

Zahra Mesbahi, André Gazsó,
Gloria Rose, Daniela Fuchs,
Anna Pavlicek*

Zusammenfassung

Advanced Materials sind Materialien oder Materialkombinationen mit verbesserten, neuartigen oder einzigartigen Funktionalitäten bzw. Eigenschaften. Sie zählen zu den Schlüsseltechnologien, welche für die Wettbewerbsfähigkeit und das Wirtschaftswachstum in der EU als entscheidend erachtet werden. EU-Forschungsrahmenprogramme, wie Horizon 2020 und Horizon Europe, spiegeln diese Bedeutung wider. Die neuen Entwicklungen reichen von innovativen Additiven in Lebensmittelverpackungen, über ultraleichte Metallschäume, bis hin zu Transportsystemen für Wirkstoffe in der Medizin oder Kosmetik. In vielen Fällen bieten diese neuartigen Materialien Lösungen für Umweltprobleme, wie zum Beispiel durch Energie- und Materialeinsparungen aufgrund von Gewichtsreduktion, und können somit einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung von Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft leisten. Neuartige Materialien und/oder neue Funktionalitäten sind jedoch auch mit Unsicherheiten bezüglich der menschlichen Gesundheit und Umwelt verbunden. Es ist daher wichtig, frühzeitig sicherheitsrelevante Aspekte zu beleuchten und im Sinne des Vorsorgeprinzips mögliche Risiken zu identifizieren. Aufgrund der Komplexität von Advanced Materials sind neue Ansätze erforderlich, um notwendige Kenntnisse über die Sicherheit dieser Materialien zu gewährleisten. Safe-by-Design bzw. Safe-and-Sustainable-by-Design sind Beispiele für solche Ansätze. Ziel ist die Integration von Sicherheit, Kreislauffähigkeit und Funktionalität von Produkten und Prozessen während ihres gesamten Lebenszyklus, um somit potenzielle Risiken für die menschliche Gesundheit und Umwelt schon früh im Innovationsprozess von neuen Materialien zu adressieren. Derzeit ist es noch unklar, ob alle Advanced Materials durch bestehende Regulierungen im Bereich der Chemikaliensicherheit abgedeckt sind. Deshalb ist es notwendig, relevante Bestimmungen und entsprechende Instrumente einer Risikoabschätzung in dieser Hinsicht zu überprüfen, um allfällige gesetzliche Lücken zu antizipieren und füllen zu können.

* Korrespondenzautorin

Advanced Materials

Einleitung

Materialien mit neuen oder verbesserten Funktionalitäten hatten schon immer große Bedeutung für die Menschheit. So werden gewisse Zeitabschnitte nach den Materialien, die sich bestimmend auf das Leben ausgewirkt haben, benannt (die Stein-, Bronze- und Eisenzeit). In der heutigen Zeit kommt es durch rasche technologische Fortschritte immer schneller zu Materialinnovationen, sogenannten Advanced Materials – ein Begriff, der seit mehr als dreißig Jahren in den Materialwissenschaften in Verwendung ist¹, welche neue Funktionalitäten und somit neue Potenziale aber auch Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Mensch und Umwelt mit sich bringen. Aufgrund ihrer neuartigen und weiterentwickelten Eigenschaften wird oftmals hervorgehoben, dass Advanced Materials attraktive Lösungen für globale Herausforderungen bieten können, wie zum Beispiel der Bedarf an kontinuierlicher erneuerbarer Energie, sauberem Wasser und Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft.

Advanced Materials sind in mehrfacher Hinsicht vielversprechend: Von neuen Arten von Additiven in Lebensmittelverpackungen, ultraleichten Metallschäumen, bis hin zu Transportsystemen für Wirkstoffe in der Medizin oder Kosmetik (sogenannte „Nanocarrier“) reichen die Anwendungen über verschiedene Bereiche und wirken sich auf unterschiedliche Branchen aus. In vielen Fällen bieten diese neuartigen Materialien Lösungen für Umweltprobleme, wie zum Beispiel durch Energie- und Materialersparnis aufgrund von Gewichtsreduktion, und können somit einen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten.²

Neben diesen potenziell positiven Aspekten von neuartigen Materialien, die Beiträge für die Umwelt leisten können, gibt es jedoch auch Unsicherheiten und Herausforderungen, etwa in Bezug auf den Arbeitsschutz, die Abfallentsorgung und Rezyklierbarkeit. Neuartige Materialien und deren neue Funktionalitäten sind mit Unsicherheiten bezüglich der Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt verbunden. Es ist daher wichtig, frühzeitig sicherheitsrelevante Aspekte zu beleuchten und im Sinne des Vorsorgeprinzips mögliche Risiken schon im Vorhinein zu identifizieren. An dieser Stelle können die bereits langjährigen Erfahrungen aus dem Bereich der Nanotechnologie herangezogen werden.³

Es gibt eine Reihe von unterschiedlichen Definitionsansätzen für den Begriff Advanced Materials, die die folgenden Gemeinsamkeiten aufweisen: Es handelt sich um Materialien oder Materialkombinationen mit verbesserten, neuartigen oder einzigartigen Eigenschaften oder Funktionalitäten, die derzeit existierenden konventionellen Materialien überlegen sind. Somit handelt es sich hier um einen Begriff, dessen Inhalt von unterschiedlichen Bezugspunkten abhängt und der kontextbezogen variieren kann. Es spielt also nicht nur das betrachtete Material eine wesentliche Rolle, sondern auch die Anwendung, ebenso wie die Auswahl der konventionellen Materialien als Referenzbasis. Der Aspekt der Verbesserung bzw. besseren Eignung hat zudem eine zeitliche Komponente.

Advanced Materials können von Grund auf neu entworfen und entwickelt werden, indem man Atome auf neue Art und Weise zusammensetzt. Sie werden aber auch durch Modifizierung von traditionellen Materialien wie z. B. Metallen, Keramiken, Gelen und Polymeren entwickelt, die dadurch neue Eigenschaften erhalten.⁴ Diese neuen Eigenschaften, wie zum Beispiel erhöhte Haltbarkeit und Elastizität, verbessern die Leistungsfähigkeit dieser Materialien und können somit den herkömmlichen Ausgangsmaterialien überlegen sein. Materialien, die in Hochtechnologie-Anwendungen eingesetzt werden, werden ebenfalls gelegentlich als Advanced Materials bezeichnet. Unter Hochtechnologie versteht man ein Gerät oder Produkt, das nach komplexen Prinzipien operiert oder funktioniert, z. B. Computer, Flugzeuge und Raumfahrzeuge.⁵ Advanced Materials repräsentieren daher eine breite Klasse von Materialien, die Halbleiter, Biomaterialien und Nanomaterialien einschließen.⁵

Das vorliegende Dossier gibt einen Überblick über die verschiedenen Definitionsansätze von Advanced Materials, ihre Potenziale sowie Anwendungen und identifiziert Bereiche in denen Sicherheitsfragen auftreten können.

Definitionen

Definitionen für den Begriff Advanced Materials sind seit annähernd zwanzig Jahren in diversen Forschungsbereichen zu finden. Es existiert zurzeit keine allgemeingültige oder gar rechtsverbindliche Definition, wobei es an erster Stelle zu ermitteln gilt, inwieweit es überhaupt einer solchen Definition bedarf. Die Erfahrungen hinsichtlich der Regulierung von Nanomaterialien haben gezeigt, dass eine regulatorische Definition ohne wissenschaftlicher Begründung – neben dem schwierigen Konsensfindungsprozesses – zusätzliche Gefahrenpotenziale birgt, beispielsweise die Tatsache, dass sich im Falle der Nanomaterialien regulatorische Definitionen an Eigenschaften orientieren, die keine Aussagen über Risikopotenziale erlauben.⁶ Sinnvoll erscheinen daher einheitliche und allgemeingültige Arbeitsdefinitionen, die ein gemeinsames Verständnis des zurzeit noch diffusen Begriffs der Advanced Materials erlauben und nicht auf eine einheitliche Regulierung ausgerichtet sind. In Tabelle 1 sind bisherige Definitionen von Advanced Materials angeführt, welche gewisse Gemeinsamkeiten aufweisen. Zusammenstellungen bereits existierender Definitionen und Kategorisierungen sind auch in den Meta-Studien von Broomfield et al. (2016)⁷ und Giese et al. (2020)⁸ zu finden.

Wenn man die oben genannten Definitionen betrachtet, werden die folgenden Eigenschaften von Advanced Materials besonders hervorgehoben:

- Sie zeichnen sich durch ihre Neuartigkeit aus
- Sie sind auf die eine oder andere Weise fortschrittlicher als traditionelle Materialien (sie haben fortgeschrittene Eigenschaften)
- Sie sind speziell auf die Erfüllung eines bestimmten Zwecks oder einer bestimmten Funktionalität zugeschnitten
- Sie haben einzigartige oder außergewöhnliche Eigenschaften und Funktionalitäten
- Sie zeichnen sich durch eine verbesserte Leistung im Vergleich zu ihrer traditionellen Form aus
- Sie sind als Materialien mit hoher Wertschöpfung anerkannt

Kategorisierungen

Eine Definition und Systematisierung von Advanced Materials in Kategorien ist sinnvoll und notwendig, um Sicherheitsbewertungen und Priorisierungen von Umwelt- und Gesundheitsrisiken vornehmen zu können.¹ Als Grundvoraussetzung für ein Risiko-Screening entwickelten Kennedy et al. (2019)¹ aus mehreren von ihnen durchgeführten Workshops und Interviews ein Kategorisierungssystem, das aus einer Reihe von Fragen nach den Eigenschaften eines Materials besteht. Die Beantwortung dieser Fragen ermöglicht es den Anwender*innen grundsätzlich zu unterscheiden,

Tabelle 1: Definitionen von Advanced Materials (eigene Übersetzung).

Quelle	Definition
Rensselaer Polytechnic Institute (2004) ⁹	„[...] Advanced Materials bezeichnen alle neuen Materialien und Modifikationen von vorhandenen Materialien, die eine überlegene Leistung in einer oder mehreren Eigenschaften, welche für die betreffende Anwendung kritisch sind, betreffen.“ [S.1]
Maine und Garnsey (2006) ¹⁰	„Advanced Materials-Technologien werden hier als Produkt- und Prozessverbesserungen definiert, die die Kosten-Leistungs-Grenze von Funktionsmaterialien erheblich verbessern.“ [S.376]
Lukkassen und Meidell (2007) ¹¹	„Hochleistungsmaterialien [oder Advanced Engineering Materials] sind Materialien, die im Vergleich zu herkömmlichen Materialien spezifische Leistungsvorteile bieten.“ [S.9]
Technology Strategy Board, UK (2008) ¹²	„Advanced Materials, hier definiert als Materialien und verbundene Prozesstechnologien mit dem Potenzial, für Produkte mit hoher Wertschöpfung verwendet zu werden [...]“ [S.8]
National Institute of Standards and Technology (NIST) (2010) ¹³	„[...] wir definieren „Materials Advances“ als: Materialien, die bis zu dem Punkt entwickelt wurden, an dem einzigartige Funktionen identifiziert wurden und diese Materialien nun in Mengen verfügbar gemacht werden müssen, die groß genug sind, damit Innovatoren und Hersteller sie testen und validieren können, um neue Produkte zu entwickeln.“ [S.5]
Romanow and Gustafsson (2012) ¹⁴	„Advanced Materials sind [...] auf bestimmte Funktionen zugeschnitten und/oder weisen überlegene strukturelle Eigenschaften auf. Wir unterscheiden vier Bedingungen, die Value Added Materials definieren: <ul style="list-style-type: none"> ■ ein wissensintensiver und komplexer Produktionsprozess, ■ neue, überlegene, maßgeschneiderte Eigenschaften für strukturelle oder funktionale Anwendungen, ■ Potenzial, zum Wettbewerbsvorteil auf dem Markt beizutragen, ■ Potenzial zur Bewältigung der großen Herausforderungen Europas.“ [S.9]
EU DAMADEI (2013) ¹⁵	„Ein Advanced Material ist jenes Material, das durch die genaue Kontrolle seiner Zusammensetzung und inneren Struktur eine Reihe außergewöhnlicher Eigenschaften [mechanisch, elektrisch, optisch, magnetisch usw.] oder Funktionen [Selbstreparatur, Formänderung, Dekontamination, Umwandlung von Energie usw.] aufweist, die es vom Rest der Materialien unterscheidet; oder eine, die, wenn sie durch fortschrittliche Herstellungstechniken transformiert wird, diese Eigenschaften oder Funktionalitäten aufweist.“ [S.25]
South Africa DTI (2018) ¹⁶	„Advanced Materials können auf viele Arten definiert werden. Die breiteste Definition bezieht sich auf alle Materialien, die Fortschritte gegenüber den traditionellen Materialien darstellen, welche seit hunderten oder sogar tausenden von Jahren verwendet werden. Aus dieser Perspektive beziehen sich Advanced Materials auf alle neuen Materialien und Modifikationen bestehender Materialien, um eine überlegene Leistung in einer oder mehreren Eigenschaften zu erzielen, die für die betrachtete Anwendung kritisch sind. Sie können auch völlig neue Eigenschaften aufweisen. Fortschrittliche Materialien haben typischerweise Eigenschaften, die herkömmlichen Materialien in ihren Anwendungen überlegen sind und diese übertreffen.“
Kennedy et al. (2019) ¹	„Advanced Materials sind Materialien, die speziell entwickelt wurden, um neuartige oder verbesserte Eigenschaften aufzuweisen, die im Vergleich zu herkömmlichen Materialien eine überlegene Leistung aufweisen. Von ihren einzigartigen Eigenschaften resultierend weisen Advanced Materials ein höchst ungewisses Gefahrenprofil auf und erfordern möglicherweise spezielle Prüfverfahren und -methoden, um das Potenzial für nachteilige Wirkungen auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit zu bewerten.“ [S.1786]
Giese et al. (2020) ⁸	„[...] Es wird empfohlen, Advanced Materials als Materialien abzugrenzen, die rational entworfen wurden um die funktionalen Anforderungen einer bestimmten Anwendung zu erfüllen.“ [S.80]
UBA, BfR & BAuA (2021) ¹⁷	„[...] unter AdMat werden Materialien verstanden, die rational unter genauer Kontrolle ihrer Zusammensetzung und/oder internen und/oder externen Struktur entworfen werden, um die funktionellen Anforderungen einer bestimmten Anwendung zu erfüllen.“ [S.5]

den, ob es sich bei einem Material um ein konventionelles oder um ein Advanced Material handelt.

Eine Einteilung in bestimmte Gruppen bzw. Kategorien wurde bereits 2007 von Lukkassen und

Meidell¹¹ sowie 2015 von Baykara et al.¹⁸ vorgeschlagen. Sie nennen die Bereiche Metalle, Keramiken, Polymere und Composite. In einem Bericht der Europäischen Union aus dem Jahr 2013 werden Advanced Materials in die Katego-

Tabelle 2: Kategorisierung von Advanced Materials des deutschen Umweltbundesamts (UBA)⁸

Kategorie	Eigenschaften
Verbundwerkstoffe	Materialien, die eine Kombination aus zwei oder mehreren Materialien sind
Poröse Materialien	Materialien, die eine poröse Struktur aufweisen
Metamaterialien	Materialien mit Eigenschaften, die über die natürlich vorkommenden Eigenschaften ihrer Bestandteile hinausgehen
Partikelsysteme	Materialien mit Eigenschaften, die mit der Struktur ihrer Partikel zusammenhängen
Fortschrittliche Fasern	Fasern mit einem Durchmesser von mehreren µm oder kleiner mit gewünschter Funktionalität
Fortschrittliche Polymere	Polymere mit gezielt hergestellter Funktionalität
Fortschrittliche Legierungen	Legierungen, die aus mehr als zwei Komponenten bestehen; mindestens zwei Komponenten haben einen großen Anteil am Endmaterial

rien aktive Materialien (Materialien, die etwa die Form oder die Farbe verändern können), fortschrittliche Composite, neuartige Herstellungsprozesse (z. B. 3-D-Druck) sowie Textilien und Fasern, Beschichtungen, Nanomaterialien Gele und Schäume, Hochleistungspolymere und neuartige Legierungen unterteilt.¹⁵ Das deutsche Umweltbundesamt (UBA) befasste sich eingehend mit der Thematik der Advanced Materials und schlägt eine Einteilung in acht Klassen vor (siehe Tabelle 2).⁸ Diese Systematisierung wurde vom UBA auf Basis einer Literaturrecherche und mehreren abgehaltenen Expert*innen-Workshops vorgenommen. Einen ausführlichen Überblick über diese Materialien, ihre Anwendungsbereiche, mögliche Risiken und die aktuelle Regulierung gibt das UBA in eigenen Factsheets.¹⁹

Die Komplexität der Art und Anwendung der Advanced Materials erfordert, sie aus unterschiedlichen Perspektiven zu betrachten und sich in verschiedenen Aspekten auseinanderzusetzen. In diesem Zusammenhang schlägt das UBA vor, vier Dimensionen – Wissenschaft, Wirtschaft, Risiko und Regulierung – zu berücksichtigen. Folgende Aspekte sind dabei zu beachten: die Neuartigkeit der Eigenschaften, die diese Materialien erlangen, ihr Marktpotenzial, Hinweise auf mögliche Risiken für Mensch und Umwelt oder ein hohes Expositionspotenzial, und die mangelhafte gesetzliche Abdeckung bzw. der Mangel an geeigneten Methoden für die Risikobewertung.⁸

Anwendungen und Risiken

Advanced Materials werden vor allem in der Medizin, Elektronik, Konstruktion, im Energiesektor einschließlich erneuerbaren Energien und auch im Umweltbereich eingesetzt.¹⁹

- **Medizin:** kontrollierte Arzneimittelabgabe (Transportsysteme, „Nanocarrier“), künstliche Gewebezüchtung, bildgebende Verfahren, Krebstherapie, künstliche Muskeln und hochelastische Implantate
- **Elektronik:** Protein-basierte Elektronik, Displays, Sensoren, organische LEDs (Leuchtdioden), tragbare Elektronik und Speichergeräte
- **Konstruktion:** Leichtbau, Schallfilterung, Wärmedämmung, Konstruktionsmaterial mit hoher Festigkeit, speziellen thermischen oder elektrischen Eigenschaften sowie schaltbare Verglasung
- **Energie:** Windturbinenflügel, Batterien, Solarzellen, metallorganische Gerüste für die H₂-Speicherung
- **Umwelt:** Filtration und Sorption von Umweltschadstoffen

Eine Gruppe von Advanced Materials, die risikorelevant ist, sind etwa Kohlenstofffasern (auch Carbon- oder Graphitfasern genannt). Sie sind keine neuen Materialien im eigentlichen Sinn,

Fallstudie zur Kategorisierung von Advanced Materials in innovativen Solarzelltechnologien

Neben Fragen der Definition, der Kategorisierung und möglicher Risiken und Adäquatheit regulatorischer Instrumente stellt sich die Frage, inwiefern eine Einteilung von verwendeten Materialien als „advanced“ im Vergleich zu konventionellen in der Praxis durchführbar ist und welchen Mehrwert eine solche Kategorisierung verglichen mit bestehenden Definitionen aus wissenschaftlicher Sicht haben könnte. Im Projekt SolarCircle²⁰ wurden nicht nur Anwendungsgebiete und Nachhaltigkeitsaspekte neuartiger Photovoltaiktechnologien und der darin vorkommenden, potenziell neuartigen Materialien untersucht, sondern ein konkretes Kategorisierungsschema – jenes von Kennedy et al.¹ – auf Materialien in neuartigen Photovoltaiktechnologien angewandt, um die Praktikabilität des Ansatzes zu überprüfen. Im Rahmen einer Diskussion mit Experten aus den Materialwissenschaften wurde das Schema experimentell auf Materialien in der konkreten Forschungspraxis angewandt.

Als Ausgangsbasis diente eine vom Institut für Physikalische Chemie und Institut für organische Solarzellen der Johannes-Kepler-Universität in Linz erstellte Materialliste über häufig verwendete Materialien in vier ausgewählten emergenten Photovoltaiktechnologien (organische Solarzellen, Farbstoff-Solarzellen, Perowskit-Solarzellen, Quantum-Dot-Solarzellen in jeweils unterschiedlichen Varianten). Diese basiert auf einer Definition von „emerging photovoltaic technologies“ (EPVs) des NREL Instituts in Colorado²¹, erhebt aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da in der Praxis eine Vielzahl mehr an unterschiedlichen Materialien in EPVs Einsatz finden. Sie umfasst keine Einzelmaterialien, sondern vielmehr Materialfamilien, wie beispielsweise halbleitende Polymere, Perowskite oder transparente Kontaktschichten, da eine Darstellung nach Einzelmaterialien unmöglich zu bewältigen wäre.

Basierend auf dieser Grundlage, zeigten sich in der Einteilung nach Kennedy et al.¹ Herausforderungen, die auf der spezifischen Funktionalität der jeweiligen Materialien beruhen. Aus Sicht der Materialentwicklung bietet das vorgeschlagene Schema nur wenig Mehrwert, um in EPVs vorkommende Materialien zu charakterisieren. Das liegt einerseits an der Komplexität der Solarzellarchitekturen, andererseits an der Vielfalt der eingesetzten Materialien. Dies bedeutet einen hohen Aufwand einer Charakterisierung für Einzelmaterialien, der in der Praxis kaum durchführbar ist. Der Begriff Advanced Materials selbst wurde von den Expert*innen in der Praxis als irreführend und wenig aussagekräftig, wenn nicht sogar problematisch eingeschätzt, weil er eine implizite Wertung zwischen Materialien suggeriere. Um dem entgegenzuwirken und die Wichtigkeit der Funktionalität solcher Materialien hervorzuheben, wurde dafür plädiert, Funktionalität nicht nur in der Definition festzuschreiben, sondern auch den Begriff zu „Advanced Functional Materials“ zu erweitern.

aber aufgrund ihrer bemerkenswerten Festigkeit haben sie verschiedene neuartige Anwendungsbereiche im Bauwesen und der Automobilindustrie, wo sie z. B. das Fahrzeuggewicht erheblich

reduzieren können und somit die Energieeffizienz verbessern.²² Zusätzlich finden sie Anwendung in den Bereichen Elektronik z. B. in Speichermedien, in Heizelementen für Textilien, in

Luftfiltern und auch in der Medizin, z. B. in Krebstests.¹⁹ Kohlenstofffasern führen normalerweise aufgrund ihres großen Faserdurchmessers nicht zu einer Gefährdung durch lungengängige, krebs-erzeugende Faserstäube. Bei speziellen, für hohe mechanische Belastbarkeiten entwickelten Carbonfasern wurde jedoch erst kürzlich ein kritisches Bruchverhalten mit Faserstaubfreisetzung beobachtet.²³

Auch Brände und thermische Recyclingprozesse von carbonfaserverstärkten Kunststoffen können zu entsprechenden Veränderungen von Carbonfasern führen. Eine morphologische Charakterisierung der Carbonfasermaterialien ist daher für den sicheren Ausschluss einer gesundheitlich kritischen Faserstaubfreisetzung im Lebenszyklus unerlässlich, vor allem für breit gestreute Anwendungen wie z. B. im Bauwesen. Eine morphologische Charakterisierung von Materialien ist derzeit im europäischen Chemikalienrecht noch nicht verankert. Rechtlich unklar ist es auch, wann es sich bei einem Material um einen „Stoff“ im chemikalienrechtlichen Sinne handelt. Mit einer Risikomanagement-Optionsanalyse (RMOA) zum Schutz vor gesundheitsschädlichen Faserstäuben wollen die deutschen Bundesoberbehörden systematisch nach umfassenden Lösungsansätzen suchen, um diese Regulierungslücken zu schließen.²⁴

Auch bei DNA-basierten Biopolymeren bestehen noch große Unsicherheiten bezüglich ihrer Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt. Sie werden meist im Nanomaßstab in komplexen 2D- oder 3D-Strukturen entworfen und erfüllen spezielle Funktionalitäten.¹⁹

Sie finden beispielsweise Anwendung bei der Verabreichung von Medikamenten zur Behandlung von Krebs. Sie können auch bei der Umweltüberwachung eingesetzt werden, da DNA-Moleküle ein breites Spektrum von Ionen, Molekülen und sogar Zellen mit hoher Präzision erkennen können.²⁵ Zu ihrer Persistenz im menschlichen Körper sowie in verschiedenen Ökosystemen ist jedoch noch kaum etwas bekannt.⁸ Die Informationen über die Stabilität dieser Materialien, ihr Verhalten sowie ihre möglichen schädlichen Auswirkungen sind derzeit nicht ausreichend. Daher ist eine langfristige Bewertung der Zytotoxizität dieser Materialien erforderlich.¹⁹ Für eine angemessene Risikoabschätzung sind geeignete Testmethoden erforderlich, die derzeit noch fehlen.¹⁹

Advanced Materials im Kontext der Nachhaltigen Entwicklung

Eine Politik der nachhaltigen Entwicklung von neuen Materialien und Produkten soll Entscheidungen zur kontinuierlichen Verbesserung von Gesellschaft, Umwelt und Wirtschaft (drei Säulen der Nachhaltigkeit) auf der Basis von wissenschaftlichen Analysen treffen. Diese Dimensionen sind jedoch in einem hohen Maße miteinander verknüpft und es bestehen komplexe Wechselwirkungen, sodass ein Vorteil in einem Bereich zu einem Defizit in einem anderen Bereich führen kann.²⁶

Die nachhaltige Entwicklung neuer Materialien kann über folgenden Prinzipien vermittelt werden:²⁶

- eine effiziente Nutzung von Materialien (Wiederverwendung, Recycling)
- die Verwendung von Ersatzmaterialien (z. B. die Substitution von Materialien, die schwer verfügbar sind)
- die Entwicklung von Materialien zur Unterstützung alternativer Energietechnologien, um fossile Brennstoffe zu ersetzen und die Energieeffizienz zu steigern
- und die Minderung unerwünschter Umweltauswirkungen

Die Europäische Kommission erhofft sich durch Advanced Materials nicht nur wirtschaftliche Vorteile, sondern erachtet sie als grundlegende Bausteine für die Entwicklung nachhaltigerer Technologien mit umweltschonenderen Eigenschaften und verbesserten Leistungen.²⁷ Im Rahmen des Horizon 2020 Programmes (2014-2020) der EU wurden Advanced Materials demnach als eine von sechs Schlüsseltechnologien (Key Enabling Technology, KET) definiert und als Themenschwerpunkt berücksichtigt. Im aktuellen Nachfolgeprogramm Horizon Europe (2021-2027) sind Advanced Materials weiterhin als eine Schlüsseltechnologie platziert.²⁸ Die EU unterstützt Innovationen in den Bereichen Design, Entwicklung, Erprobung und Upscaling von Advanced Materials, indem sie den Fokus auf folgende Bereiche legt: Lebenszyklus von Materialien, Demonstrations- und Prototyping-Aktivitäten in verschiedenen Bereichen (z. B. Energie, Mobilität, Nanotechnologien, Medizintechnik) und in verschiedenen sektorübergreifenden Anwendungsfeldern (z. B. Nanosicherheit). Darüber hinaus sollen auf datengestütztem Weg Methoden entwickelt werden, um sichere Materialien zu entwickeln und die Kosten, die Menge der eingesetzten Materialien und die Zeitspanne bis zur Markteinführung zu verringern.²⁷

Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung von Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft müssen neben Aspekten des technischen Fortschritts und

der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit auch ökologische und soziale Faktoren unter Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips und bestehender Standards für den Umweltschutz einbezogen werden. Verbesserungen, nicht nur in der Sicherheit (Safe-by-Design, SbD) sondern auch in der Nachhaltigkeit des Designs (Safe-and-Sustainable-by-Design, SSbD) sind unerlässlich für den Übergang in eine nachhaltige Gesellschaft.^{17;36} Beim Safe-and-Sustainable-by-Design Konzept handelt es sich um einen systemischen Ansatz zur Integration von Sicherheit, Kreislauffähigkeit und Funktionalität von Produkten und Prozessen während ihres gesamten Lebenszyklus.²⁹

Es ist äußerst wichtig, eine Form der Technologieevaluierung in frühen Entwicklungsstadien vorzunehmen um Risiken möglichst frühzeitig begegnen zu können. Die Lebenszyklus-Analyse (Life Cycle Assessment, LCA) wird als ein geeignetes Instrument anerkannt, um Umweltauswirkungen neuer Technologien entlang des gesamten Lebenszyklus („cradle to grave“) zu bewerten und die Entscheidungsfindung in Politik und Forschung zu erleichtern.^{30;31} Die Lebenszyklusanalyse ist eine Methode welche auf Systemdenken beruht und als wesentlich für die Bewältigung großer globaler Herausforderungen, wie die Ziele der nachhaltigen Entwicklung, angesehen wird.³² Daher gewinnt LCA bei einem niedrigen Technologiereifegrad (Technology Readiness Level, TRL)³³ zunehmend an Bedeutung, um die Entwicklung neuer Technologien mit verbesserter Umweltleistung zu ermöglichen.³⁰ Zusätzlich wäre eine adäquate Abbildung der Gefährdungen für Arbeitnehmer*innen durch spezielle Ansätze der Lebenszyklusanalyse erstrebenswert.

Advanced Manufacturing – Innovative Produktionsmethoden

Neben neuartigen Materialien gilt auch den dadurch neu entstehenden bzw. weiter entwickelten Herstellungstechnologien, wie beispielsweise der additiven Fertigung, ein Augenmerk in Bezug auf mögliche Risiken, vor allem in Hinblick auf Arbeitnehmer*innen-Schutz. Solche neuen Herstellungstechniken beschleunigen die Entwicklung neuer Materialien und haben das traditionelle Herstellungsmodell in den letzten 100 Jahren maßgeblich verändert.³⁴ Es ist daher wichtig auch in dem Bereich des Advanced Manufacturing sicherheitsrelevante Fragen, im Sinne von SSbD, so früh wie möglich zu adressieren.

Bei der additiven Fertigung werden im Wesentlichen sehr dünne Querschnitte eines Materials in Schichten aufeinander aufgetragen (oder „aufgebaut“), bis ein dreidimensionales Produkt entsteht.³⁴ Advanced Materials in Form eines feinen

Pulvers, einer Flüssigkeit oder eines festen Stranges werden sehr hohen und fokussierten Energiequellen (z. B. Laser oder hohe Temperatur) ausgesetzt, um das Material auf sehr dünne Schichten zu binden und dann zu einem Gesamtkomplex aufzubauen.³⁴ Die möglichen Anwendungen der additiven Fertigung reichen von medizinischen Implantaten bis hin zu Flugzeugtragflächen.³⁴

Gesundheits- und Sicherheitsbedenken gibt es beispielsweise bei Pulverbrettverfahren, wo es zu einer möglichen Exposition von Beschäftigten gegenüber den Ausgangsmaterialien kommen kann (z. B. mikroskalige Metall- und Kunststoffpulver)³⁵

Risikoabschätzung und Bedarf nach Regulierung

Aufgrund der Komplexität von Advanced Materials in Bezug auf die Wissenschaft, die hinter ihnen steht, und auch ihrer Anwendung sind neue Ansätze erforderlich, um die notwendigen Kenntnisse über die Sicherheit dieser Materialien zu gewährleisten. Safe-by-Design (SbD) ist ein gutes Beispiel für einen solchen Ansatz. Das Ziel des SbD-Konzepts ist die Sicherheitsfragen über die potenziellen Risiken für menschliche Gesundheit und Umwelt schon früh im Innovationsprozess von neuen Materialien zu adressieren.³⁶ Deshalb ist das Verstehen und Erkennen von Risiken ein wichtiger Schritt im Innovationsprozess.

In Bezug auf Nanomaterialien kann Safe-by-Design z. B. beinhalten, dass gefährliche Elemente wie Schwermetalle nicht verwendet werden, dass Nanomaterialien mit biologisch abbaubaren Bestandteilen entwickelt werden, damit sie sicherer und umweltfreundlicher sind und dass Herstellungsprozesse im Nanobereich sicherer gestaltet werden.³⁷ Wie oben bereits erwähnt ist ein wichtiger Aspekt die Emissionsarme Gestaltung von Materialien und Produkten, die über den gesamten Lebenszyklus eine Freisetzung verhindert.

Die Risikobeurteilung beinhaltet auch die Bewertung des Technologie-Reifegrads (TRLs). Dies kann bei der Entscheidung helfen, ob ein Material in die nächste Entwicklungsphase eintreten kann.³⁸ Viele Advanced Materials sind eine Kombination verschiedener Stoffe mit (öko-)toxikologischem Potenzial und es ist unklar, in welchem Umfang diese bei einer Freisetzung Gesundheits- oder Umweltrisiken verursachen können.¹⁹ Zusätzlich kann auch eine spezielle kritische Morphologie (lungengängige Fasern, (Ultra-)Feinstäube) zu Gefahren und Risiken führen, obwohl die chemische Zusammensetzung dieser Stoffe zunächst nicht risikorelevant ist.¹⁹ So zeigt etwa das Splittverhalten von Kohlenstofffasern (siehe weiter oben) und die daraus entstehenden Risiken insbesondere für Arbeitnehmer*innen die

Wichtigkeit für eine frühe und systematische Risikoeerkennung. Andererseits haben Risikobewertungen von Nanomaterialien gezeigt, dass viele Bedenken hinsichtlich möglicher Gesundheitsrisiken nicht gerechtfertigt sind.³⁹ Neue Anwendungen von Advanced Materials etwa im medizinischen Bereich erfordern jedoch weiterhin eine umfassende Risiko- und Gefahrenabschätzung.

Derzeit ist es noch unklar, ob alle Advanced Materials durch bestehende Regulierungen im Bereich der Chemikaliensicherheit abgedeckt sind. Deshalb ist es notwendig, relevante Bestimmungen und entsprechende Instrumente zur Risikoabschätzung in dieser Hinsicht zu überprüfen, um allfällige gesetzliche Lücken füllen zu können. Generell erscheint es derzeit aber so, dass Advanced Materials durch bestehende Regulierungen weitgehend abgedeckt werden und kein Bedarf an einem auf die gesamte Materialgruppe zugeschnittenen Risikomanagement oder einer eigenständigen gesetzlichen Regelung auf Grundlage einer umfassenden Definition besteht.¹⁷

Literatur, Hinweise und Quellen

- Kennedy A., Brame J., Rycroft T., et al. (2019). A Definition and Categorization System for Advanced Materials: The Foundation for Risk-Informed Environmental Health and Safety Testing. *Risk Anal.* 2019;39(8):1783-1795. doi:10.1111/risa.13304.
- Greßler, S. & Nentwich, M. (2011). Nano und Umwelt, Teil I: Entlastungspotenziale und Nachhaltigkeitseffekte. *NanoTrust Dossier Nr. 026*. http://epub.oeaw.ac.at/0xc1aa5576_0x0029f3d1.pdf.
- Fiedeler, U., Nentwich, M., Simkó, M. & Gzásó A. (2009). Was ist eigentlich Begleitforschung zur Nanotechnologie? *NanoTrust Dossier Nr. 011*. http://epub.oeaw.ac.at/0xc1aa5576_0x00206f7f.pdf.
- Callaghan Innovation (2018). Building innovation with advanced materials. <https://www.callaghaninnovation.govt.nz/blog/blog-vocabulary/36>
- Callister, W. D. & Rethwisch D.G. (2018). *Materials science and engineering: an introduction*. Vol. 9. New York: Wiley, 2018.
- Maynard, A. (2011). Don't define nanomaterials. *Nature* 475, 31 (2011). <https://www.nature.com/articles/475031a>.
- Broomfield, M., Hansen, S. F., & Pelsy, F. (2016). Support for 3rd regulatory review on nanomaterials – environmental legislation: Project Report. European Commission.
- Giese, B., Drapalik, M., Zajicek, L., Jepsen, D., Reihlen A. & Zimmermann, T. (2020). Advanced Materials: Overview of the field and screening criteria for relevance assessment. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-06_texte_132-2020_overview-advanced-materials_0.pdf. Zugriff am 01.10.2020.

Fazit

Die Bedeutung von Advanced Materials in der Realisierung fortschrittlicher Technologien und der Produktion von hochwertigen Produkten nimmt zu – dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass die Sicherheit von Gesundheit und Umwelt bei der Entwicklung neuer Materialien gewährleistet werden kann. Bereits beim Design innovativer Materialien und Produkte sollte der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt werden, um Vorteile – auch im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung – optimal nutzen und allfällige Risiken schon im Vorfeld minimieren zu können. Bestehende Instrumente für das Risikomanagement, ebenso wie Regulierungen im Bereich Chemikaliensicherheit erscheinen derzeit weitgehend ausreichend für Advanced Materials, sind jedoch noch zu überprüfen und unter Umständen für bestimmte Bereiche zu adaptieren.

- Rensselaer Lally School of Management & Technology (2004). *Advanced Materials Sector Report*. <https://docplayer.net/16273991-Advanced-materials-sector-report.html>.
- Maine, E. & Garnsey, E. (2006). Commercializing generic technology: The case of advanced materials ventures. *Research Policy*, 35(3), 375-393.
- Lukkassen, D. & Meidell, A. (2007). *Advanced materials and structures and their fabrication processes*. 3ed., Narvik University College, 2, 1–14.
- Technology Strategy Board, UK (2008). *Advanced materials key technology area 2008–2011*, Archiviert unter: https://web.archive.org/web/20181008191153/http://www.nibec.ulster.ac.uk/uploads/documents/advanced_materials_strategy.pdf.
- Technology Innovation Program – National Institute of Standards and Technology (2010). *Manufacturing and Biomanufacturing: Materials Advances and Critical Processes*. https://www.nist.gov/system/files/documents/2017/05/09/manufacturing_biomanufacturing_mats_adv_crit_proc_04_2010_wp.pdf.
- Romanow, B. & Gustafsson, M. (2012). *Technology and market perspective for future Value Added Materials*. Final Report from Oxford Research AS. Edited by Wessel, H. and Tomellini, R. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation – Industrial Technologies – Materials, Brussels.
- EU DAMADEI (2013). *Design and Advanced Materials as a Driver of European Innovation*. http://www.damadei.eu/wp-content/uploads/DAMADEI_report_low.pdf.

- ¹⁶ South Africa Department of Trade and Industry (DTI) (2018): Advanced materials—Background. https://web.archive.org/web/20200217140651/http://www.dti.gov.za:80/industrial_development/Advanced_Materials.jsp.
- ¹⁷ UBA, BfR & BAuA (2021). Diskussionsgrundlage für die Themenkonferenz „Advanced Materials – Identification of Governance Needs“ vom 14. Juni 2021. Dokumententwurf.
- ¹⁸ Baykara, T., Özbek, S., & Ceranoğlu, A. N. (2015). A generic transformation of advanced materials technologies: Towards more integrated multi-materials systems via customized R&D and Innovation. *Journal of High Technology Management Research*, 26(1), 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.hitech.2015.04.008>.
- ¹⁹ Drapalik, M., Giese, B., Zajicek, L., Reihlen, A. & Jepsen, D. (2020). Advanced Materials – Overview of the Field. Factsheets on selected classes of Advanced Materials. Ökopool GmbH, Studie im Auftrag des deutschen Umweltbundesamtes. https://oekopool.de/archiv/material/756_AdMa_Factsheets_final.pdf.
- ²⁰ Universität für Bodenkultur Wien (2020-2021). Projekt SolarCircle – Beurteilung von Advanced Materials in Emerging Solar Technologies unter besonderer Berücksichtigung der Kreislaufwirtschaft. https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.projekt_uebersicht?sprache_in=de&menue_id_in=300&id_in=13684.
- ²¹ McConnell, R.D. (ed.) (1998). Future Generation Photovoltaic Technologies. Proceedings first NREL conference, March 24-26, 1997. American Institute of Physics.
- ²² Gao, Z., Zhu, J., Rajabpour, S., Joshi, K., & Kowalik M., & Croom, B., Schwab, Y., Zhang, L., Bumgardner, C., Brown, K., Burden, D., Klett, J., van Duin, A., Zhigilei, L. & Li, X. (2020). Graphene reinforced carbon fibers. *Science Advances*. 6. 4191-4215. 10.1126/sciadv.aaz4191.
- ²³ D. Bäger, B. Simonow, D. Kehren, N. Dziurawitz, D. Wenzlaff, C. Thim, A. Meyer-Plath, S. Plitzko (2019). Pechbasierte Carbonfasern als Quelle alveolen-gängiger Fasern bei mechanischer Bearbeitung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK), Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 79 (2019), 13-16).
- ²⁴ Rolf Packroff (2021). Mündliche Kommunikation.
- ²⁵ AZONANO (2011). DNA as a Functional Polymer. Ein Interview geführt von Professor Juewen Liu <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2857>.
- ²⁶ Green, M. L., Espinal, L., Traversa, E. & Amis, E. J. (2012): Materials for sustainable development. *MRS Bulletin*, 37(4), 303–309. <http://doi.org/10.1557/mrs.2012.51>.
- ²⁷ European Commission (o.D.): https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/industrial-research-and-innovation/key-enabling-technologies/advanced-materials_en#eu-support-for-innovation-in-this-area.
- ²⁸ European Commission (o.D.): Key enabling technologies policy. https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/industrial-research-and-innovation/key-enabling-technologies_en.
- ²⁹ Gottardo, S.; Mech, A.; Drbohlavová, J.; Matyska, A.; Bøwadt, S.; Riego Sintes, J.; Rauscher, H. Towards safe and sustainable innovation in nano-technology: State-of-play for smart nanomaterials. *NanoImpact* 2021, 21, doi:10.1016/j.impact.2021.100297.
- ³⁰ Moni, S., Mahmud, R., High, K. & Carbajales-Dale, M. (2019). Life cycle assessment of emerging technologies: A review. *Journal of Industrial Ecology*. 10.1111/jiec.12965. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.12965>.
- ³¹ Wender, B. A., Foley, R. W., Hottle, T. A., Sadowski, J., Prado-Lopez, V., Eisenberg, D. A. & Seager, T. P. (2014a): Anticipatory life-cycle assessment for responsible research and innovation. *Journal of Responsible Innovation*, 1(2), 200–207. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/23299460.2014.920121?needAccess=true>.
- ³² Nature EDITORIAL (2020) Imagine a world without hunger, then make it happen with systems thinking. *Nature Mag.* 577(7790):293-294. doi:10.1038/d41586-020-00086-5. <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00086-5>.
- ³³ NASA (2012). TRLs (Technology Readiness Levels) sind eine Art Messsystem, das zur Beurteilung des Reifegrads einer bestimmten Technologie verwendet wird. https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html.
- ³⁴ Geraci, Ch. & Hodson, L. (o.D.): Nanotechnology Guidance and Publications. <https://synergist.aiha.org/201801-21st-century-manufacturing>.
- ³⁵ Walter, J., Hustedt, M., Kaieler, S., Prott, U., Baumgärtel, A., Woznica, A., Herbisch, R. (2021). Expositionsermittlung bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen bei additiven Fertigungsverfahren – Einsatz von Pulverbrettverfahren. BAuA Bericht. doi:10.21934/baua:bericht20210121
- ³⁶ Rose, G., Gázsó, A. & Pavlicek, A. (2019): Safe-by-Design – Die frühe Integration von Sicherheit in Innovationsprozesse. *NanoTrust-Dossiers* Nr. 50. <http://epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier050.pdf>.
- ³⁷ Murashov V., Schulte P. & Howard, J. (2012): Safe Handling of Advanced Nanomaterials, 2012. Centers for Disease Control and Prevention, NIOSH Science Blog. <https://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/2012/07/27/handling-nano/>.
- ³⁸ Steinbeis Advanced Risk Technologies (2014). Increase the probability of success of your Advanced Material related Horizon 2020 projects by including Risk Management. https://www.risk-technologies.com/images/projects/Leaflet/NanoProject-Leaflet-overview_v36gk19022016.pdf.
- ³⁹ Rolf Packroff (2019): Do we need a legal definition for “nanomaterials” in occupational health and safety regulation? BAuA Positionspapier, 20.8.2019. https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Fokus/Nano-Definition-2.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

IMPRESSUM

Medieninhaber: Österreichische Akademie der Wissenschaften; Juristische Person öffentlichen Rechts (BGBl 569/1921 idF BGBl I 31/2018); Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, A-1010 Wien

Herausgeber: Institut für Technikfolgen-Abschätzung (ITA); Apostelgasse 23, A-1030 Wien; www.oew.ac.at/ita

Erscheinungsweise: Die NanoTrust-Dossiers erscheinen unregelmäßig und dienen der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse des Instituts für Technikfolgen-Abschätzung im Rahmen des Projekts NanoTrust. Die Berichte werden ausschließlich über das Internetportal „epub.oew“ der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt:

epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/

NanoTrust-Dossier Nr. 058, Jänner 2022:
epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier058.pdf

ISSN: 1998-7293

Dieses Dossier steht unter der Creative Commons (Namensnennung-NichtKommerziell-KeineBearbeitung 2.0 Österreich)
Lizenz: creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/at/deed.de