



POSITION // MÄRZ 2023

Neuartige Materialien

Eckpunkte für einen sicheren und nachhaltigen Lebenszyklus

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet IV 2.2
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

 [/umweltbundesamt](https://www.youtube.com/umweltbundesamt)

 [/umweltbundesamt](https://www.instagram.com/umweltbundesamt)

Autorinnen und Autoren:

Kathrin Schwirn, Doris Völker

Mit Zuarbeit von:

Birgit Ahrens, Silvia Berkner, Christopher Blum,
Werner Niederle, Katrin Süring, Lars Tietjen, Julia Vogel,
Petra Weißhaupt

Satz und Layout:

Atelier Hauer + Dörfler GmbH

Publikationen als pdf:

www.umweltbundesamt.de/publikationen

Bildquellen:

Titel: Prostock-studio/AdobeStock

Stand: März 2023

ISSN 2363-8273

POSITION // MÄRZ 2023

Neuartige Materialien

Eckpunkte für einen sicheren und nachhaltigen Lebenszyklus

Inhalt

1 Hintergrund	6
2 Neuartige Materialien im Spannungsfeld zwischen Klima-, Umwelt- und Gesundheitsschutz und Kreislaufwirtschaft	8
2.1 Neuartige Materialien im Kontext Umwelt und Gesundheit	9
2.2 Neuartige Materialien – Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft	10
2.3 Neuartige Materialien für den Klimaschutz und die Energiewende	12
3 Eckpunkte für sichere und nachhaltige Materialinnovationen	14
4 Zusammenfassung	20
Endnoten	21

Abbildungen

Abbildung 1

Die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung der UN, aufgeteilt in die Bereiche Biosphäre, soziale Gemeinschaft und ökonomisches System	6
--	----------

Abbildung 2

Anwendungsfelder neuartiger Materialien mit Relevanz für die verschiedenen Themen des Umweltbundesamtes	8
--	----------

1 Hintergrund

Die globale Gesellschaft steht vor nie dagewesenen Herausforderungen. Der menschengemachte Klimawandel, der zunehmende Biodiversitäts- und Ressourcenverlust sowie steigende chemische Belastungen bedrohen die menschliche Existenz, wie wir sie kennen. Klimawandel und Biodiversitätsverlust hängen zusammen, verstärken sich gegenseitig und müssen darum auch gemeinsam angegangen werden. Der heutige Wohlstand, insbesondere in den Industriestaaten, basiert auf der Nutzung von natürlichen Ressourcen, wie der Nutzung fossiler Energieträger und einer zunehmenden globalen Inanspruchnahme von Landflächen, sowie auf dem steigenden Einsatz von Chemikalien. Dies hat ebenfalls Einfluss auf Klimawandel, Biodiversitätsverlust sowie auf Umweltverschmutzung und menschliche Gesundheit.

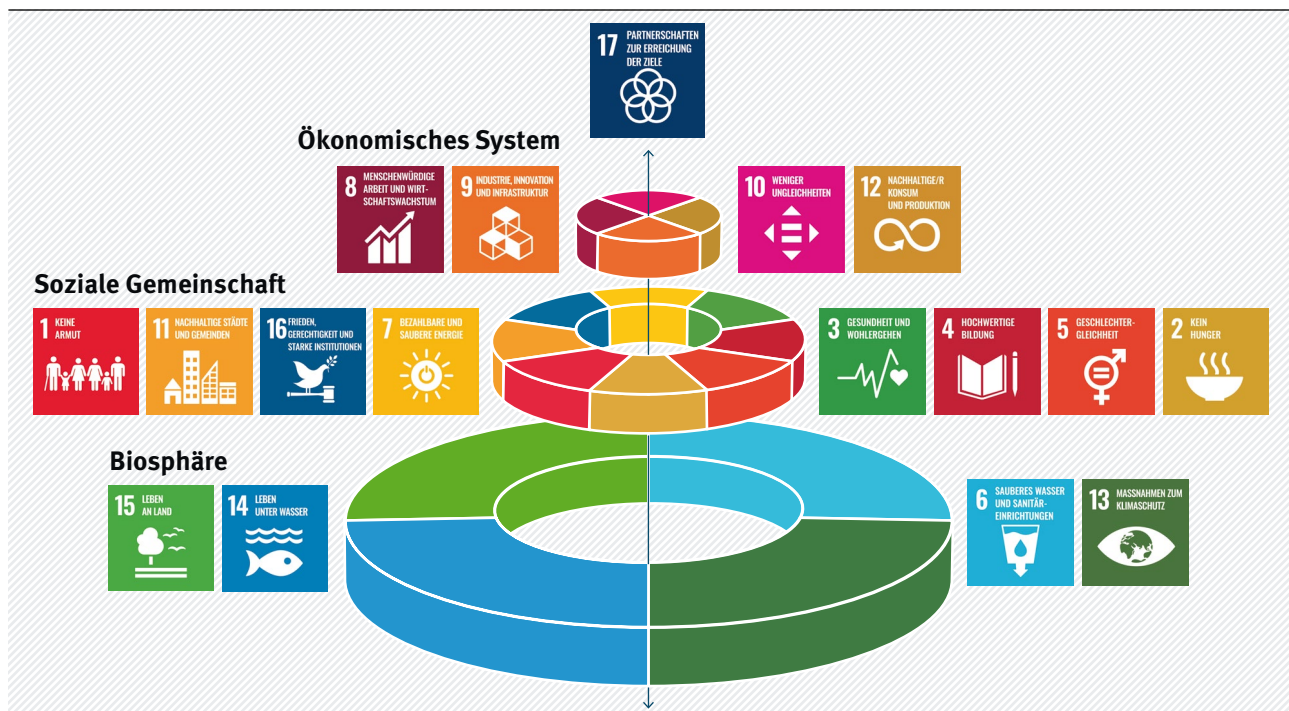
Die Möglichkeit der heutigen und künftigen Generationen ihre Bedürfnisse zu befriedigen¹ setzt voraus, innerhalb eines sicheren Raums agieren zu können und dabei die ökologischen Grenzen der Erde zu erkennen und zu respektieren. Dieser Gedanke bildet

die Grundlage für das Konzept der planetaren Grenzen². Es definiert die Voraussetzungen für eine nachhaltige Entwicklung, indem es die planetarischen Grenzen beschreibt und quantifiziert, die durch menschliche Aktivitäten nicht überschritten werden dürfen, um unannehmbare und irreversible Umweltveränderungen zu vermeiden. Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen mit ihren 17 Zielen (Sustainable Development Goals – SDG, Abbildung 1)³, 169 Vorgaben und 231 Indikatoren enthält eine Vision für eine zukünftige globale Gesellschaft, die auf den Grundsätzen der Nachhaltigkeit beruht. Die Agenda 2030 deckt die ökologische, wirtschaftliche und soziale Dimension der Nachhaltigkeit integriert ab und bietet Grundsätze und Referenzen für lokale, nationale, regionale sowie für unternehmerische Entscheidungsträger.

Um die derzeitige Wirtschaft der EU in eine grünere und nachhaltigere zu wandeln, hat die Europäische Kommission den Europäischen Green Deal⁴ vorgelegt. Der Green Deal umfasst verschiedene Aktionspläne,

Abbildung 1

Die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung der UN, aufgeteilt in die Bereiche Biosphäre, soziale Gemeinschaft und ökonomisches System



Quelle: Jerker Lokrantz/Azote for Stockholm Resilience Centre, Stockholm University

Strategien und Initiativen zur Minimierung oder, soweit möglich, Beseitigung der (schädlichen) Auswirkungen von Chemikalien, Materialien, Produkten und Dienstleistungen auf die menschliche Gesundheit, das Klima und die Umwelt, um so eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu gewährleisten. Dies erfolgt unter anderem über Aktionspläne zur Kreislaufwirtschaft, zur Klimaneutralität, zur Vermeidung von Umweltverschmutzung, sowie über Strategien wie der Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit, der Farm-to-Fork-Strategie, der Initiative für nachhaltige Produkte oder der Bioökonomie-Strategie.

Chemikalien und Materialien sind essentiell für die Bereitstellung von CO₂-armen, schadstofffreien, sowie energie- und ressourceneffizienten Techniken, Werkstoffen und Produkten. Sie sind für die digitale und grüne Transformation der Gesellschaft und Wirtschaft unverzichtbar. Neuartige Materialien versprechen das Potential technischer Lösungen, für u.a. die Energie- und Verkehrswende, den Ressourcenschutz, die Digitalisierung oder die Gesundheitsversorgung zu bieten⁵, um so den dringenden globalen Herausforderungen zu begegnen. So wird in der Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit der Europäischen Kommission dieses Potential neuartiger Materialien zur Unterstützung der grünen und digitalen Transformation aufgegriffen und die Förderung von Forschung und Entwicklung neuartiger Materialien für den Einsatz in verschiedenen Bereichen angekündigt⁶.

Um die Entwicklung zu einer nachhaltigeren Gesellschaft unterstützen zu können, ist es Grundvoraus-

setzung, dass neuartige Materialien selber sicher und nachhaltig über ihren gesamten Lebenszyklus sind. Aus Sicht des UBAs ist daher das frühzeitige Erkennen und Abwenden von Herausforderungen für den Umweltschutz und die Nachhaltigkeit durch den Einsatz von neuartigen Materialien von großer Bedeutung. Daher möchte das UBA die sichere und nachhaltige Entwicklung von neuartigen Materialien und ihren Anwendungen über den Lebenszyklus mitgestalten. Auch wenn Chemikaliensicherheit als inhärenter Bestandteil der Nachhaltigkeit angesehen wird, wird in diesem Papier der Fokus explizit auf die Chemikaliensicherheit und die Nachhaltigkeit von neuartigen Materialien und ihren Anwendungen gelegt. Dies dient der Verdeutlichung der Position, dass Chemikaliensicherheit eine Grundbedingung zur Erreichung von Nachhaltigkeit ist, welche erfüllt sein muss und nicht durch andere Aspekte der Nachhaltigkeit kompensierbar ist. Somit können ein neuartiges Material oder eine Anwendung nicht als nachhaltig erachtet werden, wenn ein stoffliches Risiko für Mensch oder Umwelt besteht⁷.

Das vorliegende Positionspapier beschreibt aus Sicht des UBAs mögliche Chancen und Risiken neuartiger Materialien und ihres Einsatzes im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung. Im Fokus steht dabei auch das Spannungsfeld zwischen dem vielversprechenden Einsatz und möglicher Herausforderungen für den Umwelt- und Gesundheitsschutz und anderen Nachhaltigkeitsdimensionen, verdeutlicht an verschiedenen Beispielen und daraus resultierenden Eckpunkten für die Entwicklung sicherer und nachhaltiger Materialinnovationen.

Neuartige Materialien

Das UBA befasst sich seit 2006 mit den Chancen und Risiken von Nanomaterialien⁸. Im Laufe der Jahre wurde immer deutlicher, dass sich die Betrachtung von Materialinnovationen nicht auf eine Obergrenze von 100nm beschränken lässt. Daher hat das UBA seinen Blickwinkel auch auf andere neuartige Materialien erweitert. Als neuartige Materialien werden solche Materialien verstanden, die durch die genaue Kontrolle ihrer Zusammensetzung und ihrer inneren und äußeren Struktur bewusst so strukturiert oder gestaltet sind, dass sie neue funktionale Anforderungen erfüllen⁹. Diese grobe Umschreibung schließt eine Vielzahl und Vielfältigkeit von Materialien mit verschiedenen Strukturen, Eigenschaften und Funktionalitäten unterschiedlichster Komplexität ein, die einen breiten Einsatz finden können. Die OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN) hat eine Arbeitsbeschreibung zu neuartigen Materialien entwickelt¹⁰, auf deren Grundlagen Fragestellungen zur Chemikaliensicherheit und Nachhaltigkeit bearbeitet werden. Beispiele für neuartigen Materialien finden sich auch in Giese et al. 2020¹¹.

2 Neuartige Materialien im Spannungsfeld zwischen Klima-, Umwelt- und Gesundheitsschutz und Kreislaufwirtschaft

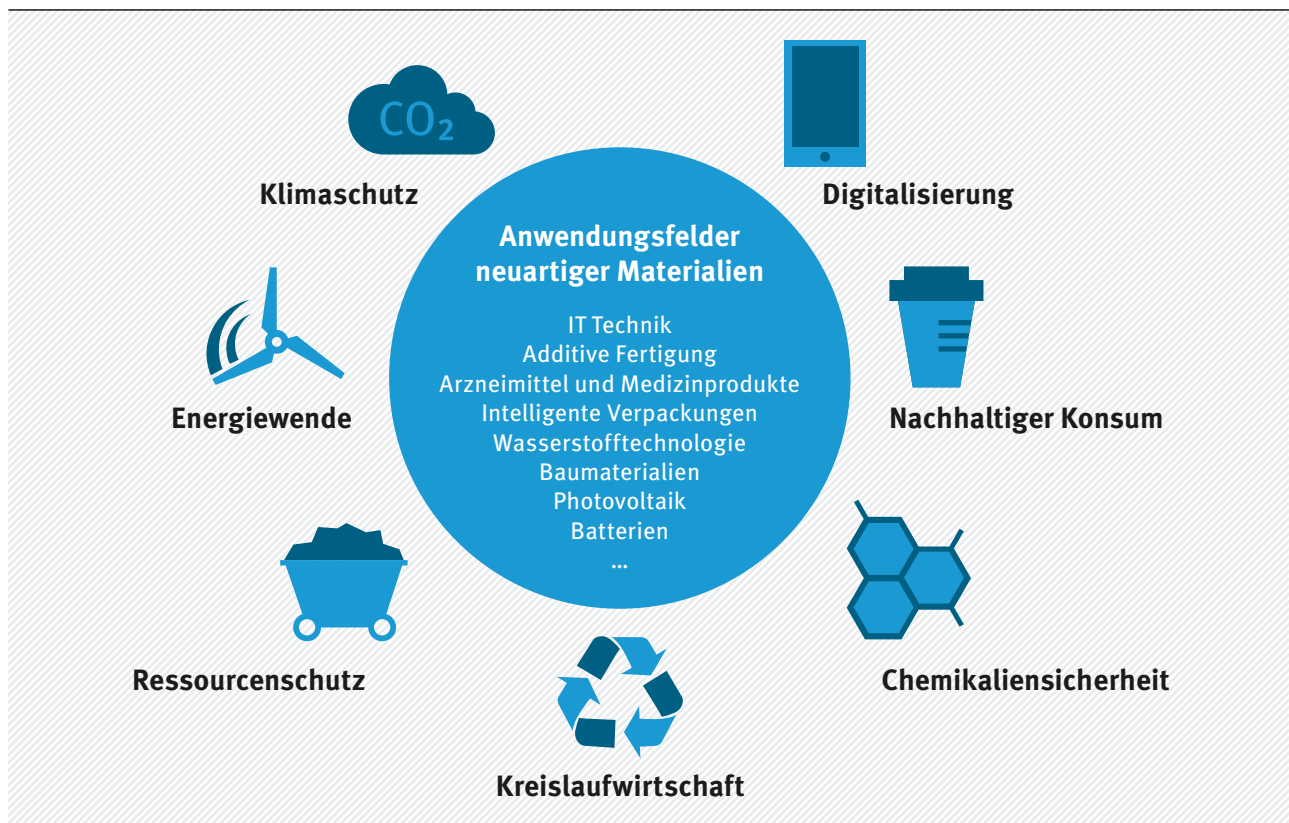
Die nachhaltige Transformation der Gesellschaft verfolgt das Ziel, über die im Vordergrund stehende Senkung der CO₂-Emissionen hinaus den Herausforderungen des Klimawandels, des Diversitäts- und Ressourcenverlustes, aber auch der steigenden Belastung durch chemische Stoffe zu begegnen, diese abzuwenden und deren negativen Konsequenzen abzumildern. Dabei müssen die dafür getroffenen Maßnahmen allen Herausforderungen gerecht werden. Diese sind eng miteinander verknüpft und bedingen sich gegenseitig, so dass es nicht zielführend ist, nur eine dieser Aufgaben lösen zu wollen und dabei die anderen aus dem Blick zu verlieren oder als nachrangig zu betrachten. Dies kann zu Zielkonflikten führen. Dennoch bestehen diese Zielkonflikte nicht zwischen den globalen Herausforderungen selber, sondern können zwischen den einzelnen Maßnahmen zur Problemlösung entstehen.

Zur Bewältigung der oben genannten Herausforderungen müssen Wege gefunden werden, wie die gesellschaftlichen Systeme so verändert werden können, dass sie mit dem Schutz von Umwelt, Gesundheit und Klima vereinbar sind¹². Dabei sind nicht nur Techniken und Produktionsprozesse zu überdenken, sondern auch Verbrauchsmuster und Lebensweisen. Dies erfordert ein sofortiges und konzertiertes Vorgehen, bei dem verschiedene Politikbereiche und Akteure der gesamten Gesellschaft einbezogen werden müssen, um einen systemischen Wandel zu ermöglichen.

Neuartige Materialien spielen eine wichtige Rolle bei einer nachhaltigen Transformation. In verschiedensten Anwendungsfeldern (Abbildung 2) kann ihr Einsatz dazu beitragen, beispielsweise Energie effizienter zu nutzen, Ressourcen einzusparen, die Nutzung problematischer oder wenig nachhaltiger

Abbildung 2

Anwendungsfelder neuartiger Materialien mit Relevanz für die verschiedenen Themen des Umweltbundesamtes



eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Chemikalien zu reduzieren oder gar zu ersetzen. Ihr Einsatz ist dabei nicht frei von Fragen zur Chemikaliensicherheit und Nachhaltigkeit ihrer Anwendung über dem Lebenszyklus.

Kapitel 2 zeigt den möglichen Nutzen, sowie die erwarteten Herausforderungen des Einsatzes neuartiger Materialien in wichtigen umweltrelevanten Handlungsfeldern auf und beschreibt Spannungsfelder anhand von ausgewählten Beispielen. Die für das Papier verwendeten Referenzen beschreiben neuartige Materialien und deren potentiellen Anwendungen, die bereits auf dem Markt sind, aber auch solche für die nicht abschließend geklärt ist, ob sie tatsächlich künftig erfolgreich vermarktet werden können. Auch ist es basierend auf der aktuellen Informationslage nicht immer möglich die tatsächlichen Chancen bzw. das tatsächliche Ausmaß des Risikos zu beschreiben.

2.1 Neuartige Materialien im Kontext Umwelt und Gesundheit

Die Kombination bereits bestehender oder neuer (Wirk-)Stoffe und/oder Materialien ermöglicht es neuartige Materialien mit verbesserten oder bisher nicht erreichten Funktionalitäten oder Eigenschaften herzustellen. Dadurch werden neue Anwendungs- und Therapieformen, sowie technische Lösungen möglich. Auch können, abhängig vom Material, gewünschte Effekte durch die Struktur der Materialien hervorgerufen werden, anstelle von oder zusätzlich zu einer chemischen Wirkung. Damit bieten neuartige Materialien eine Reihe von möglichen Chancen für den Umweltschutz und die menschliche Gesundheit. Diese umfassen unter anderem:

- ▶ Die Reduktion des Chemikalieneinsatzes und somit des Stoffeintrages in die Umwelt durch gezielteren Einsatz, geringere Dosis und höhere Effizienz und dadurch wiederum weniger unerwünschte Wirkungen auf Mensch und Umwelt.
- ▶ Ein verbesserter Umwelt- und Gesundheitsschutz durch die Bereitstellung neuer oder verbesserter Techniken und Verfahren unter Nutzung neuartiger Materialien, wie beispielsweise der Separation, Absorption oder Katalyse für die (Trink-)Wasser-aufbereitung¹³, für die Entfernung von Schadstoffen¹⁴ und für die Umweltanalytik und Diagnostik¹⁵; Entwicklung von sogenannter *Smart Textiles*¹⁶ für beispielsweise das Gesundheitsmanagement.

- ▶ Das Ersetzen von aus Umwelt- und Gesundheits-sicht bedenklicher oder in ihrer Anwendung anderweitig nicht nachhaltiger Stoffe (z. B. solchen mit hohem Ressourcenbedarf, hohem Treibhaus-potential, hohem Ferntransportpotential, schlechter Recyclingfähigkeit), aber auch die Realisierung neuer technischer Verfahren oder geänderter Wertschöpfungsketten (z. B. chemiefreie Alternativen, nachhaltigeres Konsumverhalten), die durch neuartige Materialien ermöglicht werden können.

Der Einsatz von neuartigen Materialien kann aber auch zu noch unbekannten Risiken oder erhöhten Risiken für Umwelt und Gesundheit führen. Denkbar in diesem Zusammenhang sind:

- ▶ Der Umwelteintrag neuer Stoffe oder neuer Formen eines Stoffes (z. B. als sogenannte building blocks von neuartigen Materialien) mit unbekannten Eigenschaften oder ein erhöhter oder geänderter Umwelteintrag bekannter problematischer Stoffe (problematisch z. B. hinsichtlich Persistenz, Mobilität, Bioakkumulationspotential oder Toxizität).
- ▶ Neue Formulierungen und Kombinationen, die den Einsatz von (öko)toxischeren (Wirk-)Stoffen erst ermöglichen.
- ▶ Vergrößerung des ökologischen Fußabdruckes und/oder Verschlechterung anderer Nachhaltigkeitskriterien, beispielsweise wenn die Herstellung eines neuartigen Materials ein höheres Treibhauspotential aufweist oder einen höheren Rohstoffeinsatz erfordert als die des konventionell genutzten Materials oder Stoffes¹⁷.
- ▶ Fehlende oder ungeeignete Bewertungsgrundlagen (z. B. OECD Prüfrichtlinien, Expositionsszenarien oder -modelle).
- ▶ Lücken oder Ausnahmeregelungen in den Vorgaben bestehender regulatorischer Konzepte, die dazu führen, dass Gefährdung und Risiken nicht erkannt, nicht ausreichend beschrieben oder adressiert werden können.

BEISPIEL – Neuartige Trägersysteme für Wirkstoffformulierungen

Neuartige Trägersysteme (auch Carrier oder Carriersysteme genannt) dienen dem kontrollierten Transport und Schutz einer Substanz (Cargo), z. B. eines Wirkstoffes. Unterschiedliche Typen von Materialien oder Kombinationen davon können als Carrier fungieren. Beschrieben sind bislang u. a. Mizellen, Liposomen, (Bio-)Polymere, Dendrimere, Hydrogele, poröses Siliziumdioxid, metallorganische Gerüstverbindungen (metal organic frameworks – MOF), DNA Origami, elektrogesponnene Fasern oder auch Carrier auf Kohlenstoffbasis¹⁸. Aus diesen Möglichkeiten ergeben sich zahlreiche (potentielle) Anwendungsbereiche in der Medizin, aber auch im Kosmetik-, Pflanzenschutzmittel- und Biozidbereich. In der Medizin sind unterschiedlichste Anwendungen möglich, wie zum Beispiel für Krebs- oder auch entzündungshemmende Medikamente. Ebenfalls können Hormone, Enzyme oder Nukleinsäuren (z. B. mRNA, siRNA) auf diese Art verpackt, geschützt und an den Zielort transportiert werden. Größere Bekanntheit erlangten Carriersysteme durch die Verwendung von Lipidnanopartikeln als Vehikel für COVID-19-mRNA-Impfstoffe.

Mittels des Carriersystems können verschiedene Vorteile erlangt werden, wie z. B. eine verbesserte Bioverfügbarkeit des Cargos, der Schutz des Cargos vor frühzeitiger Metabolisierung/Degradation oder auch die Kontrolle über die Freisetzung des Cargos zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort. Letzteres kann über einen Stimulus erfolgen, wie die Änderung von Umgebungsbedingungen (z. B. pH-Wert, Temperatur, Strahlung). Auf diese Weise kann ein gezielter und effektiver Transport von z. B. Wirkstoffen an den Ort der erwünschten Wirkung erfolgen. Zudem können so bislang nicht zugängliche neuartige Wirkmechanismen (z. B. kleinskalige mechanische Wirkmechanismen) des

Cargos nutzbar gemacht werden. Weitere mögliche Vorteile, die der Gesundheit von Mensch und Umwelt zugutekommen, sind z. B. die Behandlung und Vorbeugung von bislang schwer therapierbaren Krankheiten, ein insgesamt geringerer Wirkstoffeinsatz und damit einhergehend eine Verringerung der potentiellen Exposition von Mensch und Umwelt oder die Reduzierung unerwünschter (Umwelt-)Wirkungen.

Forschung und Entwicklung zu Carriersystemen nehmen seit Jahren kontinuierlich zu. Zunehmend gelangen auch bereits entwickelte Produkte auf den Markt¹⁹. Allerdings fehlt ein ausreichender Überblick darüber, welche der vielgestaltigen Carriersysteme tatsächlich (zukünftig) zum Einsatz kommen und welche Anwendungsbereiche betroffen sein werden. Dies ist in Anbetracht der bekannten und vermutlichen Anwendungsbereiche wie Arzneimittel und Medizinprodukte, Pflanzenschutzmittel und Kosmetika, ggf. auch Biozide und Lebens- und Futtermittel, von besonderer Relevanz, um für die betroffenen Regelungsbereiche den Anpassungsbedarf für eine Umweltrisikobewertung sachgerecht ableiten zu können. Diesbezüglich stellen sich Fragen inwieweit die verschiedenen Carriersysteme Umweltverhalten und -effekte des eigentlichen Cargos beeinflussen und ob bestehende Prüfmethode geeignet sind, um Umweltverhalten und -effekte des Gesamtsystems und der „building blocks“, aus denen die Carriersysteme aufgebaut sind, zu bestimmen. Entsprechende Erkenntnisse müssen gewonnen und in eine sachgerechte Umweltbewertung einfließen, da die derzeitigen Methoden zur Umweltbewertung für neuartige Materialien und Material-Wirkstoffkombinationen beträchtliche Lücken aufweisen bzw. nicht existent sind²⁰.

2.2 Neuartige Materialien – Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft

Durch die Anwendung neuartiger Materialien in diversen Produkten ergeben sich verschiedenste Chancen für die Ressourcenschonung, die Wiederverwendung und das Recycling von Produkten:

- Effizienzsteigerung durch neue und verbesserte Produktionsverfahren mit geringerem Ressourcenverbrauch oder reduziertem Aufkommen an Industrieabfällen, z. B. durch neuartige Katalysatoren²¹ oder dem gezielteren Einsatz von Chemikalien/Wirkstoffen.

- Realisierung von neuen Verfahren (z. B. additive Fertigung wie 3D Druck oder Elektrosponning²², Herstellung von gedruckter Elektronik²³), die neue Formen der Wertschöpfung und dezentrale Produktion erlauben, sowie Reparatur oder Rückverfolgbarkeit von Produkten ermöglichen.
- Erhöhte Langlebigkeit von Produkten durch Verbesserung der Wetter- und Abriebfestigkeit beispielsweise von Beschichtungen, oder auch durch Schutz vor Korrosion, Feuchte und Befall²⁴.

BEISPIEL – Additive Fertigung im Kontext Stoffströme, Ressourcennutzung, Abfall und Umwelt- und Gesundheitsschutz

Additive Fertigung, umgangssprachlich häufig auch 3D Druck genannt, beschreibt Fertigungsverfahren, bei denen Bauteile Schicht für Schicht aus einem (oder mehreren) Ausgangsmaterial(ien) aufgebaut werden. Dies eröffnet vielfältige Möglichkeiten zur Herstellung komplexer Verbundwerkstoffe oder neuem Design, wie zum Beispiel dem Design geometrisch komplexer Strukturen, die mit konventionellen subtraktiven Fertigungsverfahren nicht realisierbar sind. Additive Fertigung umfasst verschiedenste Verfahren, die zunehmend an Bedeutung gewinnen. Sie finden in unterschiedlichsten Industriezweigen Anwendung, werden aber auch zunehmend von professionellen Anwenderinnen und Anwendern, Verbraucherinnen und Verbrauchern und im Bildungswesen genutzt²⁵. Typische Ausgangsstoffe für die additive Fertigung sind je nach verwendeter Methode flüssige, pulverförmige und feste Metalle, Keramiken, Polymere und Kunstharze, aber auch Beton, Zement oder Holz. Additive Fertigung wird angewendet für die Fertigung von Modellen, Mustern und Prototypen aber auch für Bauteile, Werkzeuge und maßgeschneiderte Endprodukte für eine breite Palette an Anwendungsbe reichen²⁶. Diese reichen von Medizinprodukten über Solarzellen bis hin zu Gebäuden. Eine Weiterentwicklung des 3D Drucks ist der 4D Druck, der die Herstellung von Formgedächtnismaterialien, selbstheilenden Materialien oder sogenannte Metamaterialien ermöglicht²⁷. Die vierte Dimension bezieht sich auf die Zeit, denn diese Materialien haben die Fähigkeit ihre Eigenschaften durch einen äußeren Reiz zu verändern.

Die Möglichkeiten des dezentralen Betriebes versprechen einen reduzierten Transport- und Lageraufwand. Additive Fertigung bietet die Chance Bau- oder Ersatzteile einfacher zur Verfügung zu stellen, was die Reparaturfähigkeit und damit Lebensdauer von Produkten verlängert und Anreize für Produkt-Service-Geschäftsmodelle

bietet. Weitere mit der additiven Fertigung verbundenen Vorteile sind die Herstellung von Produkten mit weniger Ausschuss und Energiebedarf oder der Einsatz für den Leichtbau. Durch die erhöhte Produktlebensdauer können Ressourcen und Energie eingespart werden²⁸.

Dennoch stellt die additive Fertigung eine Herausforderung für die Chemikaliensicherheit und die Nachhaltigkeit dar²⁹. So können die Ausgangsmaterialien gefährliche Stoffe enthalten und die genaue Zusammensetzung nicht angegeben sein³⁰. Während des Druckprozesses kann es zur Freisetzung von flüchtigen organischen Verbindungen, (nanoskaligen) festen Verbindungen, Weichmachern, Flammschutzmitteln und Monomeren kommen³¹. Auch sind Emissionen in die Luft oder ins Abwasser bei Nachbehandlungsprozessen wie Polieren, Abschleifen und Reinigen des gedruckten Produkts denkbar. Offene Fragen bestehen in Bezug auf die Haltbarkeit der Druckprodukte, wie zum Beispiel zur mechanischen Stabilität während der Nutzungsphase oder zur Freisetzung von Komponenten in die Umwelt.

Aufgrund der Vielfältigkeit der Druckerzeugnisse und deren Anwendungsbereiche, aber auch aufgrund der Komplexität in Struktur und Zusammensetzung der Druckerzeugnisse und der fehlenden Transparenz darüber ist derzeit nicht geklärt, wie eine Abfallerfassung, -aufbereitung und ein Recycling der Druckerzeugnisse realisiert werden kann. Additive Fertigung hat einen hohen Energiebedarf, welcher zwischen den einzelnen Verfahren und auch je nach Anwendungsgebiet variiert; im Vergleich zu konventionellen Produktionsmethoden kann der Energiebedarf geringer sein. Mit den Vorteilen durch die additive Fertigung steigt zudem auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Rebound-Effekten, wenn die Möglichkeiten der Nutzung zu unnötigem Konsum anregen.

Die Anwendung von neuartigen Materialien kann allerdings auch zu erhöhter Nutzung von Ressourcen in komplexen Zusammensetzungen führen. Dies birgt folgende Herausforderungen:

- ▶ Die Herstellung neuartiger Materialien kann mit dem Einsatz neuer Rohstoffe oder einem erhöhten Verbrauch von Rohstoffen einhergehen³², deren Förderung nicht nachhaltig ist oder die zu neuen Rohstoffabhängigkeiten führt.
- ▶ Die zunehmende Komplexität und Vielfältigkeit von neuartigen Materialien, aber auch der diffuse Einsatz von Rohstoffen für deren Herstellung erschwert die Rückverfolgbarkeit, Risikobewertung und Kreislaufwirtschaft (Wiederverwendung, Recycling) zusätzlich; dies kann ebenso dazu führen, dass Recyclingprozesse chemikalienlastiger und energieintensiver werden. Dies ist insbesondere dann eine unerwünschte Folge, wenn dafür fossile Energieträger eingesetzt werden. Auch können neuartige Materialien den Recyclingprozess physikalisch stören oder zur Anreicherung problematischer Stoffe führen.
- ▶ Arbeiten mit und an Abfällen sind aufgrund ihrer Unvorhersehbarkeit und der schwankenden Zusammensetzung von Abfällen risikoreich: Wie zuvor schon für carbonfaserverstärkte Kunststoffe³³ gezeigt, kann die Abfallbehandlung von neuartigen Materialien zu Risiken für Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer und der Umwelt führen, z. B. durch die Freisetzung problematischer Bestandteile bei der Verwertung.
- ▶ Das Auftreten von Rebound-Effekten: Durch die oben beschriebene Effizienzsteigerungen ist denkbar, dass sich Angebot und Nachfrage bestimmter Anwendungen erhöhen, was dazu führt, dass die durch den Einsatz erzielten Einsparungen (z. B. Umwelteintrag von Chemikalien, Treibhausgasen, Ressourcen) teilweise wieder aufgehoben werden. In diesem Kontext ist auch ein Einsatz neuartiger Materialien denkbar, der keinen technischen Vorteil bringt, sondern vor allem dazu dient, neue Produkte werbewirksam auf den Markt zu bringen.

2.3 Neuartige Materialien für den Klimaschutz und die Energiewende

Für die Energiewende und zum Schutz des Klimas sind ressourceneffiziente Materialien ebenso wichtig wie auch Materialinnovationen, die technische Lösungen für die erneuerbare Energiegewinnung und Energiespeicherung ermöglichen. Der Einsatz neuartiger Materialien soll dabei die Effizienz erhöhen, zur Langlebigkeit sowie zur Energieeinsparung beitragen. Folgende Einsatzbereiche sollen dabei Klimaschutz und Energiewende unterstützen:

- ▶ Neuartige Materialien befinden sich in der Forschung und Entwicklung für die Verwendung in Techniken zur Gewinnung von erneuerbaren Energien (z. B. für die Herstellung von Solarpanels³⁴ und Windkraftanlagen³⁵) oder grüner Wasserstoffproduktion³⁶ sowie für die Energiespeicherung³⁷ und um diese Techniken effizienter zu machen.
- ▶ Neuartige Materialien tragen dazu bei Verfahren und Prozesse (z. B. Katalysatoren³⁸, Leichtbau) energieeffizienter zu gestalten. Diese Gestaltung geht bis hin zur Entwicklung sogenannter *Smart Textiles* für die Energiegewinnung³⁹.
- ▶ Im Baubereich kommen neuartige Materialien zum Einsatz, um den Energieverbrauch in Gebäuden zu senken (z. B. als Dämmmaterial⁴⁰ oder in Fensterscheiben zur Regulierung von Licht und Wärmeeinstrahlung⁴¹).

Der Einsatz neuartiger Materialien in Techniken zur Förderung des Klimaschutzes und der Energiewende führt allerdings auch zu Herausforderungen, Risiken und offenen Fragestellungen. Diese umfassen:

- ▶ Die Herstellung neuartiger Materialien für Techniken der Energiewende umfasst oftmals u. a. auch den Einsatz problematischer Stoffe, die insbesondere während der Herstellung und am Produktlebensende bzw. bei der Abfallbehandlung zur Exposition von Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern und der Umwelt führen können.
- ▶ Häufig fehlt es an geeigneten Methoden und Sammelkonzepten für ein Recycling zur Rückgewinnung der eingesetzten Materialien aus den technischen Anwendungen.

- Der Einsatz von neuartigen Materialien für die Techniken der Energiewende führt zu einem geänderten Rohstoffbedarf, welcher neue oder veränderte Umweltwirkungen (z. B. Eintrag problematischer Stoffe in die Umwelt, Flächenverbrauch) und Abhängigkeiten nach sich zieht.

BEISPIEL – Elektrochemische Energiespeicher für die Energiewende

Weltweit steigt die Nachfrage nach elektrochemischen Energiespeichern (umgangssprachlich: Batterien). Sie werden für die stationäre und mobile Speicherung von Energie für beispielsweise Smartphones, Laptops, E-Bikes, E-Autos oder als Zwischenspeicher für Solarstrom genutzt. Mit der zunehmenden Digitalisierung und Elektrifizierung des Alltags kommen zudem immer neue Anwendungen hinzu. Elektrochemische Energiespeicher spielen eine wichtige Rolle für die Energiewende, da sie Energie aus nicht speicherbaren erneuerbaren Quellen (Sonne, Wind) speichern und zu einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung stellen können. Neuartige elektrochemische Energiespeicher sind vielfältige und komplexe Systeme mit Einsatz einer Vielzahl von Materialien. Fokus der Weiterentwicklung von elektrochemischen Energiespeichern ist vor allem ihre Leistung und Lebensdauer zu erhöhen, die Produktionskosten zu senken sowie Störfälle zu vermeiden. Neuartige Materialien spielen eine wichtige Rolle für die Bereitstellung von Elektrodenmaterial, Membranen zur Trennung bzw. Ladungsübertragung oder Elektrolytmaterialien⁴².

Potentielle Umwelteffekte von elektrochemischen Energiespeichern lassen sich nicht pauschal beschreiben. Sie hängen vom jeweiligen Batteriesystem, vom betrachteten Lebenszyklus und Möglichkeiten des Recyclings ab⁴³. Eine besondere Herausforderung für den weltweiten Umweltschutz stellt der aufgrund der Marktentwicklung von Batterien enorm steigende Bedarf an kritischen Metallen dar, insbesondere wenn deren Gewinnung mit fehlenden Umwelt- und Sozialstandards verbunden ist⁴⁴. Das Recycling von Energiespeichern ist sehr aufwändig, aber ökologisch vorteilhafter als die Nutzung von Primärrohstoffen. Die Wirtschaftlichkeit des Recyclings ist abhängig vom Aufkommen an Altbatterien und von Wertstoffpreisen. Die wünschenswerte lange Nutzungsphase erschwert allerdings die Etablierung von Recyclingstrategien. Die Zweitnutzung von Lithiumionenbatterien (LIB), z. B. über die stationäre Speicherung von Solarstrom

durch ausrangierte Autobatterien führt zwar zu einer besseren Ausnutzung von deren Speicherkapazität, kann aber das Recycling zusätzlich erschweren, da sich die Nutzungsphase weiter verlängert und somit Wertstoffe weiter verzögert zur Verfügung stehen⁴⁵. Auch die rapide Weiterentwicklung der Elektrodenmaterialien erschwert die Etablierung eines Standes der Technik zum Recycling. So besteht hinsichtlich der Kreislaufführung von elektrochemischen Energiespeichersystemen und ihrer Bestandteile noch erheblicher Forschungsbedarf. Für eine Vielzahl von Techniken oder Teilsystemen gibt es bisher keine aus ökologischer Sicht hinreichend zufriedenstellenden Recycling- und Wiederverwendungskonzepte.

Die verwendeten Stoffe und Materialien für elektrochemische Energiespeicher stellen eine Herausforderung für die Chemikalien- und Anlagensicherheit dar, insbesondere bei der Herstellung und beim Recycling, aber auch im Rahmen von unsachgemäßem Gebrauch und Entsorgung oder durch Stör- und Unfälle. Elektrodenmaterialien beinhalten (öko-)toxische Metalle wie beispielsweise Cobalt, Chrom, Kupfer, Nickel, Thallium und Silber⁴⁶. In Bezug auf LIB basiert die Kathodenherstellung auf der Verwendung von fluorhaltigen Polymeren wie Polyvinylidendifluorid sowie dem toxischen und erbgutschädigenden Lösungsmittel N-Methyl-2-Pyrrolidon. Die Forschung zu wasserlöslichen und fluorfreien Bindern ist vielversprechend, aber ein bisher wenig untersuchtes Feld⁴⁷. Untersuchungen zeigen, dass es bei der Alterung von LIB zu einer Zersetzung des Elektrolyten kommt, welche im weiteren Verlauf zur Bildung von toxischen Organofluorophosphaten führt⁴⁸. Auch die Entstehung von Fluorwasserstoff und Phosphorsäure ist möglich, wenn eine gealterte Batterie geöffnet wird (z. B. durch einen Unfall oder während des Recyclings). LIB zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte aus. Im Fall von mechanischen Beschädigungen, thermischen Einwirkungen oder einer unsachgemäßen Lagerung kann die in der Zelle gespeicherte Energie explosionsartig freigesetzt werden.

3 Eckpunkte für sichere und nachhaltige Materialinnovationen

Neuartige Materialien können in vielerlei Hinsicht zum gesellschaftlichen Wohlergehen und zu den Lösungen beitragen, die für die Bewältigung von globalen Herausforderungen, wie der Energiewende, nachhaltiger Mobilitätskonzepte oder dem Gesundheitsschutz erforderlich sind. Die Art und Weise, wie neuartige Materialien hergestellt, verwendet und entsorgt werden, sowie die potenziellen negativen Auswirkungen ihrer inhärenten Eigenschaften können jedoch auch dazu beitragen, die großen Umweltkrisen Klimawandel, Ressourcenverlust, Verlust der biologischen Vielfalt und Umweltverschmutzung zu verstärken. Zudem hat möglicherweise nicht jedes neuartige Material oder dessen Anwendung einen gesellschaftlichen Nutzen. Es gilt somit einen ganzheitlichen Ansatz zu verfolgen, der auf der einen Seite die Nutzung dieser Materialien in Anwendungen zur Förderung einer nachhaltigen Zukunft ermöglicht, aber auf der anderen Seite auch die Sicherheit und Nachhaltigkeit dieser Materialien und ihrer Anwendungen über den Lebenszyklus gewährleistet.

Dabei ist damit zu rechnen, dass es zu Zielkonflikten kommt, beispielsweise bei einem unvermeidlichen Einsatz bedenklicher neuartiger Materialien für (neue) Techniken mit hohem gesellschaftlichen Nutzen (z. B. beim Einsatz für erneuerbare Energien). Daher gilt es Umgangsweisen zu entwickeln, die ein Abwägen zwischen dem Einsatz neuartiger Materialien zur Bekämpfung der großen Krisen unserer Zeit und ihrer ggf. vorhandenen eingeschränkten Chemikaliensicherheit oder Nachhaltigkeit über den Lebenszyklus ermöglichen. Dabei müssen Zielkonflikte frühzeitig erkannt und Maßnahmen rechtzeitig abgeleitet werden.

Bereits Anfang 2022 veröffentlichte das UBA zusammen mit dem Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) und der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) erste Empfehlungen zur Risikogovernance von neuartigen Materialien aus Perspektive der Chemikaliensicherheit⁴⁹:

Risikogovernance neuartiger Materialien

Um einen Austausch von Perspektiven und Informationen zwischen den verschiedenen betroffenen Akteuren zu ermöglichen, führte das UBA 2019 bis 2021 eine Reihe von internationalen Themenkonferenzen zur Sicherheit und Nachhaltigkeit neuartiger Materialien und ihrer Anwendungen durch⁵⁰. Auf deren Grundlage entwickelten die drei Bundesoberbehörden UBA, BAuA und BfR eine gemeinsame Perspektive zur Risikogovernance neuartiger Materialien. Diese umfasst fünf wichtige Handlungsfelder:

- ▶ Frühwarnsysteme zur Identifizierung bedenklicher Materialien und Anwendungen
- ▶ Prüfung und Anpassung der Chemikalienregulierung und Risikobewertungsinstrumente
- ▶ Förderung von Safe-&-Sustainable-by-Design für neuartige Materialien
- ▶ Kommunikation und Netzwerken
- ▶ Interdisziplinäre Forschung (Vorlauf- und regulativ motivierte Forschung)

Darüber hinaus geben BAuA, BfR und UBA in dem Papier Handlungsempfehlungen zu neuartigen Polymeren, additiver Fertigung, Fasern, intelligenten Verpackungen und Nanocarriern. Die Diskussion zu neuartigen Materialien im Kontext dieser Handlungsfelder wird seither auf nationaler und internationaler Ebene fortgeführt. Unter anderem besteht seit 2020 in Deutschland eine bundesoberbehördenübergreifende Arbeitsgruppe zu neuartigen Materialien. Seit 2021 beschäftigt sich eine Steuerungsgruppe im Rahmen der OECD Arbeitsgruppe zu Nanomaterialien mit neuartigen Materialien und Fragestellungen ihrer Sicherheit, Nachhaltigkeit aber auch angemessenen Bewertung.

Die in der behördenübergreifenden Perspektive zur Risikogovernance genannten Handlungsfelder sind schutzgutübergreifend relevant und somit auch für die Betrachtung notwendiger Maßnahmen für die Sicherheit und Nachhaltigkeit von neuartigen Materialien aus Umweltsicht wichtig (für Details zu den genannten Feldern wird an dieser Stelle auf das Papier verwiesen). Darüber hinaus ergeben sich weitere

Eckpunkte zur Unterstützung eines sicheren und nachhaltigen Einsatzes neuartiger Materialien, die im Folgenden dargelegt sind:

Anknüpfungspunkte in der EU-Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit

Auch wenn neuartige Materialien in der Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit der Europäischen Kommission keinen besonderen Schwerpunkt darstellen, sind die dort angekündigten Initiativen geeignet, um auch Maßnahmen zur Sicherheit und Nachhaltigkeit von neuartigen Materialien voranzutreiben. Mit einer Reform der stoffbezogenen Regulierungen strebt die EU-Kommission an, den Rechtsrahmen weiterzuentwickeln und eine verbesserte Informationsbasis zu schaffen. Dies betrifft z.B. die Einführung weitergehender Pflichten zur Registrierung bestimmter Polymere im Rahmen der REACH-Verordnung.

Als Bestandteil der EU-Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit werden technische Kriterien und Indikatoren für das Konzept „Safe and Sustainable by Design“ (SSbD) entwickelt⁵¹. SSbD bezieht sich auf die Leitinstrumente grüner und nachhaltiger Chemie und zielt darauf ab, Innovationen in Richtung einer nachhaltigeren industriellen Transformation zu lenken. In dieser Hinsicht wird angestrebt, die Produktion und Verwendung bedenklicher Stoffe und Materialien zu ersetzen oder zumindest zu minimieren, sowie die Auswirkungen auf Klima und Umwelt während des gesamten Lebenszyklus von Chemikalien und Materialien zu verringern. Auch plant die EU-Kommission SSbD in der Forschungs- und Innovationsförderung stärker aufzugreifen. Daneben prüft die EU-Kommission entsprechende Aspekte in der Regulierung aufzugreifen. Teilaspekte von SSbD werden bereits in den Rechtssetzungsverfahren zur geplanten EU-Batterieverordnung und EU-Ökodesignverordnung diskutiert. Es ist noch unklar, ob entsprechende Aspekte auch in der Weiterentwicklung des EU-Chemikalienrechts aufgegriffen werden. Grundsätzlich bieten diese Rechtssetzungsverfahren die Chance, solche Aspekte auch rechtlich zu verankern.

Auch die in der EU-Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit angestrebte verbesserte Kooperation der EU-Agenturen im Rahmen des „one substance, one assessment“-Ansatzes⁵² und das angestrebte bessere Zusammenwirken der stoffbezogenen Regulierungen kann dazu beitragen Risiken früher zu identifizieren. Dies trifft auch auf die geplante Schaffung eines allgemeinen Frühwarnsystems für Chemikalien

zu. Aktivitäten hierzu möchte die EU-Kommission im Jahr 2023 starten. Bislang liegt eine Konzeptstudie vor, die konkrete Ausgestaltung ist aber noch offen⁵³.

Um schadstofffreie Kreislaufströme sicherzustellen, sollten bedenkliche Chemikalien und Materialien in Produkten generell vermieden werden. Da neuartige Materialien oftmals auch wertvolle Metalle und kritische Rohstoffe enthalten, die bei herkömmlicher Abfallbehandlung verloren gehen, gilt es Behandlungsverfahren für ein Recycling der verschiedenen Abfallpfade zu ermöglichen. Damit diese Optimierung möglich ist, muss auch jenseits der Innovations- und Entwicklungsphase bekannt sein, welche Materialien in welchen Abfällen zu erwarten sind. Außerdem muss es wirtschaftlich lohnend sein, Materialien mit geringen Mengen oder die sich schwer aus Verbundwerkstoffen herauslösen lassen, zurückzugewinnen. Digitale Produktpässe mit entsprechenden Informationsstandards könnten die notwendige Transparenz zur Verfahrensoptimierungen für die Abfallaufbereitung neuartiger Materialien unterstützen. Die Europäische Kommission hat einen rechtlichen Rahmen zur Ausgestaltung von digitalen Produktpässen im Rahmen der Initiative für nachhaltige Produkte⁵⁴ vorgeschlagen. Weiterhin hat die OECD digitale Produktpässe, welche Informationen für Reparatur, Wiederverwendung und Recycling beinhalten, vorgelegt⁵⁵. Neben verschiedenen Angaben zur Herstellung, Wartung, Rückbau und Recycling könnten diese Pässe auch Auskunft über Wert- und Schadstoffe enthalten.

Grundsätzlich gehen diese Initiativen in die richtige Richtung. Es ist allerdings damit nicht automatisch gewährleistet, dass den Besonderheiten neuartiger Materialien ausreichend Rechnung getragen wird. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die gewählten Ansätze in erster Linie nur bekannte Herausforderungen berücksichtigen. So muss beispielsweise das Erkennen und angemessene Bewerten möglicher abweichender Risiken durch unterschiedliche Formen eines Stoffes aber auch völlig neuer Risiken durch Materialinnovationen sichergestellt werden.

Auch bleibt offen, ob die Transformation von Gesellschaft und Unternehmen in Richtung Nachhaltigkeit mit den getroffenen und von der EU-Kommission angekündigten Initiativen erreicht werden kann. Vermutlich wird es nötig sein, weitere Anreize und Vorgaben zu schaffen, um eine solche umfassende, aber notwendige Transformation zu erreichen.

Ansätze für grüne und nachhaltige Chemie stärken

Die zweite Ausgabe des Global Chemicals Outlook GCO-II der UNEP⁵⁶ zeigt eindrücklich, dass sich Produktionskapazität und der Umsatz der chemischen Industrie alle 15 Jahre verdoppeln. Gleichzeitig nimmt die Anzahl an neuen Chemikalien zu. Auch die Vielfalt und Verbreitung der chemischen Verwendungen und Kombinationen steigt an, was sich auch durch die Entwicklungen im Bereich neuartiger Materialien zeigt. Vor diesem Hintergrund ist es notwendig, an Nachhaltigkeit ausgerichtete Lösungen für neuartige Materialien zu erarbeiten. Diese müssen einerseits den menschlichen Bedürfnissen dienen und weltweit zu einem ausreichenden Maß an Wohlstand sowie zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen. Andererseits dürfen sie die planetaren Grenzen nicht belasten oder überschreiten.

Die internationale Weltgemeinschaft hat das für 2020 gesetzte ehrgeizige Ziel eines vernünftigen Umgangs mit Chemikalien⁵⁷ verfehlt⁵⁸. Die kritischen Analysen weisen aber auch darauf hin, dass es durchaus zahlreiche geeignete Instrumente, Werkzeuge und Lösungen gibt. Diese müssen jedoch dringend noch intensiver als bisher umgesetzt und durch ehrgeizigere weltweite Maßnahmen aller Beteiligten ausgeweitet werden („business as usual is not an option“⁵⁹).

Für eine nachhaltige Entwicklung in der Chemie, für Chemikalien und neuartige Materialien sind ein politisches Gesamtkonzept und kohärente, technische Kriterien erforderlich. Neben SSbD existieren bereits zahlreiche Ansätze, wie Chemikalien und neuartige Materialien nachhaltiger produziert, verbraucht und verwendet werden müssen:

- ▶ 1998 haben Anastas und Warner die “Twelve Principles of Green Chemistry”⁶⁰ beschrieben. Diese sind nicht nur für die Synthese von Chemikalien wichtig, sondern haben auch einer verantwortungsvollen Chemie neue Dringlichkeit verliehen.
- ▶ In einem internationalen Workshop über nachhaltige Chemie im Jahre 2004 entwickelten das UBA und die OECD ausführliche Kriterien für eine nachhaltige Chemie, die ökologische, soziale und wirtschaftliche Aspekte der Nachhaltigkeit in der Chemie miteinander verbinden⁶¹.
- ▶ 2020 postulierte die UNEP-Initiative for Green and Sustainable Chemistry zehn Ziele und Leitgedanken für eine grüne und nachhaltige Chemie als Teil des UNEP Green and Sustainable Framework Manual⁶². Sie reichen von Moleküldesign bis zur Sicherstellung, dass die Verwendung von Chemikalien zur Erfüllung gesellschaftlicher Bedürfnisse frei von Verschmutzung oder anderen negativen Auswirkungen ist. In dieser Hinsicht liefert das UNEP eine Blaupause für die Ausrichtung von Innovationen in der Chemie auf Nachhaltigkeit.
- ▶ Ergänzend zu den UNEP-Bemühungen hat das International Sustainable Chemistry Collaborative Centre (ISC₃)⁶³ 2020 in einem Stakeholder-Prozess die “Ten Key Characteristics of Sustainable Chemistry”⁶⁴ entwickelt. Diese erweitern die UNEP-Perspektive um allgemeine Nachhaltigkeitsprinzipien wie Suffizienz, Konsistenz, Effizienz und Resilienz. Vorsorge und die Einhaltung der planetaren Grenzen sind Kernprinzipien. Die Chemie wird als wissenschaftliches und wirtschaftliches Gut betrachtet, das die Lieferketten und den gesamten Lebenszyklus umfasst. Folglich zielen die “Ten Key Characteristics of Sustainable Chemistry” darauf ab, neue wirtschaftliche Möglichkeiten zu schaffen, die nicht rein gewinn- und wachstumsorientiert sind.
- ▶ Des Weiteren gibt es verschiedene praxisorientierte Instrumente zur Beschleunigung und Umsetzung von mehr Nachhaltigkeit. Die in der Substitution and Alternatives Assessment Toolbox⁶⁵ der OECD gesammelten Bewertungsschemata befassen sich hauptsächlich mit der Vermeidung und Bewältigung gefährlicher Eigenschaften. Einige Instrumente umfassen einen breiteren Blick auf die Nachhaltigkeit, wie der UBA-Leitfaden Nachhaltige Chemikalien⁶⁶ und das dazugehörige IT-Tool Sub-Select⁶⁷. Innovative und nachhaltigkeitsorientierte Geschäftsmodelle wie Chemikalienleasing ergänzen diese Instrumente in der Praxis.
- ▶ Im Rahmen ihrer Arbeiten zum Konzept zur Förderung von sicherer und nachhaltiger Innovation von Nanomaterialien und anderen neuartigen Materialien hat die OECD WPMN ihre Arbeitsbeschreibungen der Begriffe Nachhaltigkeit und Safe and Sustainable by Design veröffentlicht⁶⁸.

Als weiteren Beitrag zur Belebung der dynamischen Diskussion veranstaltete das UBA im November 2021 seine zweite internationale Konferenz zur Nachhaltigkeitstransformation mit dem Titel “Socio-ecological Transformation: Production, Use and Management of Chemicals to serve People without Polluting the Planet”. Zum Abschluss der Konferenz fasste das UBA sechs Hauptziele zusammen, die sich alle auf die nachhaltige Produktion und Nutzung von Chemikalien beziehen⁶⁹:

1. bevorzugte Verwendung von Chemikalien mit geringem Gefahrenpotenzial, wann immer dies möglich ist,
2. Beschränkung der gefährlichsten Chemikalien auf wesentliche Verwendungszwecke,
3. angemessene Bedingungen für eine Kreislaufwirtschaft mit schadstofffreien Stoffströmen,
4. ein nachhaltiges Maß für den Bedarf an Chemikalien einschließlich eines nachhaltigen Energie- und Ressourcenverbrauchs,
5. Klimaneutralität von Chemikalien während ihres gesamten Lebenszyklus und
6. klare Nachhaltigkeitskriterien und -indikatoren, um Abwägungsprozesse transparent zu gestalten und eine wesentliche Grundlage für den notwendigen deutlichen Schub bei der globalen Verwirklichung der Ziele der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung zu liefern.

Diese Ziele stellen eine Zusammenfassung einer grünen und nachhaltigen Chemie dar und adressieren alle Interessensgruppen und chemieverwendenden Sektoren. Trotz dieser erfolgreichen Bemühungen ist es wichtig, diese Ansätze zur Stärkung der nachhaltigen Entwicklung und Transformation von Chemie, Chemikalien und neuartigen Materialien weiterzuentwickeln und mehr als bisher anzuwenden sowie weitere Lösungen für eine nachhaltige Transformation zu etablieren und zu verbreiten.

Sensibilisierung und Wissensaufbau

Transformation zu mehr Chemikaliensicherheit und Nachhaltigkeit wird häufig in der Innovationsphase der Materialforschung nicht ausreichend mitbetrachtet. Dies liegt u. a. darin begründet, dass die Materialforschung vorrangig daran ausgerichtet ist, verbesserte oder neue Funktionalitäten zu erreichen, um eine technische Aufgabe zu lösen. Dennoch gibt es durchaus auch zunehmend Bestrebungen, einzelne Nachhaltigkeitsaspekte in der Entwicklung von neuartigen Materialien und deren Anwendungen zu integrieren, sofern die Erreichbarkeit einer Funktionalität generell geklärt ist und das Bewusstsein über problematische Eigenschaften eines eingesetzten Materials oder Stoffes vorhanden ist. Um diese Situation zu verbessern, bedarf es einer inhärenten Förderung von Forschung zu und Innovation von sicheren und nachhaltigen Materialien. Dabei müssen alle Bereiche der Sicherheit und Nachhaltigkeit über den gesamten Lebenszyklus mitgedacht werden und nicht nur Teilaspekte. In diesem Zusammenhang besteht auch der Bedarf, Wissen über die Auswirkung von bedenklichen Stoffen und Materialien auf Mensch und Umwelt sowie auf deren Nachhaltigkeit an derzeitige und zukünftige Entwicklerinnen und Entwicklern von Materialien und deren Anwendungen zu vermitteln. Zudem gilt es, bei diesen Akteuren Expertise zum regulatorischen Umfeld aufzubauen. Aber auch Förderinstitute sollten die fachliche Expertise haben, Förderanträge für Materialinnovationen hinsichtlich einer zielführenden Berücksichtigung von Sicherheits- und Nachhaltigkeitsaspekten bewerten zu können. Erste Angebote zum Wissensaufbau bieten hier zum Thema Sicherheit von Nanomaterialien beispielsweise verschiedene abgeschlossene und laufende Projekte des NanoSafety-Cluster⁷⁰ oder das EU H2020 Projekt Nanomet⁷¹, die es sich unter anderem zur Aufgabe machen Informations-, Lehr- und Fortbildungsmaterial zur Verfügung zu stellen. Diese gilt es aufzugreifen und weiter auszubauen. Hierbei kann das EU HEU Project PARC⁷² mitwirken, welches neben anderen Arbeiten auch eine Wissens- und Informationsplattform sowie Lehrmaterialien zur Sicherheit und Nachhaltigkeit von Chemikalien und Materialien aufbauen wird. Auch das ISC₃ fördert den Wissenstransfer zur nachhaltigen Chemie, u.a. mit einer internationalen Wissensplattform, einem globalen Start-Up Service, einer Summer School für nachhaltige Chemie und einem internationalen Netzwerk. Damit fördert das ISC₃ durch Zusammenarbeit, Innovation, Bildung, Forschung und Informationsaustausch den Wandel zu einer nachhaltigen Chemie.

Sicherheit und Nachhaltigkeit in den Innovationsprozess integrieren

Wie bereits oben erwähnt, wurde als Bestandteil der EU-Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit ein SSbD-Konzept entwickelt, welches Aspekte der Sicherheit, der Kreislauffähigkeit und der Funktionalität von Chemikalien und Materialien mit der Berücksichtigung der Nachhaltigkeit während ihres gesamten Lebenszyklus und der Minimierung ihres ökologischen Fußabdrucks integriert. Das heißt, Lösungen, beispielsweise für die Vermeidung des Einsatzes problematischer Chemikalien und Materialien, Abfallvermeidung, schadlose Abfallentsorgung und optimale Wertstoffrückgewinnung, müssen bereits in der Entwicklungs- und Innovationsphase von Materialien und deren Produkten mitgedacht werden.

Um in der Lage zu sein, den ökologischen Fußabdruck oder mögliche stoffliche Risiken insbesondere neuer oder wenig untersuchter Materialien und Chemikalien bewerten zu können, muss eine geeignete Datengrundlage auf Basis des FAIR-Data-Prinzips⁷³ geschaffen werden. Zur Erhebung der Daten bedarf es wiederum allgemein akzeptierter Methoden, die geeignet sind neuartige Materialien sachgerecht hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, ihre Recyclingfähigkeit oder ihren ökologischen Fußabdruck zu bewerten. Dies ist sowohl notwendig, um Materialentwicklerinnen und -entwickler in die Lage zu versetzen, überprüfen zu können, ob für eine Innovation SSbD-Kriterien erfüllt sind, als auch um bei einem späteren Markteintritt regulatorische Akzeptanz zu gewährleisten. Allgemein akzeptierte Bewertungsmethoden sind somit ein wichtiger Baustein um Innovation auch aus ökonomischer Sicht erfolgreich zu machen. Zum einen gewähren sie Rechtssicherheit bei der Erfüllung von Datenanforderungen. Zum anderen kann, wie im Falle der OECD Prüfrichtlinien, auf Grundlage der gegenseitigen Anerkennung von Daten vermieden werden, bei Marktzugang in anderen OECD Mitgliedsländern Prüfungen unnötig wiederholen zu müssen. Eine umfassende Datenlage ist aber auch für Entscheidungsträgerinnen und -träger und für Behörden notwendig, um bestehende Wissenslücken, Besorgnisse oder Zielkonflikte zu identifizieren und darauf basierend geeignete Maßnahmen ableiten und umsetzen zu können.

Bedenkliche Materialien frühzeitig erkennen und identifizierte Wissens- und Bewertungslücken schließen

Im Sinne des Vorsorge- und Vorbeugeprinzips bedarf es einer frühzeitigen Identifizierung derjenigen neuartigen Materialien, die Anlass zur Besorgnis geben, sei es aus Perspektive eines möglichen Gesundheits- oder Umweltrisikos, der Nachhaltigkeit oder einer unzureichenden regulatorischen Abdeckung. Im Rahmen von Frühwarnsystemen können bedenkliche neuartige Materialien und neue Anwendungen identifiziert, Besorgnisse formuliert und Wissenslücken aufgetan sowie Handlungsbedarfe beschrieben werden. Zu empfehlende Handlungen können zum einen die Erhebung von Daten zur Be- oder Widerlegung der formulierten Besorgnis, aber auch die Entwicklung von Methoden zur angemessenen Bewertung der Materialien enthalten. Auch kann das Ergebnis eines Frühwarnsystems Empfehlungen für ein Re-Design des Materials oder dessen Anwendung im Sinne des SSbD Konzepts liefern. Ein Vorschlag für ein auf die Besorgnisse von neuartigen (Nano)Materialien ausgerichtetes Frühwarnsystem liegt vor (Early4AdMa⁷⁴), aber auch andere Systeme kommen in Frage (The EU Foresight System – FORENV⁷⁵). Die Betrachtung von neuartigen Materialien in Frühwarnsystemen bleiben jedoch immer Einzelfallbetrachtungen. Die Auswahl der betrachteten Materialien, die Durchführung, Ergebnisse und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen werden somit abhängig von der Kapazität, der Expertise und dem Interesse der Beteiligten sein.

Das Schließen von Bewertungslücken sollte auch die Auswirkung der Umweltrisiken auf die menschliche Gesundheit berücksichtigen. Der Gedanke des One-Health-Ansatzes⁷⁶ kann Grundlage für eine verbesserte integrative Bewertung z. B. von Arzneimitteln bilden und sollte auch für die Risikobewertung von auf neuartigen Materialien basierenden Arzneimitteln berücksichtigt werden.

Ein neues Verständnis von Innovation entwickeln

Um zu einer nachhaltigeren Gesellschaft zu gelangen, braucht es mehr als die Betrachtung zur Sicherheit und Nachhaltigkeit von Materialien und Chemikalien auf Einzelfallebene. Es erfordert ein breiteres Verständnis von Innovation, das neben dem technischen Fortschritt und der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit, von Beginn an auch mögliche Nachteile für Umwelt und Gesellschaft bedenkt und diesen entgegenwirkt. Hierfür ist eine holistische

Herangehensweise notwendig, um z. B. den Verbrauch an Chemikalien und Materialien sowie den damit einhergehenden Ressourcenverbrauch und die Erzeugung von klimaschädlichen Gasen durch nachhaltigere Geschäftsmodelle und (Konsum-)Verhalten generell zu vermindern. Ein gesamtgesellschaftlicher Dialog ist notwendig, um einem Verständnis über die komplexen Interessenlagen erfassen zu können, Wissenstransfer zu ermöglichen, Alternativen und Maßnahmen zu erkennen und so Innovation zu mehr Nachhaltigkeit zu steuern.

Aktuelle UBA Aktivitäten zu neuartigen Materialien

Dialog: Um betroffene Stakeholder zusammenzubringen und eine umfassende Diskussion zu neuartigen Materialien und deren Herausforderungen für die Chemikaliensicherheit anzuregen, führte das UBA von 2019 bis 2021 internationale Themenkonferenzen zum Handlungsbedarf zu neuartigen Materialien im Kontext Chemikaliensicherheit durch. Auf den Fachdialogen des Nanodialogs der Bundesregierung⁷⁷ bringt das UBA die Umweltperspektive auf neuartige Materialien ein.

Vernetzung: Das UBA tauscht sich national und auf europäischer Ebene mit Partnerbehörden und Instituten, aber auch mit Wissenschaft, NGOs und der Industrie zum Thema aus. Dies findet u.a. auf nationaler Ebene im Rahmen der bundesoberbehördenübergreifenden Arbeitsgruppe statt, in der unterschiedliche Perspektiven und Expertisen zu neuartigen Materialien zusammenkommen und Herausforderungen und Handlungsbedarf gegenüber neuartigen Materialien aus behördlicher Perspektive identifiziert werden. Im Rahmen der OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN) leitet das UBA die Steuerungsgruppe zu neuartigen Materialien, die sich mit Sicherheits- und Nachhaltigkeitsfragestellungen im Kontext neuartiger Materialien und ihren Anwendungen befasst⁷⁸.

Strategische Vorschau und Frühwarnsysteme: Im Rahmen der strategischen Vorschau erkennt das UBA neue Themen mit Umweltrelevanz. In diesem Kontext hat das UBA in einer Trendstudie die Umweltwirkungen des 3D Drucks⁷⁹ abgeschätzt, die Grundlage für weiterführende Forschung zum Thema am UBA ist. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des UBAs erarbeiteten zusammen mit Kolleginnen und Kollegen des niederländischen RIVM, des BfR und der BAuA das Frühwarnsystem EARLY4AdMa⁸⁰ zur Erkennung solcher neuartiger (Nano)Materialien, die Handlungsbedarf auf Grundlage von Sicherheits- oder Nachhaltigkeitsbedenken erwarten lassen.

Bewertungsinstrumente: Aufgrund seiner Expertise zur regulatorischen Umweltrisikobewertung ist das UBA an verschiedenen Gremien und Initiativen zur Entwicklung von Bewertungsinstrumenten für Nanomaterialien für die Chemikaliensicherheit beteiligt. So ist das UBA beispielsweise im Board der Malta Initiative vertreten, die es sich zum Ziel gesetzt hat die Entwicklung von OECD Prüfmethoden voranzubringen. Diese Gremien und Initiativen erweitern derzeit ihr Bearbeitungsfeld auf neuartige (Nano-)Materialien. Das UBA ist weiterhin engagiert hier seinen Beitrag zu leisten.

Forschung: Neben dem Engagement des UBAs in Drittmittelprojekten als Partner oder in Begleitgremien auf nationaler oder europäischer Ebene, betreut das UBA eine Reihe von Forschungsprojekten aus dem ReFoPlan des BMUV. Diese Forschung umfasst derzeit sowohl sogenannte Vorlaufforschung, die dazu dient, neue relevante Themen und Handlungsfelder zu identifizieren und sich damit auseinander zu setzen, aber auch konkrete Forschungsfragen. So lässt das UBA derzeit unter anderem ein Projekt durchführen, das sich mit den Herausforderungen neuartiger Carriersysteme für die Umweltrisikobewertung befasst.

4 Zusammenfassung

Neuartige Materialien umfassen sowohl neue als auch bestehende Materialien, die gegenüber herkömmlichen Materialien verbesserte oder neue Eigenschaften aufweisen. Damit umfassen sie eine Vielzahl an Materialtypen unterschiedlichster Strukturen und Komplexitäten, die verschiedene Eigenschaften und Funktionalitäten hervorbringen und somit in sehr unterschiedlichen Anwendungsbereichen eingesetzt werden könnten. Chemikalien und Materialien sind essentiell für die Bereitstellung von CO₂-armen, schadstofffreien, sowie energie- und ressourcen-effizienten Techniken, Werkstoffen und Produkten. Sie sind für die Transformation der Gesellschaft und Wirtschaft hin zu mehr Nachhaltigkeit unverzichtbar. Eine Diskussion, welche Herausforderungen der Einsatz neuartiger Materialien hinsichtlich Chemikaliensicherheit und Nachhaltigkeit mit sich bringt, ist daher vielschichtig und die Frage nach angemessenen Handlungen, um den Herausforderungen zu begegnen, nicht einheitlich für alle neuartigen Materialien zu beantworten. Auf Grundlage der chemischen Zusammensetzung, Funktionalitäten und Komplexität eines neuartigen Materials und seiner vorgesehenen Einsatzbereiche ist es allerdings notwendig Fragestellungen zu formulieren, die ggf. eine genauere Betrachtung erfordern. Dies betrifft sowohl Fragen zu Umwelt- oder Gesundheitsrisiken als auch zu den ökologischen Fußabdrücken entlang des Lebenszyklus oder der Kreislaufführung.

Das UBA setzt sich für das Erkennen und Abwenden negativer Auswirkungen für den Umwelt- und Gesundheitsschutz und die Nachhaltigkeit ein. Es erarbeitet Lösungsansätze zum Umgang mit diesen Herausforderungen mit dem Ziel, die zwingend notwendige Transformation zur Nachhaltigkeit in Deutschland, Europa und weltweit mitzugestalten. In diesem Kontext möchte das UBA frühzeitig umwelt-relevante Herausforderungen durch neuartige Materialien identifizieren und geeignete Maßnahmen ableiten, um so eine bestmögliche Nutzung der Vorteile dieser Materialien für eine Transformation hin zu einer nachhaltigeren Wirtschaft und Gesellschaft zu unterstützen. Neuartige Materialien versprechen das Potential technische Lösungen, für u. a. die Energie- und Verkehrswende, den Ressourcenschutz, die Digitalisierung oder die Gesundheitsversorgung zu bieten. Um die Entwicklung zu einer nachhaltigeren Wirtschaft und Gesellschaft unterstützen zu können, ist es Grundvoraussetzung, dass neuartige Materialien selber sicher und nachhaltig über ihren gesamten Lebenszyklus sind. Um dies zu gewährleisten zeigt das UBA eine Reihe von Eckpunkten auf. Diese umfassen vorregulatorische Ansätze wie Wissensvermittlung, Dialog, Früherkennung, Forschung bis hin zu regulatorischen Ansätzen, wie die Bereitstellung geeigneter Bewertungsinstrumente. Diese Ansätze sollten sowohl von politischer und regulativer Seite, als auch von Seiten der Forschung, Industrie und auch Gesellschaft aufgegriffen werden.

Endnoten

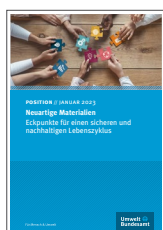
- 1 World Commission on Environment and Development (WCED) (1987) Our common Future. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>, aufgerufen am 19.08.2022
- 2 J. Rockström, W. Steffen, K. Noone (2009) A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475
- 3 Vereinte Nationen, Sustainable Development Goals. <https://sdgs.un.org/goals>, aufgerufen am 19.08.2022
- 4 Europäische Kommission Europäischer Grüner Deal, https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de, aufgerufen am 19.08.2022
- 5 Advanced Material Initiative (2022) Materials 2030 Manifesto https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/research_and_innovation/research_by_area/documents/advanced-materials-2030-manifesto.pdf, aufgerufen am 29.09.2022
- 6 Europäische Kommission (2022) Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit. https://environment.ec.europa.eu/strategy/chemicals-strategy_de, aufgerufen am 29.09.2022
- 7 BAuA, BfR, UBA (2022) Risikogovernance von neuartigen Materialien. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/risikogovernance-von-neuartigen-materialien>, aufgerufen am 19.08.2022
- 8 Europäische Kommission (2022) Empfehlung der Europäischen Kommission vom 10. Juni 2022 zur Definition von Nanomaterialien. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0614\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0614(01)), aufgerufen am 29.09.2022
- 9 Arbeitsdefinition der deutschen bundesoberbehördenübergreifenden Arbeitsgruppe zu neuartigen Materialien
- 10 OECD (2022) Advanced Materials: Working Description. Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials. No. 104. [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-CBC-MONO\(2022\)29&doclanguage=en](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-CBC-MONO(2022)29&doclanguage=en), aufgerufen am 23.09.2022
- 11 B. Giese, M. Drapalik, L. Zajicek, D. Jepsen, A. Reihlen, T. Zimmermann (2020) Advanced materials: Overview of the field and screening criteria for relevance assessment. UBA TEXTE 132/2020. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/advanced-materials-overview-of-the-field-screening>, aufgerufen am 18.08.2022. Dieser Bericht verweist auf eine Reihe von Factsheets zu ausgewählten neuartigen Materialien, die unter https://oekopol.de/archiv/material/756_AdMa_Factsheets_final.pdf (aufgerufen am 18.08.2022) abrufbar sind.
- 12 I. Andersen (2020) The triple planetary crisis: Forging a new relationship between people and the earth. 14. Juli 2020, Erklärung an den Unterausschuss, Ausschuss der ständigen Vertretungen. <https://www.unep.org/news-and-stories/speech/triple-planetary-crisis-forging-new-relationship-between-people-and-earth>, aufgerufen am 18.09.2022
- 13 A.V. Herrera-Herrera, M.Á. González-Curbelo, J. Hernández-Borges, M. Á. Rodríguez-Delgado (2012) Carbon nanotubes applications in separation science: A review, *Analytica Chimica Acta*, 734, 1-30. J.R. Werber, C.O. Osuji, M. Elimelech (2016) Materials for next-generation desalination and water purification membranes. *Nature Reviews Materials* 1(5):16018. A. Lee, J.W. Elam, S.B. Darling (2016) Membrane materials for water purification: design, development, and application, *Environmental Science: Water Research & Technology* journal2, 17-42. M. Mon, R. Bruno, J. Ferrando-Soria, D. Armentano, E. Pardo (2018) Metal-Organic Framework Technologies for Water Remediation: Towards a Sustainable Ecosystem. *Journal of Material Chemistry A* 6, 4912-4947. S. Rojas, A. Rodríguez-Diéguez, P. Horcajada (2022) Metal-Organic Frameworks in Agriculture. *ACS Applied Materials & Interfaces* 14(15):16983-7007. W. Zheng, J. Huang, S. Li, M. Ge, L. Teng, Z. Chen, et al. (2021) Advanced Materials with Special Wettability toward Intelligent Oily Wastewater Remediation. *ACS Applied Materials & Interfaces* 13(1):67-87.
- 14 V. García-Salcido, P. Mercado-Oliva, J.L. Guzmán-Mar, B.I. Kharisov, L. Hinojosa-Reyes. (2022) MOF-based composites for visible-light-driven heterogeneous photocatalysis: Synthesis, characterization and environmental application studies. *Journal of Solid State Chemistry* 207, 122801. C. Petite (2018) Present and future of MOF research in the field of adsorption and molecular separation. *Current Opinions in Chemical Engineering* 20:132-142. S. Rojas, A. Rodríguez-Diéguez, and P. Horcajada (2022) Metal-Organic Frameworks in Agriculture *ACS Appl. Mater. Interfaces* 14, 16983–17007.
- 15 Z.A. Althman, S.M. Wabaidur (2019) Application of carbon

- 19 B. Halamoda-Kenzaoui, H. Box, M. Van Elk, S. Gaitan, R. Geertsma, E. Gainza Lafuente, et al. (2019) Anticipation of regulatory needs for nanotechnology-enabled health products - The REFINE white paper. Publications Office of the European Union. doi:10.2760/599552.
- 20 S. Berkner, K. Schwirn, D. Voelker (2022) Too advanced for assessment? Advanced materials, nanomedicine and the environment. *Environmental Sciences Europe* 34(1):71.
- 21 L Tang, X. Meng, D. Deng, X. Bao (2019) Confinement Catalysis with 2D Materials for Energy Conversion. *Advanced Materials* 31(50):1901996. H. Fang, J. Yang, M. Wen, Q. Wu (2018) Nanoalloy Materials for Chemical Catalysis. *Adv Mater* 30(17):e1705698. Y. Zhu, L. Peng, Z. Fang, C. Yan, X. Zhang, G. Yu (2018) Structural Engineering of 2D Nanomaterials for Energy Storage and Catalysis. *Advanced Materials* 30(15):1706347.
- 22 H.M. Ibrahim, A. Klingner A (2020) A review on electrospun polymeric nanofibers: Production parameters and potential applications. *Polymer Testing* 90:106647. V.S. Reddy, Y. Tian, C. Zhang, Z. Ye, K. Roy, A. Chinnappan, et al. (2021) A Review on Electrospun Nanofibers Based Advanced Applications: From Health Care to Energy Devices. *Polymers* 13(21): 3746
- 23 A.H. Espera, J.R.C. Dizon, Q. Chen, R.C. Advincula (2019) 3D-printing and advanced manufacturing for electronics. *Progress in Additive Manufacturing* 4:245-267; Y. Khan, A. Thielens, S. Muin, J. Ting, C. Baumbauer, A.C. Arias (2019) A New Frontier of Printed Electronics: Flexible Hybrid Electronics. *Advanced materials* 32, 1905279. Q. Huang, Y. Zhu (2019) Printing Conductive Nanomaterials for Flexible and Stretchable Electronics: A Review of Materials, Processes, and Applications. *Advanced Materials Technologies* 4, 1800546.
- 24 I. Karapanagiotis, P.N. Manoudis (2022) Superhydrophobic and superamphiphobic materials for the conservation of natural stone: An overview. *Construction and Building Materials* 320:126175. H. Yan, Q. Wu, C. Yu, T. Zhao, M. Lui (2020) Recent Progress of Biomimetic Antifouling Surfaces in Marine. *Advanced Materials Interfaces* 7, 2000966. Y. Huang, L. Deng, P. Ju, L. Hung, H. Qian, D. Zhang, et al. (2018) Triple-Action Self-Healing Protective Coatings Based on Shape Memory Polymers Containing Dual-Function Microspheres. *ACS Applied Materials and Interfaces* 10, 23369-23379. G. Cui, C. Zhang, A. Wang, X. Zhou (2021) Research progress on self-healing polymer/graphene anticorrosion coatings. *Progress in Organic Coatings* 155, 106231. L. Zhai, A. Narkar, K. Ahn (2020) Self-healing polymers with nanomaterials and nanostructures. *Nano Today* 30, 100826. C.I. Idumah & S.R. Odera (2020) Recent advancement in self-healing graphene polymer nanocomposites, shape memory, and coating materials. *Polymer-Plastics Technology and Materials* 59, 1167-1190. I.S. Bayer (2020) Superhydrophobic Coatings from Ecofriendly Materials and Processes: A Review. *Advanced Materials Interfaces* 7, 2000095.
- 25 B. Keppner, W. Kahlenborn, S. Richter, T. Jetzke T, A. Lessmann, M. Bovenschulte (2018) Die Zukunft im Blick: 3D-Druck - Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-zukunft-im-blick-3d-druck>, aufgerufen am 18.08.2022
- 26 T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T.Q. Nguyen, D. Hui D (2018) Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* 143:172-96. A. Haleem, M. Javaid (2019) Additive Manufacturing Applications in Industry 4.0: A Review. *Journal of Industrial Integration and Management* 4, 1930001. M. Askari, D.A. Hutchins, P.J. Thomas, L. Astolfi, R.L. Watson, M. Abdi, et al. (2020) Additive manufacturing of metamaterials: A review. *Additive Manufacturing* 36:101562. Deutscher Bundestag Drucksache 20/3110 Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung. Technikfolgenabschätzung (TA) Innovative Technologien, Prozess und Produkte in der Bauwirtschaft <https://dserver.bundestag.de/btd/20/031/2003110.pdf>, aufgerufen 27.09.2022. S.K. Karunakaran, G.M. Arumugam, W. Yang, S. Ge, S.N. Khan, X. Lin, et al. (2019) Recent progress in inkjet-printed solar cells. *Journal of Materials Chemistry A* 7, 13873
- 27 K.R. Ryan, M.P. Down, C.E. Banks (2021) Future of additive manufacturing: Overview of 4D and 3D printed smart and advanced materials and their applications. *Chemical Engineering Journal* 403:126162.
- 28 C. Gao, S. Wolff, S. Wang S (2021) Eco-friendly additive manufacturing of metals: Energy efficiency and life cycle analysis. *Journal of Manufacturing Systems* 60:459-72.
- 29 T. Peng, K. Kellens, R. Tang, C. Chen, G. Chen (2018) Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. *Additive Manufacturing* 21:694-704.; M. Mani, K.W. Lyons, S.K. Gupta (2014) Sustainability Characterization for Additive Manufacturing. *Journal*

- 32 A.H. Tkaczyk, A. Bartl, A. Amato, V. Lapkovskis, M. Petranikova (2018) Sustainability evaluation of essential critical raw materials: cobalt, niobium, tungsten and rare earth elements. *Journal of Physics D: Applied Physics* 51, 203001. E. Hache, G.S. Seck, M. Simoen, C. Bonnet, S. Carcanague. (2019) Critical raw materials and transportation sector electrification: A detailed bottom-up analysis in world transport. *Applied Energy* 240, 6-25
- 33 P. Quicker, J. Stockschröder, D. Stapf, W. Baumann, M. Wexler, M. Beckmann, C. Thiel, U. Teipel, E. Seiler, H. Hoppe, V. Hoenig (2021) Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung carbonfaserverstärkter Kunststoffabfälle in thermischen Prozessen, UBA-Text 131/2021. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/moeglichkeiten-grenzen-der-entsorgung>, aufgerufen am 18.08.2022
- 34 I.M. Alarifi (2021) Advanced selection materials in solar cell efficiency and their properties - A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings..* S.Das, D. Pandey, J. Thomas, T. Roy (2019) The Role of Graphene and Other 2D Materials in Solar Photovoltaics. *Advanced Materials* 31(1):1802722.
- 35 US Department of Energy (2016) Global Wind Day 2016 – AMO's Role in Applying 3D Printing to Wind Blade Mold Manufacturing, <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/global-wind-day-2016-amos-role-applying-3d-printing-wind-blade-mold-manufacturing>, aufgerufen am 19.08.2022. Science Daily (2016) Lightweight rotor blades made from plastic foams for offshore wind turbines, <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/10/161021084515.htm>, aufgerufen am 19.08.2022. C. Tong (2019) Advanced Materials Enable Renewable Wind Energy Capture and Generation. In: C. Tong (ed) *Introduction to Materials for Advanced Energy Systems*. Springer International Publishing, Cham.
- 36 z.B. Fraunhofer IFAM, <https://www.ifam.fraunhofer.de/de/Ueberuns/Standorte/Dresden/Wasserstofftechnologie.html>, aufgerufen am 19.08.2022
- 37 European Commission, Partnership on Advanced Materials for Batteries for Electro-mobility and Stationary Energy Storage, <https://s3platform.jrc.ec.europa.eu/advanced-materials-for-batteries>, aufgerufen am 19.08.2022. IPCEI Batteries Project, <https://www.ipcei-batteries.eu/>, aufgerufen am 19.08.2022; Y. Zhang, R. Knibbe, J. Sunarso, Y. Zhong, W. Zhou, Z. Shao, et al. (2017) Recent Progress on Advanced Materials for Solid-Oxide Fuel Cells Operating Below 500 °C. *Advanced Materials* 29(48):1700132. J. Lopez, D.G. Mackanic, Y. Cui, Z. Bao (2019) Designing polymers for advanced battery chemistries. *Nature Reviews Materials* 4(5):312-30. C.M. Costa, E. Lizundia, S. Lanceros-Méndez (2020) Polymers for advanced lithium-ion batteries: State of the art and future needs on polymers for the different battery components. *Progress in Energy and Combustion Science* 79:100846. C. Yang, H. Wei, L. Guan, J. Guo, Y. Wang, X. Yan, et al. (2015) Polymer nanocomposites for energy storage, energy saving, and anticorrosion. *Journal of Materials Chemistry A* 3(29), 14929-41. J. Mei, T. Liao, L. Kou, Z. Sun Z (2017) Two-Dimensional Metal Oxide Nanomaterials for Next-Generation Rechargeable Batteries. *Advanced Materials* 29(48):1700176. E. Barrios D. Fox, Y.Y.L. Sip, R. Catarata, J.E. Calderon, N. Azim, et al. (2019) Nanomaterials in Advanced, High-Performance Aerogel Composites: A Review. *Polymers* 11, 726
- 38 Y. Yan, W.I. Shin, H. Chen, S.M. Lee, S. Manickam, S. Hanson, et al. (2021) A recent trend: application of graphene in catalysis. *Carbon Letter* 31:1777-199; Y.H. Li, J.Y. Li, Y.J. Xu (2021) Bimetallic nanoparticles as cocatalysts for versatile photoredox catalysis. *EnergyChem* 3, 1000047
- 39 G. Chen, Y. Li, M. Bick, J. Chen (2020) Smart Textiles for Electricity Generation. *Chemical Reviews* 120, 3668-3720.
- 40 C. Li, Z. Chen, W. Dong, L. Lin, X. Zhu, Q. Liu, et al. (2021) A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: Performance optimization through composition and microstructure. *Journal of Non-Crystalline Solids* 553:120517
- 41 Z. Qui, Z. Xiao, L. Gao, J. Li, H. Wang, Y. Wang, et al. (2019) Transparent wood bearing a shielding effect to infrared heat and ultraviolet via incorporation of modified antimony-doped tin oxide nanoparticles. *Composites Science and Technology* 172, 43-48. H.N. Kim, S. Yang (2020) Responsive Smart Windows from Nanoparticle-Polymer Composites. *Progress Report. Advanced Functional Materials* 30, 1902597.
- 42 L. Kong, C. Tang, H.J. Peng, J.Q. Huang, Q. Zhang (2020) Advanced energy materials for flexible batteries in energy storage: A review. *SmartMat* 1:e1007. C. Li, R. Liu, Y. Xiao, F. Cao, H. Zhang (2021) Recent progress of separators in lithium-sulfur batteries. *Energy Storage Materials* 40:439-60. L. Zhang, X.

- 47 D. Bresser, D. Buchholz, A. Moretti, A. Varzi, S. Passerini (2018) Alternative binders for sustainable electrochemical energy storage – the transition to aqueous electrode processing and bio-derived polymers. *Energy & Environmental Science* 11 (11), 3096-127.
- 48 W. Weber, R. Wagner, B. Streipert, V. Kraft, M. Winter, S. Nowak (2016) Ion and gas chromatography mass spectrometry investigations of organophosphates in lithium ion battery electrolytes by electrochemical aging at elevated cathode potentials. *Journal of Power Sources* 306,193-9.; L. Terborg, S. Weber, F. Blaske, S. Passerini, M. Winter, U. Karst, et al. (2013) Investigation of thermal aging and hydrolysis mechanisms in commercial lithium ion battery electrolyte. *Journal of Power Sources* 242:832-7. V. Kraft, M. Grützke, W. Weber, J. Menzel, S. Wiemers-Meyer, M. Winter, et al. (2015) Two-dimensional ion chromatography for the separation of ionic organophosphates generated in thermally decomposed lithium hexafluorophosphate-based lithium ion battery electrolytes. *Journal of Chromatography A* 1409,201-9. M. Grützke, V. Kraft, B. Hoffmann, S. Klamor, J. Diekmann, A. Kwade (2015) Aging investigations of a lithium-ion battery electrolyte from a field-tested hybrid electric vehicle. *Journal of Power Sources* 273, 83-8.
- 49 BAuA, BfR, UBA (2022) Risikogovernance von neuartigen Materialien. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/risikogovernance-von-neuartigen-materialien>, aufgerufen am 19.08.2022
- 50 A. Reihlen, D. Jepsen, T. Zimmermann, B. Giese, M. Drapalik, L. Zajicek (2022) Thematic Conferences Advanced Materials – Assessments of need to act on chemical safety. Thematic Conferences Advanced Materials, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/thematic-conferences-advanced-materials>, aufgerufen am 19.08.2022
- 51 C. Caldeira, R. Farcas, I. Garmendia Aguirre, L. Mancini, D. Tosches, A. Amelio, et al. (2022) Safe and Sustainable by Design chemicals and materials - Framework for the definition of criteria and evaluation procedure for chemicals and materials, EUR 31100 EN, Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC128591>
- 52 Expertengruppe zum “one substance, one assessment”, <https://ec.europa.eu/transparency/expert-groups-register/screen/expert-groups/consult?lang=en&groupID=3792>, aufgerufen am 16.11.2022
- 53 Europäische Kommission, High Level Roundtable on the implementation of the Chemicals Strategy for Sustainability (2022) Background document 1 – State of the implementation of the Chemicals Strategy for Sustainability, 18 May 2022, <https://ec.europa.eu/transparency/expert-groups-register/core/api/front/document/83178/download>, aufgerufen am 06.12.2022
- 54 Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG vom 30.3.2022 COM(2022) 142 final, 2022/0095 (COD); Europäische Kommission, Initiative für nachhaltige Produkte. Initiative für nachhaltige Produkte (europa.eu), aufgerufen am 18.08.2022
- 55 E. Barteková, P. Börkey (2021) Digitalisation for the transition to a resource efficient and circular economy, Environment Working Paper No. 192, <https://www.oecd.org/publications/digitalisation-for-the-transition-to-a-resource-efficient-and-circular-economy-6f6d18e7-en.htm>, aufgerufen am 18.08.2022
- 56 UNEP (2019) Global Chemicals Outlook II – From Legacies to Innovative Solutions: Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://www.unep.org/explore-topics/chemicals-waste/what-we-do/policy-and-governance/global-chemicals-outlook>, aufgerufen am 18.09.2022
- 57 Vereinte Nationen (2022) Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/2030agenda>, aufgerufen am 29.09.2022
- 58 SAICM (2019) Independent Evaluation of the Strategic Approach to International Chemicals Management from 2006-2015, Documents SAICM/IP.3/9 (Executive Summary, 13 pages) and SAICM/IP.3/INF/3 (Final Report, 94 pages), <http://saicm.org/Beyond2020/InterSessionalProcess/ThirdInterSessionalmeeting/tabid/8024/language/en-US/Default.aspx>, aufgerufen am 29.09.2022
- 59 UNEP (2019) Global Chemicals Outlook II – From Legacies to Innovative Solutions: Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development, <https://www.unep.org/explore-topics/chemicals-waste/what-we-do/policy-and-governance/global-chemicals-outlook>, aufgerufen am 18.09.2022
- 60 Referenzen und weitere Informationen finden sich unter <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>, aufgerufen am 29.09.2022
- 61 UBA (2009) Nachhaltige Chemie - Positionen und Kriterien des Umweltbundesamtes. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/nachhaltige-chemie>,

- 68 OECD (2022) Advanced Materials: Working Description. Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials. No. 105. [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-CBC-MONO\(2022\)30&doclanguage=en](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-CBC-MONO(2022)30&doclanguage=en), aufgerufen am 16.11.2022
- 69 UBA, Pressemitteilung vom 30.11.2021. Chemikalien: Umwelt und Gesundheit besser schützen. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/chemikalien-umwelt-gesundheit-besser-schuetzen>, aufgerufen am 29.09.2022
- 70 NanoSafetyCluster (2022) Working Group A, <https://www.nanosafetycluster.eu/nsc-overview/nsc-structure/working-groups/wga/>, aufgerufen am 29.09.2022
- 71 EU H2020 Projekt Development and standardisation of methods for the safety testing of manufactured nanomaterials at OECD (NANOMET), <https://www.oecd.org/chemicalsafety/nanomet/>
- 72 EU Horizon Europe Projekt European Partnership for the Assessment of Risks from Chemicals (PARC), <https://cordis.europa.eu/project/id/101057014>
- 73 FAIR = findable (auffindbar), accessible (zugänglich), interoperable (interoperabel), reusable (wiederverwendbar)
- 74 A. Oomen, L. Soeteman-Hernandez, W. Peijnenburg, E. Bleeker, E. Swart, C. Noorlander, et al. (2022) Towards Safe and Sustainable Advanced (Nano)materials: A proposal for an early awareness and action system for advanced materials (Early4AdMa), <https://www.rivm.nl/documenten/Early4AdMa-brochure>
- 75 The EU Foresight System for the identification of emerging environmental issues and related opportunities and risks (FORENV) https://ec.europa.eu/environment/integration/research/forenv_en.htm (insbesondere der Bericht zu: Emerging societal, economic and environmental issues that may impact our ability to deliver a zero-pollution ambition for a toxic-free environment by 2050), aufgerufen am 29.09.2022
- 76 D. Destoumieux-Garzón, P. Mavingui, G. Boetsch, J. Boissier, F. Darriet, P. Duboz, et al. (2018) The One Health Concept: 10 Years Old and a Long Road Ahead. *Frontiers in Veterinary Science*, 5:14.
- 77 BMUV, NanoDialog, <https://www.bmuv.de/themen/gesundheit-chemikalien/nanotechnologie/nanodialog-der-bundesregierung>, aufgerufen am 08.09.2022
- 78 OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials, <https://www.oecd.org/science/nanosafety/>, aufgerufen am 08.09.2022
- 79 B. Keppner, W. Kahlenborn, S. Richter, T. Jetzke, A. Lessmann, M. Bovenschulte (2018) Die Zukunft im Blick: 3D-Druck - Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-zukunft-im-blick-3d-druck>, aufgerufen am 08.09.2022
- 80 A. Oomen, L. Soeteman-Hernandez, W. Peijnenburg, E. Bleeker, E. Swart, C. Noorlander, et al. (2022) Towards Safe and Sustainable Advanced (Nano)materials: A proposal for an early awareness and action system for advanced materials (Early4AdMa), <https://www.rivm.nl/documenten/Early4AdMa-brochure>



► **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/