



Positionspapier **Materialforschung**

Rat für technologische Souveränität

Hinweis

Die Veröffentlichung des Rats für technologische Souveränität gibt nicht notwendigerweise die Meinung des BMBF wieder.



Der Rat für technologische Souveränität

Der „Rat für technologische Souveränität“ ist ein Gremium des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und wurde im September 2021 einberufen. Er unterstützt das BMBF bei der Identifizierung von

Technologiefeldern mit langfristiger strategischer Bedeutung. Der Rat bündelt eine breite Expertise aus Wissenschaft und Industrie in zentralen Technologie- und Anwendungsfeldern.

Die Mitglieder des Rats für technologische Souveränität sind:

Dr. Viola Bronsema	Dr.-Ing. Stefan Joeres (Vorsitzender)
Prof. Dr. Oliver Falck	Prof. Dr. Elsa Kirchner
Prof. Dr. Svenja Falk	Prof. Dr.-Ing. Marion Merklein
Dr. Tim Gutheit	Prof. Dr.-Ing. Hans Dieter Schotten (Stellv. Vorsitzender)
Dr.-Ing. Christina Hack (Stellv. Vorsitzende)	Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Technologische Souveränität

Technologische Souveränität ist die Fähigkeit, jederzeit Zugang zu denjenigen Schlüsseltechnologien garantieren zu können, die zur Umsetzung gesellschaftlicher Prioritäten und Bedürfnisse notwendig sind.

Dies umfasst die Verwendung und Weiterentwicklung von Technologien und Produkten unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen und notwendigen Dienstleistungen, Lücken sichtbar zu machen und wenn möglich zu schließen, und Standards auf den globalen Märkten mitzubestimmen. Technologische Souveränität kann da-

bei auch erfordern, Schlüsseltechnologien und technologiebasierte Innovationen in Europa eigenständig zu entwickeln und eigene Produktionskapazitäten innerhalb der Wertschöpfungsnetze aufzubauen, wenn dies zum Erhalt der staatlichen Handlungsfähigkeit oder zur Vermeidung einseitiger Abhängigkeiten – unter Berücksichtigung sich verändernder geopolitischer Randbedingungen – notwendig ist. Das setzt die Fähigkeit voraus, alle relevanten technologischen Entwicklungs- und Herstellungsprozesse verstehen und bewerten zu können und hat den Anspruch, gleichberechtigt mit strategisch wichtigen Partnern zusammenzuarbeiten.

Hintergrund des Papiers

Materialinnovationen sind ein wesentlicher Baustein bei der (Weiter-)Entwicklung von Schlüsseltechnologien. Mit seinen Handlungsempfehlungen gibt der Rat für technologische Souveränität Impulse in Richtung eines neuen Fachprogramms, das die Materialforschung fokussiert und zugeschnitten auf die Bedarfe von Deutschland und

der Europäischen Union fördert. Aufgrund der Breite des Themas Materialforschung gehen einzelne Aspekte über die Zuständigkeit des BMBF hinaus und adressieren das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) beziehungsweise andere Ressorts von Bund und Ländern.



Executive Summary

Die Materialforschung spielt eine zentrale Rolle bei der Entwicklung neuer Technologien und trägt dadurch maßgeblich zur Lösung globaler Herausforderungen bei. Von der Energieerzeugung über die Medizintechnik bis hin zur Mikroelektronik bietet die gezielte Untersuchung und Optimierung von Materialien ein immenses Potenzial, um innovative und nachhaltige Lösungen zu schaffen. Dabei hat sie das Potenzial, durch die Entwicklung von Substituten die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen zu reduzieren. Auch angesichts des zunehmenden Drucks, nachhaltigere und effizientere Produkte zu entwickeln, ist die Materialforschung unverzichtbar für den Fortschritt in Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft. Durch die Entwicklung neuer Materialien, die beispielsweise eine höhere Haltbarkeit, eine bessere Recyclingfähigkeit oder einen geringeren Ressourcenverbrauch aufweisen, kann die Materialforschung entscheidend zur wirtschaftlichen und technologischen Souveränität sowie zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks beitragen.

Angesichts der hohen Abhängigkeit Deutschlands von Rohstoffimporten, insbesondere bei kritischen Materialien wie Seltenen Erden, besteht die Notwendigkeit, neue Materialien und effizientere Recyclingmethoden zu entwickeln. Während Europa im Bereich des Recyclings vieler Metalle eine Vorreiterrolle einnimmt, liegt zum Beispiel die Recyclingquote für Seltene Erden auf niedrigem Niveau, was auf eine ineffiziente Sammlung, hohe Demontagekosten und fehlende Technologien zur Rückgewinnung zurückzuführen ist. Es ist wesentlicher Gegenstand der Materialforschung, diese Art von Hindernissen zu überwinden, doch die wirtschaftlichen und technischen Herausforderungen sind groß.

Die Skalierung innovativer Forschungsergebnisse in die industrielle Volumenproduktion ist unerlässlich für den Erhalt und Ausbau des Produktionsstandorts Deutschland, wobei Maßnahmen zur Förderung von Kooperationen wesentlich sind. Digitalisierung ist ein Schlüssel zur Beschleunigung der Materialentwicklung. Insbesondere Simulationen und digitale Zwillinge versprechen Möglichkeiten, zukünftig Materialverhalten und Eigenschaften bereits vor der physischen Herstellung präzise vorherzusagen und zu optimieren. Die Integration von KI und maschinellem Lernen in diese Prozesse kann neue Fortschritte möglicherweise stark beschleunigen.

Im Vergleich internationaler wissenschaftlicher Publikationen zeigt sich, dass Deutschland im Bereich Materialforschung hinter den USA und China zurückfällt. Insbesondere die Zahl chinesischer Publikationen steigt rasant.

Deutschland belegt derzeit zwar noch den dritten Platz, allerdings sinkt seit etwa 2015 die Zahl der Publikationen und der Studierenden in den Material- und Werkstoffwissenschaften. Damit diese Entwicklung langfristig nicht zu einer deutlichen Schwächung der Innovationskraft Deutschlands im Bereich der Materialforschung führt, sind gezielte Maßnahmen zur Nachwuchsförderung und Fachkräftebindung unerlässlich.

Dieses Positionspapier unterstreicht die Notwendigkeit einer verstärkten Förderung der Materialforschung auf nationaler und internationaler Ebene und empfiehlt konkret fünf politische Maßnahmen:

- Zur Sicherung benötigter Rohstoffe – ohne die eine Forschung in vielen Bereichen nicht möglich wäre – sollte die Entwicklung nachhaltiger Materials Substitute priorisiert werden, um die Abhängigkeit von Importen und die damit verbundenen Versorgungsrisiken zu minimieren.
- In der Produktentwicklung sollte die Berücksichtigung von Recycling- und Demontagemöglichkeiten bereits in der Designphase gefördert werden, um die Wiederverwertungsquote kritischer Materialien zu erhöhen und Ressourcen effizienter zu nutzen.
- Ökologische Aspekte und die Recyclingfähigkeit von Materialien sollten in Forschungsprogramme integriert und als wichtige Wettbewerbsfaktoren betrachtet werden, um die Marktfähigkeit von Materialinnovationen zu gewährleisten.
- Skalierung ist ein relevanter Aspekt der Materialinnovation, der, auch durch dedizierte Forschung, explizit berücksichtigt und gefördert werden sollte.
- Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Materialwissenschaften und Informatik sollte in der Hochschulausbildung gestärkt werden, um Fachkräfte auszubilden, die über umfassende Kompetenzen in den Bereichen Simulation und Materialforschung verfügen.



Inhaltsverzeichnis

Executive Summary.....	3
1. Materialforschung.....	5
2. Aspekte der technologischen Souveränität	6
2.1. Rohstoffverfügbarkeit	6
2.2. Kreislaufführung und Nachhaltigkeit.....	8
2.3. Forschung für die industrielle Verwertbarkeit	10
2.4. Digitale Ansätze in der Materialforschung	11
2.5. Forschung und Fachkräfte	12
3. Handlungsempfehlungen	14
3.1. Sicherung benötigter Rohstoffe und Entwicklung nachhaltiger Materialsubstitute ..	14
3.2. Recyclingquoten und Demontagemöglichkeiten.....	14
3.3. Ökologische Aspekte und Materialvielfalt.....	15
3.4. Skalierung.....	15
3.5. Fachkräfte und interdisziplinäre Zusammenarbeit	16



1. Materialforschung

Materialien und Werkstoffe bilden die Basis fast aller unserer Produkte. Die Materialforschung befasst sich mit den wissenschaftlichen Grundlagen und der technischen Umsetzung bei der Entwicklung neuer Materialien, der Untersuchung von Materialeigenschaften sowie mit deren Einsatzmöglichkeiten. Dadurch ist die Materialforschung wichtiger Treiber technologischer Innovation, indem sie neue Produkte mit verbesserten Eigenschaften ermöglicht. Die Abhängigkeit vieler Produkte – von alltäglichen Gütern über Medizinprodukte bis hin zu Baumaterialien – von den Fortschritten in der Materialforschung verdeutlicht die fundamentale Rolle, die Materialinnovationen in unserem Leben spielen. Diese Abhängigkeit erstreckt sich sogar auf digitale Inhalte, da deren Funktionalität auf Hardware basiert, die wiederum auf fortschrittliche Materialien wie Halbleiter angewiesen ist. Die Materialforschung berührt unser aller Leben also mehr als es in der Öffentlichkeit wahrgenommen wird.

Aufgrund dieser gesellschaftlich fundamentalen Rolle ist die Materialforschung wirtschaftlich und politisch von großer Bedeutung. Viele Materialien und Rohstoffe, die in unseren Produkten verwendet werden, müssen derzeit importiert werden. Oft erfolgt der Import aus Ländern außerhalb der EU. Dieser wird häufig erschwert durch geopolitische Rahmenbedingungen sowie ökologische oder soziale Probleme bei der lokalen Gewinnung und Verarbeitung. Die Materialforschung hat das Potenzial, neuartige Materialien zu entwickeln, die diesen bisher genutzten Rohstoffen ähnlich genug sind, dass sie als Substitut verwendet oder anderweitig als Alternativen eingesetzt werden können. So kann die Abhängigkeit von Importen reduziert werden – ein wichtiger Faktor für die technologische Souveränität.

Dieses Papier stellt den aktuellen Stand der technologischen Souveränität Deutschlands in der Materialforschung dar und zeigt politische Handlungsoptionen und -empfehlungen auf. Dabei stützt es sich auf eine hypotesenbasierte Analyse des wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Status der Materialforschung in Deutschland

MATERIAL

„Material ist die zusammenfassende Bezeichnung für alle natürlichen und synthetischen Stoffe.“

(Quelle: [Hütte – Das Ingenieurwissen](#))

WERKSTOFF

Unter dem Begriff „Werkstoffe“ werden im engeren Sinne Materialien zusammengefasst, die sich im festen Aggregatzustand befinden. Aus diesen lassen sich Bauteile und Produkte herstellen.

(Quelle: [Hütte – Das Ingenieurwissen](#))

ROHSTOFF

„Rohstoff, im übergeordneten Sinn, Bezeichnung für unbehandelte Produkte aus dem organischen und anorganischen Stoffkreislauf der Erde [...], die meist zur Verwertung erst weiterverarbeitet werden müssen. Im engeren Sinn werden darunter mineralische Naturprodukte [...], Industriemineralien), Energierohstoffe [...] und metallische Rohstoffe [...] unterschieden. Sekundärrohstoffe sind verarbeitete Produkte, aus denen nach ihrer Verwendung/Nutzung durch Recycling erneut Wertstoffe gewonnen werden können.“

(Quelle: [Spektrum.de](#))

und Europa. Aufgrund der Vielfaltigkeit der Thematik können nicht alle Aspekte der Materialforschung erschöpfend behandelt werden. Empfehlungen sind daher als übergreifend zu verstehen, einzelne Branchen oder Themenfelder können spezifische, zusätzliche Rahmenbedingungen haben, die in diesem Papier nicht notwendigerweise berücksichtigt werden können.

**BIOBASIERTE MATERIALIEN**

Die Anwendung biotechnologischer Verfahren und Nutzung biogener Rohstoffe hat großen Einfluss auf die Materialforschung und Werkstoffentwicklung. Biobasierte Materialien, die aus natürlichen Quellen oder durch mikrobielle Biosynthese gewonnen werden, bieten innovative Ansätze zur Herstellung funktionaler Produkte mit einer höheren Energieeffizienz und einem geringeren ökologischen Fußabdruck im Vergleich zu konventionellen fossilen Rohstoffen. Die Integration biotechnologischer Verfahren in die Materialproduktion kann nicht nur die Produktionskosten senken, sondern auch die Entwicklung nachhaltiger Kreislaufsysteme fördern, indem sie die Effizienz von Ressourcen und Energie steigert und gleichzeitig die Umweltauswirkungen minimiert.

Das Thema „Biobasierte Materialien“ wird in einem separaten Impulspapier des Rats für technologische Souveränität detailliert behandelt.

2. Aspekte der technologischen Souveränität

Die Materialforschung spielt, wie eingangs dargestellt, eine entscheidende Rolle für die technologische Souveränität Deutschlands. Sie trägt maßgeblich dazu bei, die Abhängigkeit von Rohstoffimporten zu verringern, indem neue, innovative Materialien entwickelt werden, die knappe oder schwer zugängliche Rohstoffe substituieren können. In Abschnitt 2.1 wird die technologische Souveränität am Beispiel der kritischen Rohstoffe diskutiert. Gleichzeitig liegt in der Materialforschung das Potenzial, das Recycling von bereits im Umlauf befindlichen Produkten und den darin enthaltenen Materialien zu erhöhen, wodurch wertvolle Rohstoffe wiederverwendet werden und somit die Ressourceneffizienz gesteigert wird. Das Thema Kreislaufführung wird in Abschnitt 2.2 näher betrachtet. Materialien bilden die physische Grundlage für die Umsetzung sämtlicher Schlüsseltechnologien, die wiederum für die wirtschaftliche und technologische Weiterentwicklung unverzichtbar sind. Für die Herstellung und den Einsatz moderner Technologien ist daher die Verfügbarkeit relevanter Materialien von zentraler Bedeutung. Die spezifischen Aspekte bei der Volumenproduktion werden in Abschnitt 2.3 und die Rolle der Digitalisierung in Abschnitt 2.4 beleuchtet. Doch nicht nur die bloße Verfügbarkeit von Materialien ist entscheidend: Auch das Wissen über die Entwicklung, Herstellung und Verarbeitung dieser Materialien spielt eine essenzielle Rolle. Nur durch umfassendes Know-how in diesen Bereichen kann Deutschland seine technologische Unabhängigkeit sichern und im globalen Wettbewerb bestehen. Die Fachkräfteproblematik findet eine nähere Betrachtung in Abschnitt 2.5.

METHODEN

Die hier aufgeführten Analysen beruhen auf hypothesenbasierten Recherchen. Sie ziehen Patente, Literatur und weitere Datensätze sowie wissenschaftliche Studien zu den Bereichen Materialforschung, Schlüsseltechnologien und technologische Souveränität heran. Untermauert werden die Analysen von Berichten aus Fachzeitschriften, Gesetzestexten sowie Strategiepapieren der EU-Kommission.

2.1. Rohstoffverfügbarkeit

Da Deutschland ein rohstoffarmes Land ist, ist es auf den Import von Materialien und Rohstoffen angewiesen. Die EU hat 31 Rohstoffe¹ mit hoher wirtschaftlicher Relevanz und gleichzeitig großem Versorgungsrisiko identifiziert. So stammen beispielsweise 93 % des in der EU benötigten Magnesiums aus China und 98 % des in der EU verwendeten Borats aus der Türkei.^{2,3}

Die Seltenerdelemente (Rare Earth Elements, REE) oder Seltenen Erden sind eine Gruppe von 17 chemisch ähnlichen metallischen Elementen (15 Lanthanoide sowie Scandium und Yttrium), die – insbesondere durch den vermehrten Einsatz von beispielsweise elektrischen und

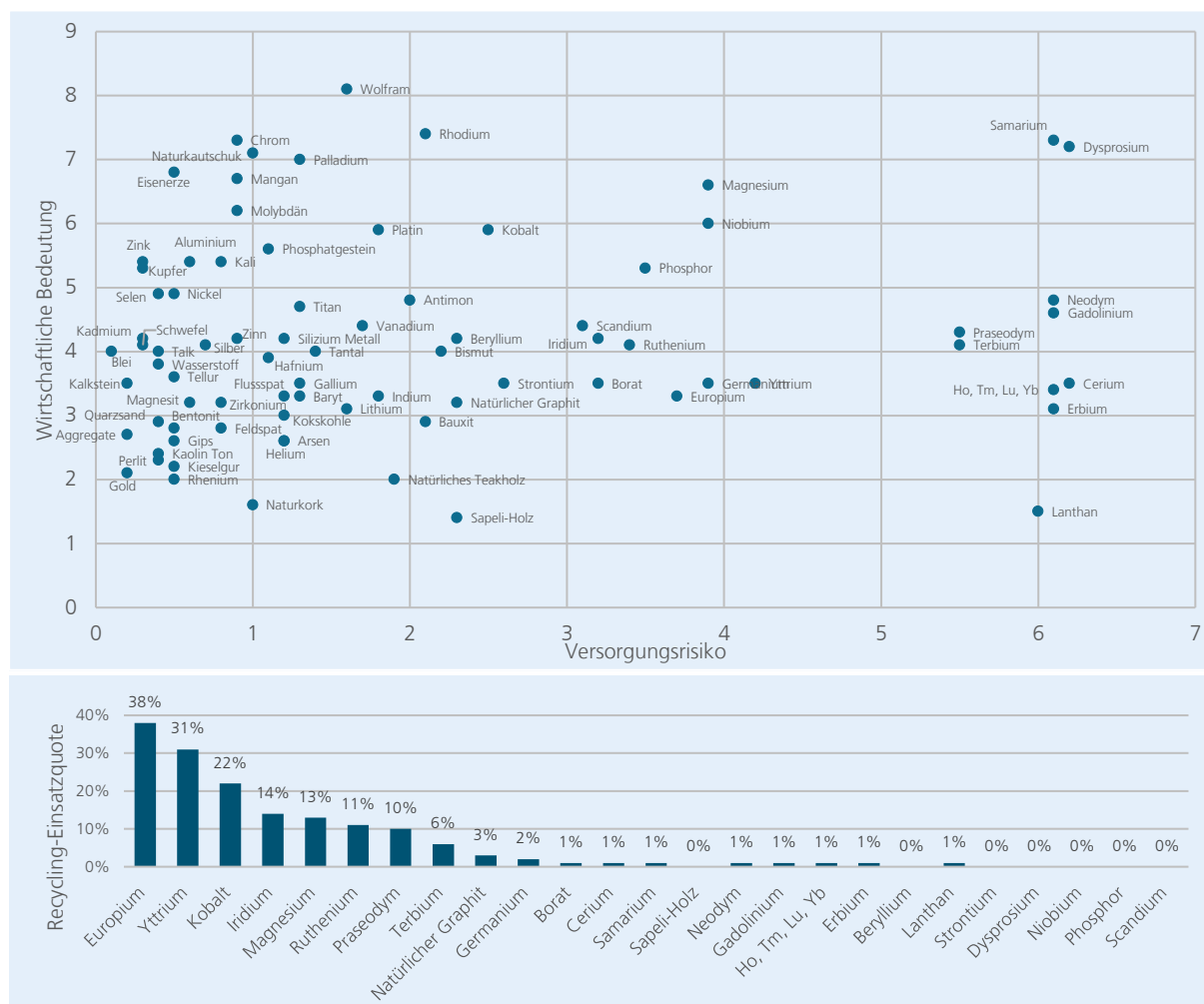


Abbildung 1: Oben: Versorgungsrisiko und wirtschaftliche Bedeutung von Materialien nach „Study on the EU's list of critical raw materials“ (2020). Unten: Beitrag des Recyclings zur Deckung des Materialbedarfs (Recycling-Einsatzquote) für die 25 Materialien mit dem höchsten Versorgungsrisiko.⁴

umweltfreundlichen Energiesystemen – zunehmend nachgefragt werden. Im Jahr 2023 war China der weltweit größte Produzent und Verarbeiter von REEs, mit einem Anteil von 70 % der Produktion und 90 % der Verarbeitung, wobei gleichzeitig Myanmar ein bedeutender Exporteur von REE nach China war.⁵

Die „Study on the EU's list of Critical Raw Materials“ der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2020 gibt für 80 Materialien die jeweilige wirtschaftliche Bedeutung („Economic Importance“, basierend auf der Bedeutung für Endverbraucheranwendungen und den Substitutionsoptionen des Materials) und das Versorgungsrisiko (basierend auf verschiedenen Faktoren, die das Risiko der Versorgung mit dem Material beeinflussen, wie beispielsweise Importzuverlässigkeit, politische Situation in den Exportländern, Handelsbeschränkungen und -abkommen, etc.) an. In *Abbildung 1* sind die Materialien

nach diesen beiden Kriterien aufgetragen (oben). Für Materialien mit hohem Versorgungsrisiko ist außerdem der Anteil von Recyclingmaterial am insgesamt eingesetzten Material angegeben (unten). Deutlich werden hier die teils sehr geringen Recyclingquoten, insbesondere für Seltene Erden.

Von besonderer Bedeutung für den Übergang zu einer grünen, CO₂-armen Wirtschaft sind vier Seltenerdelemente in Verbindung mit Permanentmagneten: Praseodym (Pr), Neodym (Nd), Terbium (Tb) und Dysprosium (Dy). Nach aktuellen Zahlen der Internationalen Energieagentur IEA⁶ werden rund 60 % dieser vier Seltenen Erden in China gefördert, weitere 14 % in Myanmar und 9 % in den USA.⁷

Diese vier REEs werden zudem fast ausschließlich in China raffiniert (d. h. gereinigt, veredelt, getrennt oder aufkonzentriert). Die IEA prognostiziert für diese vier



REEs ein Absinken des Anteils der Top-drei-Länder an Förderung und Raffinierung. Diese Diversifizierung der Produktionsländer wird jedoch eine langfristige Entwicklung sein.

Um Abhängigkeiten von – insbesondere – China und Myanmar zu reduzieren, käme somit ausschließlich eine Materialsubstitution infrage.

Eine Substitution dieser Seltenen Erden ist bislang jedoch schwierig oder gar nicht umsetzbar. Insbesondere wenn spezifische Materialeigenschaften benötigt werden, sind häufig keine Alternativen bekannt. Entsprechend besteht hier zum Beispiel viel Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu neuen Materialien.⁸ Eine höhere Materialeffizienz sowie verbessertes Recycling sind außerdem wesentliche Hebel, an denen angesetzt werden kann, um die Verwendung Seltener Erden zu reduzieren. Diesen enormen, bisher nicht genutzten Potenzialschatz gilt es zukünftig zu heben.⁹

2.2. Kreislaufführung und Nachhaltigkeit

Die Verwendung von Sekundärrohstoffen innerhalb der EU wurde in den letzten Jahren bereits stark ausgebaut. Zum Beispiel werden laut EU-Kommission mehr als 50 % bestimmter Metalle wie Eisen, Zink oder Platin recycelt. Diese recycelten Materialien wiederum decken mehr als 25 % des EU-Verbrauchs. Insofern kann der EU eine weltweite Vorreiterrolle im Bereich Recycling attestiert werden. Jedoch liegt das Recycling von Seltenen Erden aus End-of-Life (EOL)-Konsumgütern oder Industrieabfällen im einstelligen Prozentbereich, wie in Abschnitt 2.1 dargestellt. Diese Materialien werden jedoch insbesondere für Technologien für erneuerbare Energie sowie bei High-Tech-Anwendungen benötigt.¹⁰

Zu den Hindernissen für das Recycling gehören eine ineffiziente (oder nicht vorhandene) Sammlung von nicht sortenrein entsorgten Produkten, hohe Kosten für die Demontage von enthaltenen Komponenten zur Rückgewinnung der angestrebten Elemente sowie das Fehlen kosteneffizienter Methoden zur Rückgewinnung.^{11,12,13,14} Weitere erhebliche Hindernisse bestehen darin, dass der Anteil von Seltenerdelementen in vielen entsorgten Produkten klein ist und die geringen Ausbeuten einen wirtschaftlichen Betrieb von Recyclinganlagen nicht möglich machen.¹⁵ Eine Festplatte kann beispielsweise nur wenige Gramm an REE enthalten; einige Produkte bieten sogar nur einige Milligramm.

Herkömmliche Recyclingmethoden für Seltene Erden erfordern den Einsatz von Gefahrstoffen wie Salzsäure und viel Wärmeenergie. In Japan (Tohoku University¹⁶), Europa (European Rare Earth (Magnet) Recycling Network¹⁷) und den Vereinigten Staaten (Critical Materials

Institute¹⁸) werden umfangreiche Forschungsarbeiten durchgeführt, um das Recycling und die Wiederverwendung von Seltenen Erden zu verbessern.

Die globale Kreislaufmaterialnutzungsrate (circular material use rate, CMUR), also der weltweite Anteil des Materialverbrauchs, der durch recycelte Wertstoffe gedeckt wird, wird von der Europäischen Umweltagentur auf 7,2 % geschätzt, wobei sich ein abnehmender Trend abzeichnet. Der Anteil der Kreislaufwirtschaft in der europäischen Wirtschaft wird derzeit (Stand 2022) laut Europäischer Umweltagentur basierend auf der CMUR-Metrik auf 11,5 % geschätzt. Der im März 2020 verabschiedete EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft im Rahmen des European Green Deal sieht vor, dass die Nutzungsquote recycelter Materialien in der EU in den kommenden zehn Jahren verdoppelt werden soll. Zwischen 2010 und 2020 war nur ein Anstieg um einen Prozentpunkt (von 10,5 % auf 11,5 %) zu verzeichnen.¹⁹

Das Recycling von Metallen und Edelmetallen hat ein hohes ökologisches und wirtschaftliches Potenzial. Nach Anwendung von Separations- und Sortiertechnologien kommen neben klassischen Verfahren der chemischen oder elektrochemischen Wiedergewinnung hierbei auch neue Recyclingmethoden für Edelmetalle in mittlerweile kommerziell betriebenen Bioraffinerieanlagen zum Einsatz, wo Metalle mit natürlicher Biomasse recycelt werden.^{20,21} Eine Herausforderung für die Recyclingunternehmen besteht jedoch darin, dass Elektrogeräte selten recyclinggerecht konstruiert werden. Das zieht hohe Aufwendungen nach sich, wenn die verbauten Materialien dennoch Wiederverwendung finden sollen. So sind zum Beispiel Geräte, die mit Lithium-Ionen-Akkus betrieben werden, für viele Brände in den Recyclingbetrieben und auch bei den Sammelprozessen verantwortlich, da diese häufig verklebt, vergossen oder miniaturisiert, also nur schwer demontierbar, oder nicht als Akku erkennbar sind.²² Eine weitere Voraussetzung für ein Metall-Recycling ist die korrekte Entsorgung seitens der privaten oder gewerblichen Verbraucherinnen und Verbraucher.

In einer vielbeachteten Studie definiert das International Resource Panel (IRP) des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP)²³ verschiedene Metriken für das Metallrecycling. Die Untersuchung umfasst 60 Metalle, wobei lediglich bei wenigen die Recyclingraten gemäß den drei Metriken über 50 % liegen. Lediglich bei 18 Metallen wird eine End-of-Life-Recyclingrate (EOL-RR)²⁴ von über 50 % erreicht. Der recycelte Gehalt (RC) erreicht bei lediglich drei Metallen einen Wert von über 50 %, während die Altschrottquote (OSR)²⁵ bei 13 Metallen diesen Wert ebenfalls übersteigt. Als Ursachen hierfür werden im Bericht die, global betrachtet, geringe Effizienz bei der Sammlung und Verarbeitung metallhaltiger Altprodukte, technische Einschränkungen der Recyclingverfahren sowie die Tatsache identifiziert, dass Primärmaterialien

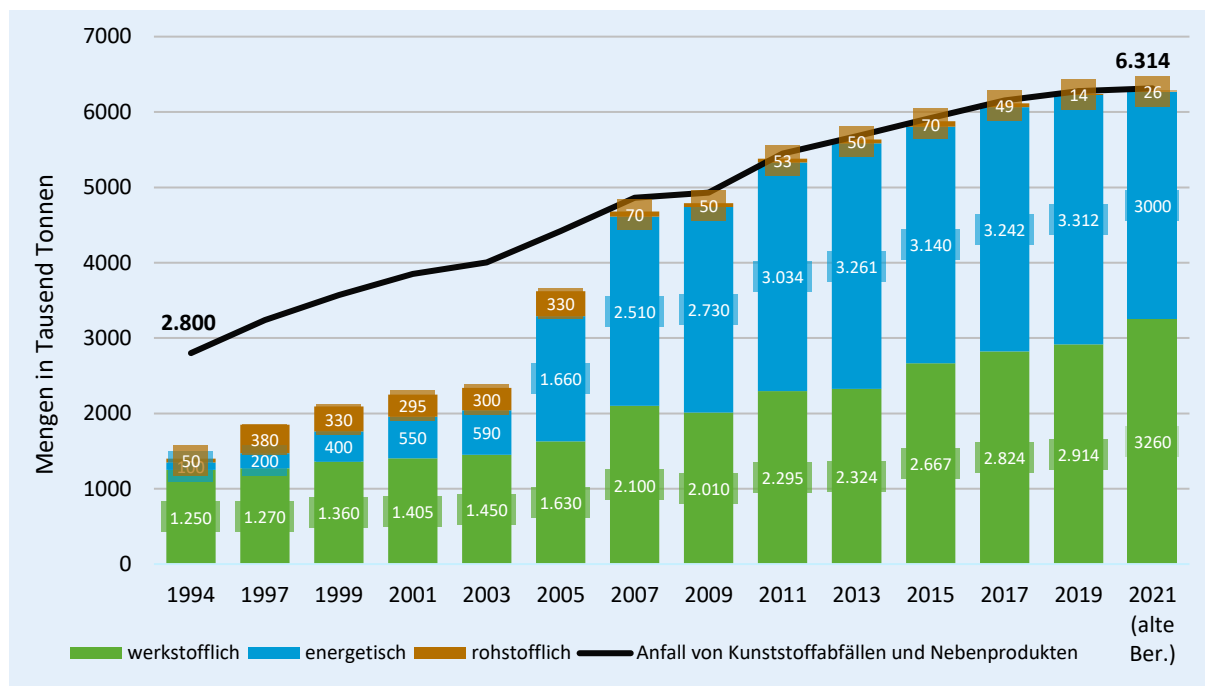


Abbildung 2: Entwicklung der Verwertung von Kunststoffabfällen. Die Darstellung basiert auf Daten der CONVERSIO Market & Strategy GmbH, wobei trotz einer Veränderung der Erhebung bzw. Berechnung der Daten ab 2021, im Sinne einer konsistenten Darstellung, auch für das Jahr 2021 auf die vorherige Berechnungsmethode zurückgegriffen wurde.²⁶

häufig reichlich verfügbar und kostengünstig sind, was das Recycling aus wirtschaftlicher Perspektive unattraktiv macht.

Bei 34 der 60 betrachteten Elemente liegen die End-of-Life-Recyclingraten unter 1 %, obwohl sie in Technologien wie Batterien für Hybridautos und Windturbinen von entscheidender Bedeutung sind. Die niedrigen Recyclingraten sind dabei laut der Studie auf mehrere Faktoren zurückzuführen, darunter ineffiziente Produktdesigns, die die Demontage und das Recycling erschweren, schlechte Abfallentsorgungspraktiken und die Gewohnheit, alte elektronische Geräte zu lagern, anstatt sie zu recyceln.

Um einen Markt für nachhaltige Materialien und Materialsubstitutionen zu generieren, setzt die Europäische Union derzeit einige Regelungen um. So soll das „EU policy framework on biobased, biodegradable and compostable plastics“ den Einsatz und die Entwicklung biobasierter Kunststoffe fördern.^{27,28,29} Ein Mittel zur Schadstoffreduzierung ist außerdem der „Carbon Border Adjustment Mechanism“ (CBAM), die Bepreisung von importiertem CO₂ sowie Produkten, die CO₂ verursacht haben, sodass die Verlagerung der Produktion ins Ausland („Carbon Leakage“) unterbunden wird. In einer Übergangsfrist zwischen 2023 und 2026 gilt die CBAM nur für die Einfuhr bestimmter Waren und ausgewählter Vorprodukte, deren Herstellung kohlenstoffintensiv ist und bei denen das Risiko einer Verlagerung von CO₂-Emissionen

am größten ist. Diese sind Zement, Eisen und Stahl, Aluminium, Düngemittel, Strom sowie Wasserstoff.^{30,31} Zudem soll die „EU-Richtlinie zur Reduzierung und Vermeidung von Verpackungsmüll“³² aktualisiert werden. Diese soll Verpackungsabfälle reduzieren und ihre Wiederverwendungs- und Recyclingfähigkeit erhöhen, indem beispielsweise Gestaltungskriterien und Recyclinganteile für Verpackungen vorgeschrieben werden.³³ Weitere Instrumente der EU sind die „Circular Economy: Packaging and Packaging Waste Regulation“³⁴ und die „European bioeconomy policy“³⁵.

Auch darüber hinaus wirken sich insbesondere die Ziele des Green Deals auf europäischer Ebene forschungspolitisch aus. Das „Materials 2030 Manifesto“ definiert die strategische Ausrichtung der europäischen Materialforschung zur Unterstützung der grünen und digitalen Transformation. Die EU-Initiative „Advanced Materials for Industrial Leadership“ (AM4IL)³⁶ zielt darauf ab, Europa als führenden Standort für die Entwicklung und Anwendung fortschrittlicher Materialien in der Industrie zu etablieren und dabei insbesondere den Übergang zu umweltfreundlicheren, ressourceneffizienteren Materialtechnologien zu unterstützen.

Im Einklang mit den europäischen Initiativen wurde seitens der Bundesregierung eine Nationale Kreislaufstrategie³⁷ entwickelt, deren Ziel die Förderung des Übergangs zu einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft ist.



Die Entwicklung nachhaltiger Materialien und Technologien zur Verlängerung der Lebenszyklen von Produkten sowie der Schließung von Materialkreisläufen ist ein wesentlicher Aspekt dieser Strategie.

In Deutschland werden Kunststoffabfälle zwar fast vollständig verwertet, allerdings zu über 60 % energetisch, also in Müllverbrennungsanlagen. Dieser Anteil ist insbesondere in den letzten 15-20 Jahren stark gewachsen und in dieser Zeit fast vollständig für eine Erhöhung der Verwertungsquote verantwortlich. Ein besonders starker Anstieg seit dem Jahr 2005 ist dabei auf eine Gesetzesänderung zurückzuführen, nach der das Deponieren von Abfällen nur dann erlaubt ist, wenn eine anderweitige Verwendung nicht möglich ist.³⁸ Die werkstoffliche Verwendung hingegen hat nur schwach zugenommen (siehe *Abbildung 2*).

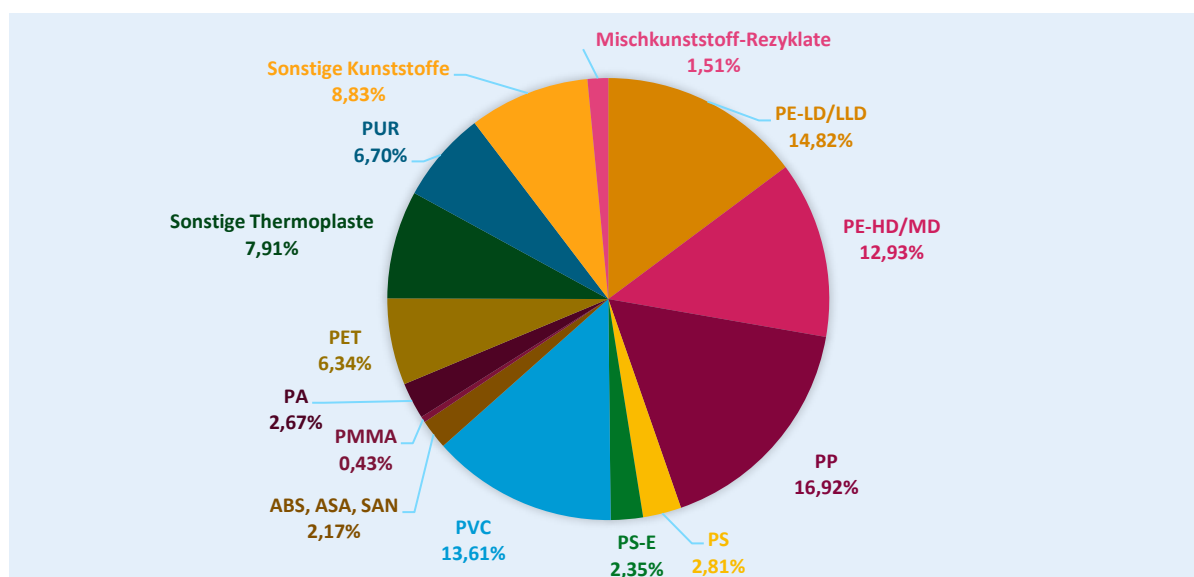
Insbesondere beim Kunststoffrecycling liegt eine Schwierigkeit in der Anzahl verschiedener Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften.

Abbildung 3 schlüsselt die 2021 in Deutschland verarbeiteten Kunststoffe nach Sorten auf und illustriert damit die Problematik, die durch Additivierung und Vermischung von Kunststoffen noch verstärkt wird. Einige

Kunststoffsorten sind nur in sehr geringen Anteilen vertreten, was eine Rückgewinnung zusätzlich erschwert. Oft entstehen daher gemischte Rezyklate von geringerer Qualität. Sie werden allenfalls zu Produkten mit geringeren Qualitätsanforderungen verarbeitet (Downcycling).³⁹ So werden Kunststoffabfälle aus Haushalten nur zu 29 % wiederverwendet. Bei Abfällen aus der Industrie, die meist sortenreiner und unverschmutzt vorliegen, sind es immerhin 38 %.⁴⁰

Zwar ist das werkstoffliche Recycling von Kunststoffen nachhaltiger als das Verbrennen, es ist jedoch oft mit technischen und wirtschaftlichen Grenzen verbunden. So sind beispielsweise nicht alle Kunststoffe rezyklierbar. Dies gilt vor allem für Kunststoffe, die nach heutigen Standards nicht mehr in Umlauf gebracht werden dürfen, jedoch noch in älteren Produkten verbaut sind. Chemisches Recycling wäre hier eine Lösung, ist aber energetisch sehr aufwendig.⁴¹

Biokatalytisches Recycling fossil basierter Kunststoffe ist eine weitere Option. Ein digitaler Produktpass, in dem genau verzeichnet ist, welche Materialien in einem Produkt enthalten sind, würde ein gezieltes Recycling unter Umständen vereinfachen (siehe dazu auch Abschnitt 2.4).



*Abbildung 3: Anteil der Kunststoffsorten an der Verarbeitungsmenge Kunststoffe 2021 (Neuware und Rezyklate). Gesamtmenge: 14,04 Millionen Tonnen.*⁴²

2.3. Forschung für die industrielle Verwertbarkeit

Der Innovationsindikator des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI)⁴³ zeigt, dass Deutschland in der Schlüsseltechnologie „neue Werkstoffe und fortschrittli-

che Materialien“ sehr gut platziert ist. Deutschland belegt hier den fünften Rang nach Japan, Finnland, Südkorea und China, während die USA auf Platz elf liegen.



Deutschland gehört in der Grundlagenforschung der Materialwissenschaften weltweit zu den führenden Nationen (siehe auch Abschnitt 2.5). Dennoch sind die erfolgreiche Kommerzialisierung und Skalierung von in der Forschung entwickelten Innovationen mit großen Herausforderungen verbunden. Skalierungseffekte spielen außerdem in der Entwicklung neuer Rohstoffquellen für Materialien eine wichtige Rolle: je nach betrachtetem Maßstab können unterschiedliche Herausforderungen auftreten. Beispiele für solche Effekte finden sich etwa bei biobasierten Materialien, wo bei der Produktion bestimmter Produkte Rückstände und/oder NebenkompONENTEN im Prozess auftreten können, die erst im größeren Maßstab sichtbar werden.

Ein Beispiel für die Herstellung eines Grundstoffes ist biobasiertes Anilin. Anilin wird für die Herstellung von Polyurethan und damit viele alltäglicher Produkte verwendet und bislang primär aus Erdöl gewonnen. Es soll – wenn die Skalierung in den Produktionsmaßstab technisch und wirtschaftlich gelingt – in Zukunft auch aus Biomasse hergestellt werden.⁴⁴

Die Bandbreite der Beispiele reicht bis hin zur Anwendung in der Mikroelektronik, wo die erreichbare Ausbeute an guten Chips pro Wafer bei den nur schwer beherrschbaren statistischen Fehlerquellen in Hochvolumenproduktion ein essenzieller Wettbewerbsfaktor ist. Forschung zu Skalierungsprozessen ist daher ein wichtiger und notwendiger Aspekt der Materialforschung.

2.4. Digitale Ansätze in der Materialforschung

Die Simulation und Modellierung von Materialien und ihren Eigenschaften ist ein zunehmend wichtiger Aspekt der Materialforschung. Eine Textanalyse der einschlägigen wissenschaftlichen Literatur zeigt eine hohe Relevanz dieser Themen, die in den letzten 30 Jahren stetig zugenommen hat. Etwa 60-70 % der Materialforschungspublikationen weisen entsprechende Stichworte auf,

auch Publikationen aus Deutschland weichen von diesem internationalen Trend nicht ab.

Ein zentraler Aspekt der Modellierung und Simulation ist die informationsgeleitete Design- und Syntheseautomatisierung, die den Entwicklungsprozess erheblich beschleunigt. Durch die Integration fortschrittlicher Algorithmen und maschineller Lernverfahren können Materialeigenschaften präzise vorhergesagt und optimiert werden, bevor sie physisch hergestellt werden. Dies führt nicht nur zu einer signifikanten Reduktion der Entwicklungszeit, sondern auch zu einer effizienteren Ressourcennutzung. Digitale Zwillinge von Materialien und Werkstoffen erlauben außerdem bei der Entwicklung von Bauteilen und Produkten flexible und vielseitige Testmöglichkeiten: Die digitalen Repräsentationen ermöglichen es Forschenden, das Verhalten von Materialien unter verschiedenen Bedingungen detailliert zu simulieren und zu analysieren. Da Materialien als hochkomplexe, multiskalige physikalische Systeme betrachtet werden müssen, deren Form und Funktion auf verschiedenen Ebenen – von der atomaren bis zur makroskopischen Skala – miteinander verknüpft sind, erlaubt der digitale Zwilling eine ganzheitliche Analyse und Optimierung.

Hier wirken sich daher auch allgemeine Fortschritte im maschinellen Lernen und der Künstlichen Intelligenz als treibende Kräfte aus, sofern die Methoden der KI entsprechend adaptiert und genutzt werden können. Für eine erfolgreiche digitalisierte Materialforschung und den Einsatz von Simulation und KI ist es notwendig, dass Informationen zu einem Material und dessen Verarbeitung einheitlich digital beschrieben, abgelegt und verarbeitet werden können, damit alle digitalen Workflows miteinander kompatibel sind. Ein entscheidender Mehrwert daraus entsteht erst, wenn die Informationen über den gesamten Verlauf einer Wertschöpfungskette sicher zwischen einzelnen Stufen austauschbar werden. Dazu bedarf es standardisierter und sicherer digitaler Dateninfrastrukturen und deren Kopplung mit industriellen Datenräumen. Dafür ist entsprechende Expertise in Form von Spezialistinnen, Spezialisten und Fachkräften nötig, die daher unbedingt gebunden werden sollte.

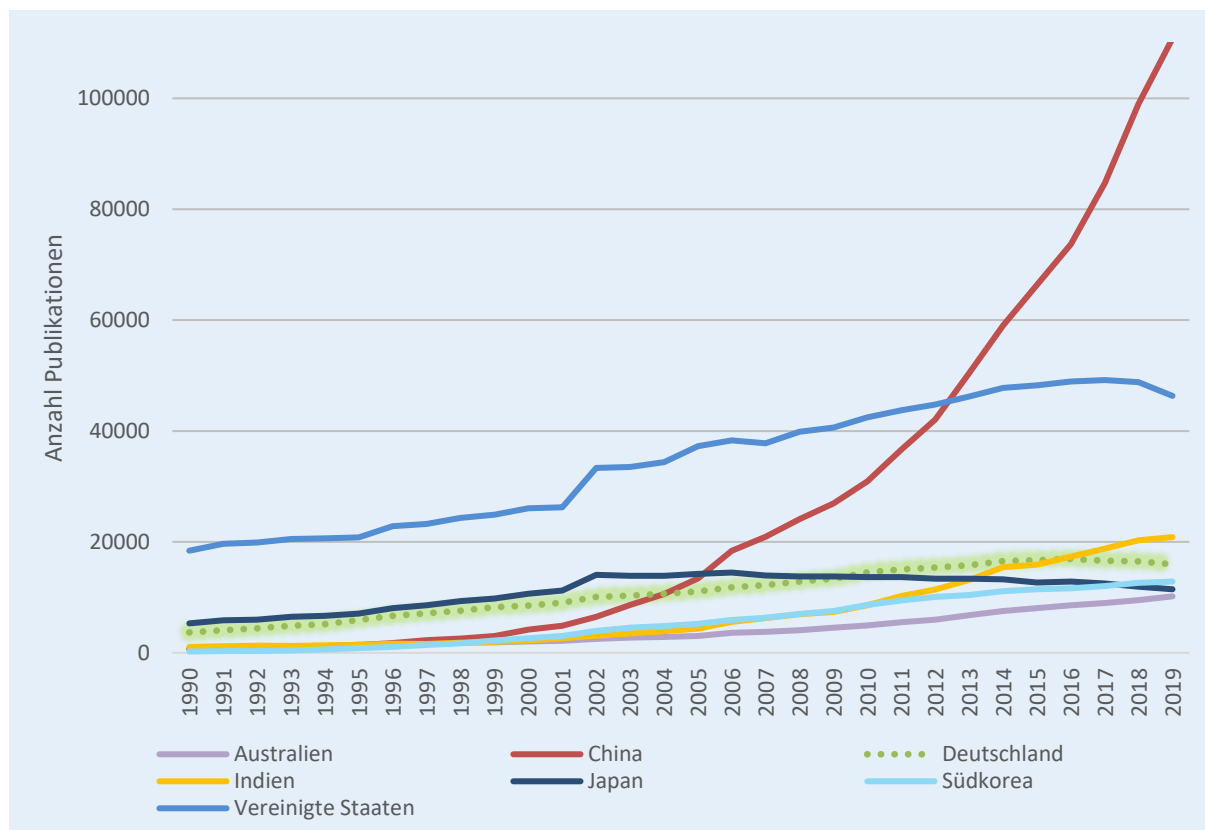


Abbildung 4: Wissenschaftliche Publikationen im Bereich Materialforschung im internationalen Vergleich. Anzahl der Veröffentlichungen mit jeweiliger Beteiligung der aufgetragenen Länder (Publikationen mit min. 10 Zitaten) Quelle: OpenAlex

2.5. Forschung und Fachkräfte

Im internationalen Vergleich der wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Materialforschung (siehe *Abbildung 4*) fällt vor allem die stark wachsende Anzahl von Publikationen mit chinesischer Beteiligung auf. Seit Beginn der 2000er Jahre wächst der Anteil Chinas überproportional und überholte 2013 sogar die ebenfalls sehr stark vertretenen USA. Indien verzeichnet ebenfalls ein stark wachsendes Publikationsaufkommen in den Materialwissenschaften und liegt in den letzten Jahren international auf Platz drei. Deutschland folgt dahinter an vierter Stelle. Trotz einer eher schwachen Dynamik liegt Deutschland damit im europäischen Vergleich vorne. Ein kontinuierlicher Anstieg des Publikationsaufkommens ist auch in Australien und Südkorea zu beobachten. In Deutschland hingegen sinkt die Zahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen seit etwa 2015 leicht ab. Auch in anderen europäischen Ländern stagniert oder sinkt die Zahl der Materialforschungspublikationen.

Seit etwa 2015 ist gleichzeitig die Zahl der Studierenden im Bereich Werkstoffwissenschaften in Deutschland kontinuierlich gesunken, insbesondere im Vergleich zu den Studierendenzahlen im Ingenieurbereich allgemein

(siehe *Abbildung 5*). Die steigenden Studierendenzahlen in den Ingenieurwissenschaften sind hauptsächlich auf das starke Wachstum der Studierendenzahlen im Fach Informatik zurückzuführen, während die Zahlen in den klassischen Fächern tendenziell rückläufig sind.

Eine ähnliche Entwicklung ist auch beim Personal an den Lehrstühlen zu beobachten. *Abbildung 6* zeigt die relative Entwicklung des hauptberuflichen wissenschaftlichen Personals (beispielsweise Professor/innen, Dozent/innen, Wissenschaftliche Mitarbeitende) an deutschen Hochschulen in den Bereichen Materialwissenschaft/Werkstofftechnik, Informatik, sowie Ingenieurwissenschaften insgesamt. Während sich die Ingenieurwissenschaften im Ganzen sehr ähnlich dem Durchschnitt aller Fächer entwickeln, steigt das Personal seit 2019 in der Informatik deutlich über-, in den Materialwissenschaften deutlich unterdurchschnittlich.

Diese Entwicklung birgt die Gefahr einer Negativspirale, wenn zunehmend geringere Studierenden- und Forschendenzahlen zu weniger Ergebnissen und damit zu weniger wissenschaftlichen Veröffentlichungen führen, was den deutschen Standort im internationalen Vergleich weiter schwächt.

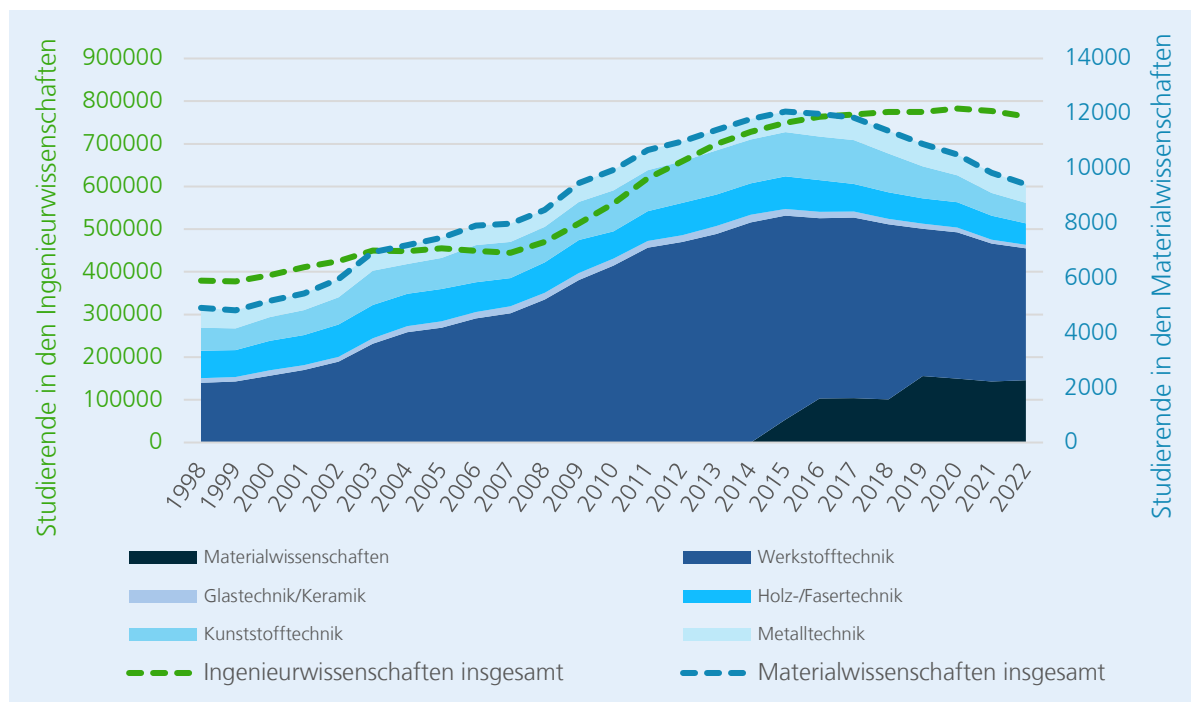


Abbildung 5: Anzahl der Studierenden im zeitlichen Verlauf (Materialwissenschaften aufgeschlüsselt).⁴⁵

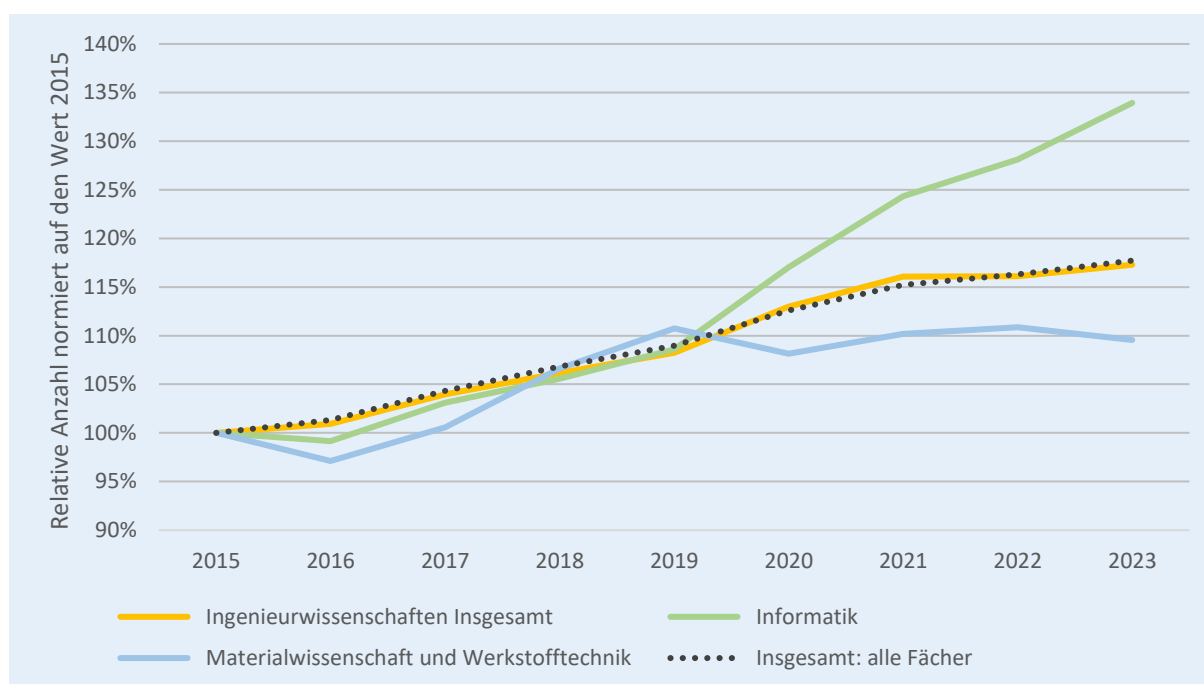


Abbildung 6 Entwicklung des hauptberuflichen wissenschaftlichen und künstlerischen Personals an Hochschulen in den Fächern Materialwissenschaften/Werkstofftechnik sowie Informatik, im Vergleich zu Ingenieurwissenschaften insgesamt und der Gesamtheit aller Fächer an Hochschulen. Die Anzahl des Personals ist jeweils normiert auf den Wert im Jahr 2015.⁴⁶



3. Handlungsempfehlungen

Die im vorherigen Kapitel angeführten Analysen verdeutlichen bestehende Herausforderungen im Bereich der Materialforschung. Daraus lassen sich Handlungsmöglichkeiten für Akteure der öffentlichen Forschungsförderung ableiten, zu denen auch das BMBF als größter öffentlicher Förderer der Materialforschung in Deutschland zählt.

Die fünf zentralen Empfehlungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Zur Sicherung benötigter Rohstoffe** – ohne die eine Forschung in vielen Bereichen nicht möglich wäre – sollte die **Entwicklung nachhaltiger Materialsubstitute** priorisiert werden, um die Abhängigkeit von Importen und die damit verbundenen Versorgungsrisiken zu minimieren.
- In der Produktentwicklung sollte die **Berücksichtigung von Recycling- und Demontagemöglichkeiten bereits in der Designphase** gefördert werden, um die Wiederverwertungsquote kritischer Materialien zu erhöhen und Ressourcen effizienter zu nutzen.
- **Ökologische Aspekte und die Recyclingfähigkeit** von Materialien sollten in Forschungsprogramme integriert und als wichtige Wettbewerbsfaktoren betrachtet werden, um die Marktfähigkeit von Materialinnovationen zu gewährleisten.
- **Skalierung** ist ein relevanter Aspekt der Materialinnovation, der, auch durch dedizierte Forschung, explizit berücksichtigt und gefördert werden sollte.
- Die **interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Materialwissenschaften und Informatik** sollte in der Hochschulausbildung gestärkt werden, um Fachkräfte auszubilden, die über umfassende Kompetenzen in den Bereichen Simulation und Materialforschung verfügen.

3.1. Sicherung benötigter Rohstoffe und Entwicklung nachhaltiger Materialsubstitute

Wie die Analysen in Abschnitt 2.1 zeigen, ist die deutsche und europäische Produktion in vielen Schlüsselbranchen abhängig von einer Vielzahl an aus dem (außereuropäischen) Ausland importierten Rohstoffen, Betriebsmitteln und vorverarbeiteten Werkstoffen. Wie *Abbildung 1* zeigt, geht für viele Materialien, besonders für zum Beispiel Seltene Erden, eine hohe wirtschaftliche Relevanz

mit einem hohen Versorgungsrisiko einher. Ein Recycling dieser Seltene Erden wird nur in sehr geringem Maße umgesetzt. Neben den hieraus resultierenden Risiken für die technologische Souveränität gehen damit oft weitere unerwünschte Umstände einher, beispielsweise Umweltverschmutzung, Klimaschädlichkeit, humanitäre Härten oder die finanzielle Unterstützung autokratischer Staaten. **Um die Abhängigkeiten vom außereuropäischen Ausland und weitere unerwünschte Nebeneffekte zu reduzieren, sollte die Entwicklung von neuen Materialien ein primäres Bestreben sein.** Deshalb wäre es ratsam, den Fokus auf eine **Kreislauffähigkeit**, die Verwendung von **Sekundärmaterialien** und die Entwicklung von nachhaltigen **Materialsubstituten** zu legen. Darum sollten **in der Zukunft benötigte Materialien und Rohstoffe** nach Möglichkeit **heute schon gesichert werden**. Andernfalls ist die Forschung und Entwicklung in vielen Forschungsbereichen nicht möglich, da hierfür verschiedenste spezifische Materialien benötigt werden.

Der **europäische Blickwinkel** muss auf Grund von **Ressourcenverfügbarkeiten** bei der Materialforschung eine wichtige Rolle spielen. Er ist bei der nachhaltigen Erzeugung von Materialien aller Art zu berücksichtigen. Dabei ist die länderübergreifende Schaffung von Synergien innerhalb Europas von entscheidender Bedeutung und erforderliche Instrumente sollten unter diesem Aspekt evaluiert werden.

Zudem sollte in Forschungsprojekten zum Thema Materialtechnologie die **Verfügbarkeit von Rohstoffen sowie mögliche Risiken und Probleme in den Lieferketten bereits frühzeitig berücksichtigt und dokumentiert** werden. Dabei müssen auch langfristige Zeiträume betrachtet werden. Dazu müsste auch die Handhabung des Umfangs der verfügbaren Rohstoffe in der Ausformulierung der Forschungsprogramme berücksichtigt werden. Es ist zudem zu beachten, dass die Forschung nicht stoppen darf, wenn Lieferengpässe zu befürchten sind. Vielmehr geht es darum, diese von Beginn an mitzudenken und – wann immer möglich – Workarounds zu definieren.

3.2. Recyclingquoten und Demontagemöglichkeiten

Ein wichtiger Schlüssel zur Verringerung des Importbedarfs ist eine **Erhöhung der Recyclingquote kritischer Materialien und Rohstoffe**. Wie *Abbildung 1* zeigt, werden insbesondere in den Bereichen High-Tech und Erneuerbare Energien Rohstoffe wie Seltene Erden, Gallium oder



Indium bislang nur in sehr geringem Umfang wiederverwertet. Um die Recyclingraten zu erhöhen, ist es daher wünschenswert, dass **die Demontage und das Recycling von Produkten und Gütern bereits bei der Entwicklung und beim Produktdesign mitgedacht werden**. Die Analysen in Abschnitt 2.2 zeigen den Bedarf und die Möglichkeiten der erhöhten Kreislaufnutzung von Materialien auf.

Bei Materialinnovationen betrifft dies insbesondere die Recyclingfähigkeit des Materials an sich oder die Rückgewinnung von Rohstoffen. Bei ganzen Produkten ist **auf eine Trennbarkeit der verbauten Materialien zu achten**, beispielsweise durch einen **Verzicht auf nicht trennbare Verbindungen und Versiegelungen**. Am Beispiel von Kunststoffen (siehe *Abbildung 2*) ist zu erkennen, dass die fehlende Trennbarkeit häufig zu einer Verbrennung und dadurch zu einer ineffektiven Nutzung von Abfällen führt. Eine werkstoffliche Wiederverwendung sollte hier priorisiert werden. **Dedizierte Forschung zum Thema möglichst energieeffizienter Trennung und Wiederverwertung von Materialien** sollte gefördert werden. Auch **digitale Produktpässe** sind ein wichtiger Baustein.

3.3. Ökologische Aspekte und Materialvielfalt

Die Erreichung **ökologischer Ziele** ist eine wichtige Mission technologischer Neuerungen. Durch **geeignete Substitution herkömmlicher Materialien durch nachhaltigere Alternativen** kann beispielsweise CO₂ eingespart und Abfall reduziert werden. Die Europäische Union plant derzeit diverse Maßnahmen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit, beispielsweise eine Richtlinie zur Reduzierung von Verpackungsmüll und ein Rahmenprogramm zu biobasiertem, bioabbaubarem und kompostierbarem Plastik. Diese Maßnahmen werden die Rahmenbedingungen für die europäische Industrie setzen und einen großen Bedarf an nachhaltigen Materialsubstitutionen generieren. Dies zählt auf die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung der UN ein, zu deren Erreichung sich alle Länder der Vereinten Nationen verpflichtet haben. Ebenso hat sich China zur CO₂-Neutralität bis 2060 verpflichtet. Dies wird unter anderem durch das Environmental Protection Law umgesetzt. Hier entsteht also viel Potenzial für Innovationen und Entwicklungen. Gleichzeitig müssen diese **bevorstehenden Regulierungen und möglichst vielseitigen Bestrebungen zur Nachhaltigkeit bereits bei der Forschung und Entwicklung von Produkten berücksichtigt** werden. Ökologische Aspekte wie die Recyclingfähigkeit von Produkten werden somit auch zur Frage der Wettbewerbsfähigkeit.

Feingranulare Einstellung von Materialeigenschaften durch (permanente) Veränderung des Materials an sich – und die damit einhergehende Erzeugung einer großen Materialvielfalt – **erschwert das Recycling**. Durch eine enge

Abstimmung der Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften kann Aufwand eingespart und die Rezyklierbarkeit verbessert werden. Die Materialforschung sollte sich deshalb mit der **Entwicklung von Alternativen** beschäftigen, beispielsweise durch reversible oder temporäre Prozesse, die die Rezyklierbarkeit nicht einschränken.

3.4. Skalierung

Neue technologische Ideen und Entwicklungen wirken nur, wenn sie auch in die Anwendung gebracht werden. In der Materialforschung sind viele Anwendungen nur in hochskalierter Produktion rentabel oder gar möglich, wie die Analysen in Kapitel 2.3 gezeigt haben. **Die Skalierung an sich und eine Verbesserung von Produktionsverfahren für Materialien sollten förderungswürdige Forschungsgegenstände sein**, die derzeit noch zu wenig Beachtung finden.

Auf dem Weg zur Skalierung sind insbesondere **Entwicklungsstadien, in denen sowohl technisch als auch finanziell noch ein hohes Risiko besteht**, ein wichtiger Ansatzpunkt für eine öffentliche Förderung. **Eine Förderung sollte hier dafür sorgen, dass das „Valley of Death“ zwischen Entwicklung und industrieller Produktion überbrückt werden kann**.

Das Ziel der Volumenproduktion sollte **möglichst früh bei Innovationen mitgedacht werden**. Gleichzeitig sollte **ergebnisoffene Grundlagenforschung** in sehr frühen TRLs als Keim für zukünftige Innovationen möglich sein. Im Hinblick auf Materialinnovationen ist es ratsam, nicht nur radikal neue, sondern **auch inkrementelle Entwicklungen zu fördern**. Diese profitieren insbesondere auch von einer ausgeprägten Volumenproduktion in deutschen Unternehmen, in denen das Know-how bewahrt und weiterentwickelt wird.

Der Einsatz neuer Materialien in einer skalierten Produktion ist ein längerer Prozess. Von Beginn der Wertschöpfungskette an muss die **Robustheit und Qualität der Volumenproduktion mitbedacht** werden. Ebenso sollten **Qualifizierungen** (zum Beispiel von Fahrzeugen) **in realen Umgebungen früh durchgeführt** werden.

Ein Beispiel für die Bedeutung der Skalierung ist **der Einsatz biotechnologischer Verfahren und Methoden in der Materialforschung**. Diese bringt wegen der Verwendung lebender Systeme im industriellen Maßstab besondere Forschungsthemen wie die Entwicklung von Produktionsorganismen, kontinuierlicher Fermentation und zellfreien Synthesen sowie Regulierungsfragen mit sich, die **separat betrachtet** werden müssen. Das Thema „Biobasierte Materialien“ wird in einem separaten Impulspapier des Rats für technologische Souveränität detailliert behandelt.



3.5. Fachkräfte und interdisziplinäre Zusammenarbeit

Für die Realisierung diverser industrieller Prozesse in Entwicklung und Produktion ist eine **Simulation und Modellierung von Materialien** und deren Eigenschaften essenziell. Diese Aspekte der Materialforschung müssen daher zukünftig ein **wichtiger Schwerpunkt der Förderlandschaft** sein. Dies ließe sich beispielsweise durch **fachübergreifende Forschungsprojekte** realisieren, in die insbesondere auch die Informatik eingebunden wird.

Im deutschen Forschungsoutput (Patente und Publikationen, siehe *Abbildung 4*) zum Thema Materialforschung ist seit etwa 2015 ein Rückgang zu verzeichnen. Auch die Anzahl der Studierenden in diesem Bereich ist etwa seit diesem Zeitpunkt rückläufig und folgt damit einem Trend, der in vielen (klassischen) Bereichen der Ingenieurwissenschaften zu beobachten ist (siehe *Abbildung 5*). Das hauptberufliche wissenschaftliche Personal in diesen Bereichen entwickelt sich analog, erwartungsgemäß mit einigen Jahren Versatz. Es ist zu befürchten, dass sich hieraus eine Negativspirale entwickeln könnte, die unbedingt verhindert werden sollte. Nicht zu vernachlässigen ist hierbei auch die Rolle des technischen Personals an den Hochschulen, das die praxisintensive Umsetzung von Forschung in den Materialwissenschaften oft erst möglich macht. Mit einer Zunahme der Komplexität der behandelten Themen, beispielsweise auch im Hinblick auf die Digitalisierung der Ma-

terialforschung, steigen die Anforderungen an dieses Personal ebenfalls. Eine Sicherung von entsprechenden Fachkräften muss diesen Aspekt berücksichtigen.

Da digitale Aspekte wie Simulation und Modellierung in der Materialforschung zunehmend wichtig werden, sollten **interdisziplinäre Aktivitäten zwischen Materialwissenschaften und Informatik bereits im Studium gefördert** werden. Es besteht ein Bedarf an Fachkräften und Spezialistinnen und Spezialisten mit gleichzeitiger Expertise in der Simulation und materialforschungsspezifischen Kenntnissen, der derzeit nicht gedeckt ist.

Grundsätzlich ist **die Ausbildung von Spezialistinnen und Spezialisten** für jeden Technologiebereich von essenzieller Bedeutung. Auch wenn Studienplätze und Forschung im Bereich Materialwissenschaften kostenintensiv sind, **sollte an ihnen nicht gespart werden**. Im Gegenteil sollte das Fach durch **öffentlichkeitswirksame positive Besetzung attraktiver gemacht werden**. Denkbar sind etwa **Informations- und Dialogformate** („Wissenschaftsjahr Materialinnovationen“ etc.).

Zudem sollte die Gesellschaft stärker dafür sensibilisiert werden, dass Ingenieure und Ingenieurinnen mit ihrer Arbeit die grundlegenden Bedürfnisse der Menschen sicherstellen, beispielsweise Gebrauchsgegenstände, Verkehrsinfrastrukturen und mobile Kommunikation. Dies geht einher mit der grundsätzlichen Notwendigkeit von besserer Bildung über alle MINT-Fächer hinweg.



- ¹ Bericht der Europäischen Kommission über die Kritikalitätsbewertung 2020, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>.
- ² Als Seltenerdelemente (Rare Earth Elements, REE) oder Seltene Erden wird eine Gruppe von 17 chemisch ähnlichen metallischen Elementen (15 Lanthanoide sowie Scandium und Yttrium) gezählt. Es sind jedoch nur 4 Seltenerdelemente, die für Permanentmagnete wichtig sind: Praseodym (Pr), Neodym (Nd), Terbium (Tb) und Dysprosium (Dy).
- ³ Für das Papier zu differenzieren sind: Metalle allgemein versus REE allgemein versus REE, die für Permanentmagnete relevant sind (Begriff „Permanentmagnete“ verwenden statt „Dauermagnete“)
- Rohstoffvorkommen versus Rohstoffförderung versus Raffinierung. Abhängigkeiten bestehen vor allem bei der letzteren.
 - Anteile bestimmten Länder an Förderung/Raffinierung versus Importquoten der EU.
- ⁴ Study on the EU's list of critical raw materials, 2020, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c0d5292a-ee54-11ea-991b-01aa75ed71a1/language-en>.
- ⁵ Critical Minerals Market Review 2023, Internationale Energieagentur (International Energy Agency, IEA, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c7716240-ab4f-4f5d-b138-291e76c6a7c7/CriticalMineralsMarketReview2023.pdf>.
- ⁶ Critical Minerals Data Explorer der Internationalen Energieagentur (International Energy Agency, IEA – eine autonome Einheit der OECD), <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/critical-minerals-data-explorer>.
- ⁷ Praseodymium (Pr), Neodymium (Nd), Terbium (Tb) und Dysprosium (Dy).
- ⁸ Rohstoffsituation der bayerischen Wirtschaft, 2023, https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2023/Downloads/231211_Rohstoffstudie_final.pdf.
- ⁹ Mobilisierung der Kreislaufwirtschaft für energieintensive Materialien, 2022, https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_02_EU_CEAP/A-EW_256_Mobilisierung-Kreislaufwirtschaft_exec-sum_DE_WEB.pdf.
- ¹⁰ Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken, 2020, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474>.
- ¹¹ Y. Fujita, S. K. McCall, D. & Ginosar, Recycling rare earths: Perspectives and recent advances. MRS Bulletin 47, 283–288 (2022), <https://link.springer.com/article/10.1557/s43577-022-00301-w>.
- ¹² K. Binnemans, P.T. Jones, B. Blanpain, T. Van Gerven, Y.X. Yang, A. Walton, M. Buchert, J. Clean. Prod. 51, 1 (2013), <https://doi.org/10.1016%2Fj.jclepro.2012.12.037>.
- ¹³ R. Eggert, C. Wadia, C. Anderson, D. Bauer, F. Fields, L. Meinert, P. Taylor, Ann. Rev. Environ. Resour. 41, 199 (2016), <https://doi.org/10.1146%2Fannurev-environ-110615-085700>.
- ¹⁴ S.M. Jowitt, T.T. Werner, Z. Weng, G.M. Mudd, Curr. Opin. Green Sustain. Chem. 13, 1 (2018), <https://doi.org/10.1016%2Fj.cogsc.2018.02.008>.
- ¹⁵ G. Gaustad, E. Williams, A. Leader, Resour. Conserv. Recycl. 167, 105213 (2021), <https://doi.org/10.1016%2Fj.resconrec.2020.105213>.
- ¹⁶ Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials (IMRAM), <https://www2.tagen.tohoku.ac.jp/en/research/>.
- ¹⁷ KU Leuven, http://www.kuleuven.be/research/excellence/materials_energy/binnemans.html.
- ¹⁸ Critical Materials Innovation Hub, <http://cmi.ameslab.gov>.
- ¹⁹ European Environment Agency (EEA) Report 13/2023 „Accelerating the circular economy in Europe: State and outlook 2024“.
- ²⁰ Bei einem hohen Gehalt an Kunststoff, homogenem Edelmetallbezug erfolgt die Rückgewinnung des Edelmetalls mithilfe einer aus mehreren Komponenten bestehenden Säurelösung. Mit elektrochemischen Methoden können die zum Teil mit inhomogenem Bezug versehenen, edelmetallhaltigen Abfälle mit niedrigem Plastikgehalt (evtl. plastikfrei) gut behandelt werden. ([Rückgewinnung von Edelmetallen, Edelmetall Recycling | Goldwater Recycling GmbH](#)).
- ²¹ In kommerzieller Anwendung: [Biorefineries \(mint.bio\)](#); Forschung z.B.: [Nachhaltig und wirtschaftlich: Neue Methode zum Recycling von Gold aus Elektroschrott \(analytik.news\)](#).
- ²² [Goldgrube im Schrotthaufen | Handelszeitung](#).
- ²³ UNEP (2011), Recycling Rates of Metals – A Status Report. A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel. Graedel, T.E; Allwood, J; Birat, J-P; Reck, B.K; Sibley, S.F; Sonnemann, G; Buchert, M; Hagelüken, C., Seite 16.
- ²⁴ d. h. der Prozentsatz eines Metalls in Abfällen, der tatsächlich recycelt wird.
- ²⁵ d.h. der Anteil des Altschrotts am gesamten Schrottstrom.
- ²⁶ Daten der CONVERGIO Market & Strategy GmbH, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle>, https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf.
- ²⁷ Synopsis report on the consultation on the policy framework on biobased, bio-degradable and compostable plastic, 2022, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/85ed8b1e-705d-11ed-9887-01aa75ed71a1/language-en>.
- ²⁸ Synopsis report on the consultation on the policy framework on biobased, bio-degradable and compostable plastic, 2022, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/85ed8b1e-705d-11ed-9887-01aa75ed71a1/language-en>.



-
- ²⁹ Communication – EU policy framework on biobased, biodegradable and compostable plastics, 2022, https://environment.ec.europa.eu/publications/communication-eu-policy-framework-biobased-biodegradable-and-compostable-plastics_en.
- ³⁰ Carbon Border Adjustment Mechanism, https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en.
- ³¹ IW-Report 64/2023, https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Report/PDF/2023/IW-Report_2023_Nachhaltigkeit-Wertsch%C3%B6pfungsketten.pdf.
- ³² Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle, <https://eur-lex.europa.eu/DE/legal-content/summary/packaging-and-packaging-waste.html>.
- ³³ European Green Deal: Putting an end to wasteful packaging, boosting reuse and recycling, https://ec.europa.eu/commis-sion/presscorner/detail/en/ip_22_7155.
- ³⁴ European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste, <http://data.europa.eu/eli/dir/1994/62/oj>.
- ³⁵ European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, European bioeconomy policy – Stocktaking and future developments – Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Publications Office of the European Union, 2022, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/997651>.
- ³⁶ European Commission, Communication on Advanced Materials for Industrial Leadership, 2024, https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/chemicals-and-advanced-materials/advanced-materials-industrial-leadership_en.
- ³⁷ Rahmenbedingungen für eine zirkuläre Wirtschaft Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie, Bundesregierung, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/kreislaufwirtschaftsstrategie-2323390>.
- ³⁸ Deponierung und Lagerung, Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/entsorgung/deponierung-lagerung>.
- ³⁹ Plastikmüll – Wie Kunststoff-Recycling in Deutschland besser werden könnte, Deutschlandfunk, 2023, <https://www.deutschlandfunk.de/kunststoff-recycling-in-deutschland-100.html>.
- ⁴⁰ Kunststoffabfälle – Unterschiede bei der stofflichen Verwertung, Umweltbundesamt, 2023, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#unterschiede-bei-der-stofflichen-verwertung>.
- ⁴¹ Plastikmüll – Wie Kunststoff-Recycling in Deutschland besser werden könnte, Deutschlandfunk, <https://www.deutschlandfunk.de/kunststoff-recycling-in-deutschland-100.html>.
- ⁴² Daten der CONVERSIO Market & Strategy GmbH, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfael>.
- ⁴³ Innovationsindikator, Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI), <https://innovationsindikator.bdi.eu>.
- ⁴⁴ Wichtige Chemikalie erstmals auf Basis von Biomasse, Covestro AG, <https://www.covestro.com/de/sustainability/flagship-solutions/bio-anilin>.
- ⁴⁵ Studierende: Deutschland, Semester, Nationalität, Geschlecht, Studienfach (Tabelle 21311-0003), Statistisches Bundesamt, 2023, <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/table/21311-0003/>.
- ⁴⁶ Hauptberufliches wissenschaftliches und künstlerisches Personal an Hochschulen: Deutschland, Jahre, Lehr- und Forschungsbereiche nach Fächergruppen, Geschlecht (Tabelle 21341-0002), Statistisches Bundesamt, 2023, <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/21341/table/21341-0002>.

Impressum

Herausgeber

Rat für technologische Souveränität, beauftragt vom BMBF

Mitglieder des Rats für technologische Souveränität

Dr. Viola Bronsema

Prof. Dr. Oliver Falck

Prof. Dr. Svenja Falk

Dr. Tim Gutheit

Dr.-Ing. Christina Hack

Dr.-Ing. Stefan Joeres

Prof. Dr. Elsa Andrea Kirchner

Prof. Dr.-Ing. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Hans Schotten

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Federführende Autorinnen dieses Papiers

Marion Merklein, Christina Hack, Viola Bronsema

Zitierhinweis

Rat für technologische Souveränität (2025): Positionspapier „Materialforschung“

Redaktion

DLR Projektträger

Gestaltung

DLR Projektträger

Januar 2025

Kontakt

DLR Projektträger

Gesellschaft, Innovation, Technologie

Strategien für Schlüsseltechnologien

pt-ts@dlr.de

