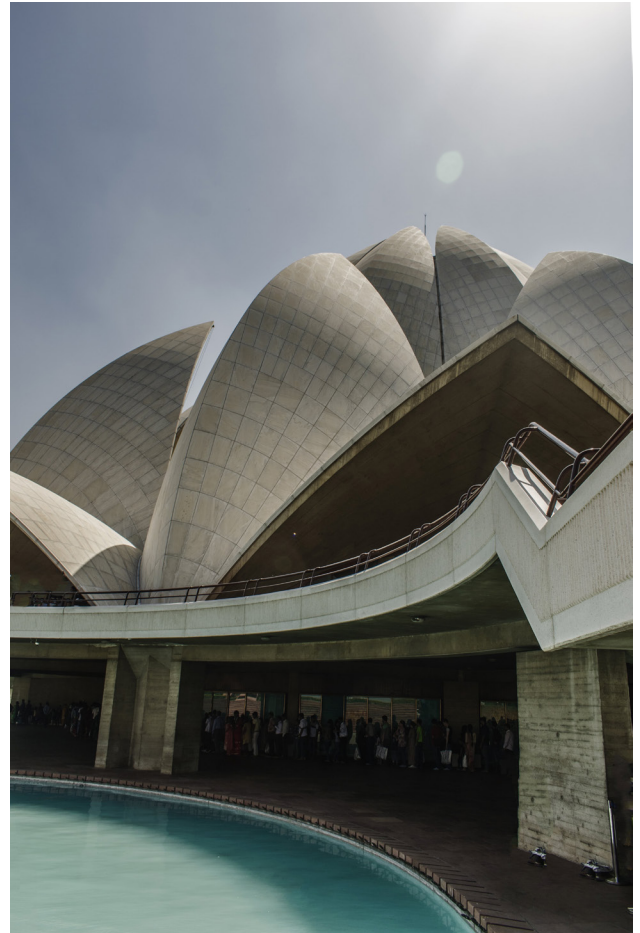
Die Bionik weist in vielen Bereichen deutliche Schnittmengen mit dem → Leichtbau auf. In dieser Funktionsintegration liegen mit die größten Ressourceneffizienzpotenziale, etwa bei Objekten in der Produktion, beim Maschinenbau, durch leichtere → Roboter etc., wobei durch Gewichtseinsparungen Rohstoffe bzw. Energie eingespart werden können.

Erst durch die Verbreitung additiver Verfahren und des 3D-Drucks wurde die Möglichkeit geschaffen, vie-

le bionische Strukturen herzustellen, deren Herstellung mit den herkömmlichen Verfahren (Guss- oder Extrusionsverfahren) schwer möglich gewesen ist (Seitz und Niebaum 2017; Bertling 2017).

Auch die Digitalisierung und die Bionik weisen Wechselwirkungen auf. Die Nutzung von Schwarminelligenz, also die Nutzung der kollektiven Intelligenz einer dezentral gesteuerten Masse zur Lösung von Problemen, und die Funktionsweisen neuronaler Netze sind für die Entwicklung von Algorithmen und Software, für das Zusammenspiel von Sensoren und die Erhebung von „smart data“ aufschlussreich, also die Fähigkeit nicht alle Daten zu erfassen, sondern sehr zielgenau nur die wichtigen Daten, die eben gebraucht werden, analog der Reizverarbeitung durch Sinnesorgane des Menschen.

Das bionische Prinzip zeigt sich auch in der Idee der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy oder Biomimikry) wenn biobasierte Werkstoffe gut biologisch abbaubar sind oder problemlos werkstofflich recycelt werden können (Biokunststoffe, Sortier- und Trenntechniken).



Quellen

Bertling, Jürgen (2014): Bionik als Innovationsstrategie. In: Cornelius Herstatt, Katharina Kalogerakis und Marc Schulthess (Hg.): Innovationen durch Wissenstransfer. Mit Analogien schneller und kreativer Lösungen entwickeln. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 139–182.

Bertling, Jürgen (2017): Bionik als Innovationsstrategie für effiziente und konsistente Lösungen. Dokumentation des VDI ZRE Fachgesprächs »Ressourceneffizienz durch Bionik«. Berlin.

BIOKON (Hg.) (2014): Wölbstruktur. Sparsam und schön anzuschauen. Unter Mitarbeit von Frank Mirtsch. Online verfügbar: http://www.biokon.de/en/bionics/best-practices/detail/page/3/?tx_nenews_uid=1636, zuletzt geprüft am 28.07.2017.

Mirtsch, S. (2017): Innovative Beispiele. Hg. v. Dr. Mirtsch Wölbstrukturierung GmbH. Berlin. Online verfügbar: <http://www.woelbstruktur.de/beispiele.php>, zuletzt geprüft am 21.08.2017.

Nachtigall, Werner (2002): Bionik. Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.

Niebaum, Anke; Seitz, Heike (2017): VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 19: Ressourceneffizienz durch Bionik. Hg. v. VDI Zentrum Ressourceneffizienz. Berlin.

Oertel, Dagmar; Grunwald, Armin (2006): Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik. Online verfügbar: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab108.pdf>.

Rudow, Louisa (2017): Bionische Wölbstrukturen – Die Natur als Vorbild für Ressourceneffizienz. Hg. v. VDI Zentrum Ressourceneffizienz.

VDI ZRE (2017): Bionische Wölbstrukturen Die Natur als Vorbild für Ressourceneffizienz. Online verfügbar: https://www.youtube.com/watch?v=_7lqldseHhs.

VDI Richtlinie 6220, 2012: Bionik Konzeption und Strategie - Abgrenzung zwischen bionischen und konventionellen Verfahren/Produkten. Online verfügbar: https://www.vdi.de/uploads/tx_vdirili/pdf/1919256.pdf.

Trend 6

Sortier- und Trenntechniken der Recyclingindustrie

Entwicklung

Manche Abfälle enthalten wertvolle Rohstoffe, die genutzt werden können, um natürliche Vorkommen zu schützen. Nach dem Grundsatz der Abfallhierarchie, die im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) festgeschrieben ist, soll Abfall - in dieser Reihenfolge - erst vermieden, dann wiederverwendet, recycelt, thermisch verwertet und schließlich deponiert werden.

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass das Recycling allgemein abhängig ist von Material und Anwendungsbereich sowie den Recyclinginfrastrukturen, und daher sehr unterschiedlich gut funktioniert. So kann bspw. Papier sehr gut recycelt werden, sofern es denn eine Sammel- und Entsorgungsstruktur gibt, wie z. B. die haushaltsnahe Papiersammlung. Hingegen ist das Recycling von Kunststoffen allgemein eher schwierig, was aber wiederum auch vom Anwendungsbereich abhängig ist. So lag zum Beispiel die Rate der stofflichen Verwertung bei Kunststoffverpackungen im Jahr 2016 bei 49,7 %. Für Verpackungskunststoffe gibt es gesetzliche Recyclingquoten. Hingegen werden technische Kunststoffe aus Fahrzeugen bisher nur in geringen Mengen ausgebaut und recycelt und bei Elektroaltgeräten gehen die Fachleute davon aus, dass lediglich etwa 12 % werkstofflich verwertet werden. Ein Grund hierfür besteht darin, dass für Kunststoffe aus Altfahrzeugen und Elektroaltgeräten bisher keine gesetzlichen Recyclingquoten existieren (ExpertInnenangaben). Bei den haushaltstypischen Siedlungsabfällen wurden 2015 bereits 91 % recycelt, davon 68 % mit stofflicher Verwertung (Consultic 2016; UBA 2017a). Beim Recycling gibt es jedoch unterschiedliche Konzepte zur Berechnung und Bewertung der recycelten Menge. Ferner gilt zu beachten, dass viele Stoffe recycelt werden, um daraus weniger werthaltige Produkte zu produzieren. Es handelt sich also häufig um ein tatsächliches Downcycling (ExpertInnenangaben).

Das Recycling von Abfällen kann allgemein einen großen Beitrag zu Ressourcenschonung, Umweltentlastung und zum Klimaschutz leisten. Die Voraussetzung dafür ist, dass die Rezyklate bei der Herstellung neuer Produkte Neumaterial ersetzen (z. B. Kranert

2017: 47). Grundlegende Voraussetzung für die Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe aus bisherigen Abfallströmen sind vor allem die zugrunde liegenden Sortier- und Trenntechniken. Hier existieren verschiedene Verfahren, um Wertstoffe aus Massenabfallströmen auszusortieren. Um feste Abfallstoffe abzutrennen, werden unterschiedlichste Materialeigenschaften wie Dichte, Form, magnetische Suszeptibilität, elektrische Leitfähigkeit oder messbare Eigenschaften wie Farbe als Trennmerkmale herangezogen (Martens und Goldmann 2016: 45; Behrendt et al. 2015: 17). So können etwa mit der Nahinfrarotspektroskopie verschiedene Verpackungsmaterialien anhand ihrer Absorptionsspektren identifiziert werden. Die jeweiligen Materialien werden mit Druckluft von Förderbändern in Sammelboxen sortiert. Mit dieser Vorgehensweise können Reinheitsgrade von über 90 % erreicht werden (Kranert 2017: 244).

„Produkte werden immer komplizierter, dadurch wird auch die Rückführung immer komplizierter, und schließlich werden auch Transparenz sowie Regulierung immer voraussetzungsvoller und komplizierter, also aufwändiger und damit teurer.“

Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz, RWTH Aachen,
Institut für Aufbereitung und Recycling

Das Recyceln von stark begrenzten Technologiemetallen funktioniert unterschiedlich gut. So sind die Recyclingraten für Edelmetalle wie Gold und Silber aber auch Kupfer relativ hoch, da die Verwertung auf die Rückgewinnung eben dieser Elemente ausgerichtet ist und ihr hohes Standardpotenzial (wesentliche Ausprägung ihres „edlen“ Charakters) dies auch vergleichsweise einfach ermöglicht. Schätzungsweise 80-90 % des Materialwertes vieler Elektrokleingeräte entfallen auf die Frachten dieser drei Metalle. Dennoch kommt es in bestimmten Schredderfraktionen noch zu Verlusten dieser Metalle. Bei anderen Elementen wie Tantal und Kobalt oder auch den Seltenen Erden stellt es sich trotz vergleichsweise

hoher Recyclingraten noch differenzierter dar, hier kommt es u.a. auf Erfassung, Mengenschwellen und die jeweiligen Technologien an (hierzu Graedel et al. 2011 sowie Reuter et al. 2013).

Die teilweise noch geringe Recyclingrate vor allem aus elektronischen Geräten ist unter anderem bedingt durch die lückenhafte Erfassung von Elektrogeräten, sozusagen dem anthropogenen Lager von Technologiemetallen. Beim Beginn des Recyclingprozesses, der Sortierung, sind Informationen über die Eingangsströme erforderlich. Dies könnte etwa mittels entsprechender RFID-Chips, Detektionstechniken und Sensorik helfen. Eine Sortierung der Verbünde noch vor dem Schreddern könnte die jeweiligen Verbundgruppen einem für sie angepassten Prozess zuführen (Behrendt et al. 2015). Hier stellt sich allerdings die Problematik eines zusätzlichen Rohstoffbedarfs, wenn alle Produkte mit Chips ausgestattet werden. Ein weiterer Lösungsvorschlag hierfür wäre, geeignete Sammel- bzw. Produktgruppen festzulegen, zu etablieren und in der Verwertung die Zerlegung und Fraktionierung mit Blick auf die mögliche anschließende Metallurgie zu optimieren. Ein Problem für eine Erhöhung der Recyclingraten mancher Elemente stellen aber auch die immer komplexer werdenden Technologieprodukte dar, die darin verbauten meist sehr geringen Mengen der einzelnen Metalle (Dissipation), die sich stetig verändernde Zusammensetzung der durchschnittlich ungefähr 80 verbauten Elemente, sowie das Fehlen neuer angemessener Trenntechniken für einige Technologiemetalle. Diese Trends erschweren das Recyceln der Geräte (Behrendt et al. 2015).

Hinzu kommt, dass die Trennung und Fraktionierung einzelner Werkstoffe zunehmend erschwert wird. Verbundmaterialien (bei Kunststoffen oder Leiterplatten) haben einen stetig wachsenden Anteil am Abfallstrom und auch die Komplexität der Verbundmaterialien wächst. Im Bereich der modernen Automobilproduktion lässt sich dies am Beispiel des Audi Q7 darstellen: Hier wurde durch den Einsatz einer bestimmten Aluminium-Legierung eine deutliche Gewichtsreduzierung erzielt (Schnittstelle Leichtbau), deren Trennung hinterher jedoch sowohl teuer als auch technisch sehr schwierig ist, und dazu führt, dass ein Downcycling zu relativ einfachen Gussqualitäten erfolgt (ExpertInnenangaben). Verstärkt wird das Problem dadurch, dass neue Produkte und

Materialien schneller auf dem Markt erscheinen, als Konzepte und Lösungen für deren Entsorgung und Recycling vorliegen und einsetzbar sind. Notwendig wären ein angemessenes Produktdesign (Ökodesign bzw. Design for Recycling), wie es bereits seit langem gefordert wird (z. B. Behrendt et al. 2015) sowie damit verbunden bzw. als dessen Voraussetzung eine verbesserte, konkretisierte Produktverantwortung mit tragfähigen Verwertungskonzepten.

Treiber

Es gibt zahlreiche Anwendungsbeispiele bionischer Prinzipien, u.a. in der Architektur und im Leichtbau, in der Robotik und Produktionstechnik, in der Entwicklung von Anstrichen und Beschichtungen, der Sensorik und Informationsverarbeitung oder auch in Organisation und im Management (VDI Richtlinie 6220; Niebaum und Seitz 2017). Die fortschreitende Integration von Funktionen und das Verschmelzen von Disziplinen wirken als Treiber für die Bionik. Die Identifikation biologischer Strukturen durch elektronenmikroskopische Verfahren, das Nachbilden durch nanotechnologische Verfahren oder die Verschmelzung von Bionik und Biotechnologie bei der Herstellung hochtechnologischer Oberflächen sind Innovationssprünge. Große Potenziale werden im Leichtbau gesehen oder auch bei mikro- und nanostrukturierten Oberflächen, etwa um Reinigungsmittel einzusparen. Besondere Fortschritte werden auch durch neue Mess- und Dokumentationsmethoden möglich, indem durch moderne Kameras und mikroskopische Verfahren bionische Prinzipien erst verstanden werden konnten. So wurde lange angenommen, die Haftfähigkeit und der Ablösemechanismus des Geckos lägen an seinen saugnapfartigen Füßen. Tatsächlich fand man schließlich durch neue Dokumentationsmethoden heraus, dass es sich hier um sehr feine Haare handelt, die die enorme Haftung ermöglichen.

Die Bionik gilt als Innovationstreiber. Allerdings sind bionische Prinzipien keineswegs eine Garantie für Nachhaltigkeit oder Umweltentlastung. Tatsächlich handelt es sich bei bionischen Lösungen häufig um Nischenprodukte, sodass selten reale Substitutionseffekte eintreten, die im großen Maßstab entlastend wirken.

Relevanz für Klimaschutz und Ressourcenschonung

Optimierte Sortier- und Trenntechniken im Recycling-System können für besser getrennte Abfallströme genutzt werden, um hochwertigere Sekundärprodukte zu erhalten. Diese können für die Verringerung der Inanspruchnahme von Primärrohstoffen sorgen, sofern Primärrohstoffe ersetzt werden. Die Höhe und Art der Einsparungen sind jeweils abhängig vom recycelten Material. Ebenso fallabhängig sind mögliche Treibhausgaseinsparungen.

Am Beispiel von Stahl- oder Aluminium-Recycling wird deutlich, dass beim Einschmelzen von Stahl- oder Aluminiumschrott ungefähr die Hälfte bzw. bei Aluminium sogar etwa 90 % der Energie eingespart werden kann, die das Schmelzen der Erze in der Primärproduktion benötigt (Yellishetty et al. 2011: 657).

Dennoch ist zu berücksichtigen, dass auch einige Recyclingprozesse sehr energieintensiv sind. Viele (Metall-)Recycling-Verfahren führen, sofern sie in Deutschland stattfinden, zu einem höheren Energieaufwand in Deutschland (und gehen in den Nationalen Inventarbericht ein), während die energie- und prozessbedingten Treibhausgasemissionen bei der Gewinnung von metallischen Primärrohstoffen im Ausland gezählt werden, aber global natürlich trotzdem klimarelevant wirken. Dabei geht es in der

Diskussion auch um die Forderung nach Befreiungen von der EEG-Umlage, um das Recycling hier im Land zu fördern und nicht zusätzlich zu belasten. Zu erwarten sind aber mögliche Reduktionen aus abnehmender Primärproduktion in Metall- und anderen Produktionsbereichen.

In Deutschland sank zwar das Netto-Abfallaufkommen 2000 - 2016 um rund 12 %, was jedoch neben statistischen Effekten hauptsächlich an der konjunkturell bedingten Abnahme der Bau- und Abbruchabfälle liegt. Demgegenüber nehmen die Abfälle aus Haushalten zu (UBA 2018a). Vor allem steigt der Verbrauch von Verpackungen (UBA 2018b). ExpertInnen kritisieren allgemein, dass die Politik zu sehr auf Recycling setzt und zu wenig dafür getan wird weniger Ressourcen zu verbrauchen (Stichwort Suffizienz) (Behrens 2017). Der Fokus liegt zu wenig auf der Vermeidung von Abfällen. Selbst wenn in der Produktion zunehmend auf Rezyklate gesetzt wird (wie etwa bei manchen PET-Flaschen), ist es fraglich, ob die benötigten Mengen verfügbar sind. Für bestimmte Produkte könnte es durchaus schwierig werden, hinreichend viel Rezyklat zu angemessenen Bedingungen zu erhalten. In der konkreten Bewertung muss zwischen Metallen, Kunststoffen und mineralischen Stoffen unterschieden werden, da hier unterschiedliche Dynamiken wirken und auch unterschiedliche Probleme und Wirkungen auftreten.



Wirkungszusammenhänge

Neue Verbundmaterialien, wie z. B. im Leichtbau zum Einsatz kommende kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, erschweren das werkstoffliche Recycling. Optimierte Sortier- und Trenntechniken wären zwar die Voraussetzung für höhere Recyclingquoten und verbessertes Kreislaufwirtschaften, doch diese fehlen bisher u.a. aufgrund von fehlenden funktionalen Recyclingkonzepten für eine sichere Verarbeitung der Fasern (Arbeitsschutz). Ein Lösungsansatz hierzu sind Roboter zum spezifischen Zerlegen der Produkte (Rujanavech et al. 2016).

Zur Unterstützung des dringend erforderlichen bzw. verbesserungsbedürftigen Stoffstrommanagement wird u.a. im Umweltbundesamt an Dokumentationen in Form von Katastern und Gebäudepässen gearbeitet,

die dann insbesondere dem selektiven Rückbau dienen sollen. Beim Management von Baurestmassen müssen auch die selektive, sortenreine Erfassung und Sortier- und Trenntechniken ineinandergreifen. Das erfordert einen höheren Aufwand im gesamten Handling. Hierzu werden mehr Steuerung, mehr Regulierung und höhere Anforderungen benötigt. In manchen Fällen kann womöglich die Nutzung von Mikrosensoren und Chips zur Identifikation von Stoffströmen etwa im Baubereich zur besseren Trennung und Sortierung beitragen und so die Nutzung von Sekundärrohstoffen und dabei auch die Identifikation von Wert-, aber auch Schadstoffen voranbringen (Urban Mining). Eine optimierte, regulierte und dadurch langfristig kostengünstigere Gewinnung von Sekundärrohstoffen kann zu einem Wettbewerbsvorteil gegenüber Primärrohstoffen führen und so den Einsatz von letzteren perspektivisch reduzieren.

Quellen

Behrendt, Siegfried; Nolte, Roland; Röben, Adrian (2015): Recycling als Rohstoffquelle. Zukunftsmärkte und Technologieanforderungen. Integrierte Roadmap III. Automation 2025+. Hg. v. ZVEI. Frankfurt am Main.

Behrens, Christoph (2017): Das Märchen vom Recycling. In: Süddeutsche Zeitung. Online verfügbar: <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/muell-das-maerchen-vom-recycling-1.3500770>

Consultic (2016): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015 -Kurzfassung. Hg. v. BKV GmbH, Plastics Europe Deutschland e.V., IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e.V., bvse-Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. Online verfügbar: <http://www.plasticseurope.de/Document/studie-zu-produktion-verarbeitung-und-verwertung-von-kunststoffen-in-deutschland-2015-kurzfassung.aspx?FoIID=2>

Graedel, T., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B.K., Sonnemann, G. (2011): Recycling rates of metals: A status report. United Nations Environment Programme, UNEP-DTIE, Paris.

Holdinghausen, Heike; Lee, Felix (2017): Deutscher Müll muss deutsch bleiben. In: taz - die Tageszeitung. Online verfügbar: <http://www.taz.de/!5462948/>

Kranert, Martin (Hg.) (2017): Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Planung - Recht - Verfahren. Wiesbaden: Springer Verlag.

KrWG (2017): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen

2017. Online verfügbar: <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/index.html>, zuletzt geprüft am 28.07.2017.

Martens, Hans; Goldmann, Daniel (2016): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag.

Reuter, M.A., Hudson, C., Van Schalk, A., Heiskanen, K., Meskers, C.E.M. und Hagelüken, C. (2013): Metal Recycling - Opportunities, Limits, Infrastructure. United Nations Environment Programme, UNEP-DTIE. Paris.

Rujanavech, Charissa; Joe Lessard, Sarah Chandler, Sean Shannon, Jeffrey Dahmus, Rob Guzzo (2016): Liam - An Innovation Story. Apple Incorporated. Online verfügbar: https://www.apple.com/environment/pdf/Liam_white_paper_Sept2016.pdf

Umweltbundesamt (2017a): Kunststoffabfälle. Dessau-Roßlau. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewahlter-abfallarten/kunststoffabfaelle>.

Umweltbundesamt (2018a): Abfallaufkommen, Dessau-Roßlau. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen>

Umweltbundesamt (2018b): Verpackungsabfälle, Dessau-Roßlau. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewahlter-abfallarten/verpackungsabfaelle>

Yellishetty, Mohan; Mudd, Gavin M.; Ranjith, P. G.; Tharumarajah, A. (2011): Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling. Sustainability issues, problems and prospects, in: Environmental Science & Policy 14 (6), S. 650–663.

Trend 7

Urban Mining - Die Stadt als Rohstoffmine für Baustoffe

Entwicklung

Unter Urban Mining wird die Rückgewinnung wertvoller Sekundärrohstoffe aus Produkten und Gebäuden und Infrastrukturen, so genannten anthropogenen Lagerstätten, am Ende ihrer Nutzungsphase verstanden. Gemeint ist damit beispielsweise sowohl die Rückgewinnung von Beton oder Kupfer aus alten Bauruinen als auch von Gold aus alten Smartphones. Derzeit wächst das anthropogene Lager innerhalb Deutschlands weiter an. Im Jahr 2015 umfasste es ungefähr 51,7 Mrd. t Material. Das entsprach in etwa der Summe aller Rohstoffe, die im Jahr 2000 weltweit gewonnen wurden. Den größten Anteil des anthropogenen Lagers machen Baustoffe wie Beton oder Ziegel aus. Seit Jahren sind zunehmend Technologiemetalle als Rohstoffe in das Blickfeld geraten, da sich auch hier Knappheiten abzeichnen (Sailer et al. 2012; UBA 2015; UBA 2017). Im Folgenden werden hier vor allem Baustoffe berücksichtigt.

Die Konzentrationen der Rohstoffe, die in anthropogenen Lagern vorkommen, sind vergleichbar oder überschreiten bereits die Konzentration der Rohstoffe, die in natürlichen Lagern vorkommen. Insgesamt wird im Fall von beispielsweise Kupfer angenommen, dass sich im globalen anthropogenen Lager inzwischen mehr befindet als in den restlichen natürlichen Lagerstätten (Mocker et al. 2010). Demnach enthält z. B. die Masse eines Hauses einen höheren Kupfergehalt als aktuell erschlossene Kupferminen (Wilts et al. 2014: 61).

Das Konzept des Urban Mining setzt sich insofern von der traditionellen Abfallwirtschaft ab, als dass die Abfallwirtschaft sich mit dem Abfallaufkommen an sich beschäftigt, also der Menge und Zusammensetzung des Mülls und einer möglichst guten Rückführung der Wertstoffe in den Stoffkreislauf. Urban Mining hingegen versucht alle langlebigen Güter mit einzubeziehen (z. B. Gebäude, Infrastruktur). So sollen zukünftige Stoffströme prognostiziert und die bestmöglichen Verwertungswege vorbereitet werden, bevor die Stoffe als Abfall anfallen. Ein möglichst großes Wissen über die verarbeiteten Materialien und ihre Nutzungszeit vereinfacht die Arbeit für Akteure,

sich auf die zukünftigen Abfallströme einzustellen und eine entsprechende Verwertung vorzubereiten. Mit zunehmenden Engpässen bzgl. der erschwerten Verfügbarkeit und steigenden Preisen von Rohstoffen stellt das anthropogene Lager eine immer interessanter werdende Rohstoffquelle dar (UBA 2017). Das Potenzial lässt sich jedoch nicht einfach erschließen.

Voraussetzung für den Abbau der anthropogenen Lager sind nicht nur geklärte Eigentumsrechte, sondern auch eine langfristige Planungsgrundlage und die Schaffung einer Wissensbasis in Form von Datenbanken und dynamischen Prognose-Modellen, wie sie z. B. bereits vom Umweltbundesamt initiiert wurden. Mit solchen Mitteln lässt sich dann feststellen, welche Anteile der regelmäßig neu eingebrachten oder sich bereits im Lager befindlichen Materialien als Sekundärrohstoffquelle unter welchen Voraussetzungen zur Verfügung stehen (UBA 2015).

Treiber

Unterstützend für die künftige Verbreitung von Urban Mining wirken spezifische informationstechnologische Entwicklungen. In zunehmendem Maße ist es möglich, z. B. Materialinformationen, Beschaffenheit, Rezepturen, Hinweise zu Verwertungsanforderungen etc. mithilfe von Datensätzen, beispielsweise über Bar-/QR-Codes abrufbar oder auf RFID-Chips hinterlegen zu können. Hierdurch können auch kritische Rohstoffe oder Schadstoffe angemessener bewirtschaftet werden.

Ein weiterer möglicher Treiber für eine Zunahme von Urban Mining in Deutschland ist der demografische Wandel, denn durch den regional konzentrierten Rückgang von Bevölkerungszahlen muss immer mehr darüber nachgedacht werden, was mit nicht mehr benötigter Infrastruktur und verlassenen Gebäuden geschehen soll. Hinzu kommt, dass durch die zunehmende Würdigung von Gewässer- und Bodenschutz auf der politisch-regulatorischen Ebene die Verfüllung von Bauschutt erschwert und dadurch teurer wird. Prognosen gehen von einem Überangebot von Primär- und Sekundärbaustoffen aus. Ein Problem ist die ungeklärte Lagerung und Nutzung des Bauschutts

aufgrund knappen Deponieraumvolumens. Daraus muss ein Umdenken erfolgen, so dass nicht der bisher beschrittene Weg „Abbruch – Verfüllung“, sondern für den Hochbau verstärkt auch das Bauschuttrecycling in den Fokus kommt. Diesbezüglich wurde die Ersatzbaustoffverordnung eingeführt (ExpertInnenangaben). Darüber hinaus müssten die Forschungsanstrengungen für die Entwicklung von Produkten und Techniken für den Einsatz von Recycling-Beton oder auch anderen Baustoffen weiter forciert werden. Was bereits technisch gut funktioniert, ist die Beimischung von Recyclaten in den Beton (ExpertInnenangaben). Allerdings sind die Akzeptanz und damit Nachfrage danach von Seiten der Bauherren noch sehr niedrig (UBA 2017: 53).

Doch fehlende oder unklare Verordnungen erschweren die Umsetzung von Urban Mining-Strategien. Die rechtlichen Rahmenbedingungen bieten das Bundesberggesetz (BBergG), das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) und das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Doch fehlt es bei diesen drei Gesetzen bislang an Anpassungen und konkretisierenden Verordnungen in Sachen Urban Mining. Mehr Klarheit und Planungssicherheit wird von der in Vorbereitung befindlichen Mantel-Verordnung erwartet, mit der eine Harmonisierung der materiellen Maßstäbe des Wasser-, Bodenschutz- und Abfallrechts vorgesehen ist. Damit sollen Qualitätsanforderungen bundesweit einheitlich geregelt und politische Rahmenbedingungen für hochwertige, ökologische Verwertungslösungen geschaffen werden. Wichtig ist das vorausschauende Gestalten weiterer rechtlicher Rahmenbedingungen für die Gewinnung, Erfassung und Behandlung von qualitätsgesicherten Sekundärrohstoffen (ExpertInnenangaben)

Relevanz für Klimaschutz und Ressourcenschonung

Am Beispiel von Gips wird deutlich, dass Urban Mining künftig relevanter werden wird. Jährlich werden in Deutschland ungefähr 7,5 Mio. t Gips verbraucht. Zum größten Teil wird REA-Gips (Koppelprodukt) verwendet. Dieser wird über Rauchgasentschwefelung in Stein- oder aber vor allem Braunkohlkraftwerken produziert. Um die Klimaschutzziele zu erreichen, wird die Stromerzeugung aus solchen Kraftwerken reduziert werden, wodurch auch die Gipsproduktion zurückgehen würde. Unter anderem werden Optionen für die Zukunft diskutiert: darunter der Ausbau der

Gewinnung von Naturgips und die Produktion von Recycling-Gips, wobei der jeweils mögliche Umfang nicht abschätzbar ist (Buddemeier und Rheinbay 2017).

Insgesamt stellt die konventionelle Rohstoffförderung und -weiterverarbeitung zu nutzbaren Materialien häufig eine Ursache enormer Umweltbelastungen in Form von Abraumflächen, Schadstoffbelastungen, Produktionsabfällen und energie- und prozessbedingten Emissionen von Treibhausgasen dar. Der Abbau und die Verarbeitung z. B. von Metallen oder Baustoffen benötigen große Mengen Wasser, Energie und Fläche. Urban Mining ist einer von mehreren Ansätzen, den negativen Auswirkungen dieser herkömmlichen Rohstoffförderung durch Vermeidung entgegenzuwirken und gleichzeitig unabhängiger von wichtigen Importen aus problematischen Regionen zu werden (Mocker et al. 2010). Die Umweltbilanz verschlechtert sich jedoch mit zunehmender Transportstrecke, also je weiter die Lagerstätte vom Ort der Verarbeitung entfernt ist.

„Recycling-Baustoffe werden sich gegenüber den traditionellen Baustoffen ohne gezielte Förderung kaum durchsetzen. Die bei den erneuerbaren Energien gesammelten Erfahrungen sollten deshalb auf die Recycling-Baustoffe übertragen werden. Durch gezielte Fördermaßnahmen, beispielsweise steuerliche Entlastungen bei der Herstellung und beim Einsatz von Recycling-Baustoffen, könnte eine verstärkte Anwendung erreicht werden. Welche Maßnahmen im Einzelnen geeignet sind, sollte Gegenstand ökonomischer Untersuchungen sein.“

Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller, Fachbereich Spezialbaustoffe, IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH

Aber nicht nur die Ressourcenschonung und Unabhängigkeit gegenüber Importen ist ein Vorteil der Rückgewinnung von Rohstoffen aus Urban Mining. Beispielsweise sind zur Produktion einer Tonne hochreinen Kupfers ca. 196 Tonnen Primärrohstoffe erforderlich, die der Natur entnommen werden. Wird Kupferschrott aufbereitet, so erfordert dies lediglich neun Tonnen Primärrohstoffe, und insbesondere we-

niger Energie (UBA 2017: 60). Entscheidend ist, dass im Recyclingprozess weitaus weniger energie- und prozessbedingt bedingte Treibhausgase emittiert werden als der Primärprozess (Dittrich/Auberger 2018: 54; Mocker et al. 2010). Aus diesem Grund sind vor allem elektronische Produkte mit einer hohen Konzentration seltener Metalle in den Fokus des Urban Mining gerückt (Cossu und Williams 2015).

Zwar weisen Recycling-Baustoffe mitunter eine geringere Qualität im Vergleich zu Primärrohstoffen auf. Bei zahlreichen Materialien sind jedoch die gleichen Materialqualitäten mit Rezyklaten möglich. Erforderlich ist die Festlegung von Standards und Qualitätsanforderungen für Materialien aus sekundären Vorstufen und damit verbundene Gewährleistungen (ExpertInnenangaben).

Wirkungszusammenhänge

Die sich ausweitende Praxis des Urban Mining kann sich technisch und ökonomisch förderlich auf die Entwicklung von Trenn- und Sortiertechniken auswirken. Steigende Nachfragen nach Sekundärrohstoffen wirken dann innovationsfördernd, kostensenkend und schließlich auch fördernd für umweltfreundlichere Branchen durch die Möglichkeit von Kapazitätserweiterungen.

Darüber hinaus ergibt sich durch den Ausbau des Urban Mining eine größere ökonomische Unabhängigkeit von Rohstoffimporten, damit verbunden eine Kostenreduzierung durch die Nutzung von Sekundärrohstoffen sowie positive umweltschonende Effekte. Beide Effekte sind dem geringeren Transportaufkommen geschuldet zumal anderenfalls recycelte Rohstoffe den Weltmarktpreis erhielten. Durch die Praxis des Urban Mining wird auch eine Stärkung der Leistungs- und Innovationfähigkeit des Wirtschaftsstandorts

erwartet, weil Rohstoffengpässe und Preiserhöhungen andere Volkswirtschaften betreffen werden, und ein gut entwickeltes System für Urban Mining Vorteile generieren wird.

Letztendlich kann Urban Mining positiv regulativ auf die Verbesserung von Sortier- und Trenntechniken wirken, denn möglichst klar definierte Abfalleigenschaftskriterien und die Deklaration (Digitalisierung, IoT) von wieder verwertbaren Stoffen erhöhen die sortierbaren bzw. trennbaren Stoffstrommengen.

Quellen

Buddemeier, Philipp; Rheinbay, Laura (2017): Chancen der Kreislaufwirtschaft für Deutschland. Analyse von Potenzialen und Ansatzpunkten für die IKT-, Automobil- und Baustoffindustrie. Studie von Accenture Strategy unter Mitwirkung der Ökopool GmbH für den Rat für Nachhaltige Entwicklung. Berlin.

Cossu, Raffaello; Williams, Ian D. (2015): Urban Mining: Concepts, terminology, challenges, in: Science Direct 2015 (45), S. 1-3.

Dittrich, Monika, Andreas Auberger (2018): KliRex Zwischenbericht AP 1.2. Heidelberg. Unveröffentlicht. Im Auftrag des Umweltbundesamts.

Mocker, Mario; Köglmeier, Markus; Leipprand, Anna; Faulstich, Martin (2010): Perspektiven für eine ressourceneffiziente Industriegesellschaft, in: Chemie Ingenieur Technik 2010 (82), S. 1881-1891.

Sailer, Michael; Menge, Karin; Quack, Dietlinde (2012): Urban Mining. Die Stadt als Goldgrube. Öko-Institut. Freiburg.

Umweltbundesamt (2015): Elemente einer erfolgreichen Ressourcenschonungspolitik. Hg.v. UBA. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2017): Urban Mining. Ressourcenschonung im Anthropozän. Hg.v. UBA. Dessau-Roßlau. Dessau-Roßlau. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/urban-mining-ressourcenschonung-im-anthropozan>

Wilts, Henning; Lucas, Rainer; Gries, Nadja von; Zirngiebl, Marthe (2014): Recycling in Deutschland - Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze. Wuppertal: Wuppertal Institut.



Trend 8

„Green Photonics“ als Wachstumsmarkt

Entwicklung

Unter Photonik wird die technische Nutzung von Licht in jeder Form verstanden. Licht besitzt besondere Eigenschaften, wie Lichtgeschwindigkeit, Fokussierbarkeit, Energiegehalt. Diese werden in der Photonik mit optischen Technologien nutzbar gemacht. Die technischen Anwendungen liegen im Bereich des sichtbaren Lichts und nicht sichtbaren Lichts (hier also UV- und Infrarot-Bereich). Typischerweise umfasst die Photonik Anwendungsbereiche, wie Produktionstechnik-, Energie- (z. B. Photovoltaik) und Beleuchtungstechnik (z. B. durch light-emitting diodes (LED) oder organic light emitting diodes (OLED)), Informations- und Kommunikationstechnik (glasfaserbasierte Kommunikationsnetze), Medizintechnik, oder Sicherheitstechnik (Zweck et al. 2015). Mit der Spezifizierung „Green Photonics“ werden optische Technologien bezeichnet, die zu Energieeinsparungen, effizienterer Ressourcennutzung und positiven Umweltwirkungen beitragen. Beispiele hierfür sind die emissionsarme Energieerzeugung mit Photovoltaik und energieeffiziente Beleuchtungstechnik wie LED und OLED. Zudem kann Licht als Werkzeug in Lasersystemen zu mehr Ressourceneffizienz bei Produktion und Fertigung beitragen. Auch als Messinstrument kann Licht in Form optischer Sensoren zu mehr Nachhaltigkeit beisteuern (Klayani et al. 2009; ExpertInnenangaben). Ferner gibt es Green Photonics Innovationen, wie laserbasierte Schädlingsbekämpfung in der Landwirtschaft, womit die Nutzung chemischer Pflanzenschutzmittel reduziert werden kann (ExpertInnenangaben).

nik wie LED und OLED. Zudem kann Licht als Werkzeug in Lasersystemen zu mehr Ressourceneffizienz bei Produktion und Fertigung beitragen. Auch als Messinstrument kann Licht in Form optischer Sensoren zu mehr Nachhaltigkeit beisteuern (Klayani et al. 2009; ExpertInnenangaben). Ferner gibt es Green Photonics Innovationen, wie laserbasierte Schädlingsbekämpfung in der Landwirtschaft, womit die Nutzung chemischer Pflanzenschutzmittel reduziert werden kann (ExpertInnenangaben).

Treiber

Besonders bei der industriellen Fertigung sind Laser ein Universalwerkzeug, mit dem erhebliche Ressourceneffizienz-Potentiale genutzt werden können (Cuhls et al. 2009). So können nasschemische Produktionsprozesse beispielsweise mit umweltfreundlicheren laserbasierten Verfahren ersetzt werden, und zu sinkendem Energieverbrauch beitragen. Vor allem beim Laserstrahlschneiden, -schweißen und bohren sind Steigerungen der Prozesseffizienz und bei der Bearbeitungsqualität zu erwarten (BMBF 2011). Eine



große Rolle bei der Steigerung von Ressourceneffizienz spielen verkürzte Prozessketten in der Fertigung. Dazu wird an parallelen Verfahren mit vielen Laserstrahlen im gleichen Prozess und der Integration mehrerer Bearbeitungsschritte in einer Maschine geforscht. Neue Laserprozesse erweitern zudem die Möglichkeiten von neuen Werkstoffkombinationen. So können gezielt Kombinationen artungleicher Werkstoffe werden, wie Glas-Metall, Glas-Kunststoff, Metall-Kunststoff oder Keramik-Metall, die sich mit bestehenden Verfahren nicht oder nur schwer verbinden und verarbeiten lassen. Somit ergeben sich z. B. im Leichtbau von Automobilen, Schiffen oder Flugzeugen Einsparpotentiale beim Energieverbrauch, wenn Materialien mit geringem Gewicht und hoher Festigkeit zusammengebracht werden können (→ Leichtbau) (Zweck et al. 2015).

Das weltweite Produktionsvolumen optischer Technologien im Jahr 2015 betrug 447 Mrd. Euro. Das jährliche Wachstum beträgt weltweit ca. acht Prozent, auch das Wachstum der deutschen Photonik-Industrie liegt bei acht Prozent jährlich. Von 2005 bis 2011 stieg der Wert der in Deutschland gefertigten Produkte von 17 Mrd. auf 27 Mrd. Euro. Die Wachstumsraten in den für Green Photonics relevanten Marktbereichen liegen zwischen zehn Prozent bei z. B. Displays und zwei Prozent im Bereich der Photovoltaik. Starke Zunahmen haben die Felder Beleuchtung mit 9 % und Produktion mit 6 % (Photonics21 2017).

Die PV-Technologie wird weltweit als eine tragende Säule einer zukünftigen emissionsarmen Energiebereitstellung angesehen. Im Jahr 2017 wurden global PV-Anlagen mit einer Kapazität von 99 GW neu installiert. Damit deckte die Solarenergie 2,5 % des weltweiten Strombedarfs 2017 (PV-Magazine 2018). Um im Preiswettbewerb der Stromerzeugung zu bestehen, sind Effizienzsteigerungen der PV-Zellen und weitere Verbesserungen in der Fertigung notwendig. In beiden Bereichen kann die Photonik wichtige Beiträge leisten (Zweck et al. 2015).

Relevanz für Klimaschutz und Ressourcenschonung

Entwicklungsbeispiele von Green Photonics mit Ressourcenrelevanz gibt es in fast allen der relevanten Technologiebereiche. Generell sind photonische Lösungsansätze aufgrund der genannten Lichteigenschaften oft energieeffizienter als vergleichbare Technologien. Da z. B. nicht Elektronen unter Wärme-

abgabe durch Widerstände Ladungen übertragen, sondern Photonen (Licht) geradezu verlustfrei Informationen übertragen.

„Die Photonik wird in vielen Bereichen in den nächsten Jahren Innovationen ermöglichen und eine Schlüsselrolle einnehmen. Vom autonomen Fahrzeug, bis zum Thema Mensch-Maschine-Interaktion oder moderne Landwirtschaft.“

Dr. Kevin Fuechsel, Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering

Schätzungen zufolge kann mit LED und OLED der weltweite Anteil des Stromverbrauchs für Beleuchtung von 20 %, bis zum Jahr 2030 um bis zu zwei Drittel gesenkt werden. Jedoch sollten neben den Energieeffizienzsteigerungen auch die Ressourcenbedarfe neuer Technologien betrachtet werden. Zur Beurteilung sind neben der Nutzungsphase auch die Herstellungs- und Entsorgungsphase relevant. LED-Beleuchtungen bspw. haben, verglichen mit anderen Beleuchtungstechnologien, einen geringen Stromverbrauch und mit 15.000 – 30.000 Nutzungsstunden längere Lebensdauern. Doch im Vergleich mit einer klassischen Glühlampe sind für die Herstellung mehr Rohstoffe erforderlich. Denn neben den Materialien der LED-Zelle sind auch Rohstoffe für die Steuerungselektronik und das große Gehäuse notwendig (Käsbohrer 2015).

„Die Trends Photonik und Leichtbau treffen derzeit aufeinander. Dabei wird das Ziel verfolgt, leichtere Bauteile zu fertigen und neuartige Materialien und Materialsysteme zu ermöglichen. Insbesondere Lasersysteme bieten hier die Chance Materialien zusammen zu bringen, die sich sonst nicht verbinden lassen. Damit sind neue Legierungen vorstellbar.“

Dr. Kevin Fuechsel, Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering

Auch der Trend von immer kleineren und kompakteren Sensoren kann aufgrund der Ressourceneinsparungen als Green Photonics angesehen werden. Dem Ressourcenschonungspotenzial wirken Reboundeffekte, wie die steigende Anzahl von Kameras pro

Telefon und allgemein eine steigende Produktnachfrage im Endkundenmarkt, stark entgegen. Diese Wachstumsmärkte können bei einigen Technologiemetallen (Indium und Gallium) zu Knappheit führen (ExpertInnenangaben). Im Vergleich zu den privaten EndkundInnenmärkten mit hohen Stückzahlen ist der Bedarf von Sensoren in der industriellen Produktion geringer. Hier werden optische Technologien verstärkt zur Einsparung von Rohstoffen und Reduktion von Produktionsabfällen eingesetzt. Eine wichtige Funktion haben optische Spektrometer bei der Erfassung chemischer Eigenschaften bei der Abfalltrennung (→ Sortier- und Trenntechniken). Hiermit können Wertstoffe direkt zurückzugewonnen werden und den Einsatz von Primärrohstoffen in der Produktion verringern (Martens und Goldmann 2016). Aktuell sind die Treiber zum steigenden Einsatz von Lasertechnologien weniger ökologische als vielmehr ökonomische Motive, wie bessere Produktfunktionalitäten (ExpertInnenangaben).

Wirkungszusammenhänge

Lasertechnologien werden weltweit in der Materialbearbeitung, der Automobilindustrie, im Flugzeugbau und in der Stahlindustrie eingesetzt. Sie sind ein wesentlicher Bestandteil bei den Entwicklungen zur Umsetzung von Industrie 4.0 (→ Internet of Things, Digitalisierung, Robotik). Ihre Anwendung ist verglichen mit vielen mechanischen Alternativen energieeffizienter und verringert Produktionsabfälle (Marscheider-Weidemann et al. 2016). Mittels Laser können neue Werkstoffverbindungen hergestellt werden, mit denen Leichtbaukonstruktion erst ermöglicht werden (→ Leichtbau). Optische Technologien wirken auf zahlreiche Technologien.

Laser vergrößern auch die Möglichkeiten bei der Werkstoffauswahl etwa durch den Einsatz von → Leichtbau im Fahrzeugbau, der Schiff- oder Luftfahrt. Daneben werden optische Sensoren in vielen Technologiefeldern eingesetzt. Optische Verfahren kommen auch in industriellen Prozessen der Abfallwirtschaft → Trenn- und Sortiertechniken zum Einsatz.

Quellen

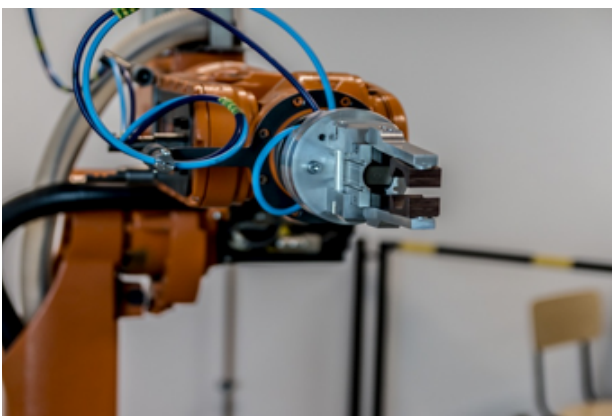
- BMBF (2011): Photonik Forschung Deutschland – Licht mit Zukunft, Herausgeber Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn 2011.
- Klayani, L., Charan, C. (2009): Green Photonics - A broad Overview and Future Aspects, Journal of Management Engineering and Information Technology (JMEIT).
- Käsbohrer, Sabine (2015): Energiesparlampe oder LED? Hg. v. CO₂ online. Online verfügbar: <https://www.CO2online.de/energie-sparen/strom-sparen/energiesparlampen-leds/energiesparlampen-oder-led/>.
- Marscheider-Weidemann, Frank; Langkau, Sabine; Hummen, Torsen; Erdmann, Lorenz; Tercero Espinoza, Luis Alberto; Angerer, Gerhard et al. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Auftragsstudie. Hannover: DERA (DERA Rohstoffinformationen, 28).
- Martens, Hans; Goldmann, Daniel (2016): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Photonics21 (2017): Europe's age of light! How photonics will power growth and innovation, Photonics21 vision paper published by European Technology Platform Photonics21, November 2017.
- PV-Magazine (2018): IEA PVPS: Weltweit wurden 2017 insgesamt 99 Gigawatt Photovoltaik-Leistung neu installiert, Autor: Ralph Diermann, online unter: <https://www.pv-magazine.de/2018/12/13/iea-pvps-weltweit-wurden-2017-insgesamt-99-gigawatt-photovoltaik-leistung-neu-installiert/>
- Zweck, Axel; Holtmannspötter, Dirk; Braun, Matthias; Cuhls, Kerstin; Hirt, Michael; Kimpeler, Simone (2015): Forschungs- und Technologieperspektiven 2030. Ergebnisband 2 zur Suchphase von BMBF- Foresight Zyklus II. Hg. v. VDI. Düsseldorf.

Trend 9

Automatisierung und Robotik - Einsatz von Industrierobotern

Entwicklung

In zahlreichen Branchen, wie Elektroindustrie, Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Informationstechnik, Sensorik, Antriebstechnik und Kommunikationstechnik steigen die Automationsgrade. Zukünftig werden automatisierte Anwendungen und industrielle Robotik nahezu flächendeckend eingesetzt (ExpertInnenangaben). Innerhalb der Branche Robotik und Automation wird in folgende Bereiche unterschieden: Montage- und Handhabungstechnik, Robotiksysteme und industrielle Bildverarbeitung. Die Einsatzschwerpunkte in Unternehmen liegen auf Industrierobotern und Handhabungssystemen bei der Fertigung und Montage. Eine Untersuchung von Beckert et. al (2016) zeigt, dass Automatisierung und der Einsatz von Industrierobotern zu Produktivitäts-, Flexibilitäts- und Qualitätssteigerungen führen können. Kürzere Durchlaufzeiten und durchschnittlich geringere Ausschussquoten führen zu Vorteilen bei Termintreue und stärken die Wettbewerbsfähigkeit. Die Wertschöpfung pro Beschäftigtem ist, im Vergleich zu Unternehmen mit geringer Automation und Industrierobotereinsatz, deutlich höher. Die Gesamtwertschöpfung hängt von der Reife der Technologien und deren Kosten und Pflegeaufwand und von möglicherweise disruptiven zukünftig wartungsärmeren und fehlerfreieren KI basierten Lösungen ab.



Im Jahr 2012 setzten in Deutschland ca. ein Drittel aller Betriebe des verarbeitenden Gewerbes Industrieroboter oder Handhabungssysteme in Produktionsprozessen ein. Besonders häufig ist die Nutzung in den Branchen Fahrzeugbau (53 %), Gummi- und Kunststoffwaren (40 %) und in der Metallindustrie

(36 %). Aber auch in den Branchen Nahrungs- und Genussmittel, Getränke, Tabak, Chemie, Maschinenbau, Elektrische Ausrüstungen, EDV und Elektronik verwenden mehr als 20 % Industrieroboter oder Handhabungssysteme (Beckert et al. 2016: 25). Entwicklungen einer verstärkten Anwendung von automatisierten Prozessen werden darüber hinaus mittelfristig in der sich wandelnden Gesundheitsbranche erwartet (ExpertInnenangaben).

Treiber

Untersuchungen zeigen, je größer das Unternehmen und die Menge der gefertigten Serien, desto höher der Einsatz von Industrierobotern. Beide Parameter bestätigen einen Zusammenhang zwischen Wirtschaftlichkeit und der Technologienutzung. Neben Großserienproduktionen werden Roboter auch bei der Herstellung komplexer Produkte häufiger eingesetzt. Das zeigt ein Blick auf die Wachstumsraten der Unternehmen mit Robotertechnologien in 2006 von 20 % mit denen von 33 % im Jahr 2012 (Beckert et al. 2016: 27). Generell werden die Technologien in allen Unternehmen, die sie installieren intensiv verwendet. Wenn Unternehmen in Industrieroboter oder Handhabungssysteme investierten, führten 22 % von ihnen auch Folgeinvestitionen in Technologieverbesserungen durch (Beckert et al. 2016: 33). Speziell im Bereich der Logistiksysteme nehmen Robotiksysteme zu, vor allem bei automatisch geführten Fahrzeugen (AGV) in Fertigungsumgebungen (Beckert et al. 2016: 82).

In den Branchen Fahrzeugbau, Metallindustrie und Gummi- und Kunststoffwaren mit den höchsten Nutzungsanteilen überwiegen die Planungen weiterer Anschaffungen. Anders ist es in der Chemieindustrie, wo in den vergangenen Jahren zwar stark in die Technologien investiert wurde, es aber kaum neue Planungen für weitere Technologieanschaffungen gibt. Insgesamt dominieren aktuell also große Betriebe beim Einsatz von Industrierobotern oder Handhabungssystemen, während kleine und mittelständische Unternehmen zurückhaltend sind. Untersuchungen zeigen aber, dass mittelständische Unternehmen inzwischen auch verstärkt in Planungen zur Ersteinführung von

Robotiksystemen einsteigen. Kleine Betriebe hingegen sind hier nach wie vor kaum aktiv.

Insgesamt verfügt Deutschland über mehr als 40 % des europäischen Industrieroboterbestands. Um den Automatisierungsgrad verschiedener Länder zu vergleichen, wird das Verhältnis der Industrieroboteranzahl eines Landes pro 10.000 Beschäftigten berechnet. Deutschland hat einen Automatisierungsgrad von 309 Industrieroboter auf 10.000 Beschäftigte. Im weltweiten Vergleich hat Südkorea mit 631 den höchsten Automatisierungsgrad, gefolgt von Singapur mit 488 und Japan mit 303. Deutschland liegt hier auf Platz drei. Die durchschnittlichen Automationsgrade in den europäischen Ländern liegen mit 99 deutlich darunter, der globale Durchschnitt ist mit 74 Industrierobotern auf 10.000 Beschäftigte noch geringer. Wie dominant die Automobilindustrie bei der Nutzung von Industrierobotern in Deutschland ist, zeigt der spezifische Automationsgrad dieser Branche in Höhe von 1.131 Industrieroboter pro 10.000 Beschäftigte. Für die anderen Branchen ergibt sich dann nur ein Wert von 181. Auch alle anderen Länder haben hohe spezifische Automationsgrade der Automobilindustrie (IFR 2017)

Relevanz für Klimaschutz und Ressourcenschonung

Bis 2020 werden die Energieeinsparpotenziale einer anforderungsgerechten Automation von Maschinen und Anlagen in Deutschland gegenüber 2010 auf bis zu 15 % geschätzt. Das entspricht einer Energieeinsparung von 88 TWh jährlich und einer Reduktion um 43 Mio. Tonnen energiebedingten CO₂-Äquivalente bezogen auf den aktuellen Strommix (Behrendt und Erdmann 2010; Pyper 2016). Mit industrieller Automatisierung durch IKT könnte durch Effizienzsteigerung bei der Fertigung auch der Materialaufwand in der EU bis 2020 um rund vier Prozent verringert werden (Behrendt und Erdmann 2010: 39). Daraus folgt auch ein Rückgang von Gütertransportleistungen und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen.

Parallel treten Rebound-Effekte auf, deren wesentliche Ursachen auf der Seite der VerbraucherInnen vor allem einkommensstärkende und preissenkende Wirkungen von Effizienzverbesserungen zurückzuführen sind (Behrendt und Erdmann 2010). Ebenso gibt es auf Seiten von Industrie und Unternehmen Reboundeffekte. Ausgelöst durch sinkende spezifische Energieverbräuche und entsprechend geringere

Betriebskosten, steigt die Gesamtanzahl von Maschinen und Anlagen pro Unternehmen. In Summe können dadurch die Rohstoffinsanspruchnahme und der Stromverbrauch zunehmen. Für den Nutzen verstärkter Automatisierung ist daher entscheidend, ob vor allem energieintensive Produktionstechniken ersetzt werden, wie bspw. der Austausch von energieintensiven pneumatischen durch elektrische Stellantrieben (ExpertInnenangaben).



In der Automatisierung und industriellen Robotik werden zudem viele wertvolle Materialien, wie Kupfer, Edelmetalle und vermehrt seltene Metalle und Verbundmaterialien eingesetzt. Durch die Automatisierung von Herstellungsprozessen von Produkten mit sehr kurzen Lebenszyklen von zwei Jahren und weniger und gleichzeitig hohen Stückzahlen in Endkundenmärkten, wie bei Chips in Smartphones, könnten Knappheiten entstehen. Dies erfordert neue Recycling- oder Entsorgungsmöglichkeiten (→ Sortier- und Trenntechniken). Im verarbeitenden Gewerbe mit Maschinenlaufzeiten von bis zu mehreren Jahrzehnten ist die Menge der Materialien hingegen weniger problematisch. Steigende Automatisierung ermöglicht den Einsatz von Verfahren mit denen einzelne Bauteile in Abhängigkeit der spezifischen Werkstoffeigenschaften im laufenden Prozess auf Fehler geprüft werden können. Das optimiert den

„Daisy ist ab sofort in der Lage 15 verschiedene iPhone-Modelle mit einer Geschwindigkeit von 200 iPhone-Geräten pro Stunde zu demontieren und kann jetzt sogar zusätzliche wichtige Materialien zur erneuten Verwendung wiedergewinnen. Sobald die Materialien von Daisy wiedergewonnen wurden, werden sie in den Herstellungsprozess zurückgeführt. Für Kobalt, ein elementares Material in Batterien, schickt Apple von Daisy recycelte iPhone-Batterien zurück in die Lieferkette. Diese werden dann mit verschrotteten Materialien aus ausgewählten Produktionsstätten kombiniert und erstmalig wird ab sofort das bei diesem Prozess gewonnene Kobalt zur Herstellung brandneuer Apple-Batterien verwendet — ein komplett geschlossener Kreislauf für diesen wertvollen Rohstoff.“

zitiert aus Apple's Pressemitteilung: <https://www.apple.com/de/newsroom/2019/04/apple-expands-global-recycling-programs/>

Prozess und die Kosten (Ciupek/Reckter 2018; ExpertInnenangaben). Ferner zeigen Studien, dass die Steigerung der Ressourceneffizienz in vielen Unternehmen lediglich ein Nebeneffekt der angestrebten Prozessautomatisierung darstellt, weshalb Energie- und Ressourcenverbräuche selten systematisch gemessen und ausgewertet werden. Dies ist aber eine Voraussetzung, um alle Ressourceneffizienzpotenziale zu identifizieren und zu realisieren (Schebek et al. 2017).

Wirkungszusammenhänge

Wirkungszusammenhänge werden vor allem mit der → Digitalisierung und neuen Produktionsverfahren, wie z. B. dem 3D-Druck gesehen. Aber es gibt auch Wechselwirkungen zwischen der Logistik und der → Automatisierung, da das Engineering immer häufiger an einem ganz anderen Ort auf der Welt stattfindet, als die physische Herstellung der Maschine (ExpertInnenangaben).

Kostensenkungen bei der Herstellung durch Automatisierung führt zur Steigerung der Nachfrage nach folgenden Technologien → Green Photonics (z. B. Sensoren), → das Internet der Dinge, → Sortier- und

Trenntechniken aber auch im → Leichtbau. Sortier- und Trenntechniken können dabei auch der Einsatz von Robotern sein. Insbesondere bei den technischen Entwicklungen wird zwischen Automationstechnologien und denen für das Internet der Dinge hohe Ähnlichkeit erwartet. ExpertInnen sehen zudem Synergien bei der Entwicklung von Standards in den Bereichen Datenkompatibilität, Maschinenkommunikation und Schnittstellen (ExpertInnenangaben).

Quellen

Beckert, Bernd; Buschak, Daniela; Graf, Birgit; Hägele, Martin; Jäger, Angela; Moll, Cornelius et al. (2016): Automatisierung und Robotik-Systeme. Studie zum deutschen Innovationssystem. Hg. v. Fraunhofer-Institut. Karlsruhe.

Behrendt, Siegfried; Erdmann, Lorenz (2010): Querschnittstechnologien, Innovationssprünge für Ressourceneffizienz. Eine Explorationsstudie. Hg. v. IZT. Berlin.

BMUB (2015): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin.

Ciupek, Martin und Reckter Bettina (2018): Bauteil in der Röhre, Artikel in VDI Nachrichten Ausgabe 41 vom 11. Oktober 2018, online abrufbar: <https://www.vdi-nachrichten.com/Gesellschaft/Bauteil-in-Roehre>

IFR (2017): Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots Hg. v. IFR - International Federation of Robotics. Online verfügbar: https://ifr.org/downloads/press/Executive_Summary_WR_2017_Industrial_Robots.pdf

Schebek, Liselotte; Kannengießer, Jan; Campitelli, Alessio; Fischer Julia et al. (2017): Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0. Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE). Berlin.

Schneider, Lisa; Steiger, Hartmut (2015): Die Welle der Automatisierung rollt 2015, 13.02.2015. Online verfügbar: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Die-Welle-Automatisierung-rollt>, zuletzt geprüft am 21.07.2017.

Uhlmann, Eckart (2015): Automatisierungstechnik. Broschüre. Hg. v. Fraunhofer IPK. Berlin.

Pyper, Michael (2016): Interview mit ZVEI und Wago von Michael Pyper freier Autor für ke.next 2016. Online verfügbar: <https://www.ke-next.de/automation/steuerung-industrie-pc/industrie-4-0-veraendert-die-prozessindustrie-111.html?page=3>

Trend 10

„The Internet of Things“ als Baustein für die Industrie 4.0

Entwicklung

Das Internet der Dinge (Internet of Things, IoT) basiert auf einer fortgesetzten digitalen Automatisierung durch die Vernetzung von Alltagsgegenständen und Dienstleistungen über das Internet. Wesentlich dafür sind miteinander verbundene Cyber-Physische-Systeme (CPS). Ein CPS ist die technische Verknüpfung von physikalischer und virtueller Welt auf Basis von Kleinstcomputern und Software, die Daten erfassen und mit anderen CPS interagieren können. Da die Technik in Objekte wie Produkte, Materialien, Maschinen etc. eingebettet ist, werden sie auch eingebettete Systeme (embedded systems) genannt. Alle eingebetteten Systeme sind mit Rechenleistung und einer eindeutigen Identifikation (wie z. B. RadioFrequency-ID oder IP-Adressen) ausgestattete kleine Computer (Bischoff et al. 2015). Zukünftig sind demnach alle physischen Objekte, die eine IP-Adresse, Sensoren und Mikrochips haben, befähigt mit anderen IT-Systemen und Gegenständen, von jedem beliebigen Ort aus, Informationen weiterzugeben oder Dienste abzurufen oder zu nutzen. Ein Computer kann dann in Geräten und in Gegenständen wie z. B. in der Kleidung (so genannte „wearables“) enthalten sein und diese Objekte zum Senden und Empfangen von Daten befähigen. Anwendungsgebiete von solchen „smarten Textilien“ - wie bei Notfalljacken, die auf Druck oder Zug am Ärmel automatisch eine vorher festgelegte Notfallnummer wählen oder Polizeikleidung mit integrierten Monitoren – sind bisher vor allem in extreme Arbeitssettings im Gesundheitsbereich oder im Leistungssport verbreitet. In der so genannten Industrie 4.0 könnten solche technischen Textilien und wearables „als Schnittstelle zwischen Arbeitern und Maschinen“ eingesetzt werden (Krshiwoblozki, zitiert nach Ciesielski 2017). Das Internet der Dinge (IoT) ist ein technologischer Baustein für die „Industrie 4.0“ (Odenbach et al. 2017). Unter diesem Metabegriff werden die Verknüpfung von Produktions- und Wertschöpfungssystemen auf allen Ebenen des Unternehmens sowie darüber hinaus verstanden.

Das IoT basiert auf zahlreichen Technologien zur Kommunikation (GSM, UMTS, Wi-Fi), Adressierbar-

keit und Identifikation (RFID oder Barcodes), Sensorik, Endeinheiten wie Greifarme, Kleinstcomputer sowie Benutzerschnittstellen zur Mensch-Maschine Kommunikation. Hinzu kommen Innovationen aus den Bereichen Sprach-, Bild- und Gestenerkennung (Mattern und Flörkemeier 2013). In der Logistik konzentrieren sich Anwendungen derzeit auf Technologien wie RFID oder Barcodes zur Identifikation und Lokalisierung von Objekten. Mittels RFID-Technologien kommunizieren immer mehr Alltagsgegenstände, wie Schlüsselkarten und Hotelzimmer Türen oder Skipässe und Lifte (Mattern und Flörkemeier 2013). Im Verkehrsbereich sind weit umfangreichere Anwendungen vorstellbar, wie etwa die intelligente Regelung von Verkehrsflüssen in Echtzeit. Mit Sensoren ausgestattete Autos könnten Daten liefern, die in die Entwicklung von Algorithmen fließen, die schließlich in Echtzeit die weitere Verkehrsentwicklung vorausberechnen und den AutofahrerInnen zur Verfügung stellen können (Dupree 2015).

„Die ganze Entwicklung zur Industrie 4.0 ist signifikant, verglichen damit was wir bisher im Automatisierungsbereich kennen. Die Vernetzung der Produktionsprozesse steigt mit der Digitalisierung.“

Johannes Kalhoff, PHOENIX CONTACT GmbH & Co KG

Bereits heute gängige IoT-Anwendungen im Endkundenbereich sind z. B. Fitnessarmbänder mit den dazugehörigen Apps zur Datenauswertung oder im so genannten Smart Home Bereich etwa zur Optimierung der Licht- und Heizungsregelung.

Auf Ebene der produzierenden Unternehmen sind im Bereich Industrie 4.0 bis zum Jahr 2025 hohe Produktindividualität, flexibilisierte und effiziente Produktion auch bei Einzelstückfertigung (Losgröße Eins), Integration von KundInnen und GeschäftspartnerInnen in den Produktionsprozess sowie Kopplung von Produktion und Dienstleistungen erreichbar (Roth 2016).

Langfristig ist davon auszugehen, dass die Nutzungsmöglichkeiten des IoT weit darüber hinausgehen und weiteren Bereichen wie Wirtschaft, öffentliche Infrastrukturen und Landwirtschaft enorme Chancen bieten. Neben den Technologien selbst, stellen Sicherheitslücken und die Formulierung klarer rechtlicher Rahmenbedingungen die größten Herausforderungen dafür dar. Es ist unumgänglich, dass Datensicherheit bereits bei der Komponentenentwicklung eine entscheidende Rolle spielen muss (Dupree 2015).

Treiber

Obwohl technologische Weiterentwicklungen einen zunehmend wichtigen Stellenwert bei der Verknüpfung von Mensch, Ding und Internet eingenommen haben und das Internet der Dinge sich zu einem System vollzieht, in dem Objekte tatsächlich mit NutzerInnen kommunizieren (Mattern und Flörkemeier 2013), befinden sich die Entwicklungen insgesamt noch am Anfang. Ausgereift ist das IoT dann, wenn Maschinen, Sensoren, Software etc. selbstständig arbeiten können und auch Wartung, Überwachung und Regelung übernehmen. An den Voraussetzungen für eine flächendeckende Einrichtung des IoT wird bereits seit Jahren kontinuierlich gearbeitet. Die weitere Verbreitung basiert dabei auf drei wesentlichen Faktoren: leistungsfähige Netzinfrastrukturen, der Zunahme vernetzter Maschinen und Geräte sowie der Verbesserung der Methoden und Infrastrukturen zur Analyse der stetig wachsenden Datenmengen (Gentner und Gramatke 2016).

Laut Hochrechnungen sind im Jahr 2020 bis zu 20,4 Mrd. Dinge vernetzt. Allein im Jahr 2015 stieg

die durchschnittliche Verbindungsgeschwindigkeit um 23 % an. In nur einem Jahr (2016) ist die Anzahl vernetzter Geräte um 31 % auf 8,4 Mrd. Geräte angestiegen. Im Endverbraucher Bereich wurden von insgesamt 8,4 Mrd vernetzten Geräten mit 5,2 Mrd. der größte Teil eingesetzt, in den Unternehmen waren es 3,1 Mrd. Geräte (Graser 2017). Prognosen zufolge steigt auch der Umsatz mit industriellen IoT Anwendungen von 7,2 Mrd. Euro im Jahr 2017 um mehr als das Doppelte bis zum Jahr 2022. Besonders stark wachsen die Anwendungen in den Branchen Automobilindustrie und Maschinen- und Anlagenbau (ca. 50 % des prognostizierten Umsatzes) (Kleinz 2017).

Relevanz für Klimaschutz und Ressourcenschonung

Einerseits ermöglicht das Internet der Dinge einen nachhaltigeren Umgang mit Ressourcen, wie bspw. eine intelligente Strom- und Heizungsnutzung, in privaten Haushalten sowie in Industrie und Gewerbe (Grimm 2016). Wenn alle Maschinen in Haushalten, Industrie, Verkehr und in der Landwirtschaft über das Internet miteinander kommunizieren, so errechnet eine Studie, könnte dadurch ein jährliches CO₂-energiebedingtes Einsparpotenzial von insgesamt 9,1 Gt realisiert werden. (Cullinen 2013; Reuter 2016). Andererseits ist hierbei nicht berücksichtigt worden, dass für die Umsetzung des Internets der Dinge zeitgleich zahlreiche Geräte und Maschinen produziert und teilweise ununterbrochen betrieben werden müssen (bspw. Server-Infrastrukturen), wodurch immense energiebedingte CO₂-Emissionen entstehen (Dupree 2015).



Hinzu kommt eine rasante Technikentwicklung, so dass neue Anwendungen auf alten Geräten nicht mehr funktionieren (als eine Form der Obsoleszenz). Neue Technologien führen zu einem hohen Innovationsdruck, der den Energie- und Rohstoffverbrauch durch das Internet der Dinge weiter ankurbelt (Ender 2015). Der Stromverbrauch aller Informations- und Kommunikationsgeräte in Deutschland entspricht in etwa der Erzeugungsmenge von ca. zehn Kraftwerken, das entspricht zehn Prozent des deutschen Gesamtstromverbrauchs (Ender 2015). Insgesamt wird bei diesem Technologietrend mit einem zunehmenden Gesamtstromverbrauch gerechnet, denn die genutzten Geräte werden zwar effizienter, aber ihre Anzahl insgesamt steigt (Rebound-Effekte). Solange Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch nicht absolut entkoppelt wurden - und derzeit sie es nicht danach aus, dass es bald gelingen würde - sind diese Steigerungen ressourcenintensiv und umweltbelastend.

Wirkungszusammenhänge

Die technologischen Entwicklungen der Trends „Automation und Robotik“ und „Internet der Dinge“ sind vergleichbar. In beiden Trends sind die Entwicklung von Standards zur Datenkompatibilität oder von Schnittstellen zur Maschinenkommunikation wichtige Erfolgsfaktoren. Durch eine weite Verbreitung und Anwendung in Alltagsgegenprodukten entstehen neue Herausforderungen für das Recycling (Sortier- und Trenntechniken), wenn etwa Textilfasern und Elektronik verwoben sind, wird es schwierig, sie werkstoffgerecht für das Recycling zu trennen

Quellen

Bischoff, Jürgen; Christoph Taphorn, Denise Wolter, Nomo Braun, Manfred Fellbaum, Alexander Goloverov, Stefan Ludwig, Tobias Hegmanns, Christian Prasse, Prof. Dr. Michael Henke, Michael ten Hompel, Frederik Döbbeler, Emanuel Fuss, Christopher Kirsch, Ben Mättig, Stefan Braun, Michael Guth, Mark Kaspers, Doris Scheffler (2015): Erschließen der Potentiale der Anwendung von Industrie 4.0 im Mittelstand, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin.

Cullinen, Matt (2013): Machine to machine Technologies: Unlocking potential of a \$1 trillion industry. Hrsg. v. Tessa Lee und Hilary McMahon. The Carbon War Room. Washington DC. Online verfügbar: <https://d231jw5ce53gcq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/M2M-Technologies-Carbon-War-Room.pdf>.

Ciesielski, Rebecca (2017): Wie intelligente Kleidung unser Leben verbessern soll, 20.01.2017 Rebecca Ciesielski, Tagesspiegel, Online verfügbar: <http://digitalpresent.tagesspiegel.de/wie-intelligente-kleidung-unser-leben-verbessern-soll>

Dupree, Simon (2015): Das Internet der Dinge. RESET. Berlin. Online verfügbar: <https://reset.org/knowledge/das-internet-der-dinge-11162015>, zuletzt geprüft am 21.07.2017.

Ender, Norbert (2015): Das Internet der Dinge - Von Bedeutung für eine moderne Verwaltung? Hrsg. v. IBM Schweiz AG. Online verfügbar: https://de.slideshare.net/Swiss_eGovernment_Forum/segf-2015-45369362

Fischer, Thomas (2015): Internet der Dinge. Chancen und Risiken. Hg. v. heise online. Hannover. Online verfügbar: <https://www.heise.de/microsites/das-insider-portal/home/internet-der-dinge-chancen-und-risiken/150/472/1649/1>, zuletzt geprüft am 21.08.2017.

Gentner, Andreas; Gramatke, Mirko René (2016): Industrielles internet der Dinge und die Rolle von Telekommunikationsunternehmen. Hype oder vernetzte Revolution? Unter Mitarbeit von Menes Kum, Wanja Giessen, Sven Heinzelmann und Ralf Esser.

Grimm, Petra (2016): Smarte schöne neue Welt? Das Internet der Dinge. Bundeszentrale für politische Bildung. Berlin.

Kleinz, Torsten (2017): Industrielles Internet der Dinge: Eine Renaissance für „Made in Germany“, Hrsg. v. heise online. Hannover. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Industrielles-Internet-der-Dinge-Eine-Renaissance-fuer-Made-in-Germany-3899716.html>.

Mattern, Friedmann; Flörkemeier, Christian (2013): Vom Internet der Computer zum Internet der Dinge. ETH Zürich. Online verfügbar: <http://www.vs.inf.ethz.ch/publ/papers/Internet-der-Dinge.pdf>

Odenbach, Jan; Edgar Göll, Siegfried Behrendt (2017): Industrie 4.0 – digital-vernetzte dezentrale Produktion Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy. Arbeitspapier. IZT. Berlin.

Reuter, Benjamin (2016): Wie plaudernde Maschinen das Klima retten, WirtschaftsWoche Online, der Handelsblatt GmbH. Online verfügbar: <http://www.wiwo.de/technologie/green/living/internet-der-dinge-wie-plaudernde-maschinen-das-klima-retten/13545436.html>.

Roth, Arnim Hrsg. (2016): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0, Armin Roth Herausgeber, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

4 Schlussfolgerungen

Grundsätzlich gilt der systemische Zusammenhang, wie er in Abbildung 1 (CLD) dargestellt wurde: Der Einsatz von neuen Technologien bedeutet immer den Einsatz von Rohstoffen und schließlich auch den Einsatz von Energie. Dem gegenüber stehen Einsparungen durch Effizienzgewinne – sowohl bei der Rohstoffnutzung als auch der Energieinanspruchnahme. Insofern spielen Mengen- bzw. Skaleneffekte, räumliche und zeitliche Verlagerungseffekte sowie Rückkopplungseffekte eine wichtige Rolle bei der Bewertung möglicher Wirkungen der Trends.

Zwar lassen sich bei vielen technologischen Trends und Innovationsprozessen und deren konkreten Anwendungen solche Entwicklungen auffinden, mit denen der Wirkungszusammenhang von Ressourceneffizienz und Klimaschutz als insgesamt oder vorwiegend positiv eingestuft werden kann. Aber es gibt immer auch Anwendungsbeispiele neuerer Technologien, die ambivalente bis gegenteilige bzw. negative Effekte zeigen, wie beispielsweise durch Rebound-Effekte, wenn Effizienzgewinne dazu führen, dass mehr produziert und konsumiert wird. Für kaum einen Technologietrend können eindeutige und allgemein gültige Einschätzungen und Aussagen zu Effekten in Bezug auf Ressourceninanspruchnahme und Treibhausgasemissionen formuliert werden. Häufig handelt es sich um ambivalente Wirkungen, etwa wenn Leichtbau zwar eine Energieeinsparung ermöglicht, aber durch die eingesetzten Verbundstoffe ein Recycling erschwert. Oder wenn das Internet of Things zwar Prozesse optimiert, aber gleichzeitig andere, wenig nachhaltige Rohstoffe und zusätzlich Energie benötigt werden.

Sollte das Energiesystem zukünftig vollständig auf erneuerbaren Quellen basieren, rückt der Fokus auf die prozessbedingten und biobasierten Treibhausgasemissionen. Auch wenn die Transformation hin zu erneuerbaren Energien technisch möglich und besser zu bewerten ist als der Einsatz fossiler Energieträger, darf in Zukunft nicht außer Acht gelassen werden, dass die Nachfrage nach den dafür benötigten biotischen, mineralischen und metallischen Rohstoffen stets auch globale und häufig negative Auswirkungen

in den Extraktionsökonomien sowie bei knapper werdenden Rohstoffen auf Kosten des nachholenden Ausbaus in anderen Länder hat (Externalisierungseffekte). Problematisch können daher einseitige Politiken sein, die nur auf Teilsysteme abzielen ohne die systemischen Zusammenhänge zu berücksichtigen.



Sowohl Produktion als auch Konsum sollten jeweils hinsichtlich der Rohstoffinanspruchnahme (inkl. Recyclingfähigkeit) und gleichzeitig des Energiebedarfs bzw. Einsparpotentials entlang der gesamten Wertschöpfungskette, also inklusive ausgelagerter Effekte, bewertet werden. Entsprechen müssten Politikinstrumente an verschiedenen Stellen ansetzen und beide Seiten berücksichtigen. Insgesamt verfügt die Politik über viele Spielräume und Hebel, die besser genutzt werden müssen. Es braucht hier effektive Strategien, die auf einen Mix aus Ressourceneffizienz, Ressourcenkonsistenz und Ressourcensuffizienz setzen und dabei die systemischen Zusammenhänge und Wechselwirkungen der Entwicklungen untereinander berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund zeigt die systematische Betrachtung der Wirkungszusammenhänge, dass Erfolge in einem Bereich nicht auf Kosten des anderen Bereichs erfolgen dürfen. Die betriebs- und volkswirtschaftliche Optimierung von Angebot und Nachfrage darf in keinem Fall das

alleinige Kriterium sein. Ebenso gilt es andauerndes Wirtschaftswachstum als Selbstzweck in Frage zu stellen.



Hier muss die Politik im Sinne der übergeordneten Ziele von Energieeinsparung, Klimaschutz und Ressourcenschonung steuern. Dazu hat sie auch nach Art 20a GG den Auftrag, im Sinne der Nachhaltigkeit die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen.

Wichtig ist dabei, dass Änderungen im Konsumverhalten nicht durch Anreize und „Anschubser“ (Stichwort: Nudging, z. B. durch die gezielte Platzierung von Produkten) allein, sondern auch durch Ge- und Verbote erreicht werden (wie z. B. einen erhöhten Anteil ressourcenschonender Produkte in der öffentlichen Beschaffungspolitik fest zu schreiben). Neben solchen Regulierungen bietet es sich an die Ressourceninanspruchnahme und andere Nebeneffekte von Produkten transparent zu machen (z. B. über die Recyclingfähigkeit von Materialien), um den VerbraucherInnen informiertere und bewusstere Kaufentscheidungen zu ermöglichen. Änderungen im Konsumverhalten der VerbraucherInnen Richtung mehr Ressourcenschonung könnten unterstützt werden durch eine transparente Kennzeichnung des ökologischen Rucksacks bzw. Fußabdrucks von Produkten. Wäre die Ressourceninanspruchnahme bzw. Recyclingfähigkeit und der Energiebedarf ersichtlich, könnten Bewertungen im Vergleich zum individuellen Nutzen anders ausgehen und zu einem Wertewandel beitragen. Einige vermeintlich fortschrittlichen Innovationen z. B. des Internet of Things, wie etwa Textilien, die per RFID mit der Waschmaschine über die empfohlene Waschtemperatur kommunizieren

würden sich dann schnell als kontraproduktiv und wenig nachhaltig erweisen.

Allerdings zeigen empirische Studien auch die Grenzen dieses Ansatzes auf und machen deutlich, dass trotz aller Aufklärungsmaßnahmen die Diskrepanz vom Umweltwissen zum Umwelthandeln immer noch groß ist. Deshalb ist es ergänzend zur Förderung des nachhaltigen Konsums sinnvoll das politische Vorsorgeprinzip ernst zu nehmen und z. B. die Rohstoffe zur Produktion von Freizeitrobotern, von Sensoren in Kleidung oder für Kunststoffprodukte auf Erdölbasis – stärker und aufkommensneutral zu besteuern (Vgl. auch die Vorschläge für eine CO₂-Steuer) oder sogar zu verbieten (Vgl. EU-Initiative zum Verbot von Einweggeschirr und Strohhalmen aus Plastik).

Wirtschaftsakteure scheuen in der Regel nationale Alleingänge in der politischen Regulierung, da sie befürchten, dass diese die Wettbewerbsfähigkeit auf eigenen wie auf internationalen Märkten einschränken könnten. Volkswirtschaftlich machen die erneuerbaren Energien, lokales Recycling und rechtzeitige Investition in ressourcenschonende Schlüsseltechnologien jedoch Sinn, da hierüber die Wertschöpfung im Inland erhöht werden kann, etwa gegenüber Importen fossiler Energieträger, Batterien und Technologierohstoffen. Neben ambitionierten, nationalen Schritten muss auch international über starke internationale Regime und Organisationen (z. B. UN) aber auch bilaterale Abkommen Nachhaltigkeit politisch durchgesetzt werden. Deckelnde Cap-Systeme oder auf Ressourcen-Inanspruchnahme ausgeweitete Top-Runner Ansätze könnten hier effektiv wirken.

5 Literatur und Quellen

- [1] Behrendt, Siegfried; Nolte, Roland; Röben, Adrian (2015): Recycling als Rohstoffquelle. Zukunftsmärkte und Technologieanforderungen. Integrierte Roadmap III, Automation 2025+. Hg. v. ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik. Frankfurt am Main.
- [2] Bertalanffy, Ludwig von: An Outline of General Systems Theory. In: The British Journal for the Philosophy of Science, 1/2, 1950, S. 134–165, hier: S. 143.
- [3] Braun, Anette; Holtmannspötter, Dirk; Korte Sabine; Rijkers-Defrasne, Sylvie; Zweck, Axel (2013): Technologieprognosen. Internationaler Vergleich 2013. Hg. v. Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH. VDI Technologiezentrum GmbH. Düsseldorf.
- [4] Bringezu, Stefan (2014): Carbon Recycling for Renewable Materials and Energy Supply – Recent Trends, Long-Term Options, and Challenges for Research and Development, In: Journal of Industrial Ecology 2014, Vol. 18, Issue 3, 327-340.
- [5] Cuhls, Kerstin; Ganz, Walter; Warnke, Philine (2009): Foresight-Prozess im Auftrag des BMBF. Etablierte Zukunftsfelder und ihre Zukunftsthemen. Fraunhofer Institut. Karlsruhe/Stuttgart.
- [6] DASTI (Danish Agency for Science, Technology and Innovation), OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2016): An OECD horizon scan of megatrends and technology trends in the context of future research policy. Danish Agency for Science, Technology and Innovation. København.
- [7] Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2014): Zukünftige Speicher- und Flexibilitätsoptionen durch Power-to-X, Antje Wörner, EnergieSpeicherSymposium Stuttgart, 12. März 2014.
- [8] EEA (European Environmental Agency) (2007). Europe's environment. The fourth assessment. Copenhagen: European Environment Agency. Online verfügbar: http://www.eea.europa.eu/publications/state_of_environment_report_2007_1.
- [9] Fichter, Klaus; Hintemann, Ralph; Beucker, Severin; Behrendt, Siegfried (2012): Gutachten zum Thema „Green IT - Nachhaltigkeit“. für die Enquete-Kommission Internet und digitale Gesellschaft des Deutschen Bundestages. Borderstep; IZT. Berlin.
- [10] Gandenberger, Carsten; Andreas Hermann, Lukas Rüttinger, Christine Scholl (2017): Entwicklung von Politikempfehlungen für die Weiterentwicklung und Ausgestaltung von strategischen Ansätzen einer nachhaltigen und effizienten Rohstoffgewinnung und -nutzung. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-von-politikempfehlungen-fuer-die>
- [11] German Convention Bureau (GCB) (2013): Tagung und Kongresse der Zukunft. Zukunftsstudie. Erstellt von Göll, Edgar und Evers-Wölk, Michaela. Frankfurt.
- [12] Hirschnitz-Garbers, Martin, Susanne Langsdorf, Ullrich Lorenz (2018): Ressourcenschonung als Zukunftsaufgabe – Ansatzpunkte für eine systemische Ressourcenpolitik. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau.
- [13] Kaku, Michio (2013): Die Physik der Zukunft. Unser Leben in 100 Jahren. 5. Aufl. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.
- [14] Kristof, Koller, Günther, Lorenz, Kanthak, Jacob, Weber, Mutert, Golde, Köder, Matthey, Hagenah, Moser, Odendahl, Bischoff, Brattig, Fabian, Eggers, Oehme, Plehn, Ilvonen, Bolland, Wuttke, Krause, Friedrich, Schnepel, Krüger, Rechenberg, Krause, Reichart, Kessler, Kosmol, Müller, Weiss, Menzel, Pluta, Simon, Köhn (2015): Elemente einer erfolgreichen Ressourcenschonungspolitik. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/elemente-einer-erfolgreichen-ressourcenschonungspolitik>.
- [15] Kuusi, Osmo; Heinonen, Sirkka, Salminen, Hazel (Eds.) (2017): How Do We Explore Our Futures? Methods of Futures Research (Helsinki: Acta Futura Fennica 10; The Finnish Society for Futures Studies)
- [16] Langsdorf, Susanne; Hirschnitz-Garbers, Martin (2014): Die Zukunft im Blick: Trendbericht für eine vorausschauende Ressourcenpolitik. Unter Mitarbeit von Doris Bergmann und Jonathan Buhl. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter http://simress.de/sites/default/files/trendbericht_ger_final.pdf#overlay-context=en/downloads.
- [17] Lorenz, Ullrich; Hördur v. Haraldsson (2014): Impact assessment of global megatrends - Two case studies connecting global megatrends to regional topics, report 6602, The Swedish Environmental Protection Agency
- [18] Marscheider-Weidemann, Frank; Langkau, Sabine; Hummen, Torsten; Erdmann, Lorenz; Tercero Espinoza, Luis (2016): DERA Rohstoffinformationen. Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Hg. v. DERA. Fraunhofer Institut. Berlin.
- [19] Naisbitt, John (1982): Megatrends. Ten new directions transforming our lives. New York: Warner Books.
- [20] REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century) (Hg.) (2016): Renewables 2016. Global Status Report. Paris.
- [21] Scharp, Michael; Behrendt, Siegfried; van Nouhuys, Jo; Zieschank, Roland (2013): Horizon Scanning als ein Instrument in der Umweltpolitik zur strategischen Früherkennung. Bericht 3: Scan-Report. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin.
- [22] Saritas, Ozcan; Smith, Jack E. (2011): The Big Picture. Trends, drivers, wild cards, discontinuities and weak signals. In: Futures 43(3):292-312.
- [23] Sheate, William; Zamparutti, Tony; Bennett, Suzan; Rogeli, Melita (2007): EEA Research Foresight for Environment and Sustainability. Final Report.
- [24] Umweltbundesamt (2019), Günther, Jens; Harry Lehmann, Ulrich Lorenz, Katja Purr: Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. 2. Aktualisierte Auflage. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Online verfügbar: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215_uba_fachbrosch_rtd_bf.pdf

- [25] United Nations Development Programme (2018): Foresight Manual. Empowered Futures for the 2030 Agenda. UNDP Global Centre for Public Service Excellence. Singapore. Online verfügbar: <http://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/capacity-building/global-centre-for-public-service-excellence/ForesightManual2018.html>
- [26] UNEP 2017: Assessing Global Resource Use. A systems approach to resource efficiency and pollution reduction. Online verfügbar: http://www.resourcepanel.org/sites/default/files/documents/document/media/assessing_global_resource_use_amended_130318_0.pdf
- [27] Wehnert, Timon; López Araguás, J.P., Bernardini, O., Jaworski, L., Holst Jørgensen, B., Jörß, W., Nielsen, O., Ninni, A., Oniszk-Poplawska, A., Velte, D. (2007): European Energy Futures 2030. Technology and Social Vision from the Energy Delphi Survey. Berlin, Heidelberg, New York.
- [28] Zivilgesellschaftliches Aktionsforum Bioökonomie (2018): Positionspapier zur Bioökonomie von diversen NGOs „Erklärung deutscher Umwelt- und Entwicklungsorganisationen zur Bioökonomie-Politik der Bundesregierung“, noch unveröffentlicht.
- [29] zPunkt (2013a): Megatrends. Online: <http://www.z-punkt.de/themen/artikel/megatrends>
- [30] zPunkt (2013i): Megatrends – Lernen von der Natur. Online: <http://www.z-punkt.de/themen/artikel/megatrends>
- [31] zPunkt (2013j): Megatrends – Unibiquitäre Intelligenz. Online: <http://www.z-punkt.de/themen/artikel/megatrends>
- [32] Zweck, Axel; Holtmannspötter, Dirk; Braun, Matthias; Hirt, Michael; Kimpeler, Simone; Philine Warnke (2015a): Gesellschaftliche Veränderungen 2030. Ergebnisband 1 zur Suchphase von BMBF-Foresight Zyklus II. Hg. v. Innovationsbegleitung und Innovationsberatung der VDI Technologiezentrum GmbH. VDI Technologiezentrum GmbH. Düsseldorf.
- [33] Zweck, Axel; Holtmannspötter, Dirk; Braun, Matthias; Cuhls, Kerstin; Hirt, Michael; Kimpeler, Simone (2015b): Forschungs- und Technologieperspektiven 2030. Ergebnisband 2 zur Suchphase von BMBF Foresight Zyklus II. Hg. v. Innovationsbegleitung und Innovationsberatung der VDI Technologiezentrum GmbH. VDI Technologiezentrum GmbH. Düsseldorf.



► **Unsere Broschüren als Download**
Kurzlink: bit.ly/2dowYYI

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt
 www.youtube.com/user/umweltbundesamt
 www.instagram.com/umweltbundesamt/