



**Fraunhofer**  
MATERIALS

**ENERGIEWENDE MIT MATERIALIEN**  
**POSITIONSPAPIER**



# FRAUNHOFER MATERIALS – ZUKUNFT MATERIALISIEREN!

Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS bündelt die Kompetenzen von 17 materialwissenschaftlich orientierten Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft, ergänzt um die materialrelevanten Kompetenzen von 5 Gastinstituten. Materialforschung bei Fraunhofer umfasst die gesamte Wertschöpfungskette von der Entwicklung neuer und der Verbesserung bestehender Materialien über deren Herstelltechnologien im industriennahen Maßstab, die Charakterisierung der Materialeigenschaften bis hin zur Bewertung des Einsatzverhaltens im Bauteil. Entsprechendes gilt für das Verhalten der aus den Materialien hergestellten Bauteile in Systemen. Der Verbund setzt sein Know-how schwerpunktmäßig in den

volkswirtschaftlich bedeutenden Handlungsfeldern Energie und Umwelt, Mobilität und Transport, Gesundheit, Sicherheit sowie Bauen und Wohnen ein. Ziel ist es, mit maßgeschneiderten Werkstoff- und Bauteilentwicklungen Systeminnovationen für diese Handlungsfelder zu realisieren. Die Basis hierfür ist die skalenübergreifende Materialkompetenz entlang industrieller Wertschöpfungsketten.

Der Fraunhofer-Verbund Materials beschäftigt über 4800 Mitarbeitende und bewegt jährlich einen FuE-Haushalt von etwa 555 Millionen Euro.

## Kontakt

Geschäftsstelle:

Dr. phil. nat. Ursula Eul

Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile - MATERIALS

Bartningstraße 47

64289 Darmstadt

Telefon +49 6151 705-262

[info-verbund-materials@lbf.fraunhofer.de](mailto:info-verbund-materials@lbf.fraunhofer.de)

[www.materials.fraunhofer.de](http://www.materials.fraunhofer.de)

Titelseite © fotolia.com\_Thaut Images



© shutterstock.com / jamestohart, artjazz, Wan An Qui, ArtisticPhoto, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IKTS

## Motivation

Materialinnovationen sind ein Schlüssel für den weltweiten Umbau der Energiesysteme. Während das klassische Energieversorgungssystem vor allem auf der Nutzung fossiler aber endlicher Energieträger basiert(e) und alle anderen Materialien in Kraftwerken und Anlagen unter Ressourcenaspekten eine nachrangige Rolle spielten, basiert das zukünftige Energiesystem in erster Linie auf erneuerbaren Energien, die nach menschlichem Ermessen unerschöpflich sind. Allerdings bedarf es eines massiv höheren Einsatzes einer Vielzahl von Materialien – von Halbleitern, Verbundmaterialien, Polymeren, Kupfer, Stahl und Beton bis hin zu Seltenen Erden – für die vielen Millionen Anlagen zur Energiewandlung und -speicherung.

Die Bedeutung von Materialien für die Kosten und damit für die Verbreitung von Schlüsseltechnologien

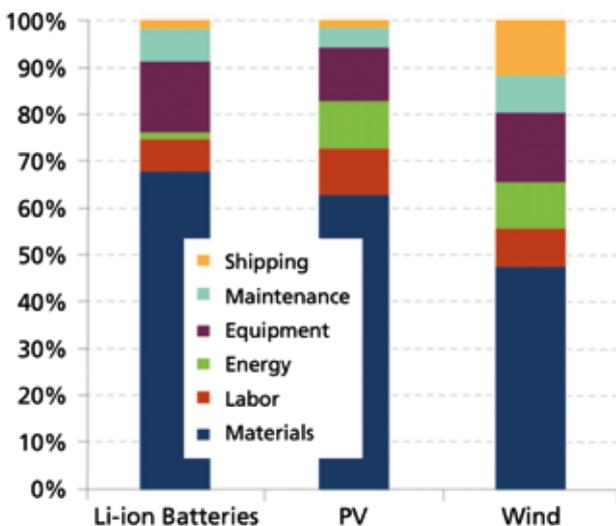


Abb. 1: Aktuelle durchschnittliche relative Kostenstruktur von Li-Ionen-Batterien, PV und Wind (EMIRI Technology Road-map, Sept. 2019)

der Energiewende ist in Abbildung 1 beispielhaft für Photovoltaik, Wind und Lithium-Ionen-Batterien gezeigt.

Zudem werden die technischen Anforderungen an Materialien stetig komplexer und bewegen sich für alle hier betrachteten Technologien in einem Spannungsfeld aus:

- Leistungsfähigkeit,
- Zuverlässigkeit,
- Sicherheit,
- Funktionalität,
- Nachhaltigkeit und
- Kosten.

Materialinnovationen bestimmen damit maßgeblich den Erfolg von Technologien, die zur Umsetzung der Energiewende unabdingbar sind. Sie sind ein starker Hebel zur erfolgreichen Transformation des Energiesystems in Deutschland und weltweit. Zudem sind Materialinnovationen vordringlich für die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und europäischen Industrie. Sie bieten die Chance, sich in einem exponentiell wachsenden Markt zu positionieren und Wertschöpfungsketten durch europäische Unternehmen nachhaltig und langfristig in Europa zu etablieren.

Im Folgenden werden für die derzeit wichtigsten Technologien der Energiebereitstellung, der Energiewandlung, -verteilung und -speicherung jeweils die aktuelle Situation und die sich daraus ableitenden Trends beleuchtet. Anschließend werden prioritäre materialwissenschaftliche Ziele von Schlüsseltechnologien mit besonders großer Hebelwirkung für die Energiewende dargestellt.

Weiterführende technische Informationen zu den hier adressierten Technologien finden sich in den entsprechenden Beiblättern zu diesem Positionspapier.



Farbige Photovoltaik-Module bieten großen Spielraum in der Fassadengestaltung. © Fraunhofer ISE



Erster hochtemperatur-supraleitender Generator im Teststand. © Fraunhofer IWES\_Jan Meier

## 1 Energiebereitstellung

Zur Defossilisierung des Energiesystems werden erneuerbare Energien, insbesondere Windenergie und Photovoltaik, die dominierenden Technologien sein. Beide Technologien liefern unmittelbar, effizient und günstig elektrischen Strom und weisen sowohl tageszeitlich als auch saisonal komplementäre Erzeugungsprofile aus, die sich im Sinne der Versorgungssicherheit gut ergänzen. Anlagen dieser beiden Technologien werden im Jahr 2050 über 50 Prozent des Primärenergieaufkommens Deutschlands decken (Studie des Fraunhofer ISE: »Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem«, 2020).

Ergänzend hierzu werden Gaskraftwerke zum Ausgleich von fluktuierender Erzeugung und Last in Zukunft unverzichtbar sein. Zudem können Gaskraftwerke perspektivisch über PowertoGas CO<sub>2</sub>-neutral betrieben werden.

Geo- und Solarthermie, Biomasse und weitere erneuerbare Energiequellen werden ebenfalls zur Deckung des Primärenergieaufkommens beitragen, allerdings in deutlich geringerem Umfang.

### Prioritäre materialwissenschaftliche Ziele

#### Photovoltaik:

- Weiterentwicklung von Silicium-Modulen zur Erhöhung der Materialeffizienz v. a. von Silicium, Silber und Aluminium sowie Verringerung von Degradationseffekten; Substitution von Blei
- Entwicklung alternativer Zellmaterialien, organische Solarzellen (Erhöhung der Langzeitstabilität), Perowskit-Solarzellen (Substitution von Blei), III-V-Solarzellen (Kostenreduktion der Abscheidung der Verbindungshalbleiter) und Tandemsolarzellen (Kontakt- und Passivierschichten ohne kritische Elemente)

- Materialentwicklung zur Integration von Solarzellen in Gebäude, Infrastrukturen und Fahrzeuge

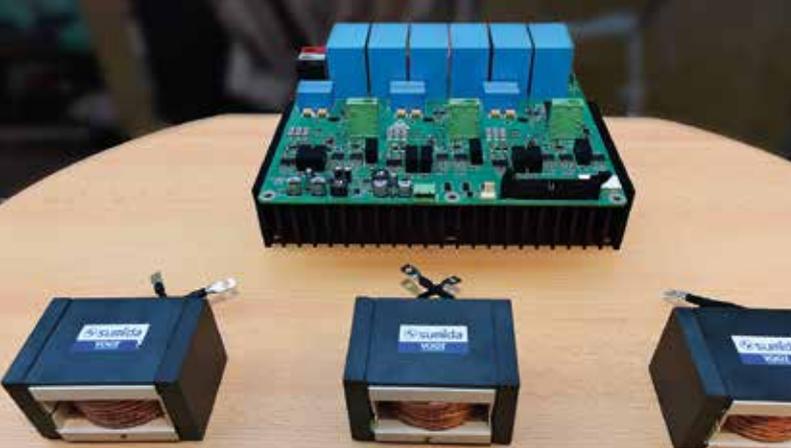
- Erhöhung der Recyclingfähigkeit von Modulen

#### Windenergie:

- Entwicklung von Verbundmaterialien für Rotorblätter zur Gewichtsreduktion, Erhöhung der mechanischen Festigkeit und einer besseren Recyclingfähigkeit
- Entwicklung von Beschichtungen gegen Erosion, Eisbildung sowie Korrosionseffekte an Rotorblättern sowie von korrosionsfesten Legierungen/Verbindungen für alle Bauteile von Offshore-Windkraftanlagen
- Design von Hochleistungsmagnetwerkstoffen mit geringem Seltenerdanteil und funktionelles Recycling von Magnetwerkstoffen

#### Gaskraftwerke:

- Gas- und Dampfturbinen: Entwicklung von Materialien für höhere Betriebstemperaturen und damit zur Steigerung des Wirkungsgrads und der Lebensdauer von Turbinenkomponenten sowie Materialentwicklung/-optimierung für eine erhöhte Flexibilität bei der Brennstoffzusammensetzung für die Verwendung von Wasserstoff oder synthetischer Kraftstoffe
- Generatoren: Entwicklung weich- und hartmagnetischer Werkstoffe unter Reduzierung des Einsatzes kritischer Elemente



Demonstrator eines 30kVA-Photovoltaik-Wechselrichters mit Silicium-Carbid-Halbleitern. © Fraunhofer IEE



Elektrolyttanks der größten Redox-Flow-Batterie Deutschlands. © Fraunhofer ICT

## 2 Energiewandlung, -verteilung und -speicherung

### 2.1 Strom

Durch die Kopplung der Sektoren mit einem ansteigenden Elektrifizierungsgrad und aufgrund des notwendigen überregionalen Ausgleichs von Erzeugung und Verbrauch wird die über Netze zu transportierende Leistung stark ansteigen. Das Stromnetz wird dadurch zur Hauptschlagader der Energieversorgung.

Neben den Stromleitungen selbst werden Stromrichter an Bedeutung gewinnen, die mit leistungselektronischen Bauteilen Gleichstrom in Wechselstrom umwandeln (und umgekehrt) oder als Frequenzrichter beispielsweise variable Drehfrequenzen in eine feste Netzfrequenz wandeln. Zum Einsatz kommen sie bei der Anbindung sowohl von Photovoltaik- und Windenergieanlagen als auch von Batteriespeichern, Antrieben, Elektrofahrzeugen und Wasserstofftechnologien wie Elektrolyseuren und Brennstoffzellen.

Weiterhin wird die Bedeutung von Kurzzeitspeichern – überwiegend Batterien – im Energiesystem der Zukunft stark ansteigen. Kurzzeitspeicher erlauben die Speicherung elektrischer Energie für einige Stunden bis Tage und sind in der Lage wichtige Aufgaben der Netzregelung von konventionellen Kraftwerken zu übernehmen. So kann der Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien erhöht werden, die in das Stromnetz integriert werden können.

### Prioritäre materialwissenschaftliche Ziele

#### Netzbetriebsmittel:

- Entwicklung von umweltfreundlichen flüssigen und gasförmigen sowie von selbstheilenden Isolierstoffen für eine höhere elektrische Leistung sowie kompaktere und kostengünstigere Bauweisen

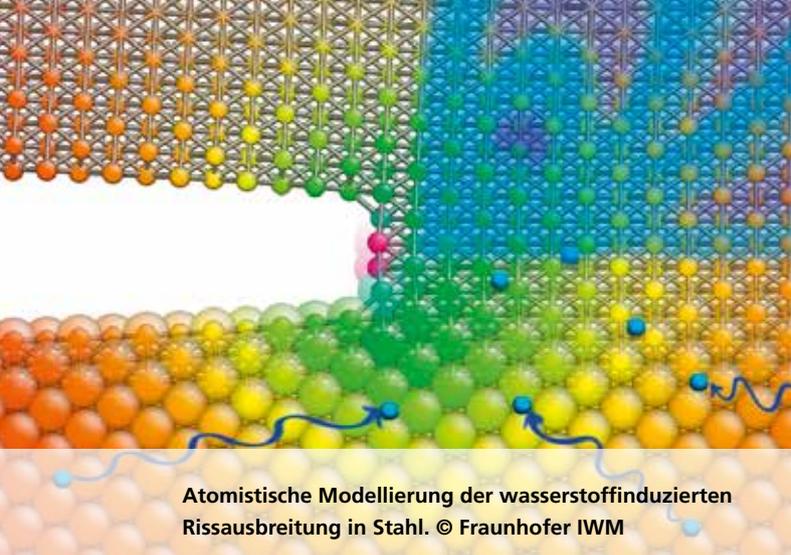
- Supraleitende Materialien für elektrische Generatoren, kurze Netzabschnitte und Überstrombegrenzer

#### Leistungselektronik:

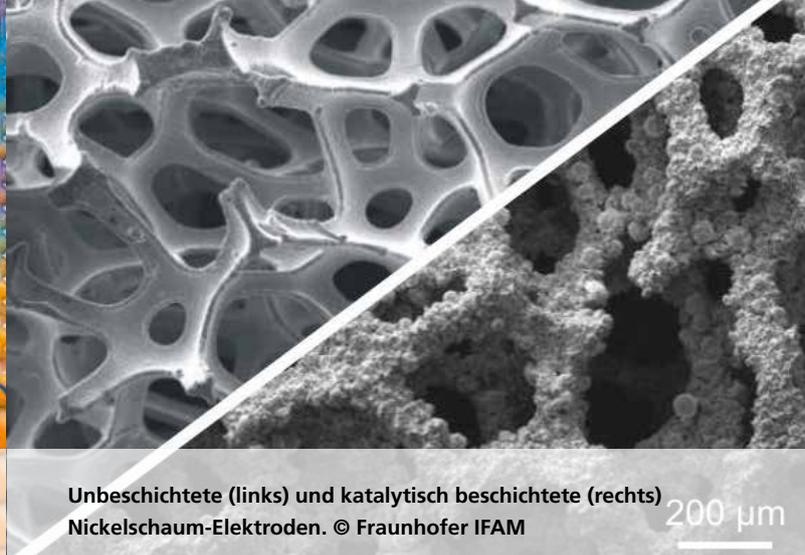
- Entwicklung von Bipolar-Transistoren mit isolierter Gate-Elektrode und Siliciumcarbid-Feldeffekttransistoren zur Verbesserung der Regelfähigkeit und Leistungsdichte in Mittel- und Hochspannungsanwendungen
- Entwicklung neuer Leistungshalbleiter und Leistungsschaltermodule für die Nieder- und Mittelspannung sowie für Gleichspannungsanwendungen aus Materialien mit verlustarmem und schnellem Schaltverhalten, die den Aufbau leichter und kompakter Stromrichter mit hoher Effizienz ermöglichen
- Materialentwicklung für passive Bauelemente (Kondensatoren, Drosselspulen, Transformatoren), die für höhere Schaltfrequenzen und höhere Spannungsbelastungen ausgelegt werden können

#### Batterien:

- Optimierte Lithium-Ionen-Zellen: Hochvolt-/Hochenergie-Kathodenmaterialien mit niedrigem Kobaltgehalt, hochvoltstabile Flüssigelektrolyte und Anodenmaterialien mit hohem Siliciumanteil zur Reduzierung der Abhängigkeit von kritischen Materialien und eine verbesserte Kreislauffähigkeit
- Neue Zellgenerationen: Entwicklung und Grenzflächen-Engineering von Lithium-Metall-Anoden für Festkörperbatteriezellen und Entwicklung von Festelektrolytmaterialien
- Entwicklung von Hochleistungsaktivmaterialien für Ableiter, Separatoren, Gehäuse, Elektrolyten sowie effizientes Batterie-Thermomanagement



Atomistische Modellierung der wasserstoffinduzierten Rissausbreitung in Stahl. © Fraunhofer IWM



Unbeschichtete (links) und katalytisch beschichtete (rechts) Nickelschaum-Elektroden. © Fraunhofer IFAM

200 µm

## 2.2 Wasserstoff und Power-to-X

Wasserstoff und darauf aufbauende Syntheseprodukte werden eine zentrale Rolle für die Treibhausgas-Neutralität aller energieverbrauchenden Sektoren wie beispielsweise Verkehr, Industrie und Gebäude spielen. Die zugehörigen Technologien sind essenziell für die Reduktion des Anteils an fossilen Energieträgern und für den Aufbau einer nachhaltigen Energiewirtschaft. Neben der direkten Nutzung in den verschiedenen Anwendungsgebieten kann Wasserstoff durch seine hohe Speicher- und Transportfähigkeit auch eine zunehmende Bedeutung für die Systemintegration von erneuerbaren Energien einnehmen.

Besonders die Wasserelektrolyse wird zu einer entscheidenden industriepolitischen Komponente werden, einerseits zur anteiligen Erzeugung des benötigten Wasserstoffs, andererseits als Flexibilitätsoption im deutschen Stromnetz. Über Power-to-X-Technologien können schließlich CO<sub>2</sub>-Kreisläufe geschlossen und nachhaltige synthetische Kraftstoffe bereitgestellt werden.

### Prioritäre materialwissenschaftliche Ziele

#### Elektrolyseure und Brennstoffzellen:

- Entwicklung von leistungsstarken und alterungsbeständigen Katalysatoren mit möglichst geringen Mengen an Edelmetallen
- Entwicklung von kostengünstigen Membranen mit verringerter Degradation und erhöhter mechanischer Stabilität, vorzugsweise aus nicht fluorhaltigen Materialien
- Optimierung der Grenzflächen von Membran zu Katalysatorschicht und Entwicklung von Katalysator-Membran-Einheiten (catalyst coated membranes, CCM)

- Optimierung der Beschichtung metallischer Bipolarplatten zur Verbesserung der Langlebigkeit

#### Wasserstoffleitungen und -speicher:

- Entwicklung von Werkstoffen für Druckspeicher, Flüssiggasspeicher, Sorptionsspeicher und LOHC-Flüssigspeicher (LOHC = liquid organic hydrogen carriers) unter den Zielkriterien Gewichtsreduktion, (Crash-)Sicherheit und Funktionsintegration
- Entwicklung von Beschichtungen für Stahl zur Verhinderung der Wasserstoff-Versprödung

#### Power-to-X und synthetische Kraftstoffe:

- Entwicklung von Katalysatoren für effizientere Synthesepfade von Power-to-X-Produkten und für einen dynamischen Anlagenbetrieb
- Entwicklung von LOHC-Materialien, die bei niedriger Temperatur Wasserstoff freisetzen

#### Ressourceneffizienz

Neue Technologien für die Energiewende benötigen neue Materialien. Dies bedeutet auch einen Wandel im Rohstoffbedarf. Im Vergleich zu konventionellen Technologien kommen vermehrt kritische Rohstoffe zum Einsatz. Die daraus resultierende Rohstoffproblematik kann durch verschiedene Ansätze adressiert werden: Materialwissenschaftliche Konzepte wie Substitution, Lebensdauererweiterung/Regeneration oder auch Leichtbau können die Basis für einen effizienten Ressourceneinsatz bilden. Außerdem können wichtige Beiträge zur Etablierung einer Kreislaufwirtschaft erbracht werden. Grundsätzliches Ziel hierbei ist es, Materialien und Produkte möglichst effizient zu nutzen und möglichst lange im ökonomischen Kreislauf zu halten. Zunächst sollte der Materialeinsatz reduziert werden (reduce). Weiterhin sollten noch nutzbare Produkte oder Komponenten wiederverwendet werden (reuse). Falls dies nicht möglich ist, sollte eine Reparatur oder Aufbereitung geprüft werden (repair, remanufacture). Ist auch dies nicht möglich, sollten enthaltene Materialien wiederverwertet werden (recycle). Die in den Abfallströmen vorhandenen Wertstoffe müssen dabei möglichst vollständig zurückgewonnen und als Sekundärrohstoffe wieder der Produktion zugeführt werden.



**Gesinterte Mehrlagenstrukturen zum Einsatz in elektrokalischen Wärmepumpen.** © Fraunhofer IKTS



**Hartschäume für die Gebäudedämmung.**  
© Fraunhofer IBP

## 2.3 Wärme und Kälte

Im Gebäudesektor ist eine Intensivierung der energetischen Sanierung von Gebäuden ein wichtiges Element, um den Raumwärmebedarf abzusenken. Dies geht einher mit der Umstellung vieler Heizungssysteme auf ein niedrigeres Temperaturniveau. Eine Schlüsseltechnologie zur Defossilisierung des Gebäudesektors stellen elektrische Wärmepumpen dar, die ein zentrales Bindeglied für die Kopplung von Strom- und Wärmesektor sind. Gebäude lassen sich so effizient mit erneuerbarem Strom beheizen, weil sie zusätzlich zur eingesetzten elektrischen Energie bis zum dreifachen dieses Wertes Umweltwärme nutzen. Zudem lassen sich Wärmepumpen auch zum Kühlen nutzen.

Auch multimodale, aus verschiedenen Erzeugern gespeiste Wärmenetze in Verbindung mit großen Wärmespeichern erweisen sich als wirkungsvolle Maßnahme zur Flexibilisierung und zum Lastmanagement. Geothermie und solarthermische Kollektoren werden zur Bereitstellung von Wärme an Bedeutung gewinnen. Für die Bereitstellung industrieller Prozesswärme werden verstärkt strombasierte Technologien wie Wärmepumpen und Elektrodenkessel eingesetzt werden. Darüber hinaus wächst nicht zuletzt aufgrund des Klimawandels der Kühlbedarf in Deutschland.

### Prioritäre materialwissenschaftliche Ziele

#### Wärme- und Kältebereitstellung:

- Wärmepumpen/Kühlung: (Neu-)Entwicklung von Kältemitteln mit verringertem Treibhausgas-Potenzial
- Geothermie: Entwicklung korrosionsbeständiger, hitze- und abrasionsbeständiger, biegesteifer und bruchfester Rohrmaterialien
- Solarthermie: Entwicklung von funktionalen

Beschichtungen (spektralselektiv/anti-reflex/anti-korrosiv), Entwicklung von Ultrahochleistungsbeton mit hoher Materialstabilität und Dichtheit

- Kühlung: Entwicklung von magnetokalorischen Materialien für alternative Kühlkonzepte, Erhöhung der Stabilität und Reduzierung des Einsatzes kritischer Elemente

#### Dämmstoffe:

- Kostenreduzierende (Weiter-)Entwicklung von Massenwerkstoffen (insbesondere für Gebäudehülle) zur umweltverträglichen Erfüllung der Brandschutzanforderungen

#### Wärmespeicher:

- Latentwärmespeicher zum Einsatz in der Gebäudeklimatisierung und für saisonale Energiespeicherung: Entwicklung von PCM (Phasenwechselmaterialien) als Alternative zu aktuell eingesetzten brennbaren Materialien auf Paraffinbasis
- Hochtemperaturspeicher zum Einsatz in industriellen Prozessen: Entwicklung von Salzen und Salzmischungen und von neuartigen Thermoölen mit hoher Wärmekapazität zur Erreichung höherer Temperaturen

### Material Data Space®

Ziel der Initiative Materials Data Space® (MDS) des Fraunhofer-Verbund MATERIALS ist es, digitale Daten zu Materialien und Werkstoffen entlang der gesamten Wertschöpfungskette bereitzustellen. Durch geeignete Schnittstellen und die digitale Vernetzung von Wertschöpfungsstufen werden kürzere Entwicklungszeiten, lernende Fertigungsverfahren und neue Geschäftsmodelle möglich. Zudem ergeben sich enorme Potenziale für Materialeffizienz, Produktionseffizienz und die Circular Economy.

# POSITIONEN UND EMPFEHLUNGEN DES FRAUNHOFER-VERBUND MATERIALS

Für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende sind in erheblichem Maße Materialinnovationen erforderlich.

Essenziell für die Beschleunigung der Energiewende sind die kontinuierlichen, systematischen Weiterentwicklungen eingesetzter Materialien und Prozesse. Daneben benötigt es richtungsweisende, gezielt stimulierte Materialinnovationen. Die wichtigsten Stimulatoren sind aus Sicht des Fraunhofer-Verbunds MATERIALS maßgeschneiderte Förderprogramme, das Forcieren einer verbindlichen Kreislaufwirtschaft sowie die Verfügbarkeit qualitätsgesicherter, funktionaler Materialdatenbanken für die Praxis.

Der Fraunhofer-Verbund MATERIALS empfiehlt daher im Einzelnen:

1. Für die Energiewende **maßgeschneiderte Materialforschungsprogramme**, in denen folgende Aspekte Beachtung finden:
  - a) Im Energiesektor sind Materialinnovationen für Effektivität und Effizienz ganzer Wertschöpfungsketten notwendig.
  - b) Die System-Einbindung sowie prozess- und verfahrenstechnische Bedingungen sind bereits während der Materialentwicklung zu berücksichtigen. Eine wettbewerbsfähige Herstellung von Materialien und Komponenten für die Energiewende im industriellen Maßstab ist zu gewährleisten.
  - c) Simulationsgestütztes Material- und Werkstoffdesign ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die Materialforschung und industrierelevante Materialentwicklung.
  - d) Systematisch vorangetriebene, evolutionäre Weiterentwicklungen bestehender Materialien, sind die Basis der überwiegenden Anzahl an Produktinnovationen, auch für die Energiewende.
  - e) Darüber hinaus ermöglichen gänzlich neue Materialien oder Materialeigenschaften zukunftsweisende neue Produkte für die Energiewende und schaffen zusätzliche Erfolgchancen im internationalen Wettbewerb.
2. Konsequente Kreislaufwirtschaft und Förderung materialwissenschaftlicher Ansätze, die die **Kreislauffähigkeit für Produkte der Energiewende** wie folgt verbessern:
  - a) Die wirtschaftlich sinnvolle Einsatzfähigkeit von Rezyklaten in Komponenten für die Energiewirtschaft ist technisch (Materialqualifizierung, Materialaufbereitung, Verifizierung über Demonstratoren) und regulatorisch mit hoher Priorität voranzutreiben.
  - b) Unterstützende Methoden des Life-Cycle-Assessments müssen weiterentwickelt und in den Innovationsprozess implementiert werden.
3. Erleichterung und Beschleunigung des Wissenstransfers durch den Aufbau bzw. die Weiterentwicklung **standardisierter, qualitätsgesicherter Materialdatenbanken**, die den mit der Energiewende verbundenen Parteien ermöglichen, die Innovationsgeschwindigkeit deutlich zu erhöhen.