

acatech POSITION

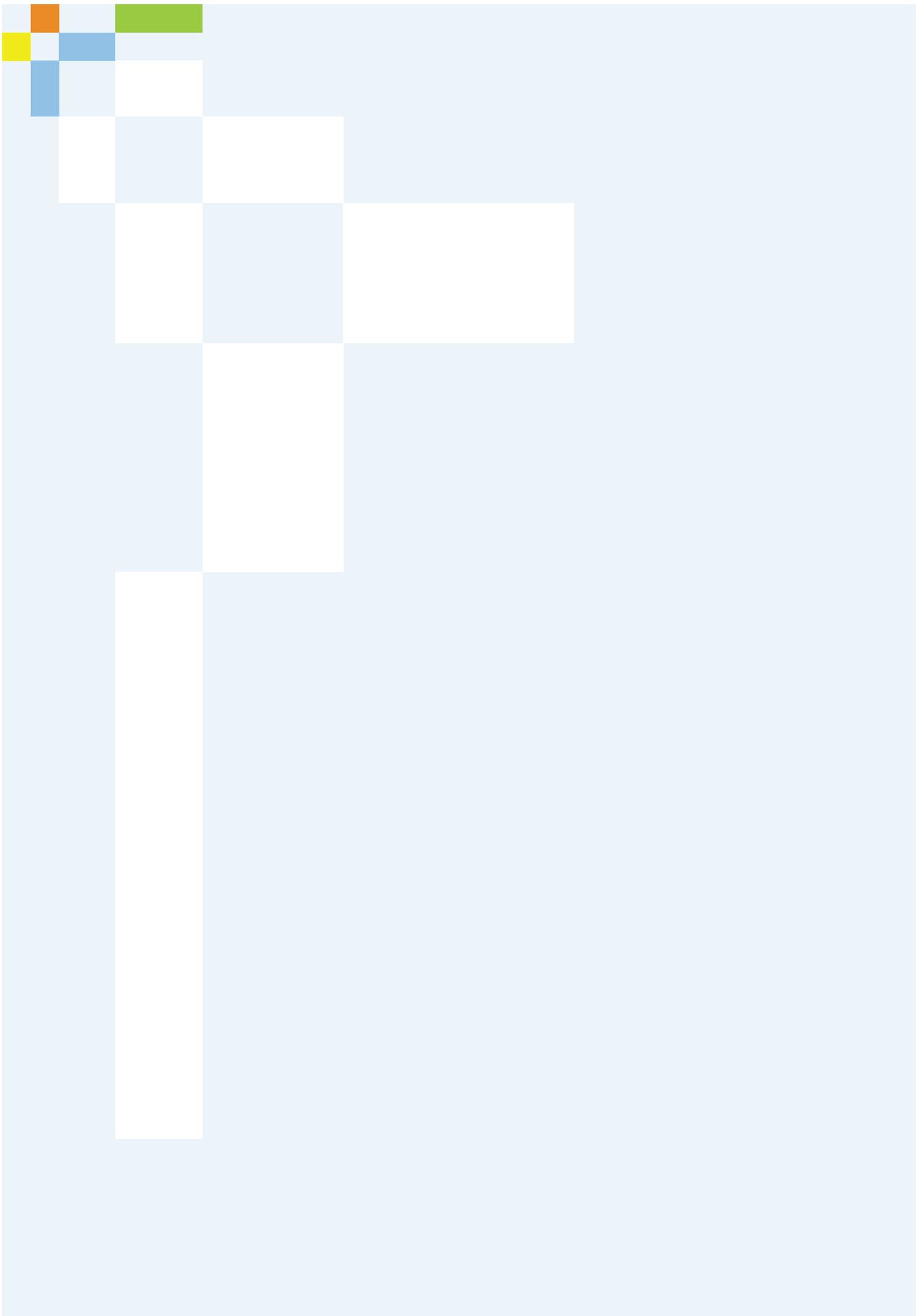
# Rahmenbedingungen für die Zukunft der Werkstoffe

Analyse und Handlungsempfehlungen

acatech (Hrsg.)

 acatech

DEUTSCHE AKADEMIE DER  
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



acatech POSITION

# Rahmenbedingungen für die Zukunft der Werkstoffe

Analyse und Handlungsempfehlungen

acatech (Hrsg.)



## Die Reihe acatech POSITION

In dieser Reihe erscheinen Positionen der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften zu technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Die Positionen enthalten konkrete Handlungsempfehlungen und richten sich an Entscheidungsträger in Politik, Wissenschaft und Wirtschaft sowie die interessierte Öffentlichkeit. Die Positionen werden von acatech Mitgliedern und weiteren Expertinnen und Experten erarbeitet und vom acatech Präsidium autorisiert und herausgegeben.

Alle bisher erschienenen acatech Publikationen stehen unter [www.acatech.de/publikationen](http://www.acatech.de/publikationen) zur Verfügung.

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>7</b>
<b>Projekt</b>	<b>11</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>12</b>
<b>2 Betrachtete Rahmenbedingungen für Werkstoffe im Überblick</b>	<b>13</b>
2.1 Regulierung: Energiepreise, Rohstoffpreise und Emissionshandel	13
2.2 Versorgungssicherheit: Verfügbarkeit von Rohstoffen	13
2.3 Nachhaltigkeit: Recycling, Materialeffizienz, Kreislauffähigkeit	14
<b>3 Ausgewählte Werkstoffbranchen und -klassen und ihre Herausforderungen</b>	<b>16</b>
3.1 Stahl	16
3.2 Nichteisenmetalle: Aluminium und Kupfer	18
3.3 Kunststoffe	21
3.4 Glas	24
3.5 Beton, Zement, Steine	26
3.6 Verbundwerkstoffe: speziell kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe	28
3.7 Funktionswerkstoffe	29
<b>4 Handlungsempfehlungen</b>	<b>31</b>
<b>Literatur</b>	<b>35</b>



## Vorwort

Neue oder verbesserte Werkstoffe – und zwar sowohl Strukturwerkstoffe als auch Funktionswerkstoffe – sind zur Bewältigung dringender Zukunftsfragen unerlässlich. Hierbei handelt es sich um Werkstoffe mit höchster Festigkeit und Temperaturbeständigkeit, um neuartige Legierungen, Stähle und Keramiken, um Magnetmaterialien und Supraleiter, aber auch um Materialien für Stromspeicher und Brennstoffzellen, für Organische und Nanoelektronik (Halbleiter), für Membranen und den Leichtbau (Faserverbundkunststoffe mit gesteigerter Faser-Matrix-Haftung) sowie um Biomaterialien (Biokompatibilität, also die Verträglichkeit mit Körperflüssigkeiten, Hart- und Weichgewebe), Sensormaterialien, Katalysatormaterialien und nicht zuletzt um bioinspirierte Werkstoffe (Werkstoffe mit biologischem Vorbild).

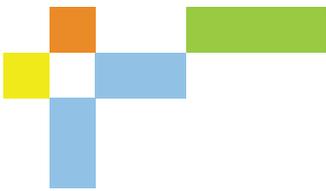
Die Abhängigkeit von der Entwicklung neuer Werkstoffe ist nicht für alle Technologiefelder einheitlich. Beispielsweise können schon graduelle Verbesserungen beim Leichtbau zu mehr Material- oder Energieeffizienz in etablierten Technologien führen. Dagegen ist die Fähigkeit zur Stromspeicherung im Bereich von Terawattstunden derzeit nicht vorhanden und ganz überwiegend von der Werkstoffentwicklung abhängig.

Forschung, Entwicklung und Produktion auf dem Gebiet der Werkstoffe unterliegen einer Reihe von Einflüssen beziehungsweise Rahmenbedingungen, die zum Teil fachlich begründet sind, zum Teil auf staatlichem Handeln beruhen. Für einen Teil der Rahmenbedingungen gilt, dass die Kräfte des Marktes in der Lage sind, die Werkstoffentwicklung auf effiziente Weise zu steuern, ohne dass ein besonderer politischer Handlungsbedarf besteht. Andererseits gibt es Rahmenbedingungen (zum Beispiel Energiekosten), die einen dringenden Handlungs- und Koordinierungsbedarf verlangen.

- Eine exportorientierte, industriebasierte Volkswirtschaft wie Deutschland ist auf den freien Welthandel mit Rohstoffen aller Art angewiesen. Ökonomische Verknappung oder politische Eingriffe sind jedoch jederzeit möglich und erfordern Vorsorgemaßnahmen. Dazu gehören die Steigerung der Materialeffizienz und damit die Reduktion der Ressourcenverwendung und die Entwicklung von Substitutionspotenzialen. Die zunehmend kritische Verfügbarkeit primärer und sekundärer Ressourcen beeinflusst schon heute gegenwärtige und künftige Entwicklungen insbesondere von modernen Funktionsmaterialien und den daraus resultierenden Technologien.

- Trotz der Arbeitsteilung in der Weltwirtschaft und stark unterschiedlicher Kostenstrukturen in den Weltregionen gibt es in Deutschland eine bedeutende Werkstoffproduktion – vielfach aus importierten Rohstoffen. Die ausschlaggebende Rolle der Werkstoffe besteht in der Wertschöpfungskette des produzierenden Gewerbes. Mit der Werkstoffentwicklung gehen jedoch auch Innovationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette einher. Daher ist es wichtig, dass die Werkstoffentwicklung in Deutschland eine Zukunft hat.
- Der Anteil der Energiekosten, insbesondere der Stromkosten, an den Gesamtkosten von Werkstoffen ist höchst unterschiedlich. Politisch festgelegte Energiepreise haben daher einen verzerrenden Einfluss auf den Wettbewerb der Werkstoffe, bis hin zur Einstellung der Produktion im Inland (besonders für die Reduktion von oxidischen Erzen, für Schmelz- und Trennprozesse).
- Recyclinggerechte Werkstoffwahl und recyclinggerechtes Konstruieren wird für alle Produktionstechnologien an Bedeutung gewinnen. Eine ganzheitliche Betrachtung der Werkstoffe unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten wird daher zunehmend wichtig.
- Das Streben nach Energie- und Materialeffizienz ist eine beständige Triebkraft für den Leichtbau. Erkenntnisse aus bioinspirierter Materialforschung (Nanostrukturen, zelluläre Strukturen, Verbundmaterialien, maßgeschneiderte Strukturen) oder aus der Luft- und Raumfahrt können ebenfalls einen Beitrag leisten.
- Werkstoffe sind eine wesentliche Voraussetzung für die Digitalisierung. Die Integration von Werkstoffen mit moderner Informations- und Kommunikationstechnik schafft neue Baugruppen (Sensoren, RFID, adaptive Elemente, zum Teil in stark miniaturisierter Ausführung) für Konsumprodukte aller Art, aber auch für die Produktionstechnik.
- Moderne Funktions- und Konstruktionswerkstoffe sind in einem vergleichsweise hohen Maß forschungsbasiert. Eine enge Kopplung der Forschungslabors mit der Wirtschaft wird in Zukunft mehr und mehr zu einem Wettbewerbsvorteil.

Die Wettbewerbsfähigkeit und die Innovationskraft der deutschen Wirtschaft, insbesondere der produzierenden Industrie, ist maßgeblich von der Verfügbarkeit geeigneter Werkstoffe für konventionelle und neue Anwendungen abhängig. Neue oder verbesserte Werkstoffe – und zwar sowohl Strukturwerkstoffe als auch Funktionswerkstoffe – sind zur Bewältigung dringender Zukunftsfragen unerlässlich. Da das Thema Werkstoffe ein Querschnittsthema darstellt und Werkstoffe am Anfang der Wertschöpfungskette und damit im Zentrum des Wertschöpfungsnetzwerks stehen, ist das Wertschöpfungspotenzial



erheblich. Folglich ist die Systemrelevanz hoch und Handlungsbedarf kontinuierlich gegeben.

Die hohe Bedeutung der Werkstoffe und ihre zukünftige Entwicklung werden in allen Industrie- und Schwellenländern gesehen. Die europäischen Staaten, besonders Großbritannien, aber auch die Vereinigten Staaten von Amerika, Japan, Südkorea und China haben dem durch Förderprogramme, Stellungnahmen und Positionspapiere Rechnung getragen. Moderne Werkstoffe sind für die Zukunft unserer Wirtschaft existenziell. Durch eine stärkere staatliche Unterstützung der Forschung, Entwicklung und Produktion moderner Werkstoffe in Abstimmung mit der Anwendung kann Deutschland im Bereich der Zukunftstechnologien Vorreiter sein.

Bei konsumentennahen Anwendungen (PKW, Handy, Internet, etc.) fehlt in der Öffentlichkeit oftmals das Verständnis für die Werkstoffinnovationen, die hinter diesen Anwendungen stehen. Daher wird auch von der Politik die Bedeutung der Werkstoffe einschließlich der Werkstoff- und Produktionstechnik oft nicht in gebührendem Maße wahrgenommen. Um dies zu ändern, ist stetiger Aufklärungsbedarf gegeben, der auch der Industrie zugutekommen würde.

Die Entwicklung der modernen Industriegesellschaft zeigt, dass ein Wettbewerb zwischen den Werkstoffen ein wesentlicher Treiber für Innovationen in allen Sektoren der Wirtschaft ist. Diesen Wettbewerb auf faire und ergebnisoffene Weise möglich zu machen, ist daher die wichtigste Empfehlung an die Politik; Wirtschaft und Wissenschaft sind aufgefordert, ihren Beitrag dazu zu leisten.

**Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath**  
Präsident acatech

**Prof. Dr.-Ing. Christina Berger**  
Technische Universität Darmstadt,  
Institut für Werkstoffkunde

**Prof. Dr. habil. Manfred Hennecke**  
Bundesanstalt für Materialforschung und  
-prüfung (BAM)

# Zusammenfassung

Quasi alle Produkte – quer durch sämtliche Branchen – hängen von maßgeschneiderten innovativen und klassischen Materialien und Werkstoffen ab. acatech hat die gesetzlichen Rahmenbedingungen und die Situation der wichtigsten klassischen Werkstoffklassen für den Standort Deutschland analysiert. Das Fazit ist: Deutschland muss auf einen effizienteren Einsatz von Energie, Materialien und Werkstoffen hinarbeiten und Kreisläufe schließen. Dabei muss die Balance zwischen den unverzichtbaren Materialien für die moderne Gesellschaft und dem Schutz von Mensch, Gesundheit und Umwelt weiterhin faktenbasiert und kontinuierlich auch in den politischen Prozessen diskutiert werden. Aus diesem Ergebnis leiten sich die nachfolgenden Empfehlungen an Politik, Wissenschaft und Wirtschaft ab. Sie zielen auf einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen im Sinne einer Circular Economy.

## Die Rahmenbedingungen im Überblick

### Regulierungen: Energiepreise, Rohstoffpreise und Emissionshandel

Die Werkstoffindustrie ist einer der energieintensivsten Industriezweige in Deutschland. Forschung und Industrie haben in der Vergangenheit große Anstrengungen unternommen, die Produktion von Werkstoffen energieeffizienter zu gestalten. Größten Einfluss auf die internationale Wettbewerbsfähigkeit dieser Branchen haben insbesondere das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und das EU-Emissionshandelssystem (EU-ETS).

### Versorgungssicherheit: Verfügbarkeit von Rohstoffen

Deutschland ist ein rohstoffarmes Land: Mit Ausnahme der Glasindustrie und der Zement- und Betonhersteller – Steine, Sand und Kies sind als Ausgangsstoffe vor Ort verfügbar – hängen alle anderen Werkstoffbranchen von Rohstoffimporten ab. Werden außerdem Güter, aber auch Altgeräte und Schrott exportiert, bleiben die verarbeiteten Werkstoffe im Ausland und können nicht im Inland recycelt und wiederverwendet werden.

### Nachhaltigkeit: Recycling, Materialeffizienz, Kreislauffähigkeit

Nachhaltigkeit, Material- und Energieeffizienz sind sowohl bei der Herstellung als auch bei der Anwendung der verschiedenen

Werkstoffe wichtig. Im Sinne eines nachhaltigen Life-Cycle-Managements sind außerdem die Lebensdauer sowie die Reparatur- und Recyclingfähigkeit von Produkten entscheidend.

## Die Situation ausgewählter Werkstoffklassen

### Stahl

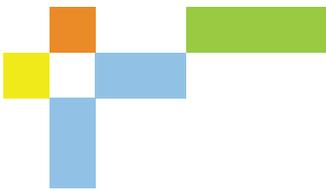
Die Eisen- und Stahlindustrie ist ein vergleichsweise energieintensiver Industriezweig und zählt somit auch zu den weltweit größten CO<sub>2</sub>-Emittenten. Daher ist ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit eng an Strompreise und Umweltauflagen gebunden. Aufgrund technischer Grenzen, welche weitere Prozessoptimierungen bei der Herstellung in naher Zukunft unwahrscheinlich machen, sind Ausnahmeregelungen und Belastungsbegrenzungen bei Energieumlagen und -abgaben für die Stahl- und Eisenindustrie nach wie vor wichtig. Höhere CO<sub>2</sub>-Einsparungen sieht die Branche vor allem bei der Entwicklung und Anwendung neuartiger Stähle.

### Nichteisenmetalle: Aluminium und Kupfer

Aluminium und Kupfer werden an der London Metal Exchange gehandelt und unterliegen dementsprechend einem harten globalen Wettbewerb. Die Preise werden hauptsächlich vom Strompreis getrieben. Ohne Privilegierung für deutsche Aluminiumhersteller hätten allein die Stromkosten den Marktpreis von Aluminium überschritten. Die Energiewende wird von Branchenvertretern daher als Herausforderung begriffen. Da die Ausgangsmaterialien sowohl für Kupfer als auch für Aluminium importiert werden müssen, hängt die Handlungsfähigkeit von den Rohstoffpreisen ab.

### Kunststoffe

Für die gesamte Grundstoffchemie stellt die Energiewende eine Herausforderung dar. Aktuell greifen zahlreiche Betriebe auf Stromkostenkompensationen zurück, doch ist es fraglich, ob auch künftig eine Befreiung von der EEG-Umlage möglich sein wird. Neben den hohen Energiepreisen sorgen sich Branchenvertreter um die Sicherheit der Energieversorgung und der Versorgung mit Kunststoff. Es wird daher die Bedeutung des Wechsels von der Erdöl- zur biobasierten Chemie hervorgehoben.



## Glas

Besonders energieintensive Unternehmen der Glasindustrie sind teilweise von der EEG-Umlage sowie von Netzentgelten befreit und können durch die Carbon-Leakage-Kriterien beim Emissionshandel sparen. Eine Senkung der Treibhausemissionen seitens der Glasindustrie ist aus physikalisch-technischen Gründen nicht möglich. Ein großes Plus gibt es bei der Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit: Primärrohstoffe (Quarzsand) sind in Deutschland reichlich vorhanden. Durch das hundertprozentige Recycling ohne Qualitätsverluste steht auch Recyclingglas als Sekundärrohstoff ausreichend zur Verfügung.

## Beton, Zement, Steine

Die Zementindustrie benötigt zum einen große Mengen an Brennstoffen, zum anderen wird beim Brennen des Rohstoffgemischs viel CO<sub>2</sub> freigesetzt. Die Zementindustrie erhält zwar eine Zuteilung kostenfreier Zertifikate im Europäischen Emissionshandel. Sollte der Carbon-Leakage-Schutz ab 2020 jedoch schwächer ausfallen, könnte das eine Verlagerung der Produktion ins außereuropäische Ausland mit sich bringen. Neuartige Zemente, Bindemittel und Baustoffe wie kohlenstofffaserverstärkter Beton können eine interessante sowie energie- und ressourcenschonende Alternative zu herkömmlichen Werkstoffen darstellen. Die Rohstoffversorgung ist gesichert, alle Rohstoffe der Zementbranche werden überwiegend in Deutschland gefördert.

## Verbundwerkstoffe – speziell kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe

Im Vergleich zu anderen, konkurrierenden Materialien hat die Kohlenstofffaserherstellung einen höheren Energiebedarf. Durch die Subventionierung der Energiepreise von wettbewerbenden Branchen wie Aluminium hat die Kohlenstofffaserbranche einen Wettbewerbsnachteil. Allerdings steht die Branche erst am Anfang ihrer Entwicklung; in den letzten zehn Jahren konnte der Energieverbrauch während der Kohlenstofffaserherstellung bereits um fünfzig Prozent reduziert werden. Neue Technologien, Materialien, Berechnungen und Verfahren lassen weitere enorme Sprünge in Bezug auf die Energieeinsparung in der Zukunft vermuten.

## Funktionswerkstoffe

Funktionswerkstoffe sind eine heterogene Gruppe von Materialien mit beispielsweise besonderen elektrischen, magnetischen, akustischen, optischen oder biologisch-chemischen Eigenschaften. Funktionswerkstoffe sind Schlüsselkomponenten für Energiespeicher-, Energiewandler- und Energietransportapplikationen

inklusive Smart Grid. Rohstoffe wie seltene Erden kommen weltweit an verschiedenen Stellen vor, der Markt wird aber von China dominiert. Die Importabhängigkeit Deutschlands von Strategiemetallen liegt in der Regel bei einhundert Prozent.

## Die Handlungsempfehlungen im Überblick

### 1. Voraussetzungen für einen fairen Innovationswettbewerb der Werkstoffbranche schaffen

Nationale oder europäische Regelungen, zum Beispiel beim Emissionshandel, bei umweltbezogenen Grenzwerten oder bei den Strompreisen, dürfen die deutsche Werkstoffbranche in ihrer internationalen ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit nicht gefährden. Im Rahmen des Emissionshandels und der steigenden Energiepreise durch die EEG-Umlage bleibt die Werkstoffbranche weiterhin auf Ausnahmeregelungen angewiesen. Diese sollen vermeiden, dass die werkstoffherzeugende Industrie in Länder abwandert, die günstiger und häufig zu schlechteren Bedingungen für Klima, Umwelt und Gesundheit produzieren können. Für einen fairen Innovationswettbewerb braucht die Werkstoffbranche nicht nur Ausnahmen bei der EEG-Umlage, es muss auch gewährleistet sein, dass nicht mehr CO<sub>2</sub>-Zertifikate auf dem Markt sind, als benötigt werden.

### 2. Kreisläufe schließen und Rückgewinnung aus Schrott und Altprodukten im Sinne der Circular Economy verbessern

Schrott und Altprodukte, die im Inland anfallen, leisten einen erheblichen Anteil an der Produktion von Neuware. Dieser Anteil lässt sich steigern, wenn die Rückführung in den Ressourcen- und Materialkreislauf verbessert wird. Insbesondere bei kritischen Roh- und Werkstoffen, deren Versorgungssicherheit in Deutschland gefährdet ist, können Ausfuhrbeschränkungen von Schrott und funktionsfähigen Altprodukten notwendig werden. Die Endlagerung von Rohstoffen in Halden oder in der Asche von Verbrennungsanlagen mit ökonomisch vertretbarem Aufwand nicht rückgängig zu machen, ist ökologisch, ökonomisch und mit Blick auf die wachsende Abhängigkeit Deutschlands von Rohstoffen nicht vertretbar. Hier sollte mehr in Forschung investiert werden, um diese Verluste so weit wie möglich zu verringern. Ein ethischer Aspekt kommt hier ebenfalls zum Tragen: Deutschland exportiert Altprodukte und Abfälle in Entwicklungsländer, die dort unter Gefahren für Gesundheit und Umwelt zerlegt und recycelt werden. Andererseits wird durch die

Ausfuhr funktionstüchtiger Produkte deren Lebens- und Nutzungsdauer häufig verlängert.

### 3. **Ökodesign-Richtlinie auf den gesamten Lebenszyklus anwenden**

Gegenwärtig steht bei der Anwendung der Ökodesign-Richtlinie der Energie- und Materialverbrauch von Produkten bei der Erzeugung und in der ersten Nutzungsphase im Vordergrund. Beim Gesamtenergie- und -materialverbrauch sind jedoch die Lebensdauer, Reparaturfähigkeit und die Recyclingfähigkeit ebenso entscheidend. Auch die Standardisierung von Schnittstellen, zum Beispiel bei der Stromversorgung und bei Steckverbindungen aller Art, ist entscheidend für die Effizienz des Material- und Ressourceneinsatzes – häufig landet heute mit dem defekten Gerät auch das funktionstüchtige Netzteil im Müll. Eine auf den gesamten Lebenszyklus ausgerichtete Ökodesign-Richtlinie muss von der Politik auf Basis materialwissenschaftlicher Evidenz weiterentwickelt werden. Der dafür bestehende Forschungsbedarf wird in der Handlungsempfehlung 7 benannt.

### 4. **Ökodesign-Richtlinie auf alle Branchen ausweiten**

Ein nachhaltiges Life-Cycle-Management von Produkten erfordert, dass alle Mitspieler einer Produktentwicklung an einem Strang ziehen. Nur so entsteht die Basis dafür, dass sich Material- und Ressourcenkreisläufe schließen. Das ist nur möglich, wenn die Grundidee der Ökodesign-Richtlinie auf alle Branchen ausgeweitet wird. Im Moment werden Transportmittel jeglicher Art von der Ökodesign-Richtlinie ausgeklammert. Diese Ausnahmen für Kraftfahrzeuge, Eisenbahnen, Flugzeuge, Schiffe sind auf ihre Berechtigung zu überprüfen.

### 5. **Geplante Regulierungen auf Zielkonflikte analysieren und gegebenenfalls revidieren**

Einige Richtlinien und Regularien lösen Zielkonflikte aus. Ein Beispiel ist der Zielkonflikt zwischen der Materialeinsparung durch immer kleinere Geräte und der Effizienz des Materialeinsatzes: Bei der Miniaturisierung von Bauteilen, zum Beispiel bei Elektrogeräten, wird zwar Material gespart. Allerdings erhöht sich durch die Vielfältigkeit der eingesetzten Werkstoffe auf immer engerem Raum die Komplexität der Produkte. Der Gehalt der einzelnen Materialien wird dermaßen gering, dass ein Recycling solcher Bauteile unrentabel oder sogar unmöglich wird.

Solche Zielkonflikte muss eine verstärkte Forschung und Entwicklung frühzeitig aufdecken. Weitere Konflikte bestehen gerade an der Schnittstelle zwischen dem Chemikalien-, Produkt- und Abfallrecht. So ist der Einsatz von recycelten Kunststoffen zum Beispiel in Lebensmittelverpackungen eingeschränkt. Regulierungen, die Zielkonflikte auslösen und ihr Ziel nicht erreichen, sollten vermieden beziehungsweise überdacht und gegebenenfalls zurückgenommen werden. Derartige Zielkonflikte sind nur durch politische Entscheidungen zu lösen.

### 6. **Durchgängige und konsequente Digitalisierung von Materialwissenschaft und Werkstofftechnik vorantreiben und etablieren**

Die Werkstoffentwicklung ist einerseits wesentlich für die Digitalisierung. Schon die Entwicklung immer kleinerer und leistungsfähiger Chips wäre ohne sie undenkbar. Die Digitalisierung verbessert andererseits auch die Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. Digitale Datenbanken und Simulationen vereinfachen die Suche nach geeigneten Werkstoffen für spezifische Anwendungen und beschleunigen die Entwicklung neuer Werkstoffe. Daher ist für die Werkstoffforschung eine durchgängige Digitalisierung der Werkstoffe nötig – entlang der Wertschöpfungskette von der Forschung bis zum Produkt und zum Recycling.

### 7. **Forschung zu Recyclingverfahren intensivieren und stärker fördern**

Das Recycling von Werk- und Rohstoffen erfordert eine bessere Kooperation zwischen Werkstoffforschung und Produktentwicklung (siehe auch Empfehlung 8). Besonders wichtig wird diese Zusammenarbeit für Metalle aus Dünnschichttechnologien, wie Indium, Gallium, Europium, Tantal, oder für einige Katalysatormetalle. Nur im Zusammenspiel von Werkstoffforschung und Produktentwicklung und mit Blick auf die Recyclingmethoden lassen sich Zielkonflikte vermeiden, wie sie in Empfehlung 3 und 5 beschrieben wurden. Zudem fehlen insbesondere für Funktionsmaterialien zumeist technisch und wirtschaftlich machbare Recyclingmethoden. Die Forschungsförderung sollte einen stärkeren Schwerpunkt auf diesen Aspekt legen. Insgesamt müssen Forschung, aber auch Politik einem systemischen Kreislaufgedanken im Sinne einer Circular Economy mehr Beachtung schenken. Zu berücksichtigen sind dabei auch mögliche Wechselwirkungen aus der Einstufung von Stoffen gemäß dem Produktrecht mit Folgen für das Abfallrecht und das Recycling.



## 8. Werkstoff – Konstruktion – Fertigung: interdisziplinäres Arbeiten ausbauen und Lücke zwischen Materialentwicklung und fertigem Produkt schließen

Die Forschungsförderung in Deutschland zur (Weiter-)Entwicklung von klassischen und neuen Werkstoffen ist insgesamt gut aufgestellt. Eine ausgeprägte interdisziplinäre Forschung zwischen Werkstoffentwicklung, Produktentwicklung und Fertigungstechnologie muss das Förderziel sein und bleiben. Jedes Bauteil benötigt Werkstoffe, Konstruktion und Fertigung. Die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands leidet, wenn einer dieser Bestandteile vernachlässigt wird. Die notwendige Durchgängigkeit zwischen Grundlagenforschung und angewandter Entwicklung erfordert je nach Zielstellung längere Projektlaufzeiten. Ebenso sind Pilotprojekte an Hochschulen und Forschungseinrichtungen wichtig, die Entwicklung von Demonstratoren, die Einrichtung von Innovation-Labs sowie die vermehrte Durchführung von Validierungsprojekten. Förderprogramme, Förderstellen und Projektträger sollten diesem Bedarf Rechnung tragen.

## 9. Mehr Mut zu innovativen Werkstoffen

Neue, innovative Werkstoffe werden von Unternehmen oft zögerlich eingesetzt, weil damit häufig ein hohes ökonomisches Risiko einhergeht sowie Normen und Standards verändert werden müssten. Außerdem erfordern sie häufig markante Umstellungen im eigenen Betrieb: Beispielsweise ändern sich der etablierte Produktionsprozess, die Verarbeitung der Produkte, die

Arbeitsorganisation. Über Jahre aufgebaute Kompetenzen werden plötzlich hinfällig, neue müssen erlernt werden. Ein Beispiel dafür ist der Einsatz von innovativen Glasfaserleitungen für die Telekommunikation: Für die Unternehmen war es kurzfristig betrachtet günstiger, wie gewohnt klassische Kupferleitungen zu verlegen – neue Arbeitsabläufe, neue Geräte oder neue Kompetenzen bei Mitarbeitenden waren dafür nicht nötig. Heute liegt darin eine Ursache des schleppenden Netzausbaus in Deutschland. Daher erfordert es Mut von Unternehmen, innovative Werkstoffe schneller in die Umsetzung zu bringen. Dafür ist eine stärkere Zusammenarbeit zwischen Forschung und Anwendung nötig, die Politik sollte die nötigen Anreize in öffentlichen Infrastrukturprojekten setzen.

## 10. Wirksamer und zielorientierter kommunizieren

Ohne innovative Werkstoffe und Materialien gibt es keine innovativen Produkte. Werkstoffinnovationen sind oft wenig sichtbar, aber unverzichtbar. Vor allem bei klassischen Werkstoffen wie Stahl oder Glas werden innovative Entwicklungen von der Öffentlichkeit und Politik kaum wahrgenommen. Häufiger geraten Werkstoffe in Negativschlagzeilen – beispielsweise Dämmmaterialien bei Hausbränden oder Plastikmüll. Verbände und Unternehmen, aber auch Fachkräfte sollten „ihre“ Werkstoffe und Materialien und deren positive Eigenschaften und Innovationspotenzial stärker kommunizieren und zugleich im gesellschaftlichen und politischen Dialog auf eine effizientere Verwendung im Sinne der Circular Economy hinwirken.

# Projekt

## Projektleitung

- Prof. Dr.-Ing. Christina Berger, Technische Universität Darmstadt
- Prof. Dr.-Ing. Volker Altstadt, Universität Bayreuth

## Projektgruppe

- Prof. Dr. Manfred Hennecke, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
- Prof. Dr. Hartwig Höcker, RWTH Aachen
- Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens, Technische Universität Dresden
- Dr.-Ing. Peter Dahlmann, Stahlinstitut VDEh
- Prof. Dr.-Ing. Oliver Gutfleisch, Technische Universität Darmstadt
- Prof. Dr.-Ing. Reiner Kopp, RWTH Aachen

## Weitere Expertinnen und Experten

- Prof. Dr. Roland Döhrn, RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
- Prof. Dr. Martin Gornig, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung DIW
- Alexander Gundling, Carbon Composites e.V.
- Jens Romeike, Verein Deutscher Zementwerke e.V.
- Dr. Michael Effing, Composites Germany/Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.
- Franziska Erdle, Wirtschaftsvereinigung Metalle

- Dr. Johann Overath, Bundesverband Glasindustrie e.V.
- Dr. Martin Reuter, Verband der Chemischen Industrie e.V.
- Dr. Matthias Simon, Gesamtverband der Deutschen Buntmetallindustrie
- Dr. Rüdiger Baunemann, PlasticsEurope Deutschland e.V.
- Dr. Oliver Möllenstädt, Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V.
- Dr. Elmar Witten, AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.
- Prof. Dr. Tobias Melz, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

## Externe Gutachterinnen und Gutachter

- Prof. Dr. Wolfgang Kaysser, Helmholtz-Zentrum Geesthacht
- Prof. Dr. Rudolf Stauber, Fraunhofer-Institut für Silicatformung ISC
- Prof. Dr. Kurt Wagemann, DECHEMA

## Projektkoordination

- Dr. Martina Kohlhuber, acatech Geschäftsstelle

## Mitarbeit und Redaktion

- Birgit Obermeier, acatech Geschäftsstelle
- Alrun Straudi, acatech Geschäftsstelle
- Lev Milstein, acatech Geschäftsstelle

Projektlaufzeit 06/2016 - 05/2019

Finanzierung durch acatech Förderverein



# 1 Einleitung

Werkstoffe und Materialien sind aus unserem Leben nicht wegzudenken. Alle Produkte bestehen faktisch aus Werkstoffen. Dabei werden sowohl die klassischen Werkstoffe als auch die innovativen Materialien gleichermaßen benötigt. Zu den klassischen Werkstoffen gehören Metalle und Metalllegierungen, Glas, Zement und Polymere. Daneben gibt es neuere Werkstoffentwicklungen wie Funktionswerkstoffe oder Verbundwerkstoffe, Halbleiter, Nanomaterialien oder Smart Materials. Intelligente Materialien und innovative Werkstoffe finden sich sowohl in alltäglich genutzten Technologien wie Smartphones und Computer, in Autos, Flugzeugen, Schiffen und Zügen, als auch in vielen anderen Bereichen, die unser Leben beeinflussen zum Beispiel in der Medizintechnik oder der Energiegewinnung. Durch die Entwicklung neuer Werkstoffe sollen einerseits die Lebensqualität gesteigert und neue Bauteilfunktionalitäten ermöglicht werden. Andererseits stärken innovative Materialien die deutsche Industrie – die Werkstoffe der Zukunft eröffnen vielfältige, neue Geschäftsfelder. Auch in der acatech internen Umfrage zu Zukunftsthemen steht das Thema Werkstoffe der Zukunft in puncto Wichtigkeit und Dringlichkeit auf Platz eins. Selbst die Digitalisierung erfasst mittlerweile auch die Material- und Werkstoffentwicklung und wird vor dem Hintergrund der immer häufiger diskutierten Life-Cycle-Analysen von Materialien und Produkten und deren Nutzung und Recycling einen immer höheren Stellenwert erlangen.

Bei den konventionellen Werkstoffen ist das technologische Potenzial zwar manchmal ausgeschöpft, ihr Einsatz aber sowohl für bisherige als auch für neue Anwendungen relevant. Hier geht es vor allem darum, diese bewährten Werkstoffe künftig nachhaltiger herzustellen und bisherige Produktionsprozesse umweltfreundlicher zu gestalten. Allerdings ist die Entwicklung, Herstellung und Anwendung von Werkstoffen – seien es klassische wie Stahl, Glas und Zement oder neue wie verschiedene Verbund- und Funktionswerkstoffe – an Rahmenbedingungen gebunden. Dazu gehören Regulierungen auf nationaler und europäischer Ebene wie Energiepreise, Rohstoffpreise und Emissionshandel, aber auch Regulierungen bezüglich Arbeits-, Umwelt- und Gesundheitsschutz.

Neben Regulierungen und Sicherheitsaspekten für Werkstoffe spielt auch die Versorgungssicherheit eine große Rolle, damit weitere Werkstoffinnovationen zustande kommen. Die Rahmenbedingungen für die Werkstoffe der Zukunft werden in der vorliegenden acatech POSITION erörtert. Dabei lag das Augenmerk auf den für Deutschland wirtschaftlich bedeutendsten Werkstoffen: Stahl und weiteren Nichteisenmetallen, Kunststoff, Glas, Zement. Außerdem werden bei den Verbundmaterialien als Beispiel kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe und im Bereich der Funktionswerkstoffe Materialien für die Energiegewinnung gesondert betrachtet.

## Ziele und Methodik

acatech befragte im Herbst 2016 die Verbände und weitere Expertinnen und Experten der Werkstoffbranchen Stahl, Nichteisenmetalle, Kunststoffe, Glas, Beton, Zement, Steine, Verbund- und Funktionswerkstoffe zu den Auswirkungen der verschiedenen Rahmenbedingungen. Die Auswahl an Werkstoffklassen ist dadurch auf die oben genannten beschränkt. Zielgruppe der Umfrage waren Verbände, um die breite Position der deutschen Werkstoffindustrie und weniger die Positionen von einzelnen Unternehmen abzubilden. Die Umfrage beinhaltete einen Online-Fragebogen und wurde bei Bedarf durch telefonische Interviews ergänzt. Zusätzlich wertete die Projektgruppe in einer Desk Research Positionspapier, Studien und Berichte von Unternehmen, Verbänden und aus der Forschung aus. Diese Auswertungen bilden die Grundlage für die Beschreibung der speziellen Herausforderungen der ausgewählten Werkstoffbranchen, die in Kapitel 3 dargestellt werden. Aus den Ergebnissen leitete acatech in einem Workshop gemeinsam mit Expertinnen und Experten aus Verbänden und von Wirtschaftsforschungsinstituten Handlungsbedarfe und Handlungsempfehlungen ab. Diese finden sich in Kapitel 4 und richten sich insbesondere an die Politik, aber auch an Forschung, Verbände und Unternehmen. Die vorliegende acatech POSITION soll dazu beitragen, die Bedeutung der Werkstoffe für die gesamte deutsche Wirtschaft publik zu machen, bestehende Rahmenbedingungen für die Werkstoffindustrie zu hinterfragen und Optionen für Verbesserungen bei künftigen Regulierungen aufzuzeigen.

## 2 Betrachtete Rahmenbedingungen für Werkstoffe im Überblick

In diesem Papier werden vor allem die Rahmenbedingungen adressiert, die für die klassischen Werkstoffe von größerer Relevanz sind: Energiepreise, Emissionshandel und Regulierung, Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit. Neben diesen gibt es natürlich weitere Rahmenbedingungen wie Forschungsförderung und Marken- und Schutzrechte und Patente, die allerdings vor allem bei den forschungsintensiveren innovativen Werkstoffen relevant sind. Diese werden in dieser Position ausgeklammert, auch weil diese in der Befragung kaum genannt wurden.

### 2.1 Regulierung: Energiepreise, Rohstoffpreise und Emissionshandel

Die Werkstoffindustrie ist einer der energieintensivsten Industriezweige in Deutschland. Forschung und Industrie haben in der Vergangenheit große Anstrengungen unternommen, die

Produktion von Werkstoffen energieeffizienter zu gestalten. Größten Einfluss auf die internationale Wettbewerbsfähigkeit dieser Branchen haben das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und das EU-Emissionshandelssystem (EU-ETS). Beide beeinflussen die Strom- und Energiepreise enorm, auch wenn die energieintensiven Branchen zum Teil von den Umlagen befreit sind, um die Industrie im internationalen Wettbewerb nicht zu benachteiligen und eine Abwanderung der Industrie in Länder mit billiger Energie zu verhindern.

### 2.2 Versorgungssicherheit: Verfügbarkeit von Rohstoffen<sup>1</sup>

Deutschland ist ein rohstoffarmes Land: Mit Ausnahme von Steinen, Sand und Kies, die für die Glasindustrie und die Zement- und Betonhersteller von größter Bedeutung sind, sind alle Werkstoffbranchen von Rohstoffimporten abhängig. Insbesondere strategisch wichtige Werkstoffe wie seltene Erden und Metalle müssen fast vollständig aus dem Ausland importiert werden. Diese sind vor allem für zukünftige Funktionswerkstoffe beziehungsweise sogenannte Smart Materials in den Informations- und Kommunikationstechnologien bedeutend. Ein Problem bei der Versorgungssicherheit ist auch der Export von Gütern wie Fahrzeugen, Elektrogeräten sowie von Schrott und Abfällen. Wenn Altgeräte und Altfahrzeuge – zum Teil illegal – ausgeführt werden, gehen der deutschen Industrie große Mengen an

#### Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Das EEG ist im Jahr 2000 in Kraft getreten und fördert als zentrale Säule der Energiewende den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. Es verpflichtet Netzbetreiber, Anlagen für regenerativ erzeugten Strom vorrangig an ihr Netz anzuschließen, den Strom abzunehmen und weiterzuleiten. Die Stromerzeuger erhalten je Kilowattstunde eine Vergütung, die bislang staatlich festgelegt war. Finanziert wird diese über eine jährlich neu berechnete Umlage auf alle Stromverbraucher. Für das Jahr 2017 beträgt diese 6,88 Cent pro Kilowattstunde. Stromintensive Unternehmen des produzierenden Gewerbes, die in starkem internationalen Wettbewerb stehen, können sich teilweise von der EEG-Umlage befreien lassen. Zu den Voraussetzungen zählt je nach Branche eine Stromkostenintensität

von mindestens 14 Prozent beziehungsweise 20 Prozent, ein Energiemanagementsystem und eine Zertifizierung nach EMAS oder ISO 50001. Mit dem seit Januar 2017 geltenden EEG 2017 traten einige Neuerungen in Kraft: Die Vergütung für die Erzeuger von regenerativem Strom wird künftig durch Ausschreibungen am Markt ermittelt, um Wirtschaftlichkeit und Wettbewerb zu fördern. Der Ausbau der erneuerbaren Energien wird stärker an den Ausbau der Stromnetze gebunden, die Kraft-Wärme-Kopplung weiter ausgebaut. Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung ist 2016 seit dem Jahr 2000 von 6 Prozent auf 30 Prozent gestiegen. Bis 2025 soll er nach den Zielen der Bundesregierung 45 Prozent betragen.

1 | Vgl. Erdmann et al. 2011.



## EU-Emissionshandelssystem

Mit dem europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS) verfolgt die EU seit 2005 das Ziel, die industriell erzeugten Treibhausgasemissionen in Europa zu begrenzen. Das Instrument funktioniert nach dem Prinzip des sogenannten Cap & Trade: Eine Obergrenze (Cap) legt fest, wie viel Emissionen die teilnehmenden Anlagen pro Handelsperiode ausstoßen dürfen. Dafür erhalten sie eine entsprechende Menge an Berechtigungen – teils kostenlos zugeteilt, teils per Versteigerung auf dem freien Markt (Trade). Das Budget der Emissionsberechtigungen sinkt bis 2020 schrittweise um 21 Prozent gegenüber 2005, aktuell um jährlich 1,74 Prozent. Damit will die EU Anreize für Unternehmen schaffen, in klimaschonende Technologien und verbesserte Prozesse zu investieren. In der laufenden dritten Handelsperiode (2013 bis 2020) gelten erstmals europaweit einheitliche Obergrenzen und Regeln für die Zuteilung von Emissionsberechtigungen. Kostenlose Zertifikate erhält nur noch die energieintensive Industrie, Stromproduzenten müssen ihre Berechtigungen vollständig erwerben. Industriebranchen, die stark im internationalen Wettbewerb stehen,

erhalten bis zu einhundert Prozent eines Benchmarks kostenlose Berechtigungen, um Wettbewerbsnachteile und eine Abwanderung ins außereuropäische Ausland zu verhindern (sogenanntes Carbon Leakage). Für die Emissionen oberhalb des Benchmarks müssen sie Zertifikate kaufen. Auf der Carbon-Leakage-Liste vertreten sind etwa Hersteller von Stahl, Ziegeln, Baukeramik und Gipszeugnissen sowie Leichtmetallgießereien. In der dritten Handelsperiode neu hinzugekommen sind die chemische Industrie mit ihrem Ausstoß an CO<sub>2</sub>- und Lachgasemissionen (N<sub>2</sub>O) sowie die Aluminiumindustrie mit CO<sub>2</sub> und perfluorierten Kohlenwasserstoffen (PFC). In Deutschland nehmen aktuell mehr als 1.900 Anlagen der Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie am EU-Emissionshandel teil. Europaweit sind es rund 12.000 Anlagen aus den 28 EU-Mitgliedstaaten, Norwegen, Island und Liechtenstein sowie knapp 6.000 Luftverkehrsbetreiber weltweit. In der vierten ETS-Handelsperiode wird die Anzahl der Zertifikate stärker als bisher verringert, um die Investitionen weiterhin zu stärken.

grundsätzlich recyclingfähigem Material verloren. Da die Versorgungslage in Deutschland kritisch ist, wird bereits daran geforscht, strategisch wichtige Rohstoffe zu substituieren. So werden unter anderem zunehmend organische Materialien wie beispielsweise organische Leuchtdioden (OLEDs) interessant für elektronische Anwendungen.

Eine Bewertung der Versorgungssicherheit eines Elements oder Werkstoffs geht über eine Analyse zum geologischen Vorkommen und zur globalen Verfügbarkeit hinaus. Sie bezieht die Untersuchung einer ganzen Reihe von quantitativen und qualitativen Parametern mit ein, deren Spektrum bei jeder Studie sorgfältig gewählt und gewichtet werden muss.<sup>2</sup> Eine fundierte Kritikalitätsstudie definiert den Anwendungsfall und diskutiert in Bezug darauf entlang klar definierter Parameter, zu welchem Grad ein bestimmtes Element oder ein bestimmter Werkstoff für diese spezifische Anwendung notwendig ist und welche wirtschaftliche Bedeutung damit einhergeht.<sup>3</sup> Zu den Kritikalitätsfaktoren gehören: 1) geologische Verfügbarkeit, 2) geopolitische Situation, 3) ökonomische

Entwicklung, 4) Substitutionspotenziale, 5) Recyclingpotenziale, 6) ökologische Einflussgrößen und 7) konkurrierende Technologien beziehungsweise Anwendungen.

## 2.3 Nachhaltigkeit: Recycling, Materialeffizienz, Kreislauffähigkeit

Nachhaltigkeit, Material- und Energieeffizienz spielen in der Werkstoffindustrie eine immer größere Rolle. Das betrifft sowohl die Herstellung als auch die Anwendung der verschiedenen Werkstoffe. Beispielsweise liegt der Materialkostenanteil im verarbeitenden Gewerbe mit 35 bis 55 Prozent weit höher als der Energiekostenanteil (2 bis 8 Prozent); Innovationen haben deshalb in der Materialeffizienz eine weitaus größere ökonomische Hebelwirkung. Sofern Abfälle nicht vermieden werden, können große Anteile des Abfalls in Industrie, Gewerbe und bei Verbrauchern durch weiterentwickelte Recyclingtechnologien mittlerweile

2 | Vgl. Reller 2011; Graedel et al. 2012.

3 | Vgl. Gauß/Gutfleisch 2016.

recycelt und verwertet werden. Neue Werkstoffe und neue Konstruktions- und Fertigungsverfahren beispielsweise im Leichtbau wurden in den letzten Jahrzehnten immer effizienter: Materialeffizienz bedeutet immer auch Energieeffizienz. Viele Werkstoffe, darunter Aluminium, neue Stahllegierungen, Verbundwerkstoffe

wie Karbonbeton und weitere Werkstoffe zur Gebäudedämmung tragen zur Energieeffizienz und zum Ausbau der erneuerbaren Energien bei. Dadurch sparen die Produkte in der Anwendung meist mehr Energie, als bei der Herstellung verbraucht wird.



## 3 Ausgewählte Werkstoffbranchen und -klassen und ihre Herausforderungen

In der vorliegenden acatech POSITION wird eine Auswahl der wirtschaftlich bedeutendsten Werkstoffe betrachtet: Stahl, Aluminium, Kupfer, Kunststoffe, Glas sowie Beton, Zement und Steine. Obwohl auch Keramik einen großen Stellenwert hat, konnte dieser Werkstoff aufgrund mangelnder Informationen in dieser Position nicht berücksichtigt werden. Sowohl Funktionswerkstoffe als auch Verbundwerkstoffe sind sehr heterogene Werkstoffgruppen und unterscheiden sich innerhalb der Werkstoffgruppen stark in den Rahmenbedingungen. Daher werden hier exemplarisch einige Werkstoffe herausgehoben.

### 3.1 Stahl

Stahl ist und bleibt auch in Zukunft weltweit einer der wichtigsten Konstruktionswerkstoffe. Mit Stahl kommt jeder Mensch jeden Tag in Berührung: im Lift, im Auto, im Bus oder in der Bahn. Auch indirekt hat jeder täglich Kontakt zu Stahl: Stromleitungen sind ohne Stahl nicht denkbar, genauso wie die Verkehrsinfrastruktur mit Schienen, Leitplanken, Brücken und Pfeilern. Stahl übernimmt eine tragende Rolle in unserem Alltag und ist aufgrund seiner Recyclingfähigkeit und Flexibilität der Werkstoff der Wahl für viele Produkte. Stahl ist mit Abstand der mengenmäßig bedeutendste Werkstoff. Im Jahr 2018 lag die Weltrohstahlproduktion bei 1,8 Milliarden Tonnen.<sup>4</sup> Die Stahlindustrie hat sich vom reinen Materiallieferanten zum Partner zahlreicher Stahlverarbeiter und Anbieter von High-Tech-Produkten und -Komponenten entwickelt.

Trotz der vielen Vorteile, die der Stahl mit sich bringt – er ist reparierbar, wiederverwertbar, vielseitig einsetzbar und dabei oft wiederverwendbar, langlebig, solide und stabil –, wird

langfristig bis 2030 weltweit nur eine schwach wachsende Stahlnachfrage erwartet. Zwar sprechen Urbanisierung, Mobilisierung und Industrialisierung für eine aufwärtsgerichtete Entwicklung, insbesondere in Schwellenländern wie Indien, Südostasien oder auch Südamerika. Dem steht jedoch gegenüber, dass in China der Sättigungspunkt überschritten ist und die Stahlnachfrage strukturell sinkt. China hält im Moment einen Anteil von fünfzig Prozent der weltweiten Stahlproduktion. Zudem ist in den kommenden Jahren in den fortgeschrittenen Volkswirtschaften damit zu rechnen, dass die Stahlintensität in der industriellen Produktion sinkt. Grund sind die Digitalisierung und der Ausbau der Circular Economy. Die größte Herausforderung für die globale Stahlindustrie liegt weiterhin in erheblichen Überkapazitäten auf globaler Ebene, die sich auf mehrere hundert Millionen Tonnen belaufen. Davon entfallen etwa zwei Drittel auf China. Außerdem ist der globale Stahlmarkt verzerrt: Schuld sind wachsender Protektionismus, Subventionen und Dumping im internationalen Wettbewerb. Gerade der offene EU-Stahlmarkt gerät dadurch unter erheblichen Anpassungsdruck. Er ist auf konsequente, handelspolitische Schutzinstrumente wie Antidumping-Maßnahmen angewiesen.

Die deutsche Stahlindustrie besitzt vergleichsweise geringe Anteile an der gesamtwirtschaftlichen Wertschöpfung, spielt jedoch eine wichtige Rolle als Vorleistungslieferant für zentrale Industriebranchen Deutschlands und somit auch für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft. So wurden im Jahr 2010 Eisen- und Stahlerzeugnisse im Wert von etwa 17,6 Milliarden Euro ausgeführt, was einem Anteil von 1,9 Prozent an den gesamten deutschen Ausfuhren entspricht.<sup>5</sup> Direkte Exporte repräsentieren jedoch nur 38 Prozent des Outputs – über 61 Prozent der Erzeugnisse der Stahl- und Metallindustrie fließen indirekt als Vorleistungen in die gesamtwirtschaftliche Wertschöpfung mit ein.<sup>6</sup> Demnach ergibt sich ein Output von 60,7 Milliarden Euro, was bezogen auf die gesamten deutschen Ausfuhren einer Stahlintensität von 6,5 Prozent entspricht.<sup>7</sup> Je nach Klassifizierung bestanden die deutschen Exporte im Jahr 2010 sogar bis zu 16,5 Prozent direkt oder indirekt aus Stahl und daraus erzeugten Produkten.<sup>8</sup> Zu den wichtigsten Abnehmern der Vorleistungen zählen deutsche Schlüsselindustrien wie der Fahrzeug- beziehungsweise Maschinenbau, die elektrische Ausrüstung sowie das Baugewerbe, welche zwischen 11

4 | Vgl. World Steel Association 2018.

5 | Vgl. RWI 2015.

6 | Vgl. Prognos AG 2016.

7 | Vgl. RWI 2015.

8 | Vgl. RWI 2015.

und 21 Prozent ihrer gesamten Vorleistungen aus Stahl und Metallerzeugnissen beziehen – inklusive Importe.<sup>9</sup>

### Energiepreise, Rohstoffpreise und Emissionshandel

Die Eisen- und Stahlindustrie ist ein vergleichsweise energieintensiver Industriezweig und zählt somit auch zu den weltweit größten CO<sub>2</sub>-Emittenten.<sup>10</sup> Dabei lassen sich bei der Stahlherstellung zwei dominierende Verfahren identifizieren: die traditionelle Erzeugung über Hochofen und Oxygenstahlkonverter, mit der weltweit etwa zwei Drittel des Rohstahls erzeugt wird, sowie die Verarbeitung von Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen (EAF-Verfahren). Die Reduzierung des Eisenerzes zu Roheisen im Hochofen ist der energieintensivste Herstellungsschritt, bei dem etwa 80 bis 90 Prozent der Energie umgesetzt werden – so auch in Deutschland, wo aktuell circa 80 Prozent des brancheninternen Energiebedarfs im Hochofen zur Reduktion umgesetzt wird. Dementsprechend entfallen nur zwanzig Prozent auf das energiesparende EAF-Verfahren, bei dem nur ein Viertel des Energieaufwands des Hochofenverfahrens benötigt wird.<sup>11</sup> Insgesamt ist die Stahlherstellung energie- und materialintensiv und besitzt schon von daher ein starkes Eigeninteresse, Effizienzmaßnahmen umzusetzen.

Im Rahmen der Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wird meist nicht zwischen den beiden Verfahren unterschieden, sodass nur prozessübergreifende Zahlen verfügbar sind. Für das Jahr 2014 lag der durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Ausstoß in der Stahlindustrie um circa 19 Prozent niedriger als 1990.<sup>12</sup> Jedoch lassen sich für die letzten Jahre keine Verbesserungen mehr feststellen, denn schon 2008 betrug die entsprechenden Branchenemissionen 1,3 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Tonne Rohstahl.<sup>13</sup> Die ab 1990 erzielten Effizienzsteigerungen lassen sich zudem größtenteils darauf zurückführen, dass Elektrolichtbogenöfen verstärkt eingesetzt wurden.<sup>14</sup> Dass die prozessspezifische „Effizienzdecke“ erreicht zu

sein scheint, wird auch vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI bestätigt. Bei den aktuell in Deutschland betriebenen Technologien sind „drastische Effizienzverbesserungen, die zu einer Reduzierung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen je Tonne Stahl von über zehn Prozent führen würden, zeitlich nicht absehbar“.<sup>15</sup> An gleicher Stelle wird festgestellt, dass bezüglich des Hochofenverfahrens theoretisch noch Einsparpotenziale bei der Abwärmenutzung bestehen,<sup>16</sup> allerdings die Wirtschaftlichkeit fraglich ist. Die Möglichkeit, das energiesparende EAF-Verfahren anzuwenden, hängt entscheidend von drei Faktoren ab: dem langfristig noch wachsenden Stahlbedarf, der benötigten Stahlqualität sowie der Verfügbarkeit von Stahlschrott. Der Stahlbedarf übertrifft bei Weitem die jährlich anfallenden Stahlschrottmengen, das heißt, Stahl kann nicht nur aus Stahlschrott erzeugt werden. Darüber hinaus lassen sich aus Qualitätsgründen nicht alle Stahlsorten im Elektrolichtbogen herstellen.<sup>17</sup> Im Gegensatz zum Oxygenstahlprozess, bei dem neben Roheisen aus dem Hochofen bis zu 20 Prozent Stahlschrott eingesetzt werden, kann im EAF-Verfahren bis zu 100 Prozent auf Stahlschrott zurückgegriffen werden.<sup>18</sup> Der Stahlschrott fällt dabei in etwa zu 21 Prozent in den deutschen Stahlwerken selbst an, 73 Prozent stammen aus dem Zukauf vom Handel und 6 Prozent aus dem Zukauf von anderen Stellen.<sup>19</sup> Bei dem Großteil des in Deutschland recycelten Stahls handelte es sich 2007 um schweren Altschrott von Bau- und Abbruchabfällen.<sup>20</sup> Stahl gilt als hundert Prozent und wiederholt recycelbar – ohne Verlust seiner inhärenten Eigenschaften bei Kenntnis von etwaigen unerwünschten Legierungselementen; während der Gebrauchs- und Nachgebrauchsphase kommt es nur zu geringen Verlusten. Schätzungsweise landen in Deutschland 1,27 Millionen Tonnen jährlich auf Deponien und werden somit nicht einer wiederholten Verwertung zugeführt. Allerdings konnten im Jahr 2007 insgesamt circa 22 Millionen Tonnen Stahlschrott recycelt werden.<sup>21</sup>

9 | Vgl. Prognos AG 2016.

10 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

11 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

12 | Vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl 2015.

13 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

14 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

15 | Siehe Fraunhofer ISI 2013.

16 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

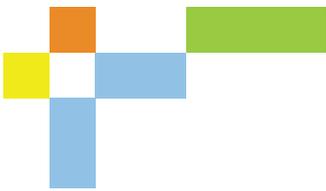
17 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

18 | Vgl. UBA 2012.

19 | Vgl. UBA 2012.

20 | Vgl. UBA 2012.

21 | Vgl. UBA 2012.



Als energie- und emissionsintensiver Industriezweig ist die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Stahlindustrie eng an Strompreise und Umweltauflagen gebunden. Zu nennen sind hier an erster Stelle die (deutsche) Ökosteuer und der (europäische) Emissionshandel.<sup>22</sup> Angesichts dessen macht die Wirtschaftsvereinigung Stahl (WV Stahl) im Rahmen der zugrunde liegenden acatech Umfrage auf die zentrale Bedeutung der Ausnahmeregelungen für energieintensive Branchen wie die der Stahl- und Eisenindustrie aufmerksam. Mit Verweis auf technische Grenzen, welche weitere Prozessoptimierungen bei den bestehenden ausgereiften Technologien in naher Zukunft unwahrscheinlich machen, und auf ein globales „Level-playing-field“ soll sowohl in der laufenden dritten als auch in der kommenden vierten ETS-Periode auf Ausnahmen für spezifische Sektoren geachtet werden, zum Beispiel EEG, Stromkostenkompensation.<sup>23</sup> Größtes Innovationspotenzial wird dagegen vor allem in der Entwicklung und Anwendung neuartiger Stähle gesehen,<sup>24</sup> wodurch höhere CO<sub>2</sub>-Einsparungen als Emissionen bei der Stahlherzeugung für diese Stähle selbst erreicht werden können. Langfristig wird zudem an anderen Verfahren und Technologien zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Stahlherstellung durch Verwendung von Wasserstoff als Reduktionsmittel der Eisenerze beziehungsweise an der stofflichen Verwertung des in den Prozessgasen enthaltenen CO<sub>2</sub> geforscht und gearbeitet, die allerdings aus heutiger Sicht bei Weitem noch nicht wirtschaftlich sind.<sup>25</sup>

### **Nachhaltigkeit: Recycling, Energieeffizienz, Materialeffizienz, Kreislauffähigkeit**

Stahl wird zu hohem Grade recycelt und landet nach der Gebrauchsphase nur zu einem Bruchteil auf Deponien. Derzeit liegt der Anteil des Schrottes am metallischen Einsatz für die Rohstahlerzeugung in Deutschland bei 45 Prozent und somit über dem globalen Durchschnitt.<sup>26</sup> Die WV Stahl als Vertreter einer energieintensiven Branche sieht vor allem Nachholbedarf, wenn es um die Bilanzierung von Materialströmen geht. So sollte der „Recyclingfähigkeit von Werkstoffen grundsätzlich mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden“, wobei „ganzheitliche

Life-Cycle-Analysen (LCA)“ zu entwickeln sind. Dabei sollen letztere über „Umweltindikatoren hinausgehen“.<sup>27</sup> Eine in sich geschlossene Bilanzierung des Werkstoffs ist jedoch nur schwer durchzuführen – zum einen, weil stahlintensive Produkte wie auch der Substitutionsstoff Stahlschrott importiert und exportiert werden, zum anderen, da die in Verwendung befindliche Stahlmenge, das heißt der in Deutschland potenziell verwertbare Stahlschrott, nicht ganzheitlich erfasst und präzise bestimmt werden kann.<sup>28</sup>

Bei der Stahlherstellung fallen außerdem weitere Nebenprodukte an, wie Schlacke, die zum großen Teil etwa als Rohstoff in anderen Sektoren (zum Beispiel Metallindustrie, Zement) oder als Baustoff genutzt werden. Ein Großteil der nicht vermeidbaren Abfälle wird darüber hinaus verwertet. Sie leisten damit, unabhängig ob Produkt oder Abfall, einen Beitrag zu den positiven Ressourcenbilanzen der Branche. Deshalb sorgt sich die WV Stahl auch um politische Rahmenbedingungen benachbarter Industriezweige. Dementsprechend wird in der acatech Umfrage auf die geplante Ersatzbaustoffverordnung verwiesen, die bei falscher Ausgestaltung dem „Kreislaufgedanken und der Ressourcenpolitik“ zuwiderlaufen kann, sodass infolgedessen bestimmte Nebenprodukte deponiert werden müssten.

## **3.2 Nichteisenmetalle: Aluminium und Kupfer**

Zu den Nichteisenmetallen (NE-Metalle) zählen unter anderem Aluminium, Kupfer, Zink, Blei und Edelmetalle. Aluminium und Kupfer sind unter den mengenmäßig bedeutenden NE-Metallen die energieintensivsten bei der Produktion.<sup>29</sup> Deswegen stehen sie hier beispielhaft für die Darstellung der NE-Metallindustrie.

### **Aluminium**

Aluminium ist nach Stahl der zweitwichtigste metallische Werkstoff. 2017 wurden weltweit über 62 Millionen Tonnen nachgefragt.<sup>30</sup> Aluminium ist leicht, funktionell, wirtschaftlich und

22| Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

23| Siehe acatech Umfrage.

24| Siehe acatech Umfrage.

25| Vgl. acatech 2018, FONA 2017.

26| Siehe acatech Umfrage.

27| Siehe acatech Umfrage.

28| Siehe acatech Umfrage.

29| Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

30| Vgl. Statista 2017a.

ästhetisch. Aufgrund seiner Eigenschaften und universellen Einsatzmöglichkeiten findet sich Aluminium fast überall: in Maschinen und Anlagen, Motoren, Verpackung, Mode, Schmuck und darstellender Kunst. Wird bei Maschinen und Anlagen Aluminium verwendet, spart der Hersteller Gewicht und dadurch Energie. Ein Roboter mit weniger Gewicht ist schneller in seinen Bewegungsabläufen und kann schneller produzieren. Neuartige Legierungen reduzieren außerdem den Materialeinsatz und schonen unsere Ressourcen. Auch die Recyclingfähigkeit von Aluminium ist beachtlich. „Aluminium ist ein Material, das genutzt und nicht im herkömmlichen Sinne verbraucht wird. Das zeigt sich allein daran, dass sich noch heute etwa 75 Prozent des seit hundert Jahren produzierten Aluminiums in Verwendung befinden.“<sup>31</sup>

## Kupfer

Von Kupfer wurden im Jahr 2017 weltweit rund 17,7 Millionen Tonnen nachgefragt.<sup>32</sup> Kupfer ist leicht zu verarbeiten und weist eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit auf und ist daher einer der ältesten und nützlichsten Werkstoffe: Millionen von Rohren und Kabeln aus Kupfer transportieren täglich Trinkwasser und Elektrizität, unzählige Flächen Kupfer bedecken weltweit Dächer und Fassaden. Kupfer steckt auch in vielen Geräten wie Waschmaschinen, Windgeneratoren, Handys. Die Eigenschaften von Kupfer lassen sich durch Legierung mit anderen Metallen noch weiter optimieren.

## Energiepreise, Rohstoffpreise und Emissionshandel

Energiepreise spielen bei der NE-Metallerzeugung eine große Rolle – der Stromverbrauch macht bis zu fünfzig Prozent der Gesamtkosten aus.<sup>33</sup> Energieintensiv ist laut Branchenvertretern vor allem die Aluminiumproduktion, bei der der Energiepreis bei über fünfzig Prozent des Metallpreises liegt. Nach einer Studie des Fraunhofer ISI beansprucht der Energieverbrauch circa vierzig Prozent der Herstellungskosten, weswegen die Aluminiumproduktion häufig in der Nähe von

Stromerzeugungsanlagen betrieben wird. Der bei Weitem energieintensivste Prozessschritt ist die Elektrolyse, bei der 82 Prozent des benötigten Energieaufwands verbraucht werden.<sup>34</sup> Die Produktion von Sekundäraluminium aus Aluminiumschrott ist hingegen deutlich energiesparsamer. Werden bei der Herstellung von Hüttenaluminium 212 Gigajoule pro Tonne verbraucht, bedarf die Produktion von Sekundäraluminium mit 18 Gigajoule pro Tonne nur eines Bruchteils des Energieaufwands.<sup>35</sup> Im Jahr 2016 wurden in Deutschland 546.800 Tonnen Primär- und 595.300 Tonnen Sekundäraluminium erzeugt.<sup>36</sup>

Für die Herstellung von Primärkupfer wird mit 100 Gigajoule pro Tonne deutlich weniger Energie benötigt als bei der Aluminiumproduktion. Circa siebenzig Prozent des Energiebedarfs werden dabei für Abbau, Mahlvorgänge und Floating-Prozesse benötigt.<sup>37</sup> Die Herstellung von Sekundärkupfer beansprucht nur 10 bis 30 Prozent des Energiebedarfs der Primärkupferproduktion. In Deutschland wird derzeit circa die Hälfte des benötigten Kupfers aus Sekundärrohstoffen gewonnen, weltweit etwa 35 Prozent.<sup>38</sup>

Der hohe Energiebedarf sowie der hohe Strompreis in Deutschland und der damit einhergehende Wettbewerbsnachteil ist innerhalb der NE-Metall-Industrie ein wichtiges Themenfeld. So werden Aluminium und Kupfer an der London Metal Exchange gehandelt und unterliegen dementsprechend einem harten globalen Wettbewerb. Deswegen ist es für die Produzenten laut Eigenaussage nicht möglich, die Stromkosten an ihre Abnehmer weiterzugeben.<sup>39</sup> Die Preise werden hauptsächlich vom Strompreis getrieben, welcher regional unterschiedlich hoch ist. Ohne Privilegierung für deutsche Aluminiumerzeuger hätten allein die Stromkosten für eine Tonne Aluminium den Marktpreis für Aluminium überschritten – dieser lag von 2011 bis 2013 bei durchschnittlich 1.550 Euro.<sup>40</sup>

Die Energiewende wird von Branchenvertretern als Herausforderung begriffen. Zur Chance wird sie nur, wenn Carbon-Leakage-Maßnahmen auf alle abwanderungsgefährdeten

31 | Siehe acatech Umfrage.

32 | Vgl. Statista 2019b.

33 | Siehe acatech Umfrage.

34 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

35 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

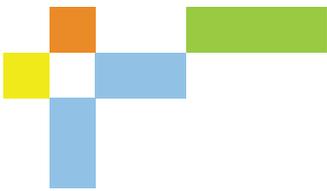
36 | Vgl. Statista 2017c.

37 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

38 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

39 | Siehe acatech Umfrage.

40 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.



Industriesektoren ausgeweitet werden. Denn die Strompreiskompensation deckt nur einen Teil der steigenden Kosten – im Jahr 2020 maximal 75 Prozent.<sup>41</sup> Andernfalls droht sogar eine Verschlechterung der (globalen) Umweltbilanz, da Unternehmen in Regionen mit geringeren Klimaschutzvorschriften abwandern und folglich zunehmend Rohstoffe aus dem Ausland importiert werden müssten.<sup>42</sup> Nach Meinung der Branchenvertreter verhilft jedoch gerade die lokale Produktion von NE-Metallen auf dem Primärweg der Industrie zu mehr Flexibilität in der Produktion und ist damit für die Stärke des Standorts Deutschland mitverantwortlich.<sup>43</sup> Allerdings unterstützt die Branche auch die Energiewende, da die Werkstoffe entscheidend zur Nachhaltigkeit beitragen: beispielsweise Leichtbau durch Aluminium, Kupfer für die Vernetzung.

### **Versorgungssicherheit: Verfügbarkeit von Rohstoffen**

Bauxit ist das wichtigste Ausgangsmaterial für die wirtschaftliche Herstellung von Primäraluminium. Bauxit wird seit den 1970er Jahren nicht mehr in Deutschland gewonnen und muss gänzlich aus Brasilien und Australien importiert werden.<sup>44</sup>

Die energieärmere Kupferproduktion ist in geringerem Umfang von hohen Strompreisen betroffen, demzufolge spielt der Materialpreis eine wichtige Rolle. Der Ausgangsstoff für die Kupferverhüttung ist Kupferkonzentrat, das nach Deutschland importiert wird.<sup>45</sup> Die Verfügbarkeit von Rohstoffen gilt laut Branchenvertretern zwar als gewährleistet, jedoch wird gefordert, dass die Politik die Entwicklung weiterverfolgt.<sup>46</sup>

### **Nachhaltigkeit: Recycling, Energieeffizienz, Materialeffizienz, Kreislauffähigkeit**

Für energie- und rohstoffsparsame Sekundärwege ist das Schrottaufkommen von großer Bedeutung. In Europa ist Deutschland

zwar der größte Kupferproduzent, weist dabei aber beständig einen starken Exportüberschuss beim Handel mit Kupferhalbzeug aus und führt damit einen Großteil des künftigen Altschrottes aus.<sup>47</sup> Auch das große Kupferlager in Deutschland, bestehend aus Kabeln, Fahrzeugen, Elektrogeräten und Ähnlichem, wird zwar auf mindestens 7,3 Millionen Tonnen geschätzt, kann aber aufgrund der langen Lebensdauer der Produktkategorien erst in Zukunft als Schrott verwendet werden.<sup>48</sup> Erschwerend kommt hinzu, dass große Teile des anfallenden Altschrotts unkontrolliert ausgeführt werden, wie das im Fall von Altautoexporten und Elektronikgeräten in Form von Kupfer, Stahl und Aluminium sowie Edelmetallen geschieht.<sup>49</sup> Schätzungsweise wurden im Jahr 2007 155.000 Tonnen Kupfer allein in Form von Elektronikgeräten aus Deutschland exportiert und 358.000 Tonnen gezielt als Kupferschrott eingeführt.<sup>50</sup> Die Rohstoffversorgung in Deutschland wird außerdem durch exportierte, gebrauchte Fertigprodukte untergraben. Deshalb begrüßen Branchenvertreter europäische Maßnahmen wie die Verschärfung der Waste-of-Electrical-and-Electronic-Equipment-Richtlinie (WEEE-Richtlinie). Dessen ungeachtet sollten weitere Schritte diesbezüglich unternommen werden, so beispielsweise gegen illegale Altautoexporte.<sup>51</sup>

Auch außenhandelspolitische Maßnahmen können hier flankierend das nationale Kupferschrottaufkommen verbessern. Eine Studie des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) empfiehlt, die Rolle Deutschlands in einer globalen Recyclingwirtschaft zu stärken und mit dem vorhandenen Know-how auch Auslandsmärkte stärker zu erschließen.<sup>52</sup>

Die Branche befürchtet ein Investitionshemmnis und, dass Produktqualität und Produkteigenschaften durch Effizienzmaßnahmen negativ beeinflusst werden.<sup>53</sup> Da die Produktqualität das Alleinstellungsmerkmal der deutschen NE-Metallerzeugung darstellt, werden Maßnahmen, die nur auf Recyclingfähigkeit von Produkten abzielen, als nicht förderlich

41 | Siehe acatech Umfrage.

42 | Siehe acatech Umfrage.

43 | Siehe acatech Umfrage.

44 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

45 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

46 | Siehe acatech Umfrage.

47 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

48 | Vgl. UBA 2012.

49 | Vgl. UBA 2012.

50 | Vgl. UBA 2012.

51 | Siehe acatech Umfrage.

52 | Vgl. IZT 2011.

53 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

angesehen. Das gilt auch hinsichtlich der Nachhaltigkeitsstrategie: Alleinige Recyclingkriterien könnten dazu führen, dass beispielsweise die Lebensdauer von Produkten bewusst verringert würde.<sup>54</sup> Die NE-Metallindustrie hat einen hohen spezifischen Energiebedarf in den Kernprozessen und daher ein starkes Eigeninteresse, Effizienzmaßnahmen umzusetzen. Branchenvertreter heben die hervorragende, qualitätserhaltende und vor allem im Fall von Kupfer unbegrenzte Recyclingfähigkeit von NE-Metallen hervor. Besonders im Verpackungs-, Verkehrs- und Baubereich liegen die Recyclingquoten bei über neunzig Prozent.<sup>55</sup> Nach eigenen Angaben der Wirtschaftsvereinigung Metalle (WV Metalle) arbeitet die Branche circa 30 Prozent effizienter als noch vor 20 Jahren. Der Effizienzsteigerung sind jedoch technologische Grenzen gesetzt – sowohl in der Herstellung von Primärwerkstoffen als auch in Recyclingprozessen.

### Regulierung und sonstige staatliche Eingriffe

Gesundheits- und Arbeitsschutzregelungen sowie weitere politische Reglementierungen werden von Branchenvertretern ambivalent betrachtet. Insbesondere Produktrücknahmeregelungen, so zum Beispiel bei Batterien, Verpackungen, Elektronik, stoßen auf Zustimmung, da die hier enthaltenen verbindlichen Recyclingquoten recycelbare Werkstoffe fördern. Das Lebensmittelrecht (niedrige Migrationswerte), die Verordnung zum Schutz vor Gefahrenstoffen (niedrige Arbeitsplatzrichtwerte) und die Konfliktrohstoffe-Verordnung (einseitige Belastung der europäischen Grundstoffindustrie) finden hingegen keine Unterstützung. Des Weiteren beklagen Branchenvertreter, dass das Vorsorgeprinzip (in den Verordnungen Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) und Regulation on Classification, Labelling and Packaging of Substances and Mixtures (CLP)) gegenüber dem risikobasierten Ansatz zu stark betont wird, sodass die „Stigmatisierungen von Metallen inzwischen Realität sind“. Im Zuge dessen würde die Branche Deregulierungsmaßnahmen begrüßen. Branchenvertreter bemängeln zudem das Fehlen einer ausgewogenen und neutralen Bewertung der Werkstoffgruppe, die vor allem im Bildungssystem von „Warnungen über vermeintliche Gefahren von Materialien“ geprägt ist. Der daraus resultierende Nutzen für die Gesellschaft wird hingegen kaum angesprochen.

## 3.3 Kunststoffe

Zahnbürsten, Flaschen, Folien, Spielzeug, Computergehäuse, Sonnenbrillen, Funktionsbekleidung, Plüschpullover, Flugzeugteile – die Liste der Gegenstände aus Kunststoffen lässt sich ins Unendliche ausdehnen. Kunststoffe bestehen aus unterschiedlichen Anteilen der Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Chlor, Stickstoff (seltener auch Fluor und Schwefel). Diese Elemente kommen überall auf der Erde in ausreichender Menge vor, sodass die Synthese lediglich Energie erfordert. Der Energiebedarf wird deutlich verringert, wenn Teilstrukturen bereits in natürlichen Rohstoffen vorliegen, zum Beispiel in Erdöl oder Erdgas. Die Herstellung von Primärkunststoffen als Teil der Grundstoffchemie ist eine wichtige Teilbranche der chemischen Industrie. Die Teilbranche Grundstoffchemie umfasst neben organischer und anorganischer Grundstoffchemie auch die Polymerindustrie und ist bei Weitem der energieintensivste Zweig der chemischen Industrie.<sup>56</sup> Die Branche hat einen hohen Anteil an Großbetrieben (über 500 Mitarbeitende) und konnte 2012 einen Umsatz von 145 Milliarden Euro erwirtschaften.<sup>57</sup> Die Kunststoffverarbeitung ist zwar kein Subsektor der Grundstoffchemie, sie ist jedoch entscheidend an Vorleistungen aus der chemischen Industrie gebunden. Der Kunststoff verarbeitende Industriezweig ist im Gegensatz zur Grundstoffchemie stark von mittelständischen und kleinen Unternehmen (KMU) geprägt: 92 Prozent der Betriebe beschäftigen weniger als 250 Erwerbstätige, knapp 42 Prozent beschäftigen weniger als 50 Mitarbeitende. Die größeren Unternehmen (mit mehr als 500 Beschäftigten) machen nur 2,3 Prozent der Betriebe aus und beanspruchen nur 18,6 Prozent der brancheninternen Arbeitsplätze; sie erwirtschaften knapp 21 Prozent des Umsatzes der Branche. Kleine und mittelständische Unternehmen beanspruchen hingegen 62,8 Prozent der Arbeitskraft und erwirtschaften einen Umsatzanteil von 58,6 Prozent.<sup>58</sup>

Kunststoffhersteller – mit einem stärkeren Fokus auf Export – sind ebenfalls am Abbau von Handelsschranken interessiert. So wird in der acatech Umfrage gleichermaßen auf den gewünschten Abbau von Einfuhrzöllen wie auch auf Wirtschaftssanktionen (Russland) aufmerksam gemacht.

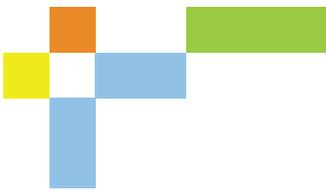
54| Vgl. IZT 2011.

55| Siehe acatech Umfrage.

56| Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

57| Vgl. IG BCE 2014a.

58| Vgl. IG BCE 2014c.



## Energiepreise, Rohstoffpreise und Emissionshandel

Die Energiewende stellt eine Herausforderung für die gesamte Grundstoffchemie dar, da diese ein besonders energieintensiver Industriezweig ist – der Energiekostenanteil lag 2011 bei knapp 6 Prozent (verarbeitendes Gewerbe – 2,1 Prozent). Neben den hohen Energiepreisen sorgen sich Branchenvertreter auch um die Versorgungssicherheit. Zwar greifen aktuell zahlreiche Betriebe auf Stromkostenkompensationen zurück, doch bleibt es Fachleuten zufolge fraglich, ob auch künftig eine Befreiung von der EEG-Umlage möglich sein wird.<sup>59</sup> Im Zusammenhang mit dem Atomausstieg wurde im Rahmen der brancheninternen Umfrage durch die Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IG BCE) zudem vielfach die Gefahr von Stromausfällen angesprochen, welche für Chemieunternehmen mit hohen Kosten verbunden wären.<sup>60</sup> Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, investieren Chemieunternehmen vermehrt in eigene Energieversorgungsanlagen (zum Beispiel Blockheizwerke), welche durch die hohen Energiepreise nun rentabel werden.<sup>61</sup>

Die chemische Industrie rechnet mit Mehrkosten von 2,3 Milliarden Euro, sollten in der vierten ETS-Periode die von der EU-Kommission anvisierten 40 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> realisiert werden. Nach aktuellen Kompensationsregelungen würden nur 550 Millionen Euro der Mehrkosten gedeckt werden. Zusätzlich beziffert Plastics Europe Deutschland die Belastungen durch den Zukauf von Zertifikaten auf weitere 240 Millionen Euro.<sup>62</sup> Dementsprechend wird vom Verband darauf aufmerksam gemacht, dass bei zukünftigen Regelungen alle Sektoren und Subsektoren der Kunststoffindustrie auf der Carbon-Leakage-Liste vertreten sein sollten und auch der „Begünstigtenkreis der Stromkompensation“ vergrößert und ebenfalls auf alle Subsektoren ausgeweitet werden muss.<sup>63</sup> Dadurch soll die Wettbewerbsfähigkeit der Kunststoffherzeugung gesteigert werden. Diese hatte laut acatech Umfrage von allen Teilbranchen der chemischen Industrie am meisten „Wettbewerbsfähigkeit eingebüßt“ (Kunststoff -6,4 Prozent, Chemie -4,1 Prozent von 1995 bis 2012). Technische

Möglichkeiten zur weiteren Einsparung von Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen sehen die Kunststoffhersteller als sehr begrenzt an, da der seit Jahren stattfindende globale Wettbewerb bereits für weitreichende Optimierungen gesorgt hat.<sup>64</sup>

Die kunststoffverarbeitende Industrie nimmt laut Eigenaussage nicht am Emissionshandel teil, ist jedoch indirekt über die Strompreise davon betroffen.<sup>65</sup> Der Energiekostenanteil bei der Kunststoffverarbeitung liegt mit 2,9 Prozent nur knapp über dem des verarbeitenden Gewerbes (2,1 Prozent), weswegen Strompreise auf den ersten Blick keine entscheidende Rolle spielen sollten. Dessen ungeachtet wird von Branchenvertretern immer wieder auf die steigenden Strompreise als Wettbewerbsnachteil verwiesen. Hintergrund ist, dass nur 34 Prozent der Unternehmen die Ausgleichsregelung EEG in Anspruch nehmen und 62 Prozent unter den Stromsteuerspitzenausgleich fallen. Das liegt vermutlich nicht zuletzt an der Branchenstruktur mit vielen kleinen Betrieben und dem generell niedrigen Strombedarf. Die Belastung durch hohe Strompreise und der damit einhergehende Wettbewerbsnachteil wurden vom Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V. wie auch von Plastics Europe Deutschland e.V. angesprochen.<sup>66</sup>

Gleichwohl sehen die Verbände branchenübergreifend große Chancen in der Energiewende, da sie den Industriezweigen neue Abnehmermärkte eröffnet, so zum Beispiel bei der energetischen Sanierung von Gebäuden, beim Leichtbau im Automobilmarkt oder durch die Entwicklung neuartiger Bio- und Verbundwerkstoffe.<sup>67</sup> Dies galt im Rahmen der acatech Umfrage für Kunststoffhersteller wie -verarbeiter. Kunststoffe und sonstige chemische Vorleistungen sind heute ausschlaggebend für Nachhaltigkeitstechnologien: Nur durch deren verstärkten Einsatz lassen sich gesamtwirtschaftlich Treibhausemissionen reduzieren, sei es durch die Produktion von Windrädern oder Solarzellen für die Gewinnung erneuerbarer Energien oder durch Effizienzsteigerungen bei Mobilität und Gebäuden.<sup>68</sup>

59| Vgl. IG BCE 2014a.

60| Vgl. IG BCE 2014a.

61| Vgl. IG BCE 2014a.

62| Siehe acatech Umfrage.

63| Siehe acatech Umfrage.

64| Siehe acatech Umfrage.

65| Siehe acatech Umfrage.

66| Siehe acatech Umfrage.

67| Vgl. IG BCE 2014a, 2014c.

68| Siehe acatech Umfrage.

## Versorgungssicherheit: Verfügbarkeit von Rohstoffen

Rohöl- und Gaspreise beeinflussen die Grundstoffchemie und damit die Kunststoffherstellung entscheidend. Deutschland sieht das Fehlen einer heimischen Brennstoffproduktion als Wettbewerbsnachteil, vor allem im Zuge der deutlich besseren Rohstoffversorgung im Mittleren Osten, wo die meisten neuen Wettbewerber anzusiedeln sind. Auch in den USA wird mit den Fracking-Möglichkeiten ein Aufschwung der Chemieindustrie erwartet. Von den Verbänden wird die Bedeutung des „Wechsels von der Erdöl- zur biobasierten Chemie“ hervorgehoben. Die Gesamtbranche setzte 2011 zu 12,4 Prozent nachwachsende Rohstoffe ein, bis 2030 soll der Anteil bei 20 bis 30 Prozent liegen. Gleichzeitig wird jedoch darauf verwiesen, dass zum einen der Einsatz von Biomasse mit der Produktion von Lebensmitteln und Energie konkurriert und zum anderen nicht alle Produkte und Prozesse den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen erlauben. Daher wird die Produktion „auch in der Zukunft mehrheitlich von Erdölverfügbarkeit und -preisen abhängig“ bleiben.<sup>69</sup> Als Alternative zu Erdöl- und biobasierten Rohstoffen rücken vermehrt Power-to-X-Technologien in den Fokus von Forschung und Entwicklung.<sup>70</sup>

Auch die Branche der Kunststoffverarbeiter steht hinsichtlich der Materialkosten unter Druck. Zwar liegen diese mit circa 45 Prozent ähnlich hoch wie im sonstigen verarbeitenden Gewerbe, doch da Erdöl die Ausgangsbasis für die Herstellung von Kunststoffen ist, ist der Materialkostenanteil eng mit dem Ölpreis verbunden. Der schwankende Rohölpreis führt dementsprechend zur Preisvolatilität bei Primärkunststoffen. Manche kunststoffverarbeitenden Unternehmen investierten deshalb bereits in größere Lagermöglichkeiten für Rohstoffe.<sup>71</sup> Neben dem Erdölpreis, der die Branche nur indirekt betrifft, ist es weit aus wichtiger, dass Kunststoffgranulate als Basisrohstoff verfügbar sind.

## Nachhaltigkeit: Recycling, Energieeffizienz, Materialeffizienz, Kreislauffähigkeit

Der größte Teil der Kunststoffproduktion hat nur eine kurze Nutzungsphase und wird dementsprechend schnell wieder der Abfallwirtschaft zugeführt. Bestes Beispiel sind Verpackungen. Kunststoffhersteller wie Verarbeiter betonen dabei die starke Recyclingfähigkeit von Kunststoffen. Diese sei „ausgezeichnet“, die Recyclingquote läge „bei 98 Prozent“<sup>72</sup>, was aber nur für Produktionsabfälle gilt, nicht für Produkte nach ihrem Gebrauch. Es ist der sehr unterschiedlich verwendete Begriff „Recycling“, der solche Aussagen möglich macht. Des Öfteren wird unter „Recycling“ auch Verwertung verstanden, diese unterscheidet sich bei Kunststoffen jedoch in energetische, werkstoffliche und rohstoffliche Verwertung und beinhaltet somit auch Downcycling oder Brennstoffsubstitution.<sup>73</sup> So wurden laut einer Studie von Consultic im Jahr 2016 über die Hälfte der gesamten Abfallmenge, nämlich 5,92 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle in Deutschland, davon 80 Prozent Verpackungen, energetisch verwertet und somit dem Werkstoffkreislauf entzogen.<sup>74</sup> Die 45 Prozent, die laut Consultic werkstofflich verwertet wurden, stellen ebenfalls kein reines Recycling im Sinne eines geschlossenen Werkstoffkreislaufs dar. Denn bei der werkstofflichen Verwertung wird zwischen hochwertiger und sonstiger werkstofflicher Verwertung unterschieden: Nur die hochwertige Verwertung substituiert tatsächlich Kunststoffe, während bei der sonstigen werkstofflichen Verwertung Mischkunststoffe hergestellt werden. Eine Studie des Umweltbundesamts kommt zum Ergebnis, dass 2007 nur 33 Prozent der Verwertung hochwertig war, sodass 67 Prozent der Herstellung von Mischkunststoffen dienen.<sup>75</sup>

Eines der Hemmnisse auf dem Weg zu einem höheren Anteil an hochwertiger Verwertung ist die sortenreine Trennung von Kunststoffabfällen. So klagten Kunststoffverarbeiter über „mangelnde Verfügbarkeit und teilweise schlechte Qualität“ der Sekundärrohstoffe.<sup>76</sup> Für die Gewinnung von hochwertigem Recyclingmaterial sind jedoch entsprechend hohe Reinheiten der Kunststoffe nötig, vor allem da einige Kunststoffe nicht oder nur bedingt miteinander verträglich sind.<sup>77</sup> Eine geschlossene,

69| Siehe IG BCE 2014a.

70| Vgl. acatech 2018, DECHEMA 2017.

71| Vgl. IG BCE 2014c.

72| Vgl. Plastics Europe 2017.

73| Vgl. UBA 2012.

74| Vgl. Consultic 2016.

75| Vgl. UBA 2012.

76| Siehe acatech Umfrage.

77| Vgl. UBA 2012.



fortdauernde, hochwertige Verwertung von Kunststoffen ist jedoch aus technologischer Sicht in der Regel auch nicht unbegrenzt möglich, da bei jedem Recyclingdurchgang die Kunststoffe an Qualität verlieren.<sup>78</sup> Außerdem ist zu berücksichtigen, dass Kunststoffe mit ursprünglich zugelassenen Additiven wie zum Beispiel Flammenschutzmittel nicht mehr recycelt und in Verkehr gebracht werden dürfen. Zudem werden Kunststoffprodukte ausgeführt und eingeführt, was eine kreislaufgerechte Bilanzierung des Produktions- und Abfallaufkommens für Deutschland erschwert.<sup>79</sup>

Der Einsatz von Kunststoffen birgt allerdings auch ein hohes Potenzial zur Ressourcenschonung: Innovative Entwicklungen, zum Beispiel für Verpackungsanwendungen, führten zu enormen Einsparungen an Material. Außerdem schützen Kunststoffverpackungen Lebensmittel vor vorzeitigem Verderben. Verbundwerkstoffe tragen durch Leichtbau sowohl zur Materialeffizienz als auch zur Energieeinsparung bei.

### Regulierung und sonstige staatliche Eingriffe

Vorrangig ist hier die mangelhafte Umsetzung der europaweiten Regulierungen in Teilen der EU und damit die Ungleichbehandlung. Zum Beispiel ist die Implementierung des EU-Abfallverbringungsgesetzes unvollständig. Hier wären „Kontroll- und Sanktionsmaßnahmen“ ein geeignetes Mittel.<sup>80</sup> Kunststoffverarbeiter machen zudem auf eine Vielzahl von allgemeinen und produktspezifischen Reglementierungen aufmerksam, welche die zahlreichen Kleinbetriebe der Branche vor große Herausforderungen stellen.<sup>81</sup>

Um im globalen Wettbewerb bestehen zu können, sind Prozess- und Stoffinnovationen essenziell. Benötigt wird eine geeignete Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur aus Universitäten und Forschungseinrichtungen, die von der Politik bereitgestellt werden sollte. Davon würden auch die KMUs der kunststoffverarbeitenden Industrie profitieren.

## 3.4 Glas

Zur Glasindustrie zählen die Bereiche Flachglas, Behälterglas, Glasfasern, Spezialglas sowie Glasbearbeitung und -veredelung. Glas hat unter anderem Vorteile als Verpackungswerkstoff; inert und durchsichtig lagert er Lebensmittel neutral und appetitlich. Leichte Glasflaschen und UV-Schutz stehen beispielhaft für das Innovationspotenzial von Glas. Prominentes Beispiel für eine innovative Glasfassade ist die Elbphilharmonie in Hamburg.

Der Gesamtumsatz der Glasindustrie betrug 2016 rund 9,4 Milliarden Euro. Der Branche gehören rund 400 Betriebe mit rund 53.000 Beschäftigten an. Spitzenreiter ist die Glasfasersparte: Sie verzeichnete 2016 ein Umsatzwachstum von 10,9 Prozent auf 980 Millionen Euro. Laut Beschäftigtenzahlen ist die deutsche Glasindustrie die größte Europas. Mit 134 Beschäftigten je Betrieb liegt die Glasindustrie genau im Durchschnitt des verarbeitenden Gewerbes. Dennoch zeichnet die Glasindustrie eine geringe Arbeitsmarktrelevanz aus – weniger als ein Prozent aller Industriebeschäftigten in Deutschland ist in der Glasbranche tätig. So wurde seit 2000 nahezu jeder sechste Arbeitsplatz abgebaut – vor allem zulasten der gering qualifiziert Beschäftigten.<sup>82</sup> Die Branche wurde von der Wirtschaftskrise hart getroffen. Im Jahr 2009 ging der Umsatz um 15,4 Prozent zurück, und auch nach der Erholung der Märkte konnte das Niveau des umsatzstärksten Jahres 2008 in der Glasindustrie nicht wieder erreicht werden.<sup>83</sup>

### Energiepreise, Rohstoffpreise und Emissionshandel

Die Glasindustrie ist eine energieintensive Branche – beobachtet wurde der Zeitraum 2009 bis 2014. Zwischen den Jahren und auch zwischen den Glassorten bestehen erhebliche Unterschiede. So liegt der Energiekostenanteil am Bruttoproduktionswert im Branchendurchschnitt 2014 bei neun Prozent.<sup>84</sup> In der Glasherstellung ist die Glasschmelze der energiebedeutendste Prozess mit 75 bis 80 Prozent des gesamten Energieeinsatzes.<sup>85</sup> Dabei stammt die benötigte Energie im Mittel zu 97 Prozent direkt aus der Verbrennung von Erdgas, in seltenen Fällen auch von Heizöl.

78 | Vgl. UBA 2012.

79 | Vgl. UBA 2012.

80 | Siehe acatech Umfrage.

81 | Siehe acatech Umfrage.

82 | Vgl. IG BCE 2014b.

83 | Vgl. IG BCE 2014b.

84 | Vgl. Statistisches Bundesamt 2016; Fraunhofer ISI 2013.

85 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

Rein elektrische Schmelzöfen werden trotz einer Reihe positiver Eigenschaften wie hohe Schmelzleistung, niedrige Wärmeverluste und gute Regelbarkeit nur bei geringen Kapazitäten verwendet. Der Grund hierfür ist, dass fossile Brennstoffe wesentlich kostengünstiger sind als Strom. Deshalb macht der Strom nur einen Anteil von drei Prozent am Energiebedarf der Branche für den Schmelzprozess aus, für einige wenige Unternehmen mit besonders stromintensiven Prozessen allerdings mehr.<sup>86</sup>

Die Energiekosten sind damit ein entscheidendes Kriterium für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Glasindustrie. Bezüglich der Stromkosten sind einige wenige besonders energieintensive Unternehmen der Glasindustrie durch die Ausnahmeregelungen für energieintensive Branchen teilweise von der EEG-Umlage sowie von Netzentgelten befreit und können durch die Carbon-Leakage-Kriterien beim Emissionshandel sparen.<sup>87</sup> Das trifft jedoch nur auf die Unternehmen zu, die die erforderlichen 14 Prozent Stromkosten im Verhältnis zur Bruttowertschöpfung erreichen.<sup>88</sup> Nur „26 von rund 400 Unternehmen erfüllen die Voraussetzungen für die besondere Ausgleichsregelung“.<sup>89</sup> Dementsprechend ist der Emissionshandel der entscheidende Wettbewerbsfaktor. Laut Bundesverband Glas e. V. (BV Glas) gibt es in der Glasindustrie eine Unterdeckung von rund zwanzig Prozent Emissionshandelszertifikaten.<sup>90</sup> Ein Hauptkritikpunkt ist, dass die EU-Klimaschutzmaßnahmen in Deutschland strenger umgesetzt werden als in anderen Mitgliedstaaten und in Nicht-EU-Ländern, in denen auch die Gesetzgebung in den Bereichen Umweltschutz und Sicherheit weniger streng ist.<sup>91</sup>

An den Vorgaben der dritten Emissionshandelsperiode wird zwar zunächst keine direkte Kritik geübt, doch wird die Herausforderung von der BV Glas als Chance wahrgenommen, „energieeffizienter zu produzieren und CO<sub>2</sub> einzusparen“.<sup>92</sup> Allerdings warnen auch die von der IG BCE befragten Expertinnen und Experten, dass „ohne die zurzeit geltenden

Entlastungsregelungen die weltweite Wettbewerbsfähigkeit einzelner Glassparten erheblich gefährdet“ sei.<sup>93</sup>

## Versorgungssicherheit

Recyclingglas ist ein wichtiger Rohstoff für die Glasindustrie, insbesondere für die mengenmäßig größte Sparte der Behältergläser. Somit sind Preis, Verfügbarkeit und Qualität des Sekundärrohstoffs „Scherben“ ein nicht zu unterschätzender Faktor für die Unternehmen der Branche.<sup>94</sup> Dieser ist in Deutschland reichlich vorhanden, sodass der Abfallexport, im Gegensatz zu den meisten anderen in dieser Studie behandelten Werkstoffen, keine Rolle spielt. Sonstige Primärrohstoffe, Quarzsand, Soda, Kalk und Dolomit, sind in Deutschland ebenfalls reichlich vorhanden, sodass den Fachleuten nach „zu hundert Prozent mit heimischen Rohstoffen“ gearbeitet werden kann.<sup>95</sup>

Ein besonderes Anliegen ist für die brennstoffintensive Branche die Versorgungssicherheit bei Erdgas. So heißt es seitens des BV Glas, dass der Versorgungssicherheit eine existenzielle Rolle zukomme, da „selbst kurzzeitige Unterbrechungen der Strom- und Gaszufuhr zu hohen und teilweise irreparablen Schäden an den Glaswannen führen können“. Diese sind darauf ausgelegt, im Zeitraum von 15 Jahren rund um die Uhr betrieben zu werden. Hier wird die Unterstützung des Staates als „nicht hinreichend“ empfunden. Des Weiteren sorgen sich Branchenvertreter auch um die Gasqualität, die „immer mehr herabgesetzt wird“.<sup>96</sup> Allerdings ist die Gasqualität streng geregelt und wird ständig überwacht, sodass Schwankungen nur innerhalb der Norm möglich sind.

## Nachhaltigkeit: Recycling, Energieeffizienz, Materialeffizienz, Kreislauffähigkeit

Kritik seitens des BV Glas gibt es auch für die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung. Eine „Senkung der Treibhausmissionen der Glasindustrie von vierzig Prozent“ sei „aus

86 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

87 | Vgl. IG BCE 2014b.

88 | Siehe IG BCE 2014b.

89 | Siehe IG BCE 2014b.

90 | Siehe acatech Umfrage.

91 | Vgl. IG BCE 2014b.

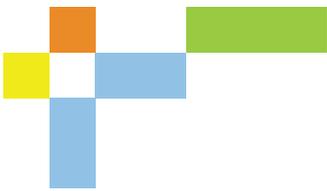
92 | Siehe acatech Umfrage.

93 | Siehe IG BCE 2014b.

94 | Vgl. IG BCE 2014b.

95 | Siehe IG BCE 2014b.

96 | Siehe acatech Umfrage.



physikalisch-technischen Gründen nicht möglich“.<sup>97</sup> Der Verband weist folglich darauf hin, dass nur noch geringe Einsparpotenziale vorhanden seien, da bereits am „chemisch-physikalisch-technischen Minimum produziert“ werde.<sup>98</sup> Laut Experteninterviews sind die bestehenden Prozesse in der Glasindustrie bereits relativ weit optimiert.<sup>99</sup> Heute geht es in der Branche um die Optimierung und Effizienzsteigerung bei den bewährten Prozessen.<sup>100</sup> Auch hier gibt es mit einem möglichen Einsatz von Biogas und synthetischem Gas allerdings Alternativen. Auch der Einsatz von Wasserstoff ist denkbar, auch wenn dafür Anlagen angepasst werden müssten.

Das Thema Nachhaltigkeit ist für die Glasbranche von besonderer Bedeutung. So wird auf die einzigartigen Recyclingeigenschaften des Werkstoffs verwiesen, der „unendliches, hundertprozentiges Recycling ohne Qualitätsverluste“ erlauben soll.<sup>101</sup> Dies gilt vor allem für Behälterglas; da lag die Recyclingquote 2014 bei 89 Prozent,<sup>102</sup> sodass 63 Prozent der Neuware aus recyceltem Glas bestehen. Vor allem im Gebäudebereich erkennt die Branche einen wichtigen Markt – darauf wird an mehreren Stellen der acatech Umfrage verwiesen. So können „moderne Fenster das Acht- bis Zehnfache an CO<sub>2</sub> einsparen“. Ferner wird die Energieeinsparverordnung ENEC als positiv gewertet. Im Gebäudebereich sollte allerdings noch mehr von der Bundesregierung auf den Weg gebracht werden, da hier das höchste Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial vermutet wird. Die Glasindustrie leistet einen Beitrag zur Nachhaltigkeit, indem sie Produkte bereitstellt, welche zur Energiewende beitragen: zum Beispiel Glasfasern für Windkraftwerke, Schaumglasprodukte, Gläser für photovoltaische und solarthermische Anwendungen.<sup>103</sup> Zudem kommt bei Glasverpackungen als Nachhaltigkeitsplus die Mehrwegfähigkeit und die aus gesundheitlichen Gründen wichtige Inertheit dazu:

„Glas gibt keine Inhaltsstoffe ab und garantiert die Reinheit von Lebensmitteln und Pharmaprodukten.“<sup>104</sup>

### 3.5 Beton, Zement, Steine

Ob Wohnhäuser oder Wolkenkratzer, kilometerlange Brücken oder Tunnel: Ohne Beton wären unsere heutige Architektur und Bauweisen nicht möglich. Zement als Grundstoff für Beton und Mörtel ist einer der wichtigsten heute verwendeten Baustoffe weltweit. Der Rohstoffbedarf der deutschen Steine-und-Erden-Industrie wird voraussichtlich bis 2030 leicht steigen.<sup>105</sup> Grund dafür ist unter anderem die hohe Nachfrage im Wohnungsbau und im Ausbau der Verkehrsinfrastruktur. Die deutsche Zementindustrie besteht aus 22 Unternehmen und 53 Werken, die mit ihren etwa 7.900 Beschäftigten jährlich einen Umsatz von rund 2,5 Milliarden Euro erwirtschaften.<sup>106</sup>

Im Jahr 2016 wurden knapp 33 Millionen Tonnen Zement hergestellt,<sup>107</sup> davon entfielen 6,5 Millionen Tonnen Zement inklusive Zementklinker auf den Export.<sup>108</sup> Zusätzlich importiert wurden etwa 1,3 Millionen Tonnen Zement.<sup>109</sup> Zuzüglich der Importe entspricht dies einem inländischen Zementverbrauch von 27,2 Millionen Tonnen, der folglich zu 96 Prozent durch einheimische Produktion gedeckt wurde.

Seit dem Jahr 2002 übersteigen die Exporte der deutschen Zementindustrie die Importe.<sup>110</sup> Die Produktion von Sand und Kies ist im Zeitraum von 2000 bis 2013 bundesweit von 343 Millionen Tonnen pro Jahr auf 236 Millionen Tonnen pro Jahr um rund 31 Prozent gesunken. Die durchschnittliche Produktionsmenge von Kies und Sand in dieser Zeitspanne betrug circa 260 Millionen Tonnen pro Jahr. Seit dem Jahr 2005 pendelt sich

97 | Siehe acatech Umfrage.

98 | Siehe acatech Umfrage.

99 | Vgl. Fraunhofer ISI 2013.

100 | Vgl. IG BCE 2014b.

101 | Siehe acatech Umfrage.

102 | Vgl. UBA 2015.

103 | Siehe acatech Umfrage.

104 | Siehe IG BCE 2014b.

105 | Vgl. bbs 2016.

106 | Vgl. VDZ 2015a.

107 | Vgl. VDZ 2015a.

108 | Vgl. Statista 2017d.

109 | Vgl. VDZ 2015a.

110 | Vgl. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH 2015.

die Menge auf einem unterdurchschnittlichen Niveau ein – der Baukonjunktur folgend. Nach Verbandsangaben werden rund 80 Prozent der Steine-Erden-Güter in der Bauwirtschaft eingesetzt; etwa 20 Prozent werden an industrielle Abnehmer wie die Chemie-, Stahl- oder Glasindustrie geliefert.<sup>111</sup>

### Energiepreise, Rohstoffpreise und Emissionshandel

Neben dem Einsatz von Primär- und Sekundärrohstoffen für die Herstellung von Zement und Beton benötigt die Zementindustrie auch große Mengen an Brennstoffen, vor allem zur Herstellung des Portlandzementklinkers. Allerdings spielen fossile Brennstoffe, die dem Gesamtrohstoffbedarf hinzugerechnet werden, bei der Zementherstellung in Deutschland nur noch eine untergeordnete Rolle. So wird der thermische Energiebedarf überwiegend durch Sekundärbrennstoffe gedeckt (63,4 Prozent in 2014), der Anteil fossiler Energieträger liegt demnach bei etwa 36,6 Prozent, während der Anteil im Jahr 2000 noch 74,3 Prozent betrug.<sup>112</sup> Als Sekundärrohstoffe werden insbesondere Industrie- und Gewerbeabfälle sowie Kunststoffabfälle und Altreifen verwendet. Der elektrische Energiebedarf stellt 10 bis 15 Prozent des gesamten Energiebedarfs der Zementherstellung und ist damit auch ein entscheidender Kostenfaktor in der Produktion. Elektrische Energie wird überwiegend für Zerkleinerungsprozesse wie Zementmahlung benötigt.

Bei der Zementherstellung wird durch das Brennen des Rohstoffgemischs eine große Menge CO<sub>2</sub> freigesetzt. Die Zementindustrie erhält als Carbon-Leakage-gefährdeter Sektor eine Zuteilung kostenfreier Zertifikate im Europäischen Emissionshandel. In Europa sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen im weltweiten Vergleich geringer. Da es in Nachbarregionen wie Nordafrika, der Türkei und dem Nahen Osten ausreichende Produktionskapazitäten für Zement gibt, befürchtet der Verein Deutscher Zementwerke e. V. (VDZ) eine baldige Verlagerung der Produktion ins außereuropäische Ausland, sofern der Carbon-Leakage-Schutz ab dem Jahr 2020 schwächer ausfallen sollte.

### Versorgungssicherheit

Die deutsche Zementindustrie fördert den Großteil ihres Primärrohstoffbedarfs selbst. Die Mehrzahl der Zementwerke in Deutschland ist nicht zuletzt aus ökologischen und

ökonomischen Gründen direkt bei den entsprechenden Abbaustätten von Kalkstein oder Mergel angesiedelt, sodass der wichtigste Rohstoff direkt vor Ort zu Klinker und Zement verarbeitet werden kann.

Grundsätzlich können in der Klinker- und Zementherstellung auch alternative primäre und sekundäre Rohstoffe eingesetzt werden, soweit die Zusammensetzung geeignet ist. Industrielle Nebenprodukte wie Hüttensand, der aus den Schlacken der Eisenverhüttung gewonnen wird, ist mit fast sieben Millionen Tonnen pro Jahr mengenmäßig der wichtigste Sekundärrohstoff. Flugaschen, ein Nebenprodukt aus Stein- und Braunkohlekraftwerken, werden als Zusatzstoffe eingesetzt. Als Folge der Energiewende, wenn die Stromerzeugung in Kohlekraftwerken rückläufig wird, könnte Flugasche in Deutschland weniger verfügbar sein. Andererseits wird sich auch die Nachfrage nach dem Primärrohstoff Kalkstein, der zur Rauchgasentschwefelung eingesetzt wird, voraussichtlich stark verringern. Schätzungen gehen von einem Rückgang der Förderung von Kalkstein von fast zehn Prozent im Jahr 2035 im Vergleich zu 2013 aus.<sup>113</sup> Eine Ursache dafür wird auch das Zurückfahren der Kohlekraftwerke sein.

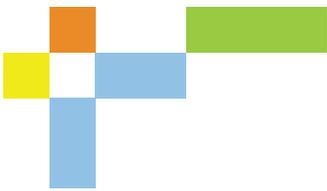
### Nachhaltigkeit

Thermische Energie wird in der Zementproduktion vor allem für das Brennen des Zwischenprodukts Zementklinker benötigt. Daneben ist auch die Trocknung der Rohstoffe energieaufwendig. Der thermische Energieeinsatz bei der Klinkerherstellung wurde bereits kontinuierlich reduziert. Maßgebliche Faktoren hierbei waren optimierte Prozesse, weitergenutzte Verbrennungsgase und erhöhte Ofenkapazitäten. Der Anteil an Sekundärbrennstoffen ist in Deutschland mit 63,4 Prozent relativ hoch, was die primären Energieressourcen schont. Grundsätzlich ist es möglich, den Anteil an Sekundärbrennstoffen noch weiter zu erhöhen, soweit diese verfügbar sind und ihr Einsatz rechtlich zulässig und gesellschaftlich akzeptiert ist. Das Potenzial, den thermischen Energiebedarf beim Brennen des Zementklinkers zu reduzieren, ist insgesamt gering. Es lässt sich vor allem bei neuen Anlagen erschließen. Allerdings haben Anlagen zur Zement- und Klinkerproduktion eine lange Lebensdauer. Daher ist nicht davon auszugehen, dass hierzulande durch einen Anlagenneubau kurz- oder mittelfristig ein relevantes Einsparpotenzial erschlossen werden kann.

111 | Vgl. bbs 2016.

112 | Vgl. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH 2015, VDZ 2015b.

113 | Vgl. bbs 2016.



Laut aktuellem Monitoring-Bericht der Initiative Kreislaufwirtschaft Bau lag die Gesamtzahl an mineralischen Bauabfällen im Jahr 2014 bei 202 Millionen Tonnen. Im Bericht wird festgehalten, dass 89,5 Prozent der 2014 angefallenen mineralischen Bauabfälle durch Recycling einer umweltverträglichen Verwertung zugeführt werden konnten. Das übertrifft bereits heute erheblich die Verwertungsquote von siebzig Prozent, die ab 2020 von der europäischen Abfallrahmenrichtlinie für Bau- und Abbruchabfälle gefordert wird.<sup>114</sup> Seit 1998 ist der Anteil der alternativen Rohstoffe in der Zementindustrie von 11 auf 16 Prozent deutlich angestiegen. Diese Entwicklung erklärt sich in erster Linie aus den Anstrengungen der deutschen Zementindustrie, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren, indem der Klinkeranteil bei der Zementproduktion auf ein im internationalen Vergleich sehr niedriges Niveau gesenkt wurde.<sup>115</sup> Wird die Nutzungsdauer von Gebäuden verlängert, kann dies den Ressourcenverbrauch erheblich verringern. Wichtig ist hierbei, schon bei der Gebäudekonzeption und Baustoffwahl die gewünschte Nutzungsdauer sowie variable Nutzungsweisen zu berücksichtigen und eine wirksame Instandhaltung zu ermöglichen. Dadurch werden allerdings auch die Sekundärrohstoffe weniger.

Neuartige Zemente und Bindemittel können eine interessante und auch energie- und ressourcenschonende Alternative zu herkömmlichen Zementen sein. Sie befinden sich jedoch derzeit noch im Entwicklungsstadium.<sup>116</sup> Hier ist auch die Entwicklung und Anwendung neuer Baustoffe wie die des kohlenstofffaserverstärkten Betons zu nennen: Durch Leichtbau und eine längere Lebensdauer ist es möglich, enorme Ressourcen einzusparen.<sup>117</sup>

Steine und Erden sowie die Rohstoffe für die Zementherstellung werden überwiegend in Deutschland gefördert. Die Flächen für den oberflächennahen Rohstoffabbau, also Steinbrüche und Kiesgruben werden in der Regel nur zeitlich befristet genutzt. Trotzdem handelt es sich um tiefgreifende Eingriffe in die Landschaft durch die Abbautätigkeiten. Daraus ergeben sich Nutzungskonflikte mit dem Grundwasserschutz, dem Natur- und Landschaftsschutz sowie zumindest temporär mit der Land- und Forstwirtschaft. Gleichzeitig finden aber Rekultivierungsbeziehungsweise Renaturierungsmaßnahmen statt, welche die Folgen dieses Eingriffs bereits während des Rohstoffabbaus

sowie nach der Stilllegung möglichst weitgehend wiederbeheben oder zumindest kompensieren. Diese Maßnahmen müssen in Form von Nachnutzungsplänen schon bei einer geplanten Erweiterung oder Neueröffnung von Abbaustätten ausgewiesen werden.

Auch Unternehmen und Verbände der Baustoff-, Steine- und Erden-Industrie sind an einer nachhaltigen Rohstoffförderung interessiert. Sie verfolgen Projekte für einen ökologisch wie wirtschaftlich sinnvollen Einsatz von Sekundärrohstoffen sowie Naturschutz und Schutz der Artenvielfalt in den Abbaustätten der Branche. Ein Beispiel ist die Gemeinsame Erklärung des Bundesverbands Baustoffe, Steine und Erden (BBS), des Naturschutzbunds Deutschland (NABU) sowie der Industriegewerkschaften Bauen-Agrar-Umwelt (IG BAU) und Bergbau, Chemie, Energie (IG BCE) zur Rohstoffnutzung in Deutschland, die in ähnlicher Form auch für die meisten Bundesländer vorliegt.<sup>118</sup>

### 3.6 Verbundwerkstoffe: speziell kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe

Kohlenstofffasern sind seit etwa fünfzig Jahren bekannt. Aufgrund ihrer mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften besitzen sie Vorzüge vor anderen Verstärkungsmaterialien wie Glas- oder Naturfasern und erlauben neue Konstruktionen mit Kunststoffen, aber auch mit Beton (siehe oben). Sie eignen sich besonders für extrem beanspruchte Bauteile beispielsweise in der Luftfahrt, im Fahrzeugbau, aber auch in der Medizintechnik, in Windkraftanlagen und für Freizeitartikel. Kohlenstofffasern werden in Deutschland produziert, aber im Vergleich zu anderen Werkstoffen nur in wenigen Kilotonnenmengen. Für die Herstellung von Kohlenstofffasern ist die Verfügbarkeit von Rohöl vernachlässigbar, da weniger als ein Prozent des weltweiten Fördervolumens dafür benötigt wird. Im Vergleich zu anderen, konkurrierenden Materialien hat die Kohlenstofffaserherstellung einen höheren Energiebedarf. Durch die Subventionierung der Energiepreise von wettbewerbenden Branchen wie Aluminium hat die Kohlenstofffaserbranche einen Wettbewerbsnachteil. Allerdings steht die Branche erst am

114 | Vgl. bbs 2017.

115 | Vgl. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH 2015.

116 | Vgl. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH 2015.

117 | Vgl. Reute 2015.

118 | Vgl. NABU et al. 2004.

Anfang ihrer Entwicklung und verspricht hohes Wachstumspotenzial. In den letzten zehn Jahren konnte der Energieverbrauch während der Kohlenstofffaserherstellung bereits um fünfzig Prozent reduziert werden.<sup>119</sup>

## Nachhaltigkeit

Theoretisch kann die Kohlenstofffaser vollständig im Kreislauf gehalten werden: Da sie auch in gemahlener Form noch Verstärkungseigenschaften besitzt, kann sie wieder als Füll- und Verstärkungstoff eingesetzt werden (Downgrading). Auch für verschiedene Matrices bestehen Verfahren für die stoffliche Wiedergewinnung. Diese befinden sich zum Teil aber noch im Entwicklungsstadium und sind noch nicht flächendeckend etabliert. Häufig werden daher Altprodukte noch thermisch verwertet. Mehrere Projekte beschäftigen sich mit Recycling und Life-Cycle-Management von Kohlenstofffasern.<sup>120</sup> Die meisten Produkte aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff befinden sich immer noch in Anwendung, daher sind Recycling und Life-Cycle-Management noch in der Entwicklung.

## 3.7 Funktionswerkstoffe

Funktionswerkstoffe sind eine heterogene Gruppe von Materialien mit beispielsweise besonderen elektrischen, magnetischen, akustischen, optischen oder biologisch-chemischen Eigenschaften. Diese Eigenschaften lassen sich gezielt beeinflussen, um die makroskopischen Eigenschaften, die Funktionalität eines Bauteils zu verändern. Funktionswerkstoffe werden in Abgrenzung zu Konstruktionswerkstoffen definiert – wobei die Übergänge zunehmend fließend sein können – und reagieren auf einen externen Stimulus mit einer nicht immer intuitiven und komplexen Eigenschaftsänderung, zum Beispiel einer spannungsinduzierten Dehnung oder einer magnetfeldinduzierten Temperaturänderung. Konkrete Beispiele sind metallisch leitende sowie ionenleitende, Halbleiter- und organische Leiterwerkstoffe, dielektrische, piezoelektrische, thermoelektrische und ferroelektrische Materialien, supraleitende Materialien und magnetische Werkstoffe. In der vorliegenden Position werden die aktuell besonders diskutierten Werkstoffe im Energiesektor als Beispiel hervorgehoben.

Funktionswerkstoffe sind Schlüsselkomponenten für Energiespeicher-, Energiewandler- und Energietransportapplikationen

einschließlich der Smart-Grid-Produkte, in denen Funktionswerkstoffe eingesetzt werden, so zum Beispiel (Li-Ionen-)Batterien, Katalysatoren und Brennstoffzellen, Festkörperwassertoffspeicher, Photovoltaik, Festkörperkühlung, (Mikro-)Energiegewinnung aus Abwärme oder Vibration, Leuchtstoffe sowie Motoren und Generatoren für die Windkraft und Elektromobilität. Zu den sogenannten Strategiemetallen gehören seltene Erden, sogenannte Lanthanoide, insbesondere Neodym (Nd), Praseodym (Pr), Gadolinium (Gd), Dysprosium (Dy) und Terbium (Tb); Übergangsmetalle für die Elektronik wie Zinn (Sn), Kupfer (Cu), Gallium (Ga), Germanium (Ge), Kobalt (Co), Tantal (Ta), Indium (In), Tellur (Te); Platingruppenmetalle für Katalyse, Brennstoffzellen und synthetische Brennstoffe.

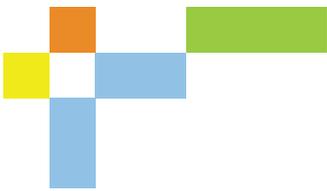
## Nachhaltigkeit

Moderne Funktionswerkstoffe sind damit ein zentraler Baustein für die Energiewende und für die Beendigung der „Nicht-nachhaltigkeit“ unserer fossil geprägten Gesellschaft und Wirtschaft. Die zunehmend kritische Verfügbarkeit primärer und sekundärer Ressourcen beeinflusst schon heute gegenwärtige und künftige Entwicklungen von modernen Funktionsmaterialien und daraus resultierende Energietechnologien. Insbesondere sind strategische Metalle oder Technologiemetalle ein Schlüssel für die große Transformation zu einer postfossilen und nachhaltigen Gesellschaft. Ihr effizienter Einsatz beziehungsweise ihre Substitution durch besser verfügbare Elemente (earth abundant) sind eine Herausforderung für Wissenschaft und Industrie. In den letzten dreißig Jahren hat sich der globale Abbau von Strategiemetallen drastisch beschleunigt. Gleichzeitig sind Stoffkreisläufe nicht geschlossen und weniger als ein Prozent der wertvollen Elemente aus End-of-Life-Geräten werden recycelt. Die Kreislaufführung zum Beispiel durch Urban Mining wäre ein wirksames Werkzeug, um die Importabhängigkeit zu verringern, den ökologischen Fußabdruck eines Neugerätes unter Einbau von Recyclingwerkstoffen drastisch zu verringern und die (unnötige) Dissipation von kritischen Metallen zu verhindern.

Generell ist festzuhalten, dass die Seltenerdgewinnung in China mit starken Umweltbelastungen einhergeht. Bei der Gewinnung fallen im Bergbau große Mengen an Rückständen an, die giftige Abfälle enthalten. Diese werden in künstlichen Teichen gelagert und können so ins Grundwasser gelangen.

119| Siehe acatech Umfrage.

120| Vgl. Carbon Composites e. V. 2012.



Mindestens ebenso problematisch aus ökologischer wie ethischer Sicht ist die Kobalt- und Tantalgewinnung im Kongo, diese Konfliktmetalle gelten als Schlüsselkomponenten für die Elektronik- und Automobilindustrie.

## Versorgungssicherheit

Die Importabhängigkeit Deutschlands von Strategiemetallen liegt in der Regel bei hundert Prozent. Das Paradebeispiel schlechthin für die Komplexität, Widersprüchlichkeit und Dynamik einer Kritikalität von Funktionswerkstoffen sind die seltenen Erden. Nicht alle seltenen Erden sind selten. Sie kommen weltweit an verschiedenen Stellen vor, trotzdem wird aber die gesamte Wertschöpfungskette vom Erz bis zum Seltenerdmetall von China dominiert. China ist mit über 90 Prozent Marktanteil derzeit auch weltweit größter Produzent der Seltenerdelement-Oxide und mit über 80 Prozent Marktanteil auch weltweit größter Hersteller für Hochleistungspermanentmagnete. Diese Magnete sind Schlüsselkomponenten für die Elektromobilität und Windkraft. Große Offshore-Windkraftanlagen, wie sie weltweit in immer größeren Stückzahlen errichtet werden, sind die gegenwärtig beste, energieeffizienteste Technologie mit dem geringsten Wartungsaufwand. Sechs-Megawatt-Anlagen enthalten bis zu drei Tonnen gesinterte Neodym-Eisen-Bor-Magnete; das entspricht ungefähr der Masse an Magnetmaterial, das für die Herstellung von 150.000 Festplatten benötigt wird.

Diese hohe Länderkonzentration entlang der gesamten Wertschöpfungskette hat weltweit Industrienationen abhängig von chinesischer Tagespolitik gemacht. Wiederkehrende extreme Preisfluktuationen sind die Folge. Eine wirklich „seltene“ Erde ist

Terbium (Tb). Der weitaus größte Teil an Terbium – über siebenzig Prozent – wird derzeit für Leuchtstoffe verwendet.<sup>121</sup> Aufgrund der starken und (überraschend) schnellen Verbreitung von LEDs nimmt der Anteil für diese Anwendung allerdings stark ab. Terbium könnte somit als Alternative für Dysprosium in Neodym-Eisen-Bor-Magneten zur Erhöhung der thermischen Stabilität in naher Zukunft verstärkt zur Verfügung stehen.<sup>122</sup> Die Extraktion und Separation von Terbium stellt technologisch eigentlich kein Problem mehr dar. Im Bericht des European Rare Earths Competency Networks (ERECON) wurde diskutiert, dass die vergangene Seltenerdkrise vermeidbar gewesen wäre. ERECON argumentiert daher, dass sich mögliche zukünftige Seltenerd Krisen mit einer volkswirtschaftlich relativ geringen Investition in eine Seltenerdmine verhindern ließen.<sup>123</sup> Ob sich die europäischen Bedarfe an seltenen Erden für alle existierenden Applikationen, aber auch für die rasch ansteigenden und kurzfristigen Anforderungen in der Elektromobilität und Windkraft auf diese Weise sicherstellen lassen, ist noch zu diskutieren.

Nicht nur, aber besonders deutlich lässt sich am Beispiel von Funktionswerkstoffen herausarbeiten, warum eine weltweit immer schneller steigende Rohstoffnachfrage, eine Intransparenz am Rohstoffmarkt, eine Abhängigkeit von wenigen Abbaugebieten, Preisschwankungen und Rohstoffverknappungen elementare Herausforderungen für die deutsche Wissenschaft, Industrie und Politik geworden sind. Der Industriestandort Deutschland ist mit seinen High-Tech-Unternehmen in Automobilbranche, Elektro- und Elektronik, Maschinenbau, Metall- und Chemieindustrie von einer stabilen Versorgung mit strategischen Metallen besonders abhängig.

121 | Vgl. EC 2014, 2017.

122 | Vgl. Gauß/Gutfleisch 2016.

123 | Vgl. ERECON 2015.

## 4 Handlungsempfehlungen

Der Wettbewerb zwischen den Werkstoffen ist ein wesentlicher Treiber für Innovationen in allen Sektoren der Wirtschaft. Diesen Wettbewerb vor dem Hintergrund von steigenden Energiepreisen, Regulierung und globalem Wettbewerb fair und offen möglich zu machen, ist daher die zentrale Empfehlung an die Politik. Wirtschaft und Wissenschaft sind aufgefordert, weiterhin Werkstoffinnovatoren zu sein. Dabei muss die Balance zwischen den Werkstoffen, deren Produktion, Nutzung sowie Recycling und dem Schutz von Mensch, Gesundheit und Umwelt kontinuierlich faktenbasiert diskutiert werden. Politische Entscheidungen müssen diesen Schutz mit der Entwicklung von Wohlstand und Wirtschaftswachstum in Einklang bringen. Die Auswirkungen von politischen Entscheidungen auf die Werkstoffwirtschaft müssen wissenschaftlich ermittelt und transparent gemacht werden.

Die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften identifizierte das Thema „Werkstoffe der Zukunft“ in der jährlich intern stattfindenden Technikthemenumfrage als eines der bedeutendsten Themen für die kommenden Jahre. acatech hat in der vorliegenden POSITION die gesetzlichen Rahmenbedingungen und die Situation der wichtigsten Werkstoffklassen analysiert. Daraus ergibt sich zusammenfassend, dass fast alle Werkstoffe stark von Energiepreisen und dem CO<sub>2</sub>-Emissionshandel abhängen. Als weitgehend rohstoffarmes Land – mit Ausnahme des Sektors Steine, Erden und Zement – ist Deutschland von der Verfügbarkeit der Rohstoffe und vom internationalen Handel abhängig. Dadurch ergibt sich zum Beispiel für Funktionswerkstoffe und auch Kunststoffe eine Notwendigkeit zu weiteren Innovationen zur Substitution dieser Materialien. Herausforderungen hinsichtlich der Kreislaufführung und Recyclingfähigkeit werden vor allem bei den Kunststoffen, den Funktionswerkstoffen und Verbundmaterialien gesehen. Aus dieser Bestandsaufnahme leiten sich die nachfolgenden Handlungsempfehlungen ab.

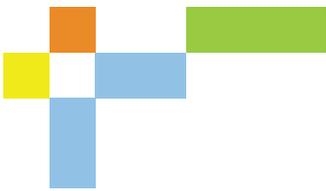
### 1. Voraussetzungen für einen fairen Innovationswettbewerb der Werkstoffbranche schaffen

Für einen fairen Wettbewerb braucht die Werkstoffbranche Ausnahmen von der EEG-Umlage, aber auch eine Verknappung von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten. Deutschland muss auf einen effizienteren

Einsatz von Ressourcen, Energie, Materialien und Werkstoffen hinarbeiten und Kreisläufe schließen. Zugleich dürfen nationale oder europäische Regelungen, zum Beispiel beim Emissionshandel, bei umweltbezogenen Grenzwerten oder bei den Strompreisen, faire Bedingungen für die deutsche Werkstoffbranche im internationalen Wettbewerb nicht gefährden. Im Rahmen des Emissionshandels und der steigenden Energiepreise durch die EEG-Umlage bleibt die Werkstoffbranche weiterhin auf Ausnahmeregelungen angewiesen. Diese sollen vermeiden, dass die werkstoffherzeugende Industrie in Länder abwandert, die günstiger und zu häufig schlechteren Bedingungen für Umwelt und Gesundheit produzieren können. Für energie- und emissionsintensive Industrien innerhalb der Werkstoffbranche können sich allerdings Konflikte ergeben: Die Industriezweige bleiben zwar durch Ausnahmeregelungen wettbewerbsfähig, die Innovationskraft wird allerdings gehemmt, wenn es zu viele CO<sub>2</sub>-Zertifikate gibt. Es muss also gewährleistet sein, dass nicht mehr Zertifikate auf dem Markt sind, als benötigt werden. Ein weiterer Lösungsansatz ist, den Zertifikatehandel weltweit auszuweiten, um globale Unterschiede auszugleichen.

### 2. Kreisläufe schließen und Rückgewinnung aus Schrott und Altprodukten im Sinne der Circular Economy verbessern

Schrott und Altprodukte, die im Inland anfallen, leisten mitunter einen erheblichen Anteil an der Produktion von Neuware. Dieser Anteil – der systematisch erfasst und dokumentiert werden muss – lässt sich steigern, wenn die Rückführung in den Ressourcen- und Materialkreislauf verbessert wird. Insbesondere bei kritischen Roh- und Werkstoffen, deren Versorgungssicherheit in Deutschland gefährdet ist, können Ausfuhrbeschränkungen von Schrott und funktionsfähigen Altprodukten notwendig werden; sie müssten dann aber auch durchgesetzt und kontrolliert werden. Die Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen im Sinne eines Produkts als Service, bei dem nicht mehr ein Gerät (zum Beispiel Waschmaschine) verkauft wird, sondern die Leistung (zum Beispiel die Anzahl der Waschgänge) einschließlich des Recyclings der Altprodukte durch die Unternehmen, wäre ein weiterer Schritt hin zum Schließen des Kreislaufsystems. Die Endlagerung von Rohstoffen in Halden oder in der Asche von Verbrennungsanlagen mit ökonomisch vertretbarem Aufwand nicht rückgängig zu machen, ist ökologisch, ökonomisch und mit Blick auf die wachsende Abhängigkeit Deutschlands von Rohstoffen nicht vertretbar. Ein ethischer Aspekt kommt hier ebenfalls zum Tragen: Deutschland exportiert unter Umständen Altprodukte und Abfälle in Entwicklungsländer, die dort unvollständig und unter Gefahren für Gesundheit und Umwelt zerlegt und recycelt



werden. Andererseits wird durch die Ausfuhr von funktionstüchtigen Produkten deren Lebens- und Nutzungsdauer häufig verlängert. Hier sollte mehr in Forschung investiert werden, um die Ökobilanz dahingehend zu erweitern. Außerdem muss gewährleistet werden, dass die Altprodukte nach ihrer Nutzungsphase auch in den Drittländern unter kontrollierten Bedingungen recycelt werden.

### **3. Ökodesign-Richtlinie auf den gesamten Lebenszyklus anwenden**

Gegenwärtig steht bei der Anwendung der Ökodesign-Richtlinie der Energie- und -materialverbrauch von Produkten in der Erzeugung und ersten Nutzungsphase im Vordergrund. Beim Gesamtenergie- und materialverbrauch sind jedoch die Lebensdauer, Reparaturfähigkeit und die Recyclingfähigkeit ebenso entscheidend. Auch die Standardisierung von Schnittstellen, zum Beispiel bei der Stromversorgung und bei Steckverbindungen aller Art, ist entscheidend für die Effizienz des Material- und Ressourceneinsatzes – häufig gelangt heute mit dem defekten Gerät auch das funktionstüchtige Netzteil im Müll. Der dafür bestehende Forschungsbedarf wird in der Handlungsempfehlung 7 benannt. Eine auf den gesamten Lebenszyklus ausgerichtete Ökodesign-Richtlinie muss von der Politik auf Basis materialwissenschaftlicher Evidenz weiterentwickelt werden.

### **4. Ökodesign-Richtlinie auf alle Branchen ausweiten**

Ein nachhaltiges Life-Cycle-Management von Produkten erfordert, dass alle Mitspieler einer Produktentwicklung an einem Strang ziehen. Nur so entsteht die Basis dafür, dass sich Material- und Ressourcenkreisläufe schließen. Das ist nur möglich, wenn die Grundidee der Ökodesign-Richtlinie auf alle Branchen ausgeweitet wird. Im Moment werden Transportmittel jeglicher Art von der Ökodesign-Richtlinie ausgeklammert. Diese Ausnahmen für Kraftfahrzeuge, Eisenbahnen, Flugzeuge, Schiffe etc. sind auf ihre Berechtigung zu überprüfen.

### **5. Geplante Regulierungen auf Zielkonflikte analysieren und gegebenenfalls revidieren**

Einige Richtlinien und Regularien lösen Zielkonflikte aus. Ein Beispiel ist der Zielkonflikt zwischen Materialeinsparung durch immer kleinere Geräte und der Effizienz des Materialeinsatzes:

Bei der Miniaturisierung von Bauteilen, zum Beispiel bei Elektrogeräten, wird zwar Material gespart. Allerdings erhöht sich durch die Vielfältigkeit der eingesetzten Werkstoffe auf immer engerem Raum die Komplexität der Produkte. Der Gehalt der einzelnen Materialien wird dermaßen gering, dass ein Recycling solcher Bauteile unrentabel oder sogar unmöglich wird. Ein weiteres Beispiel ist der Zielkonflikt zwischen Recycling und Schadstoffgrenzwerten: Zum Beispiel bestimmen in der Ersatzbaustoffverordnung Grenzwerte für Recyclingbaustoffe, inwieweit ihre Verwertung zulässig ist. Werden die Grenzwerte für bestimmte Stoffe, etwa Sulfat, Vanadium oder polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), im Rahmen der Ersatzbaustoffverordnung verschärft, erschwert dies häufig das Recycling, sodass die Verwertungsrate sinkt. Im Sinne eines Kreislaufs – einer Circular Economy – der eingesetzten Rohstoffe müssen bereits Neubauten so konzipiert werden, dass die verwendeten Baustoffe nach der Nutzungsdauer möglichst vollständig getrennt und recycelt werden können. Weitere Konflikte bestehen gerade an der Schnittstelle zwischen Chemikalien-, Produkt- und Abfallrecht.<sup>124</sup> So ist der Einsatz von recycelten Kunststoffen zum Beispiel in Lebensmittelverpackungen eingeschränkt. Solche Zielkonflikte muss eine verstärkte Forschung und Entwicklung frühzeitig aufdecken. Regulierungen, die Zielkonflikte auslösen und ihr Ziel nicht erreichen, sollten vermieden beziehungsweise überdacht und gegebenenfalls zurückgenommen werden. Diese Zielkonflikte sind nur durch politische Entscheidungen zu lösen.

### **6. Durchgängige und konsequente Digitalisierung von Materialwissenschaft und Werkstofftechnik vorantreiben und etablieren**

Die Werkstoffentwicklung ist einerseits wesentlich für die Digitalisierung. Schon die Entwicklung immer kleinerer und leistungsfähiger Chips wäre ohne sie undenkbar. Die Digitalisierung verbessert andererseits auch die Möglichkeiten der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. Digitale Datenbanken und Simulationen vereinfachen die Suche nach geeigneten Werkstoffen für spezifische Anwendungen und beschleunigen die er Vorteil: Werkstoffe können durch Entwicklung neuer Werkstoffe. Doch digitalisierte Werkstoffplattformen schneller, individueller und vor allem günstiger eingesetzt werden. Wenn solche Materialinnovationen mit Innovationen in der Produktentwicklung und Produktionstechnik verknüpft werden, ergeben sich noch größere Potenziale für Materialeffizienz, Produktnutzungsphase, Recycling und die Entwicklung neuer

124 | Vgl. EP 2018.

Geschäftsmodelle. Die Digitalisierung kann die gesamte Kette von Materialentwicklung über die Nutzungsdauer bis hin zur Kreislaufführung abbilden und so einen Beitrag zu einer echten Kreislaufwirtschaft leisten. Auf Basis einer – digital unterstützten – Analyse und Bewertung von Materialinformationen aus verschiedenen Quellen lassen sich Wertschöpfungspotenziale bei Weitem effizienter ausnutzen. Daher ist – entlang der Wertschöpfungskette von der Forschung bis zum Produkt und zum Recycling – eine durchgängige Digitalisierung der Werkstoffentwicklung nötig.

## 7. **Forschung zu Recyclingverfahren intensivieren und stärker fördern**

Das Recycling von Werk- und Rohstoffen erfordert eine bessere Kooperation zwischen Werkstoffforschung und Produktentwicklung (siehe auch Empfehlung 8). Besonders wichtig wird diese Zusammenarbeit für Metalle aus Dünnschichttechnologien, zum Beispiel Indium, Gallium, Europium, Tantal, oder für einige Katalysatormetalle. Nur im Zusammenspiel von Werkstoffforschung und Produktentwicklung und mit Blick auf die Recyclingmethoden lassen sich Zielkonflikte vermeiden, wie sie in Empfehlung 3 und 5 beschrieben wurden. Zudem fehlen insbesondere für Funktionsmaterialien zumeist technisch und wirtschaftlich machbare Recyclingmethoden. Die Forschungsförderung sollte einen stärkeren Schwerpunkt auf diesen Aspekt legen. Insgesamt müssen Forschung, aber auch Politik einem systemischen Kreislaufgedanken im Sinne einer Circular Economy mehr Beachtung schenken. Zu beachten sind dabei auch mögliche Wechselwirkungen aus der Einstufung von Stoffen gemäß dem Produktrecht mit Folgen für das Abfallrecht und das Recycling.

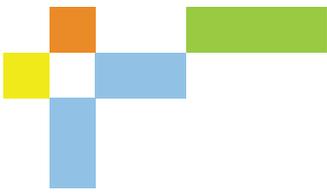
## 8. **Werkstoff – Konstruktion – Fertigung: interdisziplinäres Arbeiten ausbauen und Lücke zwischen Materialentwicklung und fertigem Produkt schließen**

Die Grundlagenforschung an Materialien und Werkstoffen gehört zu den Erfolgsbedingungen für werkstoffliche Innovationen. Die Forschungsförderung in Deutschland zur (Weiter-)Entwicklung von klassischen und neuen Werkstoffen ist insgesamt gut aufgestellt. Insbesondere das BMBF-Programm „Vom Material zur Innovation“ und das Vorgängerprogramm „WING – Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft“ sind hier zu nennen. Eine ausgeprägte interdisziplinäre Forschung zwischen Werkstoffentwicklung, Produktentwicklung und Fertigungstechnologie muss das Förderziel sein und bleiben. Jedes Bauteil benötigt Werkstoffe, Konstruktion und Fertigung. Die

Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands leidet, wenn einer dieser Bereiche vernachlässigt wird. Die Interdisziplinarität und die notwendige Durchgängigkeit zwischen Grundlagenforschung und angewandter Entwicklung erfordern je nach Zielsetzung längere Projektlaufzeiten. Zum Beispiel ermöglicht eine längere Laufzeit von F&E-Projekten von etwa fünf Jahren eine durchgehende Förderung von der Werkstoffherstellung bis zum Engineering. Ebenso sind Pilotprojekte an Hochschulen und Forschungseinrichtungen wichtig. Sie bilden den notwendigen Zwischenschritt von der Idee im Labor bis zum Einsatz im großen Maßstab. Sinnvoll sind in dieser Hinsicht die Entwicklung von Demonstratoren, die Einrichtung von Innovation-Labs sowie die vermehrte Durchführung von Validierungsprojekten, welche Anwendungsfelder von Ergebnissen der Grundlagenforschung identifizieren und validieren. Förderprogramme, Förderstellen und Projektträger sollten diesem Bedarf Rechnung tragen.

## 9. **Mehr Mut zu innovativen Werkstoffen**

Neue, innovative Werkstoffe werden von Unternehmen oft auch deswegen zögerlich eingesetzt, weil damit häufig ein hohes ökonomisches Risiko einhergeht und Normen und Standards verändert werden müssten. Außerdem erfordern sie meist markante Umstellungen im eigenen Betrieb: Beispielsweise ändern sich der etablierte Produktionsprozess, die Verarbeitung der Produkte, die Arbeitsorganisation. Über Jahre aufgebaute Kompetenzen werden plötzlich hinfällig, neue müssen erworben werden. Ein Beispiel dafür ist der Einsatz von innovativen Glasfaserleitungen für die Telekommunikation. Für die Unternehmen war es kurzfristig betrachtet günstiger, wie gewohnt klassische Kupferleitungen zu verlegen. Die Umstellung auf Glasfaser erforderte neue Methoden, Geräte und eine Entwicklung der Kompetenzen der Mitarbeitenden und der Arbeitsorganisation. Der Ausbau schneller Internetverbindungen mit Kupferkabeln war deshalb kurzfristig betrachtet effizienter – heute liegt darin eine Ursache des schleppenden Netzausbaus in Deutschland. Ein aktuelles Forschungsfeld von herausragender Bedeutung ist die Batterieforschung. Hier muss Deutschland entsprechende Weichen stellen, um Batterien der kommenden Generation (Post-Lithium) und die entsprechenden Materialien hierzulande zu entwickeln. In diesem Sinne erfordert es Mut von den Unternehmen, innovative Werkstoffe schneller zur Umsetzung zu bringen. Dabei sollte auch empirisch geklärt werden, ob werkstoffliche oder werkstofftechnische Innovationen von der Unternehmensgröße abhängen. Dafür ist eine stärkere Zusammenarbeit zwischen Forschung und Anwendung nötig – und die Politik sollte die nötigen Anreize in öffentlichen Infrastrukturprojekten setzen.



## 10. Wirksamer und zielorientierter kommunizieren

Ohne innovative Werkstoffe und Materialien gibt es keine innovativen Produkte. Werkstoffinnovationen sind Schlüsselinnovationen. Sie sind wenig sichtbar, aber unverzichtbar. Innovative Entwicklungen auch bei klassischen Werkstoffen wie Stahl, Glas und Kunststoffe werden von Öffentlichkeit und Politik kaum wahrgenommen. Häufiger geraten Werkstoffe in

Negativschlagzeilen – beispielsweise Dämmmaterialien bei Hausbränden oder Plastikmüll. Verbände und Unternehmen, aber auch Wissenschaftler sollten „ihre“ Werkstoffe und Materialien und deren positive Eigenschaften und ihr Innovationspotenzial stärker kommunizieren und zugleich im gesellschaftlichen und politischen Dialog auf eine effizientere Verwendung im Sinne der Circular Economy hinwirken.

# Literatur

## acatech 2018

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (Hrsg.): *CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie* (acatech POSITION), München: Herbert Utz Verlag 2018.

## bbs 2016

Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (bbs): *Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine- und Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland*, Berlin 2016.

## bbs 2017

Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (bbs): *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2014. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2014*, Berlin 2017.

## Carbon Composites e.V. 2012

Carbon Composites e.V.: *Spitzencluster MAI Carbon*, 2012. URL: <https://carbon-composites.eu/de/netzwerk/abteilungen/mai-carbon/> [Stand: 15.12.2018].

## Consultic 2016

Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (Consultic): *Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015* (Kurzfassung), Alzenau 2016.

## DECHEMA 2017

Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA): *Low Carbon Energy and Feedstock for the European Chemical Industry*, Frankfurt 2017.

## EC 2014

European Commission (EC): *Report on Critical Raw Materials for the EU: Critical Raw Materials Profiles; European Commission – Report of the Ad hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials*, 2014. URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/10010/attachments/1/translations/en/renditions/pdf> [Stand: 13.09.2017].

## EC 2017

European Commission (EC): *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee of the Regions on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU*, 2017. URL: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/EN/COM-2017-490-F1-EN-MAIN-PART-1.PDF> [Stand: 13.09.2017].

## EP 2018

Europäisches Parlament (EP): *Mitteilung (COM(2018) 32 final) – Optionen zur Regelung der Schnittstelle zwischen Chemikalien-, Produkt- und Abfallrecht*, 2018.

## Erdmann et al. 2011

Erdmann, L./Behrendt, S./Feil, M.: *Kritische Rohstoffe für Deutschland*, Berlin 2011.

## ERECON 2015

European Rare Earths Competency Network (ERECON): *Strengthening the European Rare Earths Supply-chain: Challenges and Policy Options*, 2015.

## FONA 2017

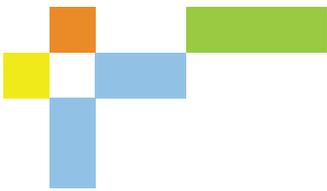
Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA): *Carbon2Chem*, 2017. URL: <https://www.fona.de/de/carbon2chem-21137.html> [Stand: 15.12.2018].

## Fraunhofer ISI 2013

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI): *Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente*, Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2013.

## Gauß/Gutfleisch 2016

Gauß, R./Gutfleisch, O.: „Magnetische Materialien – Schlüsselkomponenten für neue Energietechnologien“. In: Kausch P./Matschullat J./Bertau M./Mischo H. (Hrsg.): *Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung*, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2016, S. 99–118.



#### **Graedel et al. 2012**

Graedel, T./Barr, R./Chandler, Ch./Chase, Th./Choi, J./Christofersen, L./Friedlander, E./Henly, C./Jun, Ch./Nassar, N./Schechner, D./Warren, S./Yang, M./Zhu, Ch.: „Methodology of Metal Criticality Determination“. In: *Environmental Science and Technology*, 46, 2012, S. 1063-1070.

#### **IG BCE 2014a**

Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IG BCE): *Die Chemische Industrie. Eine Branchenanalyse*, Hannover 2014.

#### **IG BCE 2014b**

Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IG BCE): *Glasindustrie in Deutschland – Eine Branchenanalyse*, Hannover 2014.

#### **IG BCE 2014c**

Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IG BCE): *Kunststoffverarbeitung in Deutschland – Eine Branchenanalyse*, Hannover 2014.

#### **IZT 2011**

Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT): *Kritische Rohstoffe für Deutschland*, 2011.

#### **NABU et al. 2004**

Naturschutzbund Deutschland (NABU)/Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (bbs)/Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IG BCE)/Industriegewerkschaft Bauern-Agrar-Umwelt (IG BAU): *Rohstoffnutzung in Deutschland*. Bonn, Berlin, Hannover, Frankfurt 2004.

#### **Plastics Europe 2017**

Plastics Europe: *Plastics Europe's View on Eco-design with Plastics within the Circular Economy – Update 2017*, 2017.

#### **Prognos AG 2016**

Prognos AG: *Volkswirtschaftliche Folgen einer Schwächung der Stahlindustrie in Deutschland*, Freiburg 2016.

#### **Reller 2011**

Reller, A.: „Criticality of Metal Resources for Functional Materials Used in Electronics and Microelectronics“. In: *physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters*, 5: 9, Weinheim 2011.

#### **Reute 2015**

Reute, A.: *Eine neue Art des Bauens*, 2015. URL: <https://www.bauen-neu-denken.de/eine-neue-art-des-bauens/> [Stand: 24.01.2019].

#### **RWI 2015**

Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI): *Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Stahlindustrie – Eine Aktualisierung im Lichte neuer Daten. Gutachten im Auftrag der Wirtschaftsvereinigung Stahl*, Essen 2015.

#### **Statista 2017a**

Statista: *Weltweite Aluminiumnachfrage in den Jahren von 2006 bis 2017 (in 1.000 Tonnen)*, 2017. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156039/umfrage/weltweite-aluminiumnachfrage-seit-2006/> [Stand: 15.12.2018].

#### **Statista 2017b**

Statista: *Weltweite Kupfernachfrage in den Jahren von 2011 bis 2018 (in Millionen Tonnen)*, 2017. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156043/umfrage/weltweite-kupfernachfrage-seit-2006/> [Stand: 15.12.2018].

#### **Statista 2017c**

Statista: *Produktion von Primär- und Sekundäraluminium in Deutschland in den Jahren 2007 bis 2017 (in 1.000 Tonnen)*, 2017. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197960/umfrage/produktion-von-primar-und-sekundaeraluminium-in-deutschland/> [Stand: 15.12.2018].

#### **Statista 2017d**

Statista: *Exportierte Zementmenge Deutschlands in den Jahren 1960 bis 2017 (in 1.000 Tonnen)*, 2017. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/162209/umfrage/export-von-zement-aus-deutschland-seit-1958/> [Stand 15.12.2018].

#### **Statistisches Bundesamt 2016**

Statistisches Bundesamt: *Produzierendes Gewerbe. Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden 2014*, Wiesbaden 2016.

#### **UBA 2012**

Umweltbundesamt (UBA): *Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie des Anteils des Recyclings an der Wertschöpfung unter Darstellung der Verwertungs- und Beseitigungspfade des ressourcenrelevanten Abfallaufkommens*, Dessau-Roßlau 2012.

#### **UBA 2015**

Umweltbundesamt (UBA): *Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2013*, Dessau-Roßlau 2015.

**VDZ 2015a**

Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ): *Zementindustrie im Überblick 2015*, Berlin 2015.

**VDZ 2015b**

Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ): *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie*, Düsseldorf 2015.

**Wirtschaftsvereinigung Stahl 2015**

Wirtschaftsvereinigung Stahl: *Klimaschutz mit Stahl. Politische Positionen und Beitrag der Stahlindustrie in Deutschland*, Düsseldorf 2015.

**World Steel Association 2018**

World Steel Association: *Fact Sheet Steel and Raw Materials*, 2018. URL: [https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:16ad9bcd-dbf5-449fb42c-b220952767bf/fact\\_raw%2520materials\\_2019.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:16ad9bcd-dbf5-449fb42c-b220952767bf/fact_raw%2520materials_2019.pdf) [Stand: 15.12.2018].

**Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH 2015**

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH: *Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie. Initiative für Nachhaltigkeit in der deutschen Zementindustrie. Analyse des Status quo und Perspektiven*, Wuppertal: 2015.





# acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter [www.acatech.de](http://www.acatech.de)



**Herausgeber:**

**acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2019**

Geschäftsstelle  
Karolinenplatz 4  
80333 München

T +49 (0)89/52 03 09-0  
F +49 (0)89/52 03 09-900

info@acatech.de  
www.acatech.de

Hauptstadtbüro  
Pariser Platz 4a  
10117 Berlin  
T +49 (0)30/2 06 30 96-0  
F +49 (0)30/2 06 30 96-11

Brüssel-Büro  
Rue d'Egmont/Egmontstraat 13  
1000 Brüssel (Belgien)  
T +32 (0)2/2 13 81-80  
F +32 (0)2/2 13 81-89

Vorstand i.S.v. § 26 BGB: Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Karl-Heinz Streibich, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier,  
Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl, Prof. Dr. Hermann Requardt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Prof. Dr. Martina Schraudner,  
Manfred Rauhmeier

Empfohlene Zitierweise:

acatech (Hrsg.): *Rahmenbedingungen für die Zukunft der Werkstoffe – Analyse und Handlungsempfehlungen* (acatech POSITION),  
München: utzverlag 2019.

ISSN 2192-6166

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,  
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege  
und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Koordination: Dr. Martina Kohlhuber

Redaktion: Lev Milstein, Birgit Obermeier, Alrun Straudi

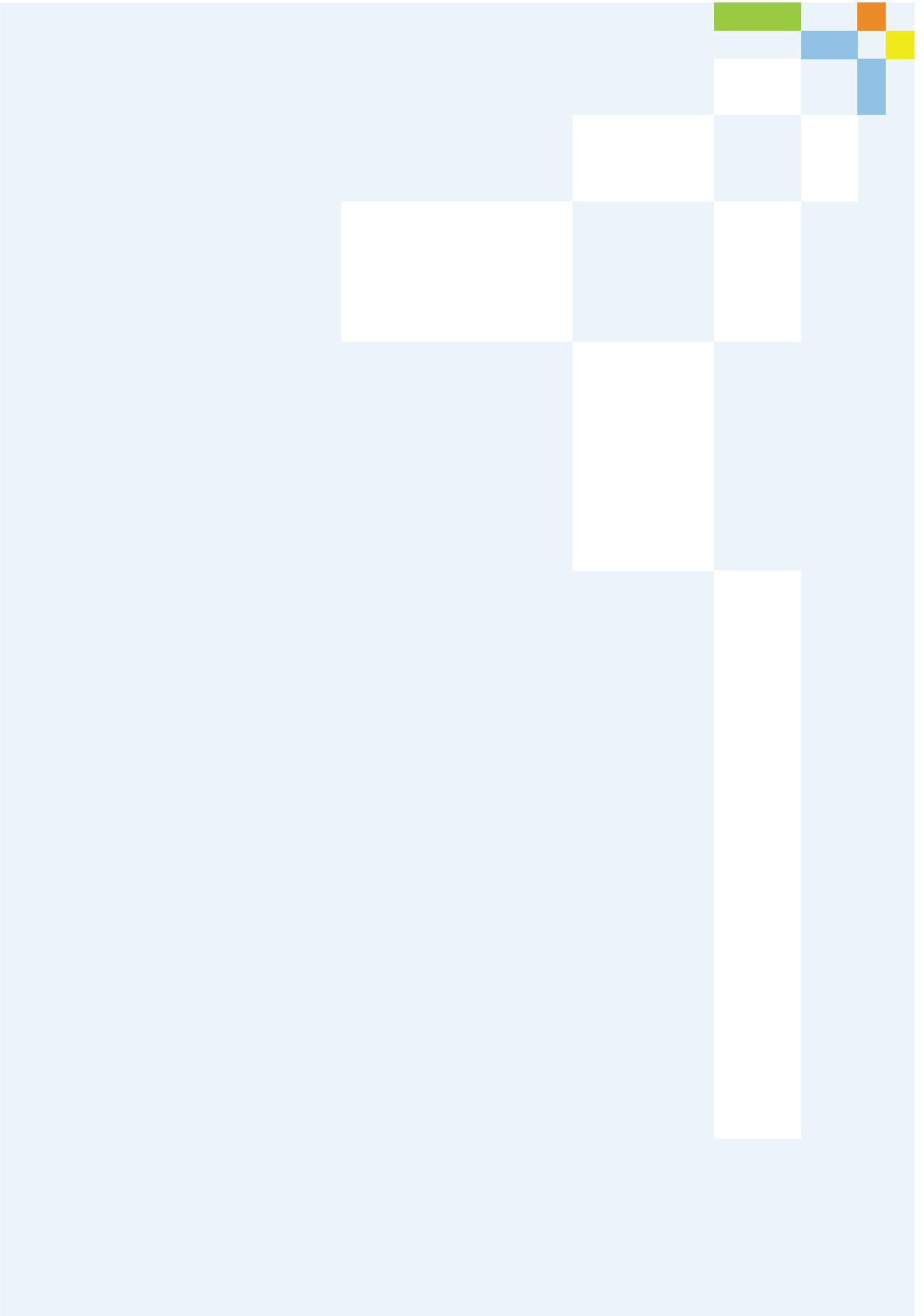
Lektorat: Lektorat Berlin, Berlin

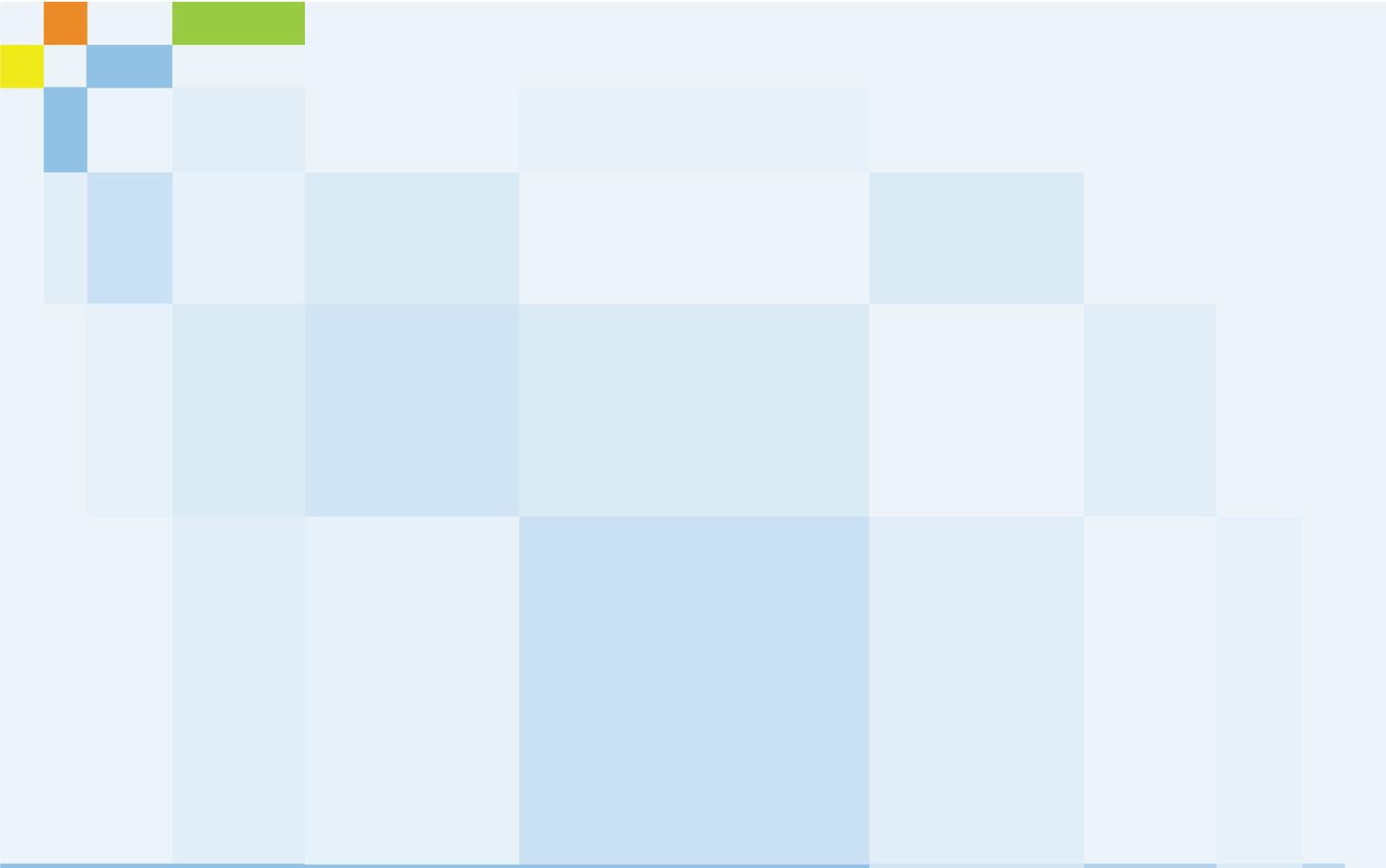
Titelfoto: isak55/shuttershock

Layout-Konzeption: Groothuis, Hamburg

Konvertierung und Satz: Fraunhofer IAIS, Sankt Augustin

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)





Werkstoffe sind aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken und haben weitreichende Bedeutung. Alle Produkte – quer durch sämtliche Branchen – hängen von maßgeschneiderten innovativen und klassischen Materialien und Werkstoffen ab. Bei den konventionellen Werkstoffen ist das technologische Potenzial zwar manchmal ausgeschöpft, ihr Einsatz aber sowohl für bisherige als auch für neue Anwendungen relevant. Neue Werkstoffe hingegen ermöglichen neue Bauteilfunktionalitäten und neue Geschäftsfelder.

Wegen der immensen Relevanz klassischer und innovativer Werkstoffe – vor allem für die deutsche Industrielandschaft – hat acatech die Rahmenbedingungen Regulierung, Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit für sieben ausgewählte Werkstoffklassen ausgewertet und daraus Handlungsempfehlungen für Politik, Wissenschaft und Gesellschaft abgeleitet. Grundlage dieser acatech POSITION bildeten eine Umfrage unter Verbänden und Expertinnen und Experten der Werkstoffbranchen sowie eine Literaturlauswertung von Positionspapieren, Studien und Berichten aus der Wirtschaft und der Forschung. Das Fazit: Deutschland braucht geeignete Rahmenbedingungen für Werkstoffe, um einen effizienten Einsatz von Energie, Materialien und Werkstoffen zu gewährleisten und eine Kreislaufwirtschaft zu erreichen. Dabei muss die Balance zwischen unverzichtbaren Materialien und dem Schutz von Mensch und Umwelt kontinuierlich ausgehandelt werden.