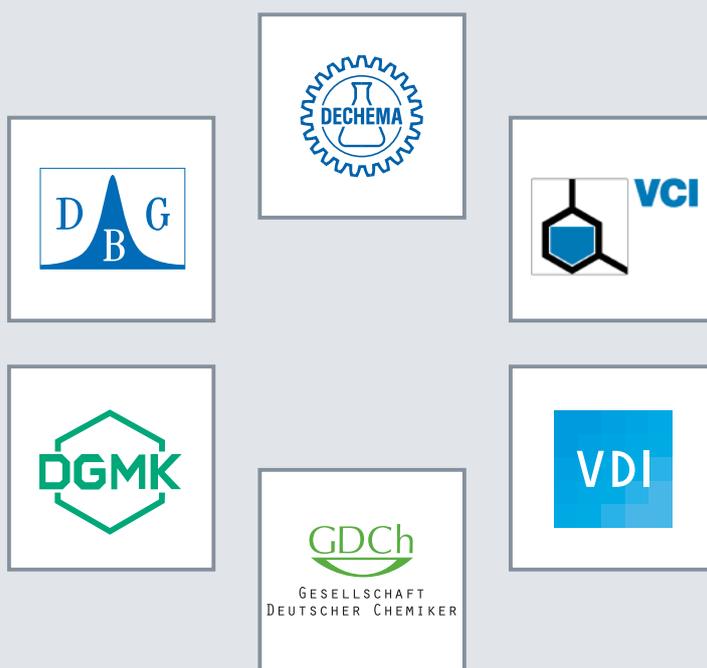


# Energieversorgung der Zukunft

– der Beitrag der Chemie –



Erstellt und getragen durch den Koordinierungskreis „Chemische Energieforschung“\*  
der folgenden Chemieorganisationen:

**DECHEMA** – Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.  
Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main, [www.dechema.de](http://www.dechema.de)

**GDCh** – Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.  
Varrentrappstraße 40-42, 60486 Frankfurt am Main, [www.gdch.de](http://www.gdch.de)

**DBG** – Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie e.V.  
Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main, [www.bunsen.de](http://www.bunsen.de)

**DGMK** – Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.  
Überseering 40, 22297 Hamburg, [www.dgmk.de](http://www.dgmk.de)

**VDI-GVC** – Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen  
Graf-Recke-Straße 84, 40239 Düsseldorf, [www.vdi.de/gvc](http://www.vdi.de/gvc)

**VCI** – Verband der Chemischen Industrie e.V.  
Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt am Main, [www.vci.de](http://www.vci.de)

März 2007

\* Vorsitzender: Prof. Dr. Ferdi Schüth, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim,  
Tel: 0208/306 2373, E-mail: [schueth@mpi-muelheim.mpg.de](mailto:schueth@mpi-muelheim.mpg.de)

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2. Vorbemerkungen</b>	<b>8</b>
<b>3. Energiebereitstellung</b>	<b>9</b>
<b>3.1. Bereitstellung von Kraftstoffen</b>	9
3.1.1. Kraftstoffe aus Erdöl, Erdgas, Kohle und Biomasse	9
3.1.2. Bioenergie	10
3.1.3. Herstellung von Wasserstoff	12
3.1.4. Nicht-konventionelle Kraftstoffe	13
<b>3.2. Bereitstellung von elektrischer Energie</b>	13
3.2.1. Gewinnung von Energie aus Sonnenlicht	13
3.2.2. Brennstoffzellentechnik	14
3.2.3. Thermoelektrika	15
3.2.4. Weiterentwicklung von Kraftwerkstechnologien	16
<b>3.3. Bereitstellung von Heizenergie</b>	17
3.3.1. Materialien für Kollektoren	17
<b>4. Energiespeicherung</b>	<b>19</b>
<b>4.1. Stoffliche Speicherung</b>	19
<b>4.2. Stromspeicherung</b>	20
4.2.1. Batterien	20
4.2.2. Supercaps	21
4.2.3. Stationäre Stromspeicher	21
<b>5. Effiziente Energienutzung</b>	<b>23</b>
<b>5.1. Leuchtstoffe und Leuchtdioden</b>	23
<b>5.2. Supraleiter</b>	24
<b>5.3. Leichtbauwerkstoffe</b>	25
<b>5.4. Nanoporöse Schaumstoffe</b>	26
<b>6. Energieeffizienz von Produktionsprozessen</b>	<b>28</b>
<b>7. Literaturverzeichnis</b>	<b>30</b>
<b>8. Liste der Autoren</b>	<b>31</b>



## 1. Einleitung

Die Erschließung neuer Energiequellen und die teilweise Umstellung unseres Energiesystems von fossilen Quellen auf eine neue Basis ist eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts, wenn nicht sogar die größte. Zur Lösung dieses Problemkomplexes bedarf es einer abgestimmten Strategie, die von kurzfristig wirkenden Maßnahmen bis zu grundlegenden Untersuchungen alternativer Energiequellen und einer angepassten Energieinfrastruktur reicht. Aufgrund seiner hohen Bedeutung für die Zukunft unserer Gesellschaft, nimmt dieses Gebiet einen prominenten Platz in der Hightech-Strategie der Bundesregierung ein.

Die Bedeutung der Chemie bei der Versorgung unserer Gesellschaft mit Energie ist bereits im gemeinsamen Positionspapier der Chemischen Fachgesellschaften und des VCI vom Sommer 2006 („Energieforschung: Innovative Beiträge der Chemie für die Energieversorgung der Zukunft und zur Reduzierung des Energieverbrauchs“) hervorgehoben worden, außerdem werden zahlreiche Aspekte im nationalen Implementierungsplan der europäischen Technologieplattform Sustainable Chemistry (SusChem) behandelt. Das vorliegende Papier stellt ausführlicher die Schlüsselposition der Chemie in den jeweiligen Teilbereichen des Energiesektors dar, um eine Beurteilung der Entwicklungspotenziale und des Forschungsbedarfs für die nächsten Jahrzehnte auf einer wissenschaftlichen Grundlage zu erlauben.

### Die Rolle der Chemie für unser Energiesystem

Analysiert man die Entwicklung unseres Energiesystems in der Vergangenheit, so wird deutlich, dass der Chemie eine immer größere Bedeutung bei der Erzeugung und Wandlung von Energie zugekommen ist und es sich mittlerweile um eine Schlüsseltechnologie auf diesem Gebiet handelt. Dieser Trend wird sich in Zukunft nicht abschwächen, sondern weiter zunehmen. Dies sei an einem Beispiel erläutert: Das in der Anfangszeit des Ölzeitalters geförderte Öl wurde bestenfalls destilliert und dann direkt verbrannt. Heute ist eine Raffinerie nicht mehr nur eine Anlage zur Destillation des Rohöls, sondern die verschiedenen Ölbestandteile werden durch zahlreiche chemische Prozesse so umgewandelt, dass der Energieinhalt des Rohöls optimal für die angestrebten Einsatzzwecke genutzt wird. Wenn sich unsere Rohstoffbasis zur Bereitstellung von Kraftstoffen mit dem Zurückgehen der Erdölvorräte verändert, wird die Bedeutung von chemischen Stoffumwandlungsprozessen noch erheblich zunehmen, da die chemischen Eigenschaften der dann verfügbaren Rohstoffe wesentlich weiter von denen der Zielprodukte entfernt sind als es bei der Basis Rohöl der Fall war.

Die Bedeutung der Chemie geht aber weiter. Neue Technologien im Bereich der Energieerzeugung erfordern fast immer entscheidende Fortschritte im Bereich der Chemie:

- Brennstoffzellenkatalysatoren sind derzeit noch zu teuer und zu wenig effizient und auch neue Elektrolyte wie thermostabile Polymermembranen für Brennstoffzellen würden den großtechnischen Einsatz solcher Systeme erheblich erleichtern.
- Zukünftige Generationen von Solarzellen erfordern neuartige molekulare Systeme, die effizienter und kostengünstiger hergestellt werden könnten und damit eine kürzere energetische Amortisationszeit bei der Umwandlung des Sonnenlichts in Elektrizität erlauben.
- Fortschritte in der Batterietechnik hängen entscheidend von Verbesserungen in der Chemie der Elektroden und der Elektrolyte ab.
- neuartige Thermoelektrika könnten eine Revolution in der Erzeugung elektrischer Energie durch direkte Nutzung von Wärmeenergie einleiten. Mit kostengünstigen Systemen könnte in jedem Abgasstrang die vorhandene Restwärme in elektrische Energie verwandelt werden, auch könnte in Kopplung mit Solarzellen der Wirkungsgrad solcher Systeme erhöht werden.
- alle Techniken zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Abgasen von Kraftwerken oder anderen Industrieprozessen werden auf chemischen Verfahren beruhen.

Diese Aufzählung ist bei weitem nicht vollständig, und für fast jedes fortgeschrittene Energiesystem sind Schlüsselinnovationen in der Chemie notwendig, wie im Hauptteil dieser Darstellung erläutert wird.

Schließlich ist auch die Umstellung der chemischen Produktion selbst auf weniger energieintensive und effizientere Verfahren eine große Zukunftsaufgabe, zudem wird es aus Kostengründen erforderlich sein, die Rohstoffbasis von Erdöl zumindest teilweise auf andere – auch regenerative Rohstoffe – zu verlagern.

## Verfügbare Potenziale

Welcher Pfad für unsere Energieversorgung schließlich eingeschlagen werden soll, ist eine gesellschaftlich-politische Entscheidung. Allerdings gibt es eine Reihe von wissenschaftlich-technischen und ökonomischen, klar definierbaren Randbedingungen, die berücksichtigt werden müssen, wie die derzeitigen und erwarteten Kosten, das nutzbare Volumen neuer Energiequellen und die Umweltverträglichkeit in der Praxis. Auch sollte man nicht vergessen, dass über Ressourcen nur einmal verfügt werden kann: Wenn die gesamte verfügbare Agrarfläche zur Produktion von Energiepflanzen genutzt werden soll, steht diese Fläche nicht mehr für die Produktion von Rohstoffen für die chemische Industrie oder für die Ernährung zur Verfügung.

Der Planung eines zukünftigen Energiesystems und der Steuerung von Investitionen in Forschungsaktivitäten muss eine realistische Potenzialabschätzung zugrunde liegen. Bei einer Reihe von Energiequellen hängt die Erschließung von Schlüsselinnovationen in der Chemie ab: Von den regenerativen Energien ist das Potenzial der Solarenergie in Form von Strahlung in Deutschland erst zu einem sehr geringen Bruchteil genutzt, allerdings derzeit – außer für Heizzwecke – nicht annähernd zu wettbewerbsfähigen Kosten. Hier existieren noch sehr hohe Reserven. Für Biomasse wird ein Gesamtpotenzial von etwa 10 % unseres derzeitigen Energieverbrauchs geschätzt, was erst zu etwa einem Drittel genutzt wird. Ein erheblicher Teil davon könnte in Form von Flüssigkraftstoff produziert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Biomasse eine der wenigen in Deutschland verfügbaren Energiequellen ist, die relativ einfach zu Flüssigkraftstoffen umgesetzt werden kann. Dies ist wesentlich, weil für diese Energieform Engpässe am ehesten befürchtet werden und die Importabhängigkeit am höchsten ist. Kohle hat von den fossilen Energieträgern die längste prognostizierte Reichweite (155 Jahre weltweit) und ist die einzig wesentliche in Deutschland vorkommende fossile Energiequelle neben weit geringeren Mengen an Erdöl und Erdgas. Kohle kann zur Gewinnung von elektrischer Energie genutzt werden, man kann jedoch auch Flüssigkraftstoffe aus ihr herstellen. In der Nutzung von Synergieeffekten mit anderen Energieträgern und -quellen im Mix könnten die üblicherweise hohen Emissionen von CO<sub>2</sub> aus der Kohlenutzung sich verringern lassen. Andere Energiequellen, wie die Windenergie, benötigen Speichertechnologien, um die un stetig anfallende Leistung abzupuffern und die Potenziale optimal zu nutzen.

## Schlussfolgerungen

Deutliche Fortschritte bei der Erschließung dieser Potenziale und der verbesserten Nutzung konventioneller Energieformen erfordern intensive Forschungsanstrengungen, zu einem erheblichen Teil in der Chemie als Querschnittswissenschaft auf dem Energiesektor. Unsere zukünftige Energieversorgung wird noch „chemischer“ werden und die Anpassung unseres Energiesystems auf die zukünftigen Herausforderungen wird ohne Durchbrüche aus der Chemie nicht möglich sein. Obwohl sowohl in einer Reihe von Unternehmen als auch in Hochschulen und Forschungsinstituten bereits intensiv daran gearbeitet wird, die Herausforderungen für die Chemie zu bewältigen, ist vielfach die Schlüsselrolle der Chemie für die Lösung des Energieproblems noch nicht erkannt. Da die Aufgabe eine langfristige ist, werden zudem auch zukünftige Generationen von Wissenschaftlern daran arbeiten müssen, so dass es gilt, entsprechende Inhalte in der Lehre stärker zu verankern.

Daher muss die Fachöffentlichkeit für diese Fragestellung sensibilisiert werden. Dies wird teilweise bereits mit diesem Papier und flankierenden Maßnahmen erreicht, aufgrund der in unserem Forschungssystem wirkenden Mechanismen ist aber auch eine Stimulierung der Forschungsaktivitäten durch finanzielle Anreize erforderlich. Aufgrund der langen Zeitskalen, die für das Energieversorgungssystem einer Gesellschaft charakteristisch sind, gilt es, jetzt die entscheidenden Weichenstellungen vorzunehmen. Folgende Maßnahmen erscheinen dazu sinnvoll und notwendig:

1. Explizite Fördermaßnahmen mit dem Ziel, die chemische Energieforschung zu stärken, würden einen Teil der chemischen Forschung auf diesen Bereich lenken. Solche Maßnahmen sollten von langfristig angelegten Programmen der eher erkenntnisorientierten Forschung bis zu kurz- und mittelfristig wirkenden Programmen mit dem Ziel der unmittelbaren praktischen Umsetzung reichen.
2. Derzeit erscheint die Förderpolitik auf diesem Gebiet häufig als nicht optimal aufeinander abgestimmt. Wenn auch die Förderung durch verschiedene Instrumente und Zuwendungsgeber aufgrund der Vielzahl der unterschiedlichen Fragestellungen sinnvoll erscheint, wäre eine Koordinierung hilfreich. Die noch vorhandene Einseitigkeit von Förderprogrammen ist zu überwinden, um komplexe Systeme entwickeln zu können und Synergieeffekte der Energieträger und Energiequellen herauszuarbeiten. Dies gilt umso mehr, als derzeit schon eine Reihe unterschiedlicher Programme existieren, in denen die chemische Energieforschung (mit)gefördert wird. Allerdings fehlt diesen eher isolierten Programmen die forschungslenkende Signalwirkung, da sie meist nicht explizit auf diesen Themenkomplex gerichtet sind.
3. Abstimmung mit der europäischen Technologieplattform „SusChem“ und dem entsprechenden nationalen Implementierungsplan. In SusChem ist beispielsweise das Smart Energy Home als Leuchtturmprojekt genannt, das zentral im Bereich der chemischen Energieforschung positioniert ist.

## 2. Vorbemerkungen

In den folgenden Ausführungen werden die wesentlichen Entwicklungslinien im Energiesektor detaillierter diskutiert und in den Kontext von Innovationsschüben gestellt, die aus der Chemie erfolgen müssen. Dabei sind nicht alle verfügbaren Energiequellen angesprochen, da in einigen wenigen Bereichen die Beiträge der Chemie relativ gering sind. Ausgespart ist bei dieser Diskussion etwa die Kernenergie. Dies stellt keine Wertung der Technologie dar. Allerdings ist die Kernenergie im wesentlichen eine physikalische Technologie, wenn auch im Zusammenhang mit Brennstoffkreisläufen chemischen Schritten erhebliche Bedeutung zukommt und für die Entwicklung der Fusionstechnologie noch zahlreiche grundlegende Werkstoffprobleme – also chemische Probleme – zu lösen sind. Die Windenergie, geothermische Energie oder Wasserkraft werden ebenfalls nicht diskutiert, da deren Gewinnung physikalische Prinzipien ausnutzt. Die Chemie kann aber auch hier wichtige Beiträge leisten, wenn beispielsweise die un stetig anfallende Windenergie gespeichert werden soll, wozu chemische Speicherprinzipien gut geeignet sein könnten.

Für die folgende Diskussion erscheinen einige generelle Bemerkungen hilfreich, um die Aussagen besser bewerten zu können. Derzeit beruht unser Energiesystem auf einer Reihe von Energiequellen, deren Status und deren mögliche Entwicklung in Kapitel 3 beleuchtet wird. Wir verfügen aber nur über zwei wesentliche Energieträger, nämlich elektrischen Strom auf der einen Seite und Kohlenwasserstoffe in Form von Erdgas, Benzin und Dieselkraftstoff oder Heizöl auf der anderen Seite. Diese Energieträger sind in ihren Funktionen nicht äquivalent, wenn sie auch zum Teil – immer unter Verlust eines Teils des Energiegehaltes – ineinander umgewandelt werden können. Kohlenwasserstoffe spielen aber neben ihrer Funktion als Energieträger eine wichtige zusätzliche Rolle: Sie sind unsere Hauptenergiespeicher. Elektrische Energie muss in gleichem Maße erzeugt werden, wie sie verbraucht wird, abgesehen von Puffern in Form von Speicherkraftwerken. Nur in Form von Kohlenwasserstoffen ist Energie derzeit langfristig „lagerbar“ in einer Form, in der die gelagerte Energie relativ schnell wieder abgerufen werden kann. Diese zusätzliche Funktion der Kohlenwasserstoffe muss eine Diskussion um ein zukünftiges Energiesystem berücksichtigen. Wenn die Basis von Öl auf eine andere Energiequelle umgestellt werden soll, müssen gleichzeitig neue Energiespeichertechnologien entwickelt werden. Dies gilt umso mehr, als ein Teil der regenerativen Energiequellen (Wind, Solarenergie) sehr un stetig anfällt und somit Puffer vorgehalten werden müssen, um die schwankende Produktion und die schwankende Nachfrage auszugleichen. Dieser Aspekt unseres Energiesystems wird in Kapitel 4 diskutiert.

Ein anderer genereller Punkt sollte ebenfalls bedacht werden: Die Umwandlung einer Energieform in eine andere ist aus fundamentalen physikalischen Gründen immer mit Verlusten verbunden. Umwandlungsprozesse sollten daher so weit als möglich vermieden werden, und die Energiequellen sollten so genutzt werden, dass möglichst wenige Schritte erforderlich sind, um den gewünschten Zweck zu erreichen. Biomasse kann beispielsweise mit relativ hoher Effizienz in Blockheizkraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung in Heizenergie und elektrische Energie umgewandelt werden. Wenn die gleiche Biomasse aber zunächst vergast wird, dann über den Fischer-Tropsch-Prozess zu Dieselkraftstoff umgewandelt wird und der Dieselkraftstoff in einem Motor ein Fahrzeug antreibt, wird nur ein relativ geringer Teil des Energieinhalts der Biomasse tatsächlich für den angestrebten Zweck, den Antrieb des Fahrzeugs, genutzt. Die gleiche Biomasse liefert also, je nach Art ihrer Nutzung, völlig unterschiedliche Mengen an Endenergie. Es sollte demnach angestrebt werden, jede Energiequelle entsprechend ihrer Spezifika möglichst effizient zu nutzen.

Schließlich soll noch darauf hingewiesen werden, dass eine der größten „Energiequellen“ die Ausnutzung der vorhandenen Sparpotenziale ist. Anstelle den Energiebedarf durch die Erschließung neuer Quellen zu befriedigen, kann auch der Bedarf verringert werden, wodurch die Reichweiten und Deckungsbeiträge der vorhandenen und noch erschließbaren Energiequellen vergrößert werden. Auch hierzu werden wesentliche Beiträge aus der Chemie kommen, etwa durch die Entwicklung neuer Superisolatoren, von Materialien für Leuchtdioden für Beleuchtungszwecke, durch Leichtbaumaterialien, die den Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen erheblich reduzieren. Diese Aspekte werden im Wesentlichen in Kapitel 5 und 6 dargestellt.

## 3. Energiebereitstellung

### 3.1. Bereitstellung von Kraftstoffen

#### 3.1.1 Kraftstoffe aus Erdöl, Erdgas, Kohle und Biomasse

» **Entwicklungslinie:** Konventionelle Kraftstoffe auf der Basis von Kohlenwasserstoffen, das sind Ottokraftstoff (Benzin), Flugturbinenkraftstoff (Kerosin) und Dieselmotorkraftstoff, werden auf absehbare Zeit weiterhin die Grundlage für die Mobilität unserer Gesellschaft bieten. Die Qualitätsanforderungen an diese Kraftstoffe werden sich weiter erhöhen – vorwiegend mit dem Ziel eines weitergehenden Umweltschutzes, der Verträglichkeit für effizientere Motoren und eines geringeren Kraftstoffverbrauchs. Es muss sichergestellt werden, dass die hochwertigen Kraftstoffe der Zukunft außer aus dem Rohstoff Erdöl auch aus Erdgas, Kohle und/oder Biomasse mit vertretbaren Kosten erzeugt werden können.

» **Stand der Technik:** Benzin, Kerosin und Dieselmotorkraftstoff werden heute nahezu vollständig aus Erdöl durch Destillation und nachgeschaltete katalytische Veredelungsverfahren hergestellt. Lediglich kleine Mengen an Biokraftstoffen der 1. Generation – das sind Bioethanol, Ethyltertiär-Butylether (ETBE) und Biodiesel – werden aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt. In einigen Ländern entsteht derzeit die Technologie zur Herstellung von synthetischem Dieselmotorkraftstoff und Kerosin aus Erdgas über die Zwischenstufen Synthesegas und Wachs. Synthesegas wird auch aus Kohle oder aus Rückständen der Erdöldestillation durch Vergasung erzeugt.

» **Defizite und Entwicklungsziel:** Wichtige Entwicklungsziele bestehen an zahlreichen Stellen der Wertschöpfungskette von den fossilen Rohstoffen oder Biomasse zu den Kraftstoffen der Zukunft. Selbst bei der Verarbeitung der heute eingesetzten konventionellen hochwertigen Erdöle sind noch Defizite im Bereich der Veredelungsverfahren zu verzeichnen. So ist z.B. keine effiziente Methode bekannt, um polycyclische Aromaten in Dieselmotorkraftstoffen oder Kerosin durch hydrierende Ringöffnung in hochwertige offenkettige Kohlenwasserstoffe umzuwandeln. Es hat auch den Anschein, als ob die konventionellen Hydrotreating-Verfahren zur Entfernung von Schwefel und Stickstoff aus Kraftstoffen heute an ihren Grenzen für die Schadstoffminderung angelangt seien. Deutlicher Verbesserungsbedarf besteht ferner für Crackverfahren zur Umwandlung der mit Schadstoffen angereicherten Destillationsrückstände in hochwertige Kraftstoffe und Chemierohstoffe. Solche Verfahren werden noch erheblich an Bedeutung gewinnen, wenn die auf der Erde in sehr großen Mengen vorkommenden Schweröle, Ölsande und Ölschiefer mehr und mehr die konventionellen Erdöle als Rohstoffe ablösen.

Die Technologie zur Umwandlung von Erdgas und anderen Kohlenwasserstoffgasen in flüssige Kraftstoffe („Gas-to-Liquids“, GTL) setzt sich aus der Erzeugung von Synthesegas ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) durch katalytisches Dampfreformieren oder partielle Oxidation, der Fischer-Tropsch-Synthese zu wachsartigen langkettigen n-Alkanen und schließlich deren mildem Hydrocracken zu sehr hochwertigem Dieselmotorkraftstoff und Kerosin zusammen, leider noch zu relativ hohen Kosten. Da der größte Teil der Gesamtkosten im ersten Teilschritt anfällt, gilt es vordringlich, die Erzeugung von Synthesegas aus Erdgas kostengünstiger zu gestalten. Längerfristig muss die Forschung das Ziel verfolgen, Methan durch völlig neuartige direkte C-C-Verknüpfungen in höhere Kohlenwasserstoffe umzuwandeln. Kohle kann nach zwei Routen in flüssige Kraftstoffe umgewandelt werden, nämlich durch Vergasung mit Wasserdampf und Sauerstoff zu Synthesegas gefolgt von der für Erdgas beschriebenen Technologie sowie durch direkte Verflüssigung mit Wasserstoff unter Hochdruck. Beide Techniken wurden in der Vergangenheit in Deutschland betrieben, aus heutiger Sicht wäre jedoch eine tiefgreifende Modernisierung der früheren Verfahren erforderlich.

Mit dem Ziel, nachwachsende Rohstoffe deutlich besser als bisher zu nutzen, müssen jetzt Verfahren zur Erzeugung von Biokraftstoffen der 2. Generation entwickelt werden. Hierunter fasst man die folgenden Routen zusammen: 1) Vergasung der Biomasse zu Synthesegas gefolgt von dessen Umwandlung zu synthetischen Biokraftstoffen nach der oben für Erdgas beschriebenen Technologie („Biomass-to-Liquids“, BTL); 2) Enzymatische Gewinnung von Bioethanol nicht nur aus Zuckerbestandteilen der Pflanze, sondern auch aus Cellulose, Hemicellulosen u.a.; 3) Enzymatische Gewinnung von anderen, für Kraftstoffe besser als Bioethanol geeigneten Verbindungen, z.B. von Biobutanol. Weiterhin muss über Synergieeffekte von Verfahren bei kombiniertem Einsatz von Biomasse mit Kohle und organischen Reststoffen nachgedacht werden.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Seit einem halben Jahrhundert hat sich Erdöl als optimaler Rohstoff für die Herstellung flüssiger Kraftstoffe erwiesen. Im Methan, dem Hauptbestandteil des Erdgases, fehlen C-C-Verknüpfungen, und sie können bislang nicht in einem einzigen chemischen Schritt erzeugt werden, da Methan thermodynamisch recht stabil und kinetisch reaktionsträge ist. Kohle ist wasserstoffarm (ihre Umwandlung in qualitativ hochwertige wasserstoffreiche Kraftstoffe bedingt daher vergleichsweise hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen), oft reich an schädlichen Fremdatomen (Schwefel, Stickstoff und anderen) und als Feststoff schwierig zu handhaben. Die Verfügbarkeit von nachwachsenden Rohstoffen für den Kraftstoffsektor ist begrenzt (man schätzt das Substitutionspotenzial auf maximal 20 bis 25 % der nationalen Versorgung), und auf manchen Routen (z.B. Rapsöl zu Biodiesel) fallen große Mengen an Nebenprodukten (Glycerin) an.

» **Lösungsansätze:** Eine Schlüsseltechnologie, welche in erster Linie das Potenzial für die Überwindung bestehender Hindernisse bietet, ist die Katalyse. In besonderem Maße in Betracht kommen die heterogene Katalyse und die Biokatalyse. Lediglich als Beispiele seien im Folgenden einige mögliche Entwicklungslinien skizziert:

In Deutschland werden heute alle Kraftstoffe mittels Hydrotreating sehr weitgehend (bis herab zu 10 Massenppm) entschwefelt. Der Trend zu noch schwefel- (und stickstoff-) ärmeren Kraftstoffen wird sich fortsetzen. Hierfür werden innovative Verfahren benötigt, im Ansatz erkennbar sind derzeit biokatalytische, oxidative und Routen über reaktive Adsorption. Bei der Erzeugung von Dieselkraftstoff und Kerosin aus Erdgas ist weiter nach katalytischen und verfahrenstechnischen Maßnahmen zu suchen, welche eine kostengünstigere Erzeugung von Synthesegas erlauben. Auch für die weitere Verbesserung der Katalysatoren und Technik der Reaktoren für die Fischer-Tropsch-Synthese besteht ein Potenzial. Der Bereich der chemischen Kohleveredelung sollte angesichts der sehr großen Kohlevorräte auf der Erde langfristig unter Einbeziehung aller Möglichkeiten der modernen Katalyse, Verfahrenstechnik und Synergieeffekte bearbeitet werden. Bei den nachwachsenden Rohstoffen muss das Hauptaugenmerk von Forschung und Entwicklung naturgemäß den Biokraftstoffen der 2. Generation gelten mit den Schwerpunkten Vergasung von Biomasse und gentechnische Optimierung von Pflanzen und Biokatalysatoren. Wo große Mengen an Nebenprodukten anfallen, z.B. Glycerin bei der Erzeugung von Biodiesel durch Umesterung von Rapsöl, kann deren katalytische Veredelung zu Chemieprodukten einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit leisten.

» **Verbesserungspotenzial:** Der technische Fortschritt auf dem Sektor der Herstellung hochwertiger flüssiger Kraftstoffe aus fossilen und nachwachsenden Rohstoffen wird sich insgesamt als Ergebnis internationaler F&E-Anstrengungen und Kooperationen vollziehen. Gerade in Deutschland bestehen aber bei einer gezielten Förderung solcher F&E-Tätigkeiten hervorragende Erfolgsaussichten. Gründe dafür sind der hohe Rang der Katalyse in Forschung und industrieller Anwendung sowie eine bereits jetzt führende Rolle in der Herstellung und Nutzung von Biokraftstoffen.

### 3.1.2 Bioenergie

» **Entwicklungslinie:** Unter dem Begriff „Bioenergie“ fasst man die energetische Nutzung von Biomasse zusammen, der eine zukunftsweisende Bedeutung zukommt, da weltweit eine deutliche Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und den damit zusammenhängenden CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgen muss. Neben der energetischen Nutzung von Biogas, Bioethanol und ETBE (Ethyltertiärbutylether) haben die niedermolekularen Substanzen (Methanol, Ethanol usw.) darüber hinaus das Potenzial, als Plattformchemikalien zum Aufbau neuer Chemikalienstammbäume nutzbar zu sein.

» **Stand der Technik:** Derzeit beruhen die zur Anwendung kommenden Darstellungsverfahren im Wesentlichen auf der Anaerobtechnik zur biologischen Vergärung nachwachsender Rohstoffe und Produkterzeugung (Biogas, Bioethanol). Eine dem Darstellungsverfahren direkt nachgelagerte thermische Verwertung erfolgt lediglich beim Biogas in Blockheiz-Kraftwerken (BHKW), wobei zur Erhöhung des Wirkungsgrades der Abwärmenutzung besondere Bedeutung zukommt. Hinsichtlich der energetisch-stofflichen Nutzung von kleinemolekularen Bioprodukten (Bioethanol, Methanol usw.) muss eine Produktabtrennung und Aufkonzentrierung aus dem fermentierten Substrat erfolgen. Die Anforderungen an den Reinheitsgrad des Produktes benötigen dabei häufig energetisch und stofflich aufwändige Zwischenschritte. Im Falle des Bioethanols sind das z.B. Destillation, Rektifikation und Entwässerung durch Zeolithinsatz. Eine Veredelungskette kann durchaus auch mit einer großtechnisch chemischen Umwandlung abschließen, wie im Falle der ETBE-Darstellung. Derzeit sind die

Kosten für Rohstoffe, Anlagenbau und -betrieb, Produktaufbereitung und z.T. chemische Umwandlung noch zu hoch. Nicht zuletzt anzumerken ist, dass es auch der Gärrestentsorgung und -verwertung an günstigen energetischen Konzepten mangelt.

» **Defizite und Entwicklungsziele:** Dem großen gesellschaftlichen Bedarf an bioenergetischen Produkten steht in Deutschland die nur sehr begrenzte Ressourcenverfügbarkeit von „Nachwachsenden Rohstoffen“ (NawaRos) gegenüber. Derzeit könnten etwa 10 % des derzeitigen Primärenergiebedarfs durch NawaRos gedeckt werden. Das besondere Augenmerk sollte auf die Entwicklung von neuen innovativen Verfahren zur Herstellung von biotechnologischen Produkten gelegt werden, die eine deutlich erhöhte Ressourceneffizienz und eine erweiterte Rohstoffvielfalt aufweisen. Zudem sollte die gesamte Wertschöpfungskette im Blickfeld von Forschung und Entwicklung bleiben. In diesem Sinne sind Anbaumethoden nachwachsender Rohstoffe, konkrete Produktanwendung, Rohstoffalternativen und ggf. Gärreststoffverwertungen möglichst früh aufeinander abzustimmen. Dies gilt insbesondere für die Biogasgewinnung, da hier die Biogasausbeute bisher allein im Zentrum des Interesses steht. Der erweiterten Produktbetrachtung (Sekundärmetabolite, die parallel zum Biogas bei der Gärung entstehen), veränderten Prozessführungsstrategien sowie einer optimalen Verwertung der Gärreststoffe (Stickstoffnutzung) wurde bisher nur wenig Aufmerksamkeit gewidmet. Eine analoge Aussage ist auch für die Bioethanolherstellung zutreffend, wobei der verbesserten Ressourceneffizienz bei veränderter Rohstoffwahl und Fermentationstechnik, Produktabtrennung und Entwässerung bei geringem Energie- sowie Kostenaufwand eine deutlich höhere Priorität zugeordnet werden sollte. Hieraus resultierend könnte die ökonomische/ökologische Konkurrenzfähigkeit der Nutzung regenerativer Energiequellen sowie nachwachsender Rohstoffe deutlich erhöht werden.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderung:** Bisher befinden sich keine technischen Systeme in der Anwendung, die für die o.g. Optimierung der Aufgaben brauchbar wären. Die technisch-wissenschaftliche Herausforderung liegt in der Entwicklung neuer geeigneter Verfahren, die 1.) eine Erhöhung des ha-Ertrages an NaWaRos durch direkt einsetzbare Glukose/Cellulose als Gärsubstrat aufweisen und/ oder 2.) eine innovative Prozessführungsstrategie der Fermentation bei optimierter Produktausbeute und Ressourceneffizienz aufzeigen. Zudem ist auch vermehrt an die Verwertung von bislang nicht betrachteten Wertstoffen am Ende der Prozessketten zu denken. Im Folgenden sollen zur Veranschaulichung zwei konkrete Beispiele genannt werden:

- Bei der Biogasherstellung ist oberhalb einer Anlagengröße von 200 KW elektrischer Leistung eine positive Stickstoffbilanz feststellbar, die bisher keiner Verwertung zugeführt wird. Das früher favorisierte Stripping der flüchtigen Stickstoffkomponenten hat sich aufgrund des hohen Chemikalieneinsatzes und der Ausfallprozesse als nicht anwendbar herausgestellt.
- Bei der Bioethanolherstellung haben sich neben der Fermentation insbesondere die technischen Systeme zur Entwässerung als Schlüsseltechnologie herausgestellt, wobei die derzeit verwendeten Zeolithe mit vorgeschalteter Rektifikation einen zu hohen Energie- und Investitionskosten aufwand erfordern.

» **Lösungsansätze:** Zur Verbesserung kostenintensiver Aufreinigungen und Trennverfahren werden derzeit verschiedene Ansätze verfolgt. Ein Schlüssel könnte hier die Herstellung gezielt funktionalisierter Feststoffoberflächen sein. Diese können in Form von Adsorbentien und Membranmaterialien sehr einfach Eingang in die technische Systementwicklung, wie mehrstufige oder hybride Membranverfahren, finden. Hier ist konkret an Fortschritte bei der Ethanolentwässerung in Richtung von günstigeren Energie- und Investkosten zu denken. Dies gilt auch für die Abtrennung der Ammoniumkomponenten in den Gärresten bei der Biogasherstellung. Als Produkt einer erweiterten Wertschöpfung bietet sich hier das ammoniakreiche Wasser an. Dieses ist geeignet für den Einsatz als Lösungsmittel in der Industrie und eine geeignete Komponente zur Entstickung von Abgasen in Kraftwerken. Die Ertragslage und ökobilanzielle Bewertung von Biogasanlagen könnte so entscheidend verbessert werden. Bei den in fester Form anfallenden Reststoffen sind die Phosphorverbindungen potenziell interessante Wertstoffe, deren Abtrennung und Gewinnung über Extraktionsverfahren genauer betrachtet werden sollte. Bei der Optimierung der Fermentationstechnik ist aufgrund der sehr begrenzten Ressource NawaRo's über die Verwendung von organischen Reststoffen aus der Lebensmittelverarbeitung nachzudenken, wodurch der Biogasanteil an der Gesamtbioenergie deutlich erhöht werden könnte. Aufgrund der Bestimmungen des EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) können diese Rohmaterialien von den Anlagenbetreibern aber ohne ökonomische Benachteiligung nicht verwendet werden. Die Erweiterung der Rohstoffnutzung und

Fermentertechniken mit anpassbarer Raum-Zeit-Ausbeute bei hohen Feststoffgehalten erscheinen vielversprechend. Hierzu arrondierend gilt es auch, die Anwendung der „grünen Gentechnik“ zur Entwicklung verbesserter Energiepflanzen zu prüfen.

» **Verbesserungspotenzial:** Die im Vorhergehenden aufgezeigten Innovationen sind aufgrund der sehr begrenzt zur Verfügung stehenden Menge an NawaRo's dringend notwendig, um eine ausreichende Substitution von fossilen Energieträgern erreichen zu können. Des Weiteren würde eine Erweiterung im Produktportfolio eine deutliche Reduzierung von der Subventionsabhängigkeit ergeben. Hinsichtlich dieser wirtschaftlichen und ökologischen Aspekte gilt es auch auf den umwelttechnischen Exportgütermarkt hinzuweisen, da die globale Konkurrenzfähigkeit in diesem großen Wachstumsmarkt entscheidend verbessert wird.

### 3.1.3 Herstellung von Wasserstoff

Entwicklungslinie: Wasserstoff wird als ein vielversprechender Energieträger in einem zukünftigen Energiesystem diskutiert. Da Wasserstoff keine Energiequelle ist, muss er aus einer verfügbaren Energiequelle zunächst hergestellt werden. Dazu müssen effiziente Verfahren bereitgestellt werden.

» **Stand der Technik:** Wasserstoff wird zum größten Teil aus Kohlenwasserstoffen, hauptsächlich aus Erdgas, durch Dampfreformierung oder Partialoxidation hergestellt. Die Hauptmenge des derzeit produzierten Wasserstoffs wird direkt weiter umgesetzt zu Ammoniak, Methanol oder in Raffinerieprozessen, nur ein kleinerer Anteil wird isoliert und als Wasserstoff gehandelt. Die Wasserstofferzeugung aus Kohlenwasserstoffen ist unter energetischen Gesichtspunkten weitgehend optimiert.

» **Defizite und Entwicklungsziel:** Angesichts der absehbaren Verknappung fossiler Energiequellen, insbesondere von Kohlenwasserstoffen, müssten bei einem Übergang zu Wasserstoff als Energieträger neue Zugänge zu Wasserstoff entwickelt werden und prinzipiell bekannte, aber bisher aus Kostengründen nicht umgesetzte Prozesse zur Wasserstoffherstellung optimiert werden. Entwicklungsziel ist die Bereitstellung von regenerativ hergestelltem Wasserstoff zu Kosten, die vergleichbar mit zukünftigen Kosten für fossile Energieträger sind.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Derzeit ist die Elektrolyse von Wasser die am weitesten entwickelte Technologie. Die Elektrolyse selbst arbeitet bereits mit hoher Energieeffizienz (> 60 %), die Erzeugung der erforderlichen elektrischen Energie (Kraftwerke, Photovoltaik, Wind etc.) ist jedoch typischerweise relativ ineffizient. Die Wasserstofferzeugung ohne den Umweg über elektrische Energie durch thermochemische Prozesse hat das Potenzial für eine höhere Gesamteffizienz, jedoch sind für die meisten der diskutierten Verfahren Langzeitstabilität und Fragen der Skalierbarkeit offen. Der auf den ersten Blick attraktivste Weg, die katalytische Wasserspaltung, ist sowohl bei Nutzung von festen Katalysatoren als auch unter Nutzung biochemischer oder biomimetischer Systeme von befriedigenden Raum-Zeit-Ausbeuten weit entfernt.

» **Lösungsansätze:** Im Bereich von Elektrolysezellen könnten alternative Katalysatoren insbesondere für den Anodenprozess sowie die Entwicklung von Hochtemperatur-Elektrolysezellen zu höherer Effizienz führen. Die schlechte Effizienz der Stromerzeugung bleibt jedoch. Interessante thermochemische Prozesse sind im Zusammenhang mit dem Hochtemperaturreaktor und solaren Turmkraftwerken entwickelt worden. Hier gilt es, die Systeme zu verbessern und weitere chemische Systeme zu identifizieren, die über thermisch getriebene Redoxzyklen zur Wasserstoffproduktion geeignet sind. Untersuchungen zur katalytischen Wasserspaltung befinden sich noch im Grundlagenstadium. Vielversprechende Ansätze verwenden neuartige Feststoffe zur direkten Nutzung von Strahlungsenergie zur Wasserspaltung, bilden auf molekularer Basis die Funktion des Photosystems von Pflanzen nach oder versuchen, teils durch Nutzung gentechnisch veränderter Organismen, befriedigende Wasserstofferzeugungsraten in Bioreaktoren zu erreichen.

» **Verbesserungspotenzial:** Das Verbesserungspotenzial liegt im Wesentlichen im Wechsel auf eine andere, CO<sub>2</sub>-neutrale Grundlage für die Wasserstofferzeugung. Die derzeitige Produktion beruht auf fossilen Energiequellen, die endlich sind, wenn auch Kohle noch eine relativ lange Reichweite hat. Die oben skizzierten Lösungsansätze werden die Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Energiequellen erheblich effizienter machen, in Teilbereichen wie z.B. der katalytischen Wasserspaltung an Feststoffen ist eine Effizienzsteigerung um eine Größenordnung im Bereich des Möglichen. Für die Konkurrenzfähigkeit zur Wasserstofferzeugung aus fossilen Energiequellen wäre dies vermutlich vielfach ausreichend.

### 3.1.4 Nicht-konventionelle Kraftstoffe

» **Entwicklungslinie:** Alternativen zu den derzeit gebräuchlichen Kraftstoffen, die im Wesentlichen auf Gemischen aus Kohlenwasserstoffen beruhen, stellen Methanol (mit einer Research-Oktananzahl von 100) bzw. Dimethylcarbonat, DMC (Research-Oktananzahl ca. 110) als Ersatz für Ottokraftstoffe sowie Dimethylether, DME (Cetanzahl von 55 bis 60) als Ersatz für Dieselmotorkraftstoff dar.

» **Stand der Technik:** Die großtechnische Herstellung von Methanol aus Synthesegas ist Stand der Technik. Hieraus ein Produktgemisch herzustellen, das der Qualität von Superbenzin entspricht, ist ebenfalls Stand der Technik. Gleichfalls ist es Stand der Technik, DME durch katalytische Dehydratisierung von Methanol zu gewinnen. Darüber hinaus wurden Prozesse entwickelt, die die Herstellung von Methanol und dessen Dehydratisierung zum DME in einem Schritt ermöglichen. Für die Herstellung von Dimethylcarbonat existieren außer der klassischen Route über Phosgen mehrere neuere Konzepte auf phosgenfreier Basis. Am weitesten entwickelt ist derzeit die Route über oxidative Carbonylierung von Methanol an Kupferchlorid als Katalysator. Konzepte, die auf der Umsetzung von Methanol mit Kohlendioxid beruhen, wurden ebenfalls untersucht.

» **Defizite bzw. Entwicklungsziel:** Herausragende Entwicklungsziele sind: 1.) die Herstellung von Methanol durch selektive Direktoxidation von Methan (d.h. ohne Synthesegas als Zwischenprodukt); 2.) die Herstellung von Methanol unter Nutzung von  $\text{CO}_2$  als Kohlenstoffquelle (hierzu wird Wasserstoff aus – möglichst – erneuerbaren Quellen benötigt); 3.) die direkte Herstellung von DME aus  $\text{CO}$  und  $\text{H}_2$  bzw. aus  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$ ; 4.) die Herstellung von DMC auf der Basis von Methanol und Kohlendioxid mit hohen Ausbeuten (Begrenzung des Umsatzes durch die Lage des thermodynamischen Gleichgewichts).

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Herausforderungen liegen insbesondere im Bereich der Katalyse und der Reaktionstechnik: Es werden Katalysatoren benötigt, die u.a. selektiv Methan zu Methanol bzw. DME umsetzen. Darüber hinaus ist die (katalytische) Umsetzung von  $\text{CO}_2$  mit  $\text{H}_2$  zu DME eine Herausforderung, wenn es darum geht, „Abgase“ in die Herstellung von Kraftstoffen einzubeziehen. Gleiches gilt für die Herstellung von DMC aus Methanol und Kohlendioxid. Hier bestehen die wesentlichen Aufgaben darin, aktivere Katalysatoren sowie Möglichkeiten zur Abtrennung von Produktwasser aus dem Reaktionsgemisch (z.B. über Membranen, zur Verschiebung des Gleichgewichts) zu entwickeln.

## 3.2. Bereitstellung von elektrischer Energie

### 3.2.1 Gewinnung von Energie aus Sonnenlicht

» **Entwicklungslinie:** Aus heutiger Sicht müssen erneuerbare Energien signifikante Anteile des sich bis 2050 verdoppelnden Energiebedarfs der Erde decken. Das Potenzial von Wind-, Wasser-, Biomasse- und geothermischer Energie zusammen reicht für diese Herausforderung nicht aus. Im Gegensatz dazu übertrifft die auf der Erde ankommende Strahlungsleistung der Sonne den Energiebedarf der Erde um mehrere Größenordnungen. Das Ziel aller Entwicklungen im Sektor Solarzellen muss daher eine hinreichend kostengünstige, effiziente und langlebige Technologie sein, mit der die Energiequelle Sonne urbar gemacht werden kann.

» **Stand der Technik:** Zur Zeit dominieren Solarzellen aus kristallinem Silicium den Markt. Mit den heutigen Solarzellen-Technologien kann Sonnenenergie nicht kosteneffizient nutzbar gemacht werden. Es wird erwartet, dass die in ihrer Entwicklung vor der Marktreife stehenden Dünnschichtsolarzellen ( $\alpha$ -Si,  $\mu\text{c-Si}$ , CdTe,  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ ) die kommende Solarzellen-Generation stellen. Um wettbewerbsfähig zu werden, sind drastische Kostensenkungen bei den existierenden Technologien nötig, und es werden neue Zellkonzepte benötigt, welche auf neuen Materialien beruhen.

» **Defizite und Entwicklungsziel:** Die Umwandlungseffizienz von Solarzellen ist durch die Energieschwelle (Bandlücke) des jeweils verwendeten Halbleiters limitiert. Um einen möglichst breiten Bereich des Sonnenspektrums abgreifen zu können, verwendet man Halbleiter mit einer kleinen Bandlücke. Dies bringt den Nachteil, dass die Energie von Photonen, welche die Bandlücke übersteigt, zum Teil als Wärme verloren geht. Ziel muss es daher sein, durch geeignete Zell- und Modularchitekturen eine effizientere Umwandlung von Licht in elektrische Energie zu erreichen.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Das Konzept mit den vermutlich höchsten Realisierungschancen sind Zell-Architekturen, mit denen Licht verschiedener Energie in kleineren aneinander gekoppelten Stufen umgewandelt wird. Eine solche Vorgehensweise wird heute bereits bei den Hochleistungszellen für die Raumfahrt eingesetzt. Gefragt sind nun einfachere Realisierungswege für solche multi-Bandlücken-Zellen (zu wettbewerbsfähigen Kosten). Entsprechende Zellkonzepte können nur auf Basis neuer Materialien realisiert werden.

» **Lösungsansätze:** Sowohl anorganische als auch organische Solarzellen können zur Umsetzung von multi-Bandlücken-Solarzellen eingesetzt werden. Anorganische multi-Bandlücken-Konzepte sind mit Hilfe von Interband-Zuständen in einem Material vorstellbar. Organische Zellen können durch den einfachen Aufbau von gestapelten Schichtstrukturen als in Serie geschaltete, sogenannte Tandem-Zellen aufgebaut werden. Die synthetische Vielfalt der organischen Halbleiter erlaubt hier eine optimale Abstimmung der Absorptionseigenschaften der jeweiligen Schichten.

» **Verbesserungspotenzial:** Gelingt es, Solarmodule mit einem Preis-Leistung-Verhältnis von knapp unter 1 €/Wp (Watt peak) herzustellen, wird der erzeugte Strom bereits konkurrenzfähig zu den heutigen Verbraucherpreisen. Es ist eventuell möglich, dieses Ziel mit den heute entwickelten Dünnschicht-Technologien zu erreichen.

Eine deutliche Unterschreitung dieser Marke auf ca. 0,20 €/Wp würde bedeuten, dass Solar-Energie mit dem heutigen Niveau der Primärenergie-Kosten gleichziehen kann. Dies ist nur mit neuen Technologien möglich. Dass das Ziel lohnt, zeigt eine einfache Rechnung: Bei einem Wirkungsgrad von 25 % benötigt man 0,3 % der Landfläche der Erde, um den gesamten Energiebedarf von 28 TW in 2050 mit Solarenergie zu decken – vorausgesetzt man verfügt bis dahin über entsprechende Speicher und Distributionswege für die erzeugte Energie.

### 3.2.2 Brennstoffzellentechnik

» **Entwicklungslinie:** Die Effizienz von Energiewandlern kann einen entscheidenden Beitrag zur Ressourcenschonung fossiler Energieträger und zum Klimaschutz leisten. Brennstoffzellensysteme sind effizient, auch im kleinen Leistungsbereich. Das Ziel ist, kostengünstige Brennstoffzellensysteme mit langer Lebensdauer zu entwickeln als Baustein einer zukünftigen Energieversorgungsstruktur.

» **Stand der Technik:** Verschiedene Brennstoffzellentypen sind bekannt: Die Entwicklungslinien basieren auf verschiedenen Materialkombinationen, die wiederum verschiedene Betriebstemperaturen bedingen. Das Spektrum reicht von 1000°C bis Raumtemperatur – dementsprechend unterschiedlich ist auch das Anwendungsspektrum der Brennstoffzellen. Sie können zum Antrieb in der Elektrotraktion, als mobiler oder portabler Stromgenerator oder zur stationären Erzeugung von Strom und Wärme dienen. Die Kraft-Wärme-Kopplung ist diejenige Maßnahme, die ohne Komfortverlust und ohne neue Infrastruktur schon heute umsetzbar wäre und einen signifikanten Beitrag zur Effizienzsteigerung leisten könnte, wenn Brennstoffzellen zu wettbewerbsfähigen Kosten zur Verfügung stünden. Die Bereitstellung der Energieträger für die Brennstoffzellentechnik reicht von reinem Wasserstoff für den Automobylantrieb, Methanol und anderen flüssigen Energieträgern für Anwendungen im kleineren Leistungsbereich, zu Erdgas und Biogas für den stationären Bereich. Die großtechnische Wasserstoffherzeugung aus fossilen Energieträgern ist bekannt, für Brennstoffzellensysteme sind oft dezentrale Einheiten im kleineren Leistungsbereich gefragt, zumindest als Übergangstechnologie, bis regenerativer Strom für die elektrolytische Wasserstoffherstellung zur Verfügung steht.

» **Entwicklungsziele:** Für die Chemie sind generell die verwendeten Materialien von Interesse. Werkstoffe, Katalysatoren und insbesondere die Elektroden und Elektrolyte der Brennstoffzelle selbst sind wichtige Arbeitsfelder. Für die Werkstoffe sind Kostenreduktion und massenfertigungstaugliche Bearbeitungsverfahren wichtig. Katalysatoren werden sowohl in den Elektroden der Brennstoffzelle selbst als auch für die Wasserstoffbereitstellung benötigt – oft sind Edelmetalle im Spiel. Eine weitere Reduktion der benötigten Edelmetallmenge und bessere katalytische Eigenschaften sind Entwicklungsziele. Die Lebensdauer von Elektroden und Elektrolyten unter Betriebsbedingungen ist ebenfalls noch zu verbessern.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderung:** Hohe Leistungsdichten von bis zu einigen Ampere pro  $\text{cm}^2$ , trotzdem sichere Trennung von Brenngas und Luft und eine Lebensdauer wie die bisher eingesetzten Techniken sollen mit den neuen Materialien erreicht werden – bei gleichzeitig reduzierten Materialkosten. Die Membran selbst und die optimierte Herstellung von Membran-Elektrodeneinheiten (MEE) ist für die Brennstoffzellen das zentrale Thema. Die perfluorierten Membranen für die Membranbrennstoffzelle sind chemisch sehr stabil zumindest bis ca.  $80^\circ\text{C}$ , aber teuer und verlangen ein genaues Wassermanagement. Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle arbeitet bei  $650^\circ\text{C}$  mit einer Salzschnmelze als Elektrolyt – hier dominieren Korrosionsfragen und die Löslichkeit des Kathodenmaterials im Elektrolyten die Materialaspekte. Yttriumdotiertes Zirconiumoxid ist ein guter Sauerstoffionenleiter für die Festoxidbrennstoffzelle, aber erst bei Temperaturen von  $900 - 1000^\circ\text{C}$ , was wiederum für alle anderen Werkstoffe eine schwierige Herausforderung darstellt. Verbesserungen – teilweise auch sehr anwendungsspezifische – sind wichtige Voraussetzung für die Markteinführung der Brennstoffzellentechnik.

» **Lösungsansatz:** Für die Membranbrennstoffzelle wird bereits intensiv an neuen Elektrolyten geforscht, bessere Leitfähigkeit und Lebensdauer wird durch Modifikation der Fluorpolymere bereits erreicht, eine Arbeitstemperatur über  $100^\circ\text{C}$  braucht völlig neue Ansätze. Es werden anorganisch-organische Hybridmembranen entwickelt, wobei die anorganische Komponente hydrophil und temperaturstabil ist, so dass die Eigenschaften der resultierenden Hybridmembran in dieser Hinsicht besser sein können. Wenn die anorganischen Materialien eine eigene Protonenleitung aufweisen, werden gute Leitfähigkeiten erwartet. In einer zweiten Route werden funktionalisierte siliciumorganische Membranen entwickelt auf Basis von Zeolithen und Hetero-polysiloxanen. Ein stabiles Trägermaterial wird funktionalisiert oder sogar ein poröses Substrat gefüllt. Die größte Herausforderung ist sicher, eine hohe Leitfähigkeit bei wasserfreier Protonenleitung zu erreichen. Hier setzt die dritte Entwicklungslinie zum Thema intrinsisch leitfähiger Polymere an.

Für die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle werden überwiegend Modifikationen der bekannten Materialien untersucht, um die Korrosionsgeschwindigkeit zu verringern. In aufwändigen Langzeitversuchen werden Materialeigenschaften optimiert.

Für die Festoxidbrennstoffzelle hingegen wird ebenfalls nach neuen Elektrolyten gesucht, die bei niedrigerer Temperatur eine ausreichende Ionenleitfähigkeit haben. Oxidische Systeme z.B. mit Cer, Gadolinium oder Scandium sind Kandidaten. Allerdings muss gleichzeitig die Verarbeitbarkeit, ein zu den Elektrodenmaterialien passender thermischer Ausdehnungskoeffizient und eine niedrige elektronische Leitfähigkeit sowie eine gute Verfügbarkeit der Materialien beachtet werden, so dass sich eine komplexe, vielschichtige Aufgabe ergibt. Die pulverförmigen Ausgangsmaterialien, die Beschichtungsverfahren zur MEE-Herstellung und der Sinterprozess bestimmen die Qualität der Festoxidbrennstoffzelle; bezüglich Lebensdauer und Leistungsdichte wurden bereits große Fortschritte erzielt.

» **Verbesserungspotenzial:** Das durch Brennstoffzelleneinsatz zu erreichende Verbesserungspotenzial zu ermitteln, ist eine komplexe Aufgabenstellung. Drei Beispiele seien hier genannt. Mit stationären Brennstoffzellen in der Energieversorgung eines Einfamilienhauses können laut eines Simulationsbeispiels ca. 18 % an  $\text{CO}_2$ -Emissionen und 23 % an Energiekosten im Vergleich zu konventioneller Heiztechnik eingespart werden, dabei wird eine Reduktion des Strombezugs aus dem Netz von 81 % erreicht. Für größere stationäre Brennstoffzellenanlagen bringt allein die Tatsache, dass Kraft-Wärme-Kopplung realisiert wird, den entscheidenden Vorteil gegenüber konventioneller Energieversorgung. Eine Reduktion des Energieverbrauchs und damit auch der  $\text{CO}_2$ -Emissionen von 20 – 50 % wurde ermittelt. Für Brennstoffzellenfahrzeuge mit Wasserstoff als Kraftstoff werden Fahrzeugwirkungsgrade von über 37 % entsprechend 3,8 l Dieseläquivalent auf 100 km erzielt (gegenüber 26 % bei Verbrennungsmotoren), so dass sogar mit Wasserstoff aus Erdgas bereits eine  $\text{CO}_2$ -Einsparung möglich ist. Mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff sind die  $\text{CO}_2$ -Emissionen nahezu um 100 % zu reduzieren.

### 3.2.3 Thermoelektrika

» **Entwicklungslinie:** Thermoelektrische Energiekonversion ermöglicht die Umwandlung von Wärme in elektrische Energie. Wäre sie effizienter, könnte diese Art der Stromerzeugung weitreichende Anwendung erfahren. Elektrizitätsgewinnung kann aus Abwärme erfolgen, zum Beispiel erzeugt in Verbrennungsprozessen (Kraftfahrzeuge, Flugzeuge, Schiffe, Müllverbrennung) und Kraftwerken.

» **Stand der Technik:** Derzeit findet die thermoelektrische Stromerzeugung noch begrenzte Anwendung, wird jedoch seit Jahrzehnten insbesondere in der Raumfahrt und Telekommunikationsindustrie hoch geschätzt. Zudem laufen seit einiger Zeit Feldversuche in den USA, in denen die elektrische Energie, gewonnen aus Abwärme von Dieselmotoren, zum Antrieb der elektrischen Geräte der Fahrzeuge benutzt wird.

» **Defizite und Entwicklungsziel:** Die zur Zeit verwendeten Materialien arbeiten mit einem Wirkungsgrad von unter 10 % – hier muss angesetzt werden, indem innovative Materialien mit höherer Effizienz entwickelt werden. Interdisziplinäre Kollaborationen sind gefragt, um die physikalischen Eigenschaften zu optimieren.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Thermoelektrische Materialien müssen u.a. neben hoher elektrischer Leitfähigkeit eine niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Hierin liegt die größte Herausforderung, da Materialien hoher elektrischer Leitfähigkeit gewöhnlich auch hohe Wärmeleitfähigkeit zeigen, dadurch verursacht, dass die Ladungsträger, welche für die elektrische Leitfähigkeit vorhanden sind, gleichermaßen eine hohe Wärmeleitfähigkeit verursachen.

» **Lösungsansätze:** Unterschiedliche Ansätze werden von diversen Arbeitsgruppen verfolgt. Zum einen wird versucht, mittels Nanotechnologie die Wärmeleitfähigkeit bekannter Materialien wie  $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  und  $\text{PbTe}$  herabzusetzen, ohne die elektrische Leitfähigkeit zu verringern. Zum anderen werden explorativ neue Materialien synthetisiert und anschließend ihre thermoelektrischen Eigenschaften optimiert. Hierbei wird im Wesentlichen das PGEC-Konzept angewendet (PGEC = phonon-glass, electron-crystal). Dieses Konzept beruht auf der grundsätzlichen Idee, Materialien zu entwickeln, deren Wärmeleitfähigkeit sich wie im Glas verhält und deren elektrische Leitfähigkeit wie im wohlgeordneten Kristall. Als vielversprechende Materialien haben sich  $\text{CsBi}_4\text{Te}_6$  sowie allgemein Verbindungen der Klathrat-Familie, des Skutterudit- und des  $\text{Ir}_3\text{Ge}_7$ -Typ herauskristallisiert. Feldversuche haben dabei zum Teil bereits die technische Verwendbarkeit der neuen Materialien demonstriert.

» **Verbesserungspotenzial:** Innerhalb der letzten zehn Jahre wurde der thermoelektrische Gütewert, der sich aus spezifischen Werkstoffeigenschaften und der Temperatur berechnet, mehr als verdoppelt, von etwa 1 auf deutlich über 2 (höhere Werte entsprechen höherer Effizienz). Ein Ende dieser Steigerung ist nicht abzusehen, und theoretisch gesehen existiert kein Limit. In Fachkreisen werden Materialien mit Werten von 3–4 für die nahe Zukunft erwartet, mit welchen dann eine großflächige Nutzung der thermoelektrischen Elektrizitätsgewinnung aus Abwärme und Sonnenwärme erfolgen kann.

### 3.2.4 Weiterentwicklung von Kraftwerkstechnologien

» **Entwicklungslinie:** Kohlebefeuerte Kraftwerke werden noch auf lange Zeit das Rückgrat der Versorgung mit elektrischer Energie bilden. Die Weiterentwicklung der Kraftwerkstechnologie sollte in erster Linie die Verminderung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen durch Erhöhung des Kraftwerkswirkungsgrades zum Ziel haben. Ein Weg, der heute diskutiert wird, sind Kraftwerkskonzepte, bei denen die  $\text{CO}_2$ -Emissionen durch Abscheidung und Ablagerung des  $\text{CO}_2$  in unterirdischen Speichern vermieden werden.

» **Stand der Technik:**  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus kohlebefeierten Kraftwerken machen heute rd. 30 % der insgesamt in Deutschland emittierten  $\text{CO}_2$ -Mengen aus. Weltweit haben die in Betrieb befindlichen Steinkohlekraftwerke nur einen Wirkungsgrad von im Mittel rd. 30 %, während neue Anlagen Wirkungsgrade von mehr als 45 % aufweisen. Im Durchschnitt benötigen die Anlagen zur Erzeugung von 1 kWh-Strom 480 g Kohle und emittieren dabei rd. 1100 g  $\text{CO}_2$ , während moderne Kraftwerke nur rd. 750 g  $\text{CO}_2/\text{kWh}$  ausstoßen.

» **Defizite und Entwicklungsziel:** Eine Verminderung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus der Kohleverbrennung in Kraftwerken kann grundsätzlich auf zwei Wegen erreicht werden, nämlich durch Steigerung des Wirkungsgrades, wie oben beschrieben, oder durch Abscheidung des  $\text{CO}_2$  im Kraftwerksprozess mit nachfolgender unterirdischer Speicherung.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Die Anhebung des Kraftwerkswirkungsgrades erfordert bei grundsätzlicher Beibehaltung des Kraftwerksprozesses die Anhebung von Frischdampfdruck und -temperatur. Zur Beherrschung dieser Frischdampfzustände ist die Entwicklung neuer Werkstoffe erforderlich, die bis zu heute angestrebten Frischdampftemperaturen von 700° C einsetzbar sind.

Hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Abscheidung ist die große Herausforderung, Prozesse zu entwickeln, die bei den in der Kraftwerkstechnik üblichen großen Betriebseinheiten wirtschaftlich und mit hoher Verfügbarkeit betreibbar sind. Entwicklungsschwerpunkte sind die Demonstration geeigneter Kohlevergasungsverfahren, die Entwicklung der Sauerstoffverbrennung und die Entwicklung und Erprobung großer Wasserstoffturbinen. Weitere wichtige Entwicklungsziele sind neuartige Waschflüssigkeiten zur Abscheidung des CO<sub>2</sub> aus dem Brenngas ebenso wie die Verminderung des Energieaufwandes bei der Regeneration der Waschlösungen. Wichtig wäre auch die Erarbeitung von Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung, die zur Nachrüstung an bestehenden Kraftwerken geeignet sind.

» **Lösungsansätze:** Hinsichtlich der für die Wirkungsgradanhebung notwendigen Materialentwicklung werden in Zusammenarbeit zwischen Kraftwerksbetreibern und Kraftwerksbau bereits verschiedene Materialien in einer realistischen Kraftwerksumgebung getestet. Ein im Falle der Braunkohle interessanter Lösungsansatz zur Anhebung des Kraftwerkswirkungsgrades ist die Vortrocknung der feuchten Rohbraunkohle im dampfbetriebenen Wirbelschichttrockner. Diese Entwicklung verspricht ebenso wie die Anhebung der Frischdampfparameter eine Erhöhung des Kraftwerkswirkungsgrades um bis zu 4 Prozentpunkte.

Im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Abtrennung werden zur Zeit drei Prozessrouten als aussichtsreich angesehen. Die sogenannte pre combustion Technologie basiert auf dem IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle)-Prozess, bei dem die Kohle zunächst in einem Vergasungsschritt in ein Synthesegas umgewandelt wird. In einer nachfolgenden Konvertierung unter Wasserdampfzugabe wird ein Brenngas erzeugt, das im Wesentlichen aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> besteht. Das CO<sub>2</sub> wird vor dem eigentlichen Kraftwerksprozess in einer Synthesegaswäsche abgetrennt. Die Energie des H<sub>2</sub>-reichen Gases wird in einem kombinierten Gas- und Dampfturbinenprozess in Strom umgewandelt. Die zweite Prozessroute ist das Oxyfuel-Verfahren, bei dem mit Hilfe einer vorgeschalteten Luftzerlegungsanlage aus der Verbrennungsluft der Stickstoff abgetrennt und nur der verbleibende Sauerstoff der Verbrennung zugeführt wird. Das den Dampferzeuger verlassende Rauchgas besteht dann zu etwa 70 % aus Kohlendioxid. Der Rest besteht im Wesentlichen aus Wasserdampf, der durch Kühlung der Rauchgase auskondensiert werden kann. Die dritte Prozessroute besteht in der Abtrennung des CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas eines konventionellen Kraftwerksprozesses, wobei für diese Rauchgaswäsche verschiedene Verfahren in der Diskussion sind.

» **Verbesserungspotenzial:** Allen zum „CO<sub>2</sub>-freien“ Kraftwerk führenden Verfahren gemeinsam ist, dass die CO<sub>2</sub>-Freiheit mit einem Verlust des Kraftwerkswirkungsgrades von 5–14 Prozentpunkten – am höchsten beim post combustion Verfahren – erkauft wird, wobei die Spreizung der Angaben bereits auf das große Potenzial zukünftiger Entwicklungen hindeutet. Allein durch einen vollständigen Ersatz der weltweit in Betrieb befindlichen Steinkohlekraftwerke mit einem mittleren Wirkungsgrad von 30 % durch moderne Anlagen mit einem Wirkungsgrad von 46 % ließe sich eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Steinkohleverstromung um 35 % erreichen. Die Weiterentwicklung der Kraftwerkstechnologie in Richtung einer Wirkungsgradanhebung bietet damit einen Hebel, mit dem sich eine national und global bedeutende CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung erreichen lässt. Durch eine integrierte CO<sub>2</sub>-Abscheidung, die erst nach einer längeren Entwicklungs- und Demonstrationsphase großtechnisch einsetzbar ist, verschlechtert sich der Kraftwerkswirkungsgrad aber wieder, was, wenn man dies wegen eines sich verschärfenden Klimaproblems in Kauf nehmen muss, zu einem zusätzlichen Brennstoffverbrauch und damit zu einer vermehrten Inanspruchnahme der fossilen Rohstoffressourcen führt.

### 3.3. Bereitstellung von Heizenergie

#### 3.3.1 Materialien für Kollektoren

» **Entwicklungslinie:** Für die Solar- und Geothermie benötigt man Kollektoren, die Solarenergie oder Erdwärme absorbieren und speichern. Erreichbar ist zur Zeit ein Wirkungsgrad bis 75 %.

» **Stand der Technik:** Gebräuchlich sind verschiedene Typen, die Flachkollektoren, Vakuumröhrenkollektoren und Parabolrinnenkollektoren. In Vakuumröhrenkollektoren werden „Getter“-metalle wie Barium eingebracht, um eine längere Lebensdauer zu gewährleisten. Kollektoren enthalten als wichtigste Komponenten bestimmte Absorbermaterialien, Dämmschichten (Polyurethan-Schaum, Mineralwolle), Reflektoren und Wärmeträger. Bei

letzterem handelt es sich üblicherweise um Wasser mit Propylen- oder Ethylenglycol. Die Absorber müssen schwarz, dünn und gut wärmeleitend sein. Es sind hochselektiv beschichtete Metallbleche (Kupfer, Aluminium) oder Glasrohre, die bezüglich maximaler Absorption und minimaler Emission optimiert sind. Beschichtungen bestehen entweder aus „Schwarz“-Chrom (feine Nadeln) oder -Nickel, die galvanisch aufgebracht werden und Absorptionskoeffizienten (Sonnenlicht 0,4-0,8  $\mu\text{m}$ ) bis zu 96 % und Emissionskoeffizienten von 8 % bis 12 % erreichen, oder aus im Hochvakuum aufgedampften oder gesputterten Schichten aus Aluminiumnitrid, Metallcarbid oder blauem Titanoxidnitrid. Letztere erreichen sehr gute Emissionskoeffizienten um 5 % und können damit vor allem bei hohen Betriebstemperaturen deutlich höhere Leistungen erzielen. Damit werden Absorptionswerte von ca. 94 % für das Sonnenlicht und Emissionswerte von weniger als 6 % für die aufgrund der Eigentemperatur des Absorbers reemittierte Infrarotstrahlung (Wellenlänge ca. 7,5  $\mu\text{m}$ ) erreicht. Für die Abdeckung der Kollektoren müssen Gläser mit besonders hohem Transmissionsgrad eingesetzt werden. Es handelt sich um spezielle eisenarme, gehärtete Borosilicat-Gläser oder Anti-Reflex-Gläser. Als Reflektoren werden zunehmend sogenannte CPC-Reflektoren eingesetzt (compound parabolic concentrator, rinnenförmig), die Strahlung innerhalb eines bestimmten Winkelbereiches einsammeln und auf den Absorber fokussieren. Außerhalb dieses Bereiches wird ein Teil der einfallenden Strahlung wieder aus dem Kollektor herausreflektiert. Außerdem gibt es weiße, diffuse Reflektoren aus hochreinem Aluminium.

» **Defizite und Entwicklungsziel:** Die galvanische Beschichtung mit feinteiligen Absorbermaterialien wie Chrom und Nickel ist ökologisch und toxikologisch bedenklich. Die neuen Materialien für die Absorber-Beschichtung, Carbide, Nitride und Oxidnitride sind in der Synthese, Aufbringung und Verarbeitung relativ aufwändig. Weitere Absorbermaterialien müssen gesucht und entwickelt werden. Ziel ist eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei gleichbleibender Effizienz.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Der reale Wirkungsgrad der Anlagen ist niedriger als oben angegeben, da die optimale Anbringung der Kollektoren von den baulichen Gegebenheiten abhängig ist. Ein weniger winkelabhängiges Konstruktionsprinzip würde die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens erheblich begünstigen. Vakuumröhrenkollektoren stellen hier bereits eine Verbesserung dar, ihre Schwachstelle ist jedoch die langfristige Dichtigkeit.

» **Lösungsansätze:** Ein interdisziplinärer Ansatz von Materialsynthese und Abscheidung dünner Schichten wird zu neuen, besseren Absorbersubstanzen führen. Ihre Konditionierung und Aufbringung muss modifiziert werden, um eine größere Toleranz bezüglich des Einfallswinkels von Solarstrahlung zu erreichen.

## 4. Energiespeicherung

### 4.1. Stoffliche Speicherung

» **Entwicklungslinie:** Große Mengen Energie können auf absehbare Zeit nur in Form energiereicher Verbindungen gespeichert werden, die in der Regel über chemische Reaktionen hergestellt werden müssen. Eine solche Speicherung ist aus Gründen der Versorgungssicherheit und zum Ausgleich jahreszeitlich schwankender Nachfrage auch in Zukunft dringend erforderlich und wird einen erheblichen Anteil der gesamten umgesetzten Energie betreffen.

» **Stand der Technik:** Derzeit basiert die stoffliche Speicherung von Energie weitgehend auf fossilen Energiequellen. Hierzu gehören eingelagerte Vorräte an Kohle, Öl (und dessen Folgeprodukte) oder Gas. In einem zukünftigen Energiesystem, das nicht mehr oder nicht ausschließlich auf solchen Stoffen beruht, sind alternative Speichermedien erforderlich.

» **Defizite und Entwicklungsziel:** Die Forschung auf diesem Gebiet muss in enger Abstimmung mit der Entwicklung zukünftiger Kraftstoffe erfolgen. In einem zukünftigen Energiesystem könnten weiterhin Benzin und Dieselmotorkraftstoff, die aus Kohle, Solarenergie oder Biomasse über die unter 3.1. genannten Wege hergestellt werden können, die Hauptrolle spielen. Diese würden dann auch als wesentliche stoffliche Speicher dienen, da deren Energiedichte die der meisten anderen Stoffe übertrifft. Für die stoffliche Speicherung würden sich dann keine besonderen neuen Herausforderungen ergeben. Auch Methanol, Ethanol, Biodiesel und andere mögliche flüssige Kraftstoffe könnten unter Nutzung herkömmlicher Technologie als stoffliche Energiespeicher genutzt werden.

Wasserstoff, der intensiv als Energieträger und Kraftstoff diskutiert wird, stellt allerdings erhebliche Anforderungen in Hinblick auf seine Speicherung. Physikalische Verfahren sind mit einer Reihe von Nachteilen verbunden (geringe Speicherdichten, Energieverluste), die langfristig andere Lösungen sinnvoll erscheinen lassen. Hier könnten chemische Speicherverfahren für Wasserstoff interessante Alternativen bieten, wobei die Ziele solcher Entwicklungen höhere Speicherkapazitäten, geringe Energieverluste, akzeptable Kosten und ein möglichst hoher Sicherheitsstandard wären.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Allerdings sind bisher keine der chemischen Speicherverfahren für einen technischen Einsatz brauchbar. Sorptive Systeme erreichen nicht die notwendige Speicherkapazität, außer bei tiefen Temperaturen und gleichzeitig hohem Druck, Hydridspeicher haben im relevanten Temperaturbereich nahe Raumtemperatur ebenfalls zu geringe Kapazitäten, darüber hinaus ist die Kinetik dieser Systeme zu langsam. Für eine Reihe anderer diskutierter Systeme, insbesondere für solche, die off-board regeneriert werden müssen, scheint die Energiebilanz über die gesamte Prozesskette ungünstig zu sein.

» **Lösungsansätze:** Zur Lösung dieser Probleme werden derzeit zahlreiche Entwicklungslinien verfolgt. Komplexe Leichtmetallhydride sind noch weitgehend unerforscht, zahlreiche denkbare Verbindungen sind bisher nicht beschrieben, für viele bekannte Hydride sind weder Struktur noch Thermodynamik bekannt. In diesem Feld könnten sich Systeme finden lassen, die technisch einsetzbar wären. Dabei ist auch die Kopplung mehrerer Reaktionen interessant, durch die die Thermodynamik des Gesamtsystems in einen günstigen Bereich verschoben werden kann. Als sorptive Speicher scheinen „metal organic frameworks“ (MOFs) Speicherkapazitäten zu bieten, die über die von Kohlenstoff deutlich hinausgehen. Sowohl auf dem Gebiet der MOFs als auch der Hydride ist die Nutzung theoretischer Methoden zur Exploration der in Frage kommenden Parameterfelder vielversprechend. Die Wasserstoffspeicherung in kovalenten Verbindungen wie z.B. Methanol oder Ammoniak erscheint ebenfalls möglich. Allerdings gilt es hier, effiziente Methoden zur Synthese und zur Wasserstofffreisetzung zu finden. Außerdem ist alternativ immer die direkte Nutzung solcher Moleküle als Energieträger/-speicher zu überprüfen.

Schließlich gibt es potenzielle stoffliche Speichersysteme auf der Basis energiereicher Feststoffe. So werden Silicium oder Kohlenstoff als Energiespeicher diskutiert. Aufgrund der erheblich einfacheren Handhabung von fluiden Energieträgern/-speichern erscheint es aber unwahrscheinlich, dass feste Energiespeicher eine wesentliche Rolle spielen werden.

» **Verbesserungspotenzial:** Die Systemscheidung für einen neuen Energieträger/-speicher sollte besonders sorgfältig erwogen werden, da die Konsequenzen enorm sind. Insbesondere erscheint es wichtig, die Herstellung der derzeitigen Energieträger/-speicher aus regenerativen Energiequellen zu prüfen und diesen Ansatz mit dem Übergang auf neue Energieträger/-speicher zu vergleichen, sowohl in Hinblick auf wirtschaftliche Aspekte als auch in Hinblick auf die Gesamtenergiebilanz. Da die Frage des Energieträgers/-speichers einen großen Anteil des Energieverbrauchs betrifft, haben bereits geringfügige Unterschiede in der Gesamteffizienz der Systeme große Effekte auf den gesamten Weltenergiebedarf.

## 4.2. Stromspeicherung

» **Entwicklungslinie:** In einer hoch technisierten Gesellschaft besitzt die elektrische Energie einen besonderen Stellenwert, da sie nahezu universell und an jedem Ort einsetzbar ist und in andere Energieformen wie Licht, Wärme und mechanische Energie umgewandelt werden kann. Schwieriger ist die bidirektionale Speicherung und Rückgewinnung von Strom ohne den Umweg über andere Energieformen. Dazu sind besonders elektrochemische Stromspeicher geeignet, wie die wieder aufladbaren Batterien (Akkumulatoren) und die elektrolytischen Doppelschichtkondensatoren (Supercaps). Im Vergleich zu anderen Stromspeichern, bei denen elektrische Energie als Wärme oder mechanische Energie statisch oder dynamisch gespeichert wird, besitzen elektrochemische Systeme höhere Wirkungsgrade, Energie- und Leistungsdichten. Von Vorteil sind auch die günstigen Betriebsbedingungen, die den mobilen oder stationären Einsatz von Batterien bei Normaldruck und relativ niedrigen Temperaturen erlauben. Von Nachteil ist, dass Batterien nur Gleichstrom liefern und die Spannung der einzelnen Zellen relativ niedrig ist (1–3 V). Auch Sicherheits- und Umweltaspekte haben in einigen Systemen noch nicht ihr Optimum erreicht.

### 4.2.1 Batterien

» **Stand der Technik:** Bisher haben nur relativ wenige Akkumulator-Systeme die technische Marktreife erreicht und sind kommerziell verfügbar. Eine dominierende Stellung nimmt der Blei-Akku ein, dessen technische Entwicklung und Optimierung für unterschiedliche Anwendungen am weitesten fortgeschritten ist. Er besitzt ein breites Anwendungsspektrum, das von der Starterbatterie, über die Notstromversorgung, den Antrieb von Schienenfahrzeugen und Booten bis hin zur Bordelektronik in Flugzeugen und Schiffen reicht. Für mobile Kleingeräte sind die technisch leichter handhabbaren Ni-Cadmium, Ni-Metallhydrid und Li-Ionenbatterien besser geeignet. Sie sind für den Betrieb von elektronischen Hightech Geräten, wie Mobiltelefon, digitale Foto- und Videokamera oder den Laptop unentbehrlich.

» **Entwicklungsziele:** Für den mobilen Einsatz von Batterien werden sich in Zukunft weitere Anwendungsmöglichkeiten eröffnen. Im Consumer-Bereich weitet sich der Akkubetrieb von elektrischen Werkzeugen, wie Schrauber und Bohrer (cordless tools) und Kleingeräten (Rasenmäher) weiter aus. Dazu werden verbesserte Hochleistungsbatterien mit hoher Energiedichte benötigt. Aber auch für den elektrischen Antrieb von Straßenfahrzeugen könnte der elektrochemische Akkumulator neben der Brennstoffzelle in Zukunft wieder an Bedeutung gewinnen. Von besonderer Aktualität ist der Hybrid-Antrieb für Kraftfahrzeuge, z.B. den Prius von Toyota, dessen Antriebskonzept auf der Kombination von Verbrennungsmotor und Batterie beruht. Zurzeit kommen dabei fast ausschließlich Ni-Metallhydridbatterien zum Einsatz. Mittelfristig geht die Entwicklung jedoch in Richtung der Hochleistungs-Lithium-Ionenbatterie, der aus technischen und ökonomischen Gründen bessere Chancen als Standardtechnologie eingeräumt wird. Der Markt von Lithium-Hochenergiebatterien für mobile Geräte wird überwiegend von Herstellern aus dem asiatischen Raum bedient. Eine Reihe deutscher Unternehmen hat sich jedoch bereits in der Lithium-Technologie entlang der Wertschöpfungskette (Materiallieferant-Komponentenhersteller-Zellenhersteller-Batterieassembler-Systemintegrator) engagiert, um gemeinsam mit etablierten Forschungseinrichtungen einen Technologievorsprung und die Marktführerschaft bei Lithium-Großbatterien zu erlangen.

Weiterhin werden Stromspeicher für die lokale Spitzenlastabdeckung der Stromnetze benötigt sowie Systeme, die als Puffer in diskontinuierlich arbeitenden, netzfernen Sonnen- oder Windkraftwerken Verwendung finden. Für diese Anwendungen sind Akkumulatoren mit hoher Speicherkapazität erforderlich, die bisher dafür nicht verfügbar sind. Die Aktivitäten zur Forschung und Entwicklung moderner Akkumulatorsysteme könnte auch in diese Richtung erheblich ausgeweitet werden.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Da die Funktionsweise der elektrochemischen Stromspeicher im Prinzip bekannt ist, können Fortschritte auf dem Gebiet der Akkumulatoren im Wesentlichen nur durch Optimierung der Materialeigenschaften und der Komponenten erreicht werden. Das Ziel muss eine Verbesserung der Energie- und Leistungsdaten sowie der Zyklenstabilität und Lebensdauer sein.

» **Lösungsansätze:** Im Bereich Lithium-Ionenbatterien sind Fortschritte in Richtung höherer Performance durch neue Elektrodenmaterialien und Elektrolyte denkbar. Es müssen Anoden- und Kathoden mit höherer Lade/Entladekapazität entwickelt werden (Lithium-Interkalation). Höhere Energiedichten können auch durch eine höhere Zellspannung erreicht werden, z.B. durch Kathoden aus Mischoxiden vom Typ  $\text{LiMPO}_4$  mit ( $M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn}$ ). Dabei ist der Reaktivität der Elektroden/Elektrolyt-Grenzfläche (SEI = Solid-Electrolyte-Interface) besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Durch Nanostrukturierung könnten neue mesoporöse Kohlenstoffstrukturen als Alternative zum konventionellen Graphit gefunden werden. Höhere Sicherheit und Stabilität der Lithium-Systeme kann durch Substitution der organischen Flüssigelektrolyte durch Polymer-elektrolyte, stabilere Elektrolytsalze und Elektrolytadditive sowie durch neue Überladungsschutzmechanismen erreicht werden.

#### 4.2.2 Supercaps

» **Stand der Technik:** Das Prinzip der elektrischen Energiespeicherung in Superkondensatoren, auch Supercaps oder Ultracaps genannt, ist rein physikalischer Natur und beruht auf der Umladung der elektrolytischen Doppelschicht (Helmholtz-Schicht), die sich an der Phasengrenze eines Elektronenleiters im Kontakt mit einem Elektrolyten ausbildet. Eine chemische Stoffumwandlung findet dabei nicht statt. Die ersten Patente zur Anwendung solcher Doppelschichtkondensatoren (DSK) wurden bereits 1957 angemeldet. Im Vergleich zu konventionellen Kondensatoren besitzen Supercaps eine wesentlich höhere Speicherkapazität, typisch sind Werte von 100 Farad/g bezogen auf Aktivkohle als aktives Elektrodenmaterial mit ca. 1000  $\text{m}^2/\text{g}$  spezifischer Oberfläche. Damit können Energiedichten von 5-10 Wh/kg erreicht werden. Im Vergleich zu den Batterien können Superkondensatoren bei der Entladung diese Energie viel schneller abgeben und kurzfristig hohe elektrische Leistungen von > 20 kW/kg bereitstellen. Die spezifische Energie ist allerdings deutlich geringer als bei Batterien.

» **Entwicklungsziele:** Anwendungen von DSK zusammen mit Batterien oder Brennstoffzellen zielen auf eine Erhöhung der Leistung und Lebensdauer der elektrischen Komponenten hin. Unter Umständen könnten Supercaps auch als Batterieersatz verwendet werden. In den 90-er Jahren fanden sie im Zusammenhang mit der Entwicklung von Hybrid-Fahrzeugen starke Beachtung. Sie erfüllen dabei die Funktion eines Kurzzeitspeichers, der neben der Brennstoffzelle oder Batterie Spitzenleistungen abdeckt und zusätzlich Bremsenergie rückspeichern kann (Rekuperation). Heute investieren Firmen wie Maxwell Technologies, EPCOS, Panasonic, NEC, NESS und andere in diese Technologie.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Um einen wesentlichen Marktanteil zu erreichen, müssen die spezifische Energie- und die Leistungsdaten von Supercaps verbessert werden.

» **Lösungsansätze:** Ein Weg zur Erhöhung der Energie- und Leistungsdichte führt über die Erhöhung der Nennspannung von ca. 2,5 V auf 3 V bei gleicher Zyklenstabilität von etwa 500.000 Lade-/Entladezyklen. Dazu ist wie bei den Batterien die Erforschung neuer Elektrodenmaterialien und Elektrolyte, wie zum Beispiel Ionische Flüssigkeiten, von zentraler Bedeutung. Die Optimierung des Designs mit Volumen- und Gewichtseinsparungen ist eine weitere Option. Maßgeschneiderte Porensysteme und funktionelle Eigenschaften der dreidimensionalen Elektrodenstrukturen könnten mit Hilfe der Nanotechnologie zu Verbesserungen führen. Synergien in der Entwicklung von DSK und Lithium-Ionenbatterien müssen insgesamt stärker genutzt werden.

#### 4.2.3 Stationäre Stromspeicher

» **Entwicklungslinie:** Die verstärkte Bedeutung der regenerativen Stromerzeugung, insbesondere Windenergie und in Zukunft Photovoltaik, führt die vorhandenen Stromnetze an die Grenzen ihrer Belastbarkeit. Die zunehmende Diskrepanz zwischen Stromangebot und -bedarf kann nur durch Erweiterung der Speicherkapazitäten gedeckt werden. Aufgrund der großen räumlichen Entfernung zwischen Windfarmen und Pumpspeicherkraftwerken muss in den Ausbau der Netze investiert werden. Die Kosten hierfür und die begrenzten hydroelektrischen Speicherkapazitäten zwingen dazu, weitere Lösungen zu suchen.

» **Stand der Technik:** Elektrochemische Speicher bieten eine der wichtigsten Optionen. Frühere Ansätze, Strom im MW-Bereich mit Hilfe von Bleibatterien zu speichern, hatten begrenzten Erfolg. Die stationäre Natrium-Schwefel-Batterie mit keramischen Elektrolyten als Separatoren tritt in Japan gerade ihren Siegeszug an. Diese beiden Systeme sind als „klassische“ Batterien modular aufgebaut: Jede Einzelzelle enthält die gesamte redoxaktive Masse. Dies führt zu hohen Systemkosten. Die modulare Begrenzung wird mit Redox-Flow-Batterien gesprengt. Diese trennen die elektrochemische Zelle von der Vorratshaltung der Redoxsysteme, ähnlich wie es bei Brennstoffzellen geschieht. Redox-Flow-Batterien wurden bisher nur bis zum Pilotmaßstab entwickelt. Kanadische, englische und japanische Unternehmen waren bzw. sind hier führend.

» **Defizite und Entwicklungsziel:** Obwohl etliche der genannten Technologien in Deutschland entwickelt wurden, bzw. im Besitz deutscher Firmen waren, sind diese Entwicklungslinien bei uns aufgegeben worden. Ein großer Teil der Know-how-Träger ist aus dem aktiven Dienst ausgeschieden. Den Anschluss wiederzuerlangen, kann nur durch innovative Neuansätze erfolgen. Hierbei sollten die Aktivitäten auf so getrennten Gebieten wie ionische Flüssigkeiten, neue Festelektrolyte, Separatoren, Elektronenleiter und Elektrodenwerkstoffe frühzeitig gebündelt werden.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Redox-Flow-Batterien im Multi-MW-Bereich sind chemische Großanlagen in der Leistungsklasse von Chloralkalielektrolysen. Die Auswahl und Bewertung möglicher Redoxsysteme muss wie für ein sicheres, kostengünstiges chemisches Großverfahren erfolgen.

» **Lösungsansätze:** Der Zwang zu einer kostengünstigen Lösung erfordert einen neuartigen Systemansatz und die frühzeitige Einbindung aller Beteiligten (Energieerzeuger, Netzbetreiber, Politik, Ingenieurwissenschaften, Grundlagenforschung). Die Chemie erfüllt hier in exemplarischer Weise ihre Querschnittsfunktion.

» **Verbesserungspotenzial:** Die Struktur und die Kostenziele des zukünftigen europäischen Energieverbundes definieren das Potenzial für die aufzugreifenden Neuentwicklungen. Der Ausbau der Stromnetze und Alternativen zur Stromspeicherung (Stichwort Wasserstoffwirtschaft) werden mit diesen neuen Batterien konkurrieren aber auch von ihnen profitieren.

## 5. Effiziente Energienutzung

### 5.1. Leuchtstoffe und Leuchtdioden

» **Entwicklungslinie:** Forschung und Entwicklung an lumineszierenden Materialien bzw. Leuchtstoffen sind derzeit maßgeblich durch folgende Aspekte getrieben:

**1) Neue technische Anwendungen, die den Einsatz neuer Materialien erfordern.**

Hierzu zählen Flachbildschirme, dielektrisch behinderte Entladungslampen, elektrolumineszente Bildschirme und Lampen, optische Speichermedien und moderne tomographische Instrumente.

**2) Originäre Entdeckung von Materialien, die neuartige Anwendungen initiieren.**

Hier sind insbesondere die sogenannten Quantum-Dots sowie Zweiphotonenleuchtstoffe zu nennen, auf deren Grundlage transparente lumineszierende Bauteile, optische Bildgebung und Diagnostik in der Medizin, dreidimensionaler Bildaufbau in Displays, neuartige Laseranwendungen und hocheffiziente, energiesparende Bildschirme und Lampen prinzipiell realisierbar sind.

Organischen Leuchtdioden, kurz OLED (Kurzform für engl.: „organic light-emitting diode“), sind dünnfilmige, leuchtende Bauelemente aus organischen, halbleitenden Materialien, deren Aufbau dem einer anorganischen Leuchtdiode (LED) ähnelt. Mit OLEDs lassen sich flächige Lichtquellen realisieren, weshalb diese Technologie vorrangig für neue Beleuchtungsmittel (Leuchtkacheln) und die Bildschirmanwendung (z.B. Mobiltelefone, PC/Laptop-Bildschirme, Fernseher, Anzeigen im Automobilbereich) geeignet ist. Aufgrund der nutzbaren Materialien ist die Verwendung der OLEDs als biegsames Display und als E-Paper denkbar und wahrscheinlich.

» **Stand der Technik:** Die große Zahl bekannter Leuchtstoffe ist für eine Anregung mittels UV-Licht, Röntgen- oder Elektronenstrahl entwickelt und optimiert. Eine Anwendung dieser Materialien, z.B. unter den Bedingungen einer Xe-Gasentladung (z.B. Plasma Display Panel), einer dielektrisch behinderten Entladung oder einer Leuchtdiode, ist jedoch in weiten Teilen nur eingeschränkt möglich.

» **Defizite und Entwicklungsziel:** Für die genannten neuartigen Anwendungen müssen im Hinblick auf vielfältige Randbedingungen (z.B. Energieeffizienz, Lebensdauer, Produktionskosten, Emissionsspektrum, Lichtauskopplung, Materialstabilität, Biokompatibilität) neuartige Leuchtstoffe identifiziert bzw. bekannte Materialien in geeigneter Weise modifiziert und optimiert werden. Für die OLEDs ist insbesondere die unzureichende Stabilität ein großes Problem.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Herausforderungen liegen wesentlich in der Herstellung dünner, stabiler, flexibler, und kostengünstiger Schichten für Anwendungen als Bildschirme und Lichtquellen, in der Energieeffizienz der Systeme bzw. in der Verwendbarkeit/Biokompatibilität von Leuchtstoffen für die medizinische Diagnostik und Therapie. Prägend ist jeweils das interdisziplinäre Zusammenspiel der beteiligten Fachrichtungen sowie von ‚Material‘ und ‚Bauteil/Device‘.

» **Lösungsansätze:** Als Lösungsansätze können hier zum einen nitridische Materialien (z.B.  $\text{LaSi}_3\text{N}_5:\text{Eu}$ ) als Leuchtstoffe in Leuchtdioden bzw. Fluoride (z.B.  $\text{LiGdF}_4:\text{Eu}$ ) als Zweiphotonenleuchtstoff genannt werden. Beide Materialklassen waren als effiziente Leuchtstoffsysteme bis vor wenigen Jahren nahezu unbeachtet. Quantum-Dots (z.B.  $\text{ZnS@CdSe}$ ) bzw. nanoskalige Leuchtstoffe allgemein stellen einen vielversprechenden Lösungsansatz im Hinblick auf dünne, flexible und kostengünstige Bildschirme und Lichtquellen dar. Letztere sind zudem für die medizinische Diagnostik und Therapie von hohem Interesse. Allerdings ist die chemische Synthese nitridischer Leuchtstoffe für LED-Anwendungen bislang aufwändig und nur in kleinen Substanzmengen möglich, weitere Probleme liegen im Emissionsverhalten und der chemisch-physikalischen Stabilität. Bei den nanoskaligen Leuchtstoffen weisen Quantum-Dots eine hohe Energieeffizienz und Lichtausbeute auf, allerdings haben diese immanent eine merkliche Toxizität und vergleichsweise geringe chemisch-physikalische Stabilität.

Bei OLEDs gibt es durch modellgestützte Abstimmung der Einzelkomponenten (Emitter, Matrix, Lochleiter, Lochblocker, Elektronenleiter und Elektronenblocker) vielversprechende Ansätze. Die Entdeckung neuer Materialklassen verbreitert die Materialbasis. Neben den Materialien ist aber auch der Aufbau der OLED-Devices entscheidend für die Performance. Wichtige Einflussgrößen sind z.B. Trägermaterialien, Abfolge und Dicke der Schichten, Einsatz von Dotierstoffen und die Reinheit der eingesetzten Materialien. Zur Verbesserung der Lichtauskoppelung werden Materialien mit angepasstem Brechungsindex untersucht.

» **Verbesserungspotenzial:** Für Beleuchtungszwecke werden derzeit etwa 10 % der elektrischen Energie verwendet. Sie wird teils sehr ineffizient durch Glühlampen in Licht umgewandelt. Leuchtstofflampen haben eine Energieeffizienz von etwa 30 %. Nimmt man eine Verbesserung der Effizienz um den Faktor 2 an, was konservativ erscheint, errechnet sich eine Einsparung von 5 %.

## 5.2. Supraleiter

» **Entwicklungslinie:** Supraleiter erlauben quasiverlustfreien Stromtransport und die Reduktion der Größe von Bauelementen der Energietechnik aufgrund der hohen Stromdichten. Die Entdeckung der Hochtemperatursupraleiter und die Möglichkeit der Herstellung von Schichten von Yttrium-Barium-Kupferoxid (YBCO) auf metallischen Trägern (Coated Conductor, CC) erlaubt es, die Anwendung der Systeme aus Nischenbereichen in viele Felder der Energietechnik auszudehnen.

» **Stand der Technik:** Die globalen Aktivitäten konzentrieren sich auf die Entwicklung der CC, die schon in Längen bis >200m mit zahlreichen Methoden hergestellt werden. Betriebsmittel der Energietechnik, wie ein 600m Hochstromkabel (Albany/NY), 4 MW Motor (Siemens) oder Fehlerstrombegrenzer sind erfolgreich im Praxistest, basieren jedoch noch auf einem relativ teuren silberhaltigen BSCCO (Bismuth-Strontium-Calcium-Kupferoxid)-Leiter der ersten Generation, da die entsprechenden Materiallängen und -qualitäten der YBCO CC noch fehlen.

» **Defizite und Entwicklungsziel:** Die Entwicklung der CC konzentriert sich derzeit auf die Aufskalierung zu gesteigerten Längen von 300–500m und die Verbesserung der Transportströme und Feldabhängigkeiten durch gezieltes Einbringen nanoskalierter Flussverankerungszentren ins supraleitende Material. Defizite der genutzten Vakuumdepositionsverfahren sind die beschränkten Herstellungsgeschwindigkeiten, teure Anlagen und hohe Herstellungskosten, positiv ist deren Reproduzierbarkeit. Weiteres Entwicklungsziel ist aus ökonomischen Gründen, auch mit chemischen Verfahren die hohe Reproduzierbarkeit und Stromtragfähigkeit zu erreichen, die vakuumdeponierte Schichten aufweisen.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Die wichtigste Herausforderung ist die Herstellung aller deponierten Schichten (Supraleiter und Pufferschutzschichten) auf chemischem Wege aus preiswerten Vorstufen, bei gleichzeitig vereinfachter Leiterstruktur, um die Kosten des Leiters in den wirtschaftlich interessanten Bereich zu senken. Besondere Schwierigkeiten werfen dabei die notwendige Würfeltextur der Schichten, eine optimierte Mikrostruktur im Supraleiter und die Vermeidung chemischer Reaktionen im Schichtaufbau auf. Es müssen weiterhin Verfahren verfolgt werden, die die nanoskaligen Flussverankerungszentren gezielt ausgerichtet, homogen und auf einfache Weise erzeugen. Die Herstellungsverfahren müssen modernen Umweltaspekten genügen.

» **Lösungsansätze:** Zur Lösung dieser Probleme werden derzeit zahlreiche Entwicklungslinien auf chemischer Basis verfolgt, wie beispielsweise MOCVD (metal-organic chemical vapor deposition) und MOD (metal-organic deposition) auf texturierten Substratbändern durch Dipcoating. Die Einstellung der Textur der Schichten erfolgt durch das Aufwachsen auf würfeltexturierten Substratbändern. Nanoskalige Einschlüsse werden additiv durch Fremdpartikel oder als initiierte Defekte bei der Phasenbildung erzeugt. Wichtige Aspekte sind die Erzielung von hohen Depositionsraten durch neue, angepasste Ausgangschemikalien und eine homogene, hochtexturierte Mikrostruktur der Schichten.

» **Verbesserungspotenzial:** Den chemischen Depositionsverfahren wird bereits mittelfristig der ökonomische Durchbruch zugetraut. Die Stromtrageigenschaften und Magnetfeldverträglichkeiten der besten bekannten Kurzproben lassen eine gewaltige Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Baugröße elektrotechnischer Komponenten erwarten. Die Stromtragfähigkeit der CC beginnt, jene der Hochtemperatursupraleiter der ersten Generation um einen Faktor >3–4 zu übertreffen, und sie werden daher diese Materialien zukünftig ablösen.

### 5.3. Leichtbauwerkstoffe

» **Entwicklungslinie:** Schnelllaufende bzw. -beschleunigte Maschinen und Komponenten der Verfahrenstechnik und der Biotechnologie sollen leichter, sicherer, sparsamer und zugleich ökologisch verträglich sein – und dies bei hoher Wettbewerbsfähigkeit und möglichst großer Wertschöpfung. Hiermit sind die Zielkonflikte aber auch der Trend zur leichtbaugerechten Mischbauweise mit ihrer Werkstoffvielfalt und den damit einhergehenden Vor- und Nachteilen bereits vorgezeichnet.

Der Sinn des Einsatzes von modernen Leichtbauwerkstoffen in der Fahrzeugindustrie liegt in der Reduzierung des Treibstoffverbrauches durch die Verminderung der zu bewegenden Massen. Verglichen mit den anderen Alternativen wie der Verminderung des Roll- und Luftwiderstandes sowie der Verbesserung des Wirkungsgrades beim Antriebsstrang ist der Leichtbau der hier aussichtsreichste Weg.

» **Stand der Technik:** Bei modernen Leichtbaustrukturen wird derzeit eine Vielzahl unterschiedlicher metallischer, polymerer bzw. keramischer Werkstoffe verwendet, die dem Anforderungsprofil hinsichtlich der mechanischen, thermischen und medialen Belastungen entsprechen müssen. Hierbei ist aufgrund ihres breit einstellbaren Eigenschaftsspektrums ein zunehmender Einsatz von Kunststoffen in aktuelle Produkte zu beobachten. Zur Erhöhung der thermomechanischen Kennwerte werden sie mit Faser- und Partikelmaterialien verstärkt. Eine andere Möglichkeit zur Verbesserung der Bauteileigenschaften ist die Verwendung von Polymerblends und Copolymeren.

Weiterhin hat neben den klassischen Leichtbaumaterialien Titan, Aluminium und Magnesium auch der Leichtbau mit modernen Stahlwerkstoffen stark an Bedeutung gewonnen. In der Automobilindustrie dominieren beim Karosseriebau die neuen Stahlwerkstoffe, bei denen eine Kombination aus hoher Festigkeit bei gleichzeitiger guter Verarbeitbarkeit im Vordergrund der Entwicklungen steht.

» **Defizite und Entwicklungsziel:** Bei der Entwicklung von Leichtbaukomponenten im Maschinen- und Anlagenbau sowie der Verfahrenstechnik und der Biotechnologie kommt der Erfassung der komplexen Belastungszustände sowie der werkstoff- und strukturgerechten Umsetzung in ein entsprechendes Konstruktionskonzept – unter Einbeziehung allfälliger Fertigungsrestriktionen – ein hoher Stellenwert zu. Derzeit ist hier eine weitgehende konstruktive und werkstoffliche Trennung der Tragfunktion etwa vom Korrosions- und Verschleißschutz zu beobachten. Dies ist darin begründet, dass die zur Verfügung stehende Werkstoffpalette nur eingeschränkt die thermomechanischen, medialen und tribologischen Anforderungen erfüllen kann. So werden etwa auf die Tragstrukturen zusätzliche Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten aufgetragen.

Ziel werkstofftechnischer und konstruktiver Entwicklungen sind daher neuartige Leichtbaustrukturen mit hoher Funktionsintegration, bei denen etwa durch den Einsatz neuer Leichtbauwerkstoffe sowohl die thermomechanischen als auch die funktionellen Anforderungen erfüllt werden.

» **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Insbesondere die spezifischen Temperatureinsatzgrenzen von Kunststoffen und Faserverbundwerkstoffen mit polymerer Matrix beschränken deren großtechnischen Einsatz. Moderne Hochleistungspolymere erweitern zwar diese Grenzen, sind aber aufgrund der aufwändigeren Herstellung und Verarbeitung für industrielle Anwendungen oft noch zu kostenintensiv.

» **Lösungsansätze:** Zur Lösung dieses Zielkonfliktes – kosteneffiziente Verbesserung der Eigenschaften – ist eine nachhaltige enge Zusammenarbeit von Werkstoffentwicklern, Konstrukteuren und Technologen entlang der gesamten Wertschöpfungskette erforderlich. Neben der Entwicklung neuartiger Kunststoffe und polymerbasierter Faserverbundwerkstoffe mit einsatzorientierten Eigenschaften ist die Weiterentwicklung von near-net-shape-Verfahren für eine kostengünstige Bauteilherstellung zielführend.

Durch die Verwendung spezieller Copolymerisate können neue Leichtbaumaterialien für unterschiedlichste industrielle Anwendungen bereitgestellt werden. Hierdurch können sowohl die geforderten thermomechanischen Kennwerte aber auch funktionelle Eigenschaften wie etwa akustische, tribologische oder elektrische eingestellt werden.

Besonderes Leichtbaupotenzial bieten neuartige beanspruchungsgerechte Textilverstärkungen in Kunststoffen. Die variierbaren, richtungsabhängigen Struktureigenschaften von Komponenten aus Textilverbunden entste-

hen in einem simultanen Prozess von Werkstoffkonstruktion und Bauteilgestaltung, was – im Unterschied zu konventionellen Werkstoffen – eine besonders enge Verzahnung aller Prozessstufen erzwingt. Dazu müssen grundlegende Erkenntnisse für alle Stufen der Wertschöpfungskette, beginnend vom Filament über Hybridgarn, Halbzeug und textile Preform bis hin zu konsolidierten Komponenten und Bauteilen in funktionsintegrierender Mischbauweise mit reproduzierbarer Qualität und kurzen Taktzeiten erarbeitet werden.

Die derzeitigen Forschungsschwerpunkte liegen bei den metallischen Werkstoffen in folgenden Bereichen: Bei den Stahlwerkstoffen werden neue Produktionsmethoden für die Herstellung von hoch legierten Stählen erforscht und neue Verfahren und Beschichtungen für das Warmumformen untersucht. Beim Titan konzentrieren sich die derzeitigen Bemühungen auf die Verbesserung bzw. Substitution des Herstellungsverfahrens, da so dem sehr hohen Materialpreis entgegengewirkt werden soll. Für Aluminium gibt es derzeit viele verschiedene Forschungsprojekte. Es wäre aber besonders lohnenswert, wenn die Etablierung schweißgeeigneter Legierungen in der Luftfahrtindustrie gelänge. Beim Magnesium steht neben der Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit und Warmfestigkeit derzeit vor allem die Entwicklung von gut verformbaren, kostengünstigen Blechwerkstoffen für den automobilen Karosseriebau im Vordergrund.

**Verbesserungspotenzial:** Die Weiterentwicklung von Leichtbauwerkstoffen birgt erhebliches Potenzial zur Energieeinsparung. So könnte im Automobilbau die Reduzierung von 5 % des Karosseriegewichtes in etwa 3 % Einsparung des Kraftstoffverbrauches bewirken.

#### 5.4. Nanoporöse Schaumstoffe

**Entwicklungslinie:** Steigende Energiekosten stellen eine große Herausforderung für unsere Industriegesellschaft dar, in der etwa ein Drittel der verbrauchten Energie auf die Beheizung von Wohn- und Arbeitsräumen entfällt. Um die eingesetzte Energie bei gleichzeitigem Erhalt des Wohnkomforts effizienter zu nutzen, ist es notwendig, neue Materialien bzw. neue Systeme mit deutlich höherer Wärmedämmung zu entwickeln. Auch im Sinne der Nachhaltigkeit sind solche Materialien als Beitrag zur verminderten CO<sub>2</sub>-Emission dringend erforderlich.

**Stand der Technik:** Bei der Gebäudeisolierung werden derzeit vorwiegend Mineralwolle, geschäumtes Polystyrol (EPS, XPS), Polyurethan (PU) und entsprechende Verbundsysteme eingesetzt. Sowohl im Neubau als auch in der AltbauSanierung werden Verbundsysteme, die Vakuumisulationspaneele oder Latentwärmespeicher enthalten, bereits in geringer Stückzahl zur Verbesserung der Energieeffizienz eingesetzt.

**Defizite und Entwicklungsziel:** Obwohl es heute schon Vakuumisulationspaneele (VIP) gibt, die sehr gute Wärmedämmeigenschaften aufweisen, konnte sich diese Technologie im Baubereich bisher nicht durchsetzen. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass die bestehende VIP Technologie in vielerlei Hinsicht nicht ausreichend robust und zu kostenintensiv ist. Daraus leitet sich als Entwicklungsziel ab, ein Material bzw. ein System zu entwickeln, das hinsichtlich der Wärmedämmung in etwa auf dem Niveau der VIP liegt und zum anderen sowohl hinsichtlich der mechanischen Festigkeit als auch der Langlebigkeit mindestens so gut ist wie die derzeitigen konventionellen Wärmedämmmaterialien wie Mineralwolle oder PU. Die Mehrkosten für ein solches System müssen sich nach wenigen Jahren durch den geringeren Energieverbrauch wieder ausgleichen.

**Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen:** Obwohl bekannt ist, dass ein Schaumstoff mit einer Zell- bzw. Porengröße in der Größenordnung der mittleren freien Weglänge der Zellgasmoleküle extrem effizient in der Wärmedämmung ist, gibt es derzeit keine Materialklasse, die das geforderte Eigenschaftsprofil aufweist. Die Herstellung von nanoporösen Schäumen durch konventionelles Aufschäumen ist trotz großer Anstrengungen bisher nicht gelungen und physikalisch nahezu unmöglich. Die Herstellung von nanoporösen Polymer-schäumen durch einen nasschemischen Prozess (z.B. aus einem Gel) ist technisch möglich, wenn auch sehr anspruchsvoll hinsichtlich Strukturgebung und Trocknungsverhalten (vgl. frühere Versuche zur Herstellung von Silica-Aerogelen).

**Lösungsansätze:** Insbesondere die Polymerisation von organischen Monomeren in einem strukturgerichteten (templatierten) Prozess kann eingesetzt werden, um Materialien geringer Dichte und kleiner Poren herzustellen. Um kostenintensive Schritte wie z.B. das überkritische Entfernen des Reaktionsmediums zu vermeiden, müssen entsprechende chemische Modifikationen am Gerüst des Schaumstoffes durchgeführt werden.

**Verbesserungspotenzial:** Zum Erreichen einer sehr hohen Wärmedämmung ist neben der Nanoporosität in erster Linie eine geringe Dichte des Schaums notwendig. Eine mit den konventionellen Schäumen vergleichbare Dichte ist bis dato nie gelungen und stellt wohl die größte technologische Herausforderung dar. Eine geringe Dichte des Schaums ist nicht nur für die Performance des Materials, sondern auch für die Wirtschaftlichkeit von entscheidender Bedeutung, da nur ein Schaum mit entsprechend geringer Dichte zu vertretbaren Kosten herstellbar ist. Ebenso sind Fragen der Verarbeitbarkeit, des Handlings, der Langlebigkeit, etc. von großer Bedeutung, die stark von der Wahl des Polymersystems abhängen.

## 6. Energieeffizienz von chemischen Produktionsprozessen

Technische Prozesse in der chemischen Industrie sind häufig mit hohem Energieeintrag verbunden. Der Anteil der Energiekosten an den Betriebskosten beträgt in der chemischen Industrie im Mittel 10 %. Er reicht von 2 % in der Pharmaindustrie bis zu 40 % in der Grundstoffchemie. Die Grundstoffchemie gehört damit neben der Metallherzeugung und der Verarbeitung von Steinen und Erden zu den größten Energieverbrauchern. Eine energieeffiziente Herstellung von Produkten stellt daher eine große Herausforderung für die chemische Industrie dar.

Das Potenzial der Energieeinsparung erstreckt sich von der energetischen Optimierung ganzer Standorte und Anlagen (Transport, Verpackung, Beleuchtung, Heizung etc.) bis hin zur Verbesserung einzelner Apparate, Prozesse und Reaktionen. Bezüglich der Energieeffizienz von Anlagen nimmt die deutsche Chemie im internationalen Wettbewerb bereits eine der führenden Positionen ein. Der deutsche Chemieanlagenbau bietet Anlagen mit höchstem Standard in den Bereichen Umwelt, Sicherheit und Gesundheit. Um diese Führungsposition zu halten bzw. auszubauen, muss besonders die Entwicklung innovativer Produktlinien und entsprechender Produktionsverfahren und -technologien vorangetrieben werden.

### Drei Punkte sind von grundlegender Bedeutung:

- Für jedes Produkt existiert ein spezifischer Mindestenergieverbrauch bzw. -gewinn, gegeben durch die Energiedifferenz Edukt/Produkt, der auch bei perfekten Verfahren nicht unter- bzw. überschritten werden kann.
- Bei den meisten chemischen Reaktionen muss eine Aktivierungsenergie überwunden werden, damit sie ablaufen.
- Die Aufarbeitung der Produkte ist häufig durch aufwändige Trennprozesse sehr energieintensiv.

Folgende Technologien können wesentliche Beiträge für eine weitere Effizienzsteigerung chemischer Prozesse leisten:

### KATALYSE

Die Katalyse, die bei der Herstellung von mehr als 80 % aller in der chemischen Industrie erzeugten Produkte eine Rolle spielt, gilt als Schlüsseltechnologie in der chemischen Technik. Durch katalytische Reaktionen kann die Aktivierungsenergie gesenkt werden und damit zum einen die Selektivität der Reaktion erhöht und zum anderen ggf. die Durchführung der Reaktion bei niedrigeren Temperaturen ermöglicht werden. Die Weiterentwicklung von Katalysatoren ist deshalb von entscheidender Bedeutung für die Energieeffizienz von chemischen Prozessen.

### MIKROREAKTIONSTECHNIK

In der Mikroreaktionstechnik wird durch Verkleinerung der Abmessungen von chemischen Reaktoren in den Millimeter- oder sogar Mikrometerbereich eine Intensivierung des Wärme- und Stoffaustausches erreicht. Dies führt u.a. zu einer größeren Selektivität und höheren Ausbeute bei chemischen Reaktionen und damit auch zu einer höheren Energieeffizienz von Prozessen.

### NEUE REAKTIONSMEDIEN, WIE Z.B. IONISCHE FLÜSSIGKEITEN

Ionische Flüssigkeiten sind hochpolare Salze, die meist bei Raumtemperatur flüssig sind. Sie können in Reaktionen sowohl als Lösemittel als auch als Reaktand eingesetzt werden, wobei sie oft neue meist selektivere Reaktionswege in Prozessen eröffnen. Intelligente Lösungsmittelsysteme können nach Reaktionsabschluss zwei Phasen bilden, wodurch sich die Produktabtrennung wesentlich effizienter realisieren lässt.

### NICHTKLASSISCHE FORMEN DES ENERGIEEINTRAGES

Eine Methode zur Erreichung höchster Energieeffizienz in Prozessen stellt der selektive und gezielte Eintrag von Energie, auch unter Anwendung unkonventioneller Energieformen (z.B. Elektronen, Mikrowellen, Plasma, Licht, Ultraschall) dar. Dies ermöglicht u.a. Zugang zu neuen Produkten mit neuen Funktionalitäten, die durch konventionelle Prozesse schwierig zu erhalten sind. Diese Technologie ist allerdings nur rentabel, wenn die Beschleunigung der Reaktion oder die Ausbeuteerhöhung besonders hoch in Relation zu diesen auch unter energetischen Gesichtspunkten teuren Energieformen sind.

### AUFARBEITUNG VON PRODUKTEN

Ein lohnendes Ziel ist es, Technologien weiterzuentwickeln, die eine Ausbeutesteigerung im Prozess ermöglichen, damit das Zielprodukt schon vor der Aufarbeitung möglichst konzentriert vorliegt. Dieses wird u.a. durch katalytische Verfahren, den Einsatz der Mikroreaktionstechnik und Reaktionen in ionischen Flüssigkeiten gewährleistet.

Weiterhin ist die Entwicklung innovativer Trennprozesse von hoher Bedeutung für die Senkung der Energiekosten. Hierzu zählen beispielsweise chromatographische Verfahren, die mittlerweile in großem Maßstab eingesetzt werden können. Ein Beispiel aus der Praxis ist der Einsatz ionischer Flüssigkeiten als Hilfsstoffe in der Extraktivdestillation, wodurch Energieeinsparungen bis zu 60 % gegenüber herkömmlichen Prozessen erzielt werden können.

### PROZESSINTEGRATION

Unter Prozessintegration versteht man die Verringerung der Anzahl von Prozessschritten durch Kombination von mehreren Verfahrensschritten in einem Prozess. Dieses Konzept kann entweder die Verknüpfung von Wärme- und Stofftransport oder von Reaktion und Separation in einem Apparat beinhalten und führt zu einer signifikanten Senkung der Betriebskosten und des Energieeintrages für den Gesamtprozess.

Alle aufgeführten Technologien stellen innovative Konzepte der Prozessintensivierung dar, d.h. sie leisten Beiträge zur ökonomischen und ökologischen Steigerung der Effizienz chemischer Prozesse und der Generierung neuer Produkte und Produktqualitäten. Zur Steigerung der Energieeffizienz von Produktionsprozessen ist eine ganzheitliche Prozessbetrachtung von der chemischen Reaktion bis zur Formulierung des Produktes und die Weiterentwicklung von innovativen Technologien notwendig.

## 7. Literaturverzeichnis

---

- [1] G. A. Olah, A. Goepfert und G. K. Surya Prakash: „Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy“, 290 S., Wiley-VCH, Weinheim (2006)
- [2] F. Rivetti, in: Proceedings of the DGMK-Conference „Chances for Innovative Processes at the Interface between Refining and Petrochemistry“, G. Emig, E. Gallei, B. Lücke und J. Weitkamp, Hrsg., S. 53/60, DGMK, Hamburg (2002)
- [3] D. Linden, T.B. Reddy (editors), Handbook of Batteries, 3rd ed., Mc-Graw-Hill, ISBN 0071359788 (2002)
- [4] Pawlik, Klaschinsky, Dippel, BWK Bd. 58, Nr. 1/2, S. 10, (2006)
- [5] Krewitt, Pehnt, Fishedick, Temming, „Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung“, Erich Schmidt Verlag, Berlin (2004)
- [6] [www.bmvbs.de](http://www.bmvbs.de), “Perspektiven für Deutschland – unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung – Fortschrittsbericht 2004”, Kapitel E, Abschnitt III
- [7] Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung, Herausgegeben vom BMU, (Mai 2006)
- [8] [www.bp.com/statisticalreview](http://www.bp.com/statisticalreview), BP Statistical Review of World Energy (June 2006)
- [9] Ausbau erneuerbarer Energien im Stromsektor bis zum Jahr 2020. Studie im Auftrag des BMU, Stuttgart, Wuppertal (2005)
- [10] Sichere Energie im 21. Jahrhundert, J. Petermann (Hrsgb.), Hoffmann und Campe (2006)
- [11] Interkontinentale Stromverbünde – Perspektiven für eine regenerative Energieversorgung, G. Czsisch, FVS Themen, S. 51-63 (2001)
- [12] Kraftstoff, Wärme oder Strom oder Wärme aus Stroh und Waldrestholz - ein system-analytischer Vergleich, L. Leible et al., Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 15, S. 61-72 (April 2006)
- [13] Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, Weinheim

## 8. Liste der Autoren

---

- Prof. Dr. Barbara Albert, TU Darmstadt
- Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bach, Universität Hannover
- Dr. Dana Demtröder, DECHEMA e.V., Frankfurt am Main
- Dr. Jürgen Engelhard, RWE Power AG, Köln
- Prof. Dr.-Ing. Stefan Ernst, Technische Universität Kaiserslautern
- Prof. Dr. Claus Feldmann, Universität Karlsruhe
- Dr. Andreas Förster, DBG – Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie e.V., Frankfurt
- Prof. Dr. Angelika Heinzel, Universität Duisburg-Essen, Duisburg
- Dr. Renate Hoer, GDCh – Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V., Frankfurt am Main
- Prof. Dr.-Ing. Werner Hufenbach, Technische Universität Dresden, Dresden
- Prof. Dr. Dieter Jahn, BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen
- Prof. Dr. Klaus-Michael Jüttner, DECHEMA e.V., Frankfurt am Main
- Prof. Dr. Holger Kleinke, University of Waterloo, Waterloo/CDN
- Prof. Dr. Wolfram Koch, GDCh – Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V., Frankfurt am Main
- Dr.-Ing. Mathias Noe, Forschungszentrum Karlsruhe
- Dr.-Ing. Ludolf Plass, Lurgi AG, Frankfurt am Main
- Dr. Hermann Pütter, Neustadt
- Prof. Dr.-Ing. Norbert Rübiger, Universität Bremen, Bremen
- Dr. Martin Reuter, VCI Verband der Chemischen Industrie e. V., Frankfurt am Main
- Dr.-Ing. J. Schmalfeld, DGMK – Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V., Hamburg
- Prof. Dr. Ferdi Schüth, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim
- Dr. Peter J. Seifried, Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg
- Dr. Gisa Teßmer, DGMK – Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V., Hamburg
- Dr. Kurt Wagemann, DECHEMA e.V., Frankfurt am Main
- Prof. Dr.-Ing. Jens Weitkamp, Universität Stuttgart, Stuttgart
- Prof. Dr.-Ing. Joachim Werther, TU Hamburg-Harburg, Hamburg

## **Zum Inhalt:**

Unsere zukünftige Energieversorgung und die Anpassung unseres Energiesystems an die kommenden Herausforderungen werden ohne Durchbrüche aus der Chemie nicht möglich sein. Für die dringend benötigte Steigerung der Effizienz bei der Nutzung der Energie ist die Chemie die Schlüsseldisziplin. In diesem aktuellen Positionspapier „Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie“ (Stand März 2007) zeigen die deutschen Chemieorganisationen die Schlüsselposition der Chemie bei der Versorgung unserer Gesellschaft mit Energie auf. Hierin werden wesentliche Entwicklungspotenziale sowie der Forschungsbedarf in der Energieforschung für die nächsten Jahrzehnte beschrieben und beurteilt.