



Chemie

für eine nachhaltige
globale Gesellschaft

White Paper mit Beiträgen und Ergebnissen des zweiten
Chemical Sciences und Society Symposiums (CS3):
Sustainable Materials Summit

London · Großbritannien · 7. – 10. September 2010

Dieses White Paper wurde von der Wissenschaftsautorin Carol Stanier (PhD) in Absprache mit der Royal Society of Chemistry erstellt und durch das Wissenschaftliche Komitee des CS3 überprüft. Der Originaltext wurde in englischer Sprache erstellt.

Über dieses Weißbuch

Diese Empfehlungen und der begleitende Report fassen die Ergebnisse des zweiten „Chemical Sciences and Society Symposium“ (CS3) zusammen, welches sich diesmal mit dem Thema „Nachhaltige Materialien“ beschäftigte. Es ist das Selbstverständnis der CS3-Veranstaltungsserie, die führenden Chemiker aus einem Fachgebiet zusammenzubringen; dabei ist der Anspruch, Lösungen für die brennendsten Probleme der Gesellschaft aus der Chemie heraus zu entwickeln, z.B. in den Bereichen Ernährung, Gesundheit, Energie oder Umweltschutz.

30 der weltweit führenden Materialchemiker aus den fünf teilnehmenden Staaten (USA, China, Japan, Großbritannien, Deutschland) trafen im September 2010 in London zusammen, um drei Tage lang den erforderlichen Forschungsbedarf für nachhaltige Materialien zu identifizieren und entsprechende Empfehlungen an die Politik zu formulieren. In der Zusammenarbeit zwischen der Chinese Chemical Society (CCS), der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), der Chemical Society of Japan (CSJ), der Royal Society of Chemistry (UK), der American Chemical Society (ACS) und der entsprechenden Förderinstitutionen, der National Science Foundation of China (NSFC), der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Japan Society for the Promotion of Science (Japan), des Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC, UK) und der National Science Foundation (NSF, US), repräsentiert das Ergebnis des Symposiums eine internationale Sicht der Frage, inwiefern die Materialchemie zur Bewältigung nationaler und globaler Herausforderungen beitragen kann.

1 Neue Materialien zur Energieumwandlung und -speicherung	11
Energieerzeugung	11
Nutzung der Solarenergie	11
Brennstoffzellen und biologische	12
Energiewandlungssysteme	
Energiespeicherung	13
Batterien und thermische	13
Energiespeicher	
Chemische Energiespeicherung	14
Groß- und kleinskalige Energiesysteme	15
2 CO₂-Aktivierung, -Speicherung und -Nutzung	16
Die Herausforderung	16
CO ₂ -Bindung und -Abtrennung	17
CO ₂ als Energie-Vektor	17
Erzeugung von Methanol	18
Erzeugung von Methan	18
Erzeugung von Synthesegas	18
CO ₂ als ein Grundstoff für Kunststoffe und komplexe chemische Moleküle	19
CO ₂ als Lösemittel und Prozesshilfsstoff	19
3 Ersatzstoffe für fossile Treibstoffe und chemische Rohstoffe	20
Die Herausforderung	20
Verarbeitung niederwertiger fossiler Kohlenwasserstoffe	20
Syngas	21
Methan	21
Bio-Rohstoffe	22
Bio-basierte Polymere mit verbesserter Leistungsfähigkeit	22
CO ₂ als Rohstoff	23
4 Bewahrung seltener natürlicher Rohstoffe	24
Die Herausforderung	24
Phosphor	25
Lithium	25
Platin	26
Indium	26
Seltene Erden	26
Versorgung und Regulierung	27
5 Nachhaltige Materialien und Prozesse	28
Die Herausforderung	28
Neue Katalysatoren	29
Prozessentwicklung	30
Detektion, Kontrolle und Minderung von Verunreinigungen	30
Luftverschmutzung	30
Wasserverschmutzung	31
Produktion von Kunststoffen	31
Literatur	33
Appendix: Teilnehmerliste	35

Vorwort

Schon immer ist die Menschheit angewiesen auf die Segnungen der Sonne und die reichen geologischen und biologischen Ressourcen der Erde. Diese Ressourcen waren jedoch von Anfang an ungleichmäßig verteilt und je nach Epoche von unterschiedlicher Bedeutung. Aus diesem Grund gerieten Völker und Staaten in ihrem Bestreben, Ressourcen der Erde als ihr Eigentum zu beanspruchen, immer wieder in Konflikt miteinander.

Im Lauf der Jahrhunderte haben uns Wissenschaft und Technik – Erzeugnisse des menschlichen Einfallsreichtums und unseres Bemühens, die Natur zu verstehen – in die Lage versetzt, die natürlichen Reichtümer zum Aufbau hochentwickelter Zivilisationen zu nutzen. Überlegene, auf Wissenschaft beruhende Techniken haben die zerbrechliche Menschheit vor den Gefahren der Natur bewahrt, Schutz und Sicherheit gewährt und ein bequemes und angenehmes Leben möglich gemacht. Im 20. Jahrhundert verlängerten wissenschaftlich fundierte Techniken die durchschnittliche Lebenserwartung in den Industrieländern von 45 auf 80 Jahre und lieferten verschiedene Hilfsmittel, welche die der Menschheit innewohnenden geistigen und körperlichen Fähigkeiten beträchtlich erweitert haben.

Andererseits haben wir, was die effiziente Nutzung unserer begrenzten Ressourcen angeht, nur begrenzte Erfolge erzielt. Das Streben der Menschheit nach einer immer höher entwickelten Zivilisation hat ironischerweise zu einer alarmierenden Erschöpfung zentraler Ressourcen geführt, und die weltweiten Konflikte um den Zugang zu diesen Ressourcen scheinen kein Ende zu nehmen.

Das Ideal für das 21. Jahrhundert ist eine zivilisierte globale Gesellschaft, die kulturelle Vielfalt respektiert. Wenn verschiedene ethnische Gruppen die natürlichen Reichtümer ihrer Heimat nutzen dürfen, sollte es ihnen möglich sein, die einzigartige, von ihren Vorfahren ererbte Kultur zu bewahren und eine differenzierte, zivilisierte Gesellschaft aufzubauen, ohne die Rechte anderer zu beschneiden. Die Welt braucht Wissenschaft und Technik, die unverrückbar auf dieser Voraussetzung gründen.

Seit der industriellen Revolution hat der unstillbare Energiehunger der Menschheit uns dazu gebracht, große Mengen schädlichen Kohlendioxids in die Atmosphäre freizusetzen. Das wirkt sich negativ auf die gesamte Welt aus. Wir müssen einen Paradigmenwechsel

vollziehen: weg von einem Modell, das auf dem Verbrauch fossiler Energieträger gründet, hin zu einem Modell, das darauf beruht, Ressourcen in einer Weise zu erneuern, die der natürlichen Photosynthese ähnelt, aber effizienter ist. Es wäre doch wunderbar, wenn wir Sonnenlicht ganz leicht in elektrische Energie umwandeln und nützliche Werkstoffe aus im Überfluss vorhandenen Elementen herstellen könnten. Wir brauchen innovative Wissenschaft und Technik, welche die kontinuierliche Versorgung mit Ressourcen sowie deren Erneuerung sicherstellt, um eine wirklich nachhaltig arbeitende Gesellschaft zu erreichen.

Bei diesen Bemühungen ist die internationale Zusammenarbeit ganz sicher ein wesentliches Merkmal. Politische und wirtschaftliche Interessen machen jedoch die Ressourcen- und Umweltprobleme noch komplizierter. Es ist daher ermutigend zu wissen, dass Chemiker – Werkstoffwissenschaftler aus China, Deutschland, Japan, Großbritannien und den Vereinigten Staaten – in London zusammengekommen sind, um sich gemeinsam dem Thema „Nachhaltige Werkstoffe“ zu widmen und Empfehlungen für die Politik auszuarbeiten.

Die Chemie ist die Wissenschaft von den Stoffen und Substanzen sowie deren möglichen Umwandlungen. So ist sie eine zentrale Wissenschaft, die viele Fachgebiete umfasst. Die Chemie liefert das Wissen, das wir brauchen, um Nachhaltigkeit zu erreichen, um also die Probleme zu lösen, die das Fortbestehen der Menschheit bedrohen. Der Chemiker hat den Auftrag, die Gesellschaft zu beraten und ihr zu zeigen, welche Lösungen sie mit der Chemie erreichen kann. Es ist zu hoffen, dass die Empfehlungen des „CS3 2010: Sustainable Materials Summit“ weite Verbreitung bei Regierungen und Gesellschaften in der ganzen Welt finden und wir gemeinsam auf das Ziel der idealen und nachhaltigen internationalen Gemeinschaft hinarbeiten.

Ryoji Noyori

Präsident, Riken, Professor an der Universität Nagoya, Japan

Nobelpreis für Chemie 2001

Zusammenfassung

Die Materialchemie kann bei der Schaffung einer Welt helfen, in der Energie nicht mehr beschränkt werden muss, in der wir CO₂-Emissionen mindern, unsere Abhängigkeit von fossilen Treibstoffen reduzieren und ganz allgemein die Umwelt viel weniger belasten. Wir könnten die weitere Erschöpfung seltener Rohstoffe vermeiden und neue Produkte schaffen, die eine neue CO₂-arme und ressourceneffiziente Industrie als Treiber wirtschaftlichen Wachstums zum Blühen bringen.

Die Weltbevölkerung wird weiter steigen, und für das Jahr 2030 werden mehr als 8 Milliarden Menschen erwartet, von denen die Mehrzahl in Städten leben wird. Gerade große Städte benötigen jedoch große Mengen an Energie und Ressourcen und belasten die Umwelt in einem Maße, welches nicht beibehalten werden kann.¹

Gleichzeitig steigt der Lebensstandard in vielen Teilen der Welt.² Würde jeder Erdenbürger wie ein Nordamerikaner leben wollen, wäre wohl das Zwei- bis Dreifache der natürlichen Ressourcen der Erde nicht ausreichend, um eine entsprechende Lebensweise zu ermöglichen.³

Das Zusammenwirken von Bevölkerungswachstum und einem verbesserten Lebensstandard belastet verstärkt den Planeten und die verbleibenden zugänglichen Ressourcen. Unser Bedarf an Rohöl überschreitet schon jetzt die Geschwindigkeit, mit der es aus der Erde gefördert werden kann. Der weltweite Energiehunger bedingt zudem zunehmende Mengen an Kohlendioxid (CO₂), einem Atmosphärgas, welches zur globalen Erwärmung und dem Klimawandel beiträgt und welches im Augenblick nicht adäquat abgetrennt oder gelagert werden kann. Andere natürliche Ressourcen nehmen mit einer alarmierenden Geschwindigkeit ab, und jetzige

Studien zeigen, dass wir schon in der nahen Zukunft alternative Quellen für einige Elemente und Mineralien identifizieren müssen.

Wir schädigen unseren Planeten in einer irreparablen und manchmal nicht einmal quantifizierbaren Weise. Es ist klar, dass unser jetziger Umgang mit Rohstoffen nicht nachhaltig ist. Die Chemie, manchmal zu Recht, manchmal zu Unrecht mit dem Etikett versehen, Umweltprobleme zu verursachen, hat z.B. durch Kunststoffe und Medikamente schon heute zu vielen Entwicklungen und Problemlösungen beigetragen, ohne die wir nicht mehr leben könnten.

Das diesjährige *Chemical Sciences and Society Symposium (CS3) 2010: Chemistry for a Sustainable Global Society* führte 30 der weltführenden Forscher der Materialchemie zusammen und stellte sie vor die Aufgabe, die dringendsten Fragen im Bereich einer "Nachhaltigen Chemie" zu identifizieren und auch mögliche Lösungen vorzuschlagen.

Die Teilnehmer des Workshops haben fünf Schlüsselfelder identifiziert, in denen Materialchemiker – in Kooperation mit anderen Wissenschaftlern, der Industrie und der Politik – spannende Forschungsfelder entwickeln können, aus denen Lösungen für diese Herausforderungen zum Vorteil der globalen

Gesellschaft hervorgehen können. Die Materialchemie kann dabei schon jetzt für viele der benötigten Lösungen Ansätze liefern, wie die dringendsten Umwelt- und Energieprobleme in der heutigen Gesellschaft gelöst werden können.

- Die wachsende Bevölkerung und der wachsende Wohlstand verlangen zunehmend mehr Energie. Dieser Energiebedarf wird schon sehr bald die Menge an nutzbarer Energie übersteigen, die mit jetzigen Methoden erzeugt werden kann. Materialchemiker werden helfen, neue nachhaltige Technologien der Energieerzeugung und -speicherung zu entwickeln, mit denen zukünftige, neue Energiekreisläufe bei gleichzeitiger Minimierung der CO₂-Erzeugung ermöglicht werden.
- Für die nächsten 100 Jahre wird eine mittlere Erderwärmung um bis zu 4.5°C vorhergesagt, begleitet von noch größeren Wetterextremen auf der lokalen Ebene. Dies ist größtenteils das Ergebnis der menschlichen CO₂-Emissionen. CO₂ kann im Moment weder in den entsprechenden Mengen gebunden noch gespeichert werden. Wissenschaftler werden Verfahren entwickeln, in denen CO₂ nur vermindert erzeugt wird und nicht mehr nur als Abfall, sondern auch als Rohstoff zu nutzen ist.
- Ca. 90% des geförderten Erdöls werden für Energieerzeugung und Treibstoffe verwendet, und nur der Rest wird von der Chemie für die Erzeugung sehr vieler Alltagsprodukte benutzt, von Plastikgegenständen bis hin zu lebensrettenden Medikamenten. Alternative, nachhaltige Quellen für Chemierohstoffe werden dringend benötigt und bedeuten Rohstoffsicherheit so-

wie globale finanzielle und politische Stabilität. Die Verfügbarkeit seltener natürlicher Rohstoffe nimmt mit einer alarmierenden Rate ab, und ein Mangel an diesen Stoffen wird noch in der Lebensspanne der jetzigen Generation schmerzhaft werden. Viele seltene Elemente werden zudem in Krisengebieten gewonnen und ihr Abbau führt zu Not und politischer Instabilität.

- Die Belastungen durch eine wachsende Weltbevölkerung schädigen die Umwelt. Die Prinzipien einer nachhaltigen Chemie müssen angewendet werden, um unsere Bedarfe an frischer Luft, Wasser, Energie und Rohstoffen in einer nicht umweltschädlichen Weise zu decken. Hier kann die Wissenschaft zahlreiche Technologien zur Überwachung und Reinigung unserer Stoffströme zur Verfügung stellen.

Die Fortschritte der Grundlagenforschung untermauern viele der folgenden Vorschläge, dabei ist die Unterstützung der „Forschung aus reiner Neugierde“ genau so wichtig wie die anwendungsorientierte Forschung, um das Füllhorn für zukünftige wissenschaftliche Durchbrüche gefüllt zu halten.⁴ „*Chemistry for tomorrow's world: a roadmap for the chemical sciences*“ gibt Empfehlungen, wie ein Netzwerk geschaffen und erhalten werden kann, mit dem die globalen Herausforderungen auch angegangen werden können.⁵ Eine nachhaltige und auch langfristige Strategie für die Unterstützung der Wissenschaft ist dabei essentiell, um das Wohlergehen, das Wohlfühlen und den Wohlstand unserer modernen Gesellschaft zu erhalten.^{6,7}

Alle diese Herausforderungen können innerhalb einer starken Wissenschafts-Infrastruktur mit einer fördernden, langfristig denkenden und handelnden politischen Kultur bewerk-

stellt werden. Dies schließt zum Beispiel eine nicht-einschränkende Gesetzgebung sowie Investitionen in die langfristig orientierte Grundlagenforschung ein.

Wir können eine Welt schaffen, in der unsere Energie nachhaltig erzeugt, gespeichert und geliefert wird, wo und wann immer sie benötigt wird. Wir können Verschmutzungen minimieren und auch aus der Umwelt entfernen, während wir neue Konsumentenprodukte schaffen, die weniger belastend sind. Während die Herausforderungen für jedes geographische und politische Umfeld spezifisch sind, ist es wichtig, dass das nationale Denken nicht auf die Probleme des jeweiligen Landes beschränkt bleibt.

Viele der Ziele können so schon kurzfristig angegangen werden und bereits die Lebensqualität der jetzigen und nächsten Generation verbessern. Finanzielle Investitionen werden sicherlich in größerem Umfang benötigt; auf mittel- bis langfristige Sicht werden sich diese Investitionen jedoch auch ökonomisch auszahlen.⁸ Zudem wird ein derartiger Wandel eine Generation neuer nachhaltiger Industrien schaffen, die auch viele langfristige Arbeitsplätze mit sich bringen und damit die globale Sicherheit und Stabilität fördern wird.

Wir müssen jedoch jetzt handeln, um die Vorteile beim Schopf zu packen, die die Wissenschaft jetzt schon bietet.

1 Neue Materialien zur Energieumwandlung und -speicherung

Die wachsende Bevölkerung der Welt verbraucht bald mehr Energie als mit konventionellen Methoden hergestellt werden kann – insbesondere, weil die Lebensstandards sich global verbessern. Bis 2030 haben wir eine weitere Steigerung des Energieverbrauchs um 50% zu erwarten.⁹ Eine Erweiterung der Energieerzeugung darf aber nicht mehr mit einer weiteren Erhöhung der Kohlendioxid-Emissionen verbunden sein.

Selbst wenn wir in der Lage sind, in den vorhandenen Technologien Emissionen weiter zu reduzieren (siehe Kapitel 2), so ergeben die meisten Abschätzungen, dass wir mehr Energie benötigen werden, als wir mit konventionellen Methoden erzeugen können.^{10,11}

Ein erster Schritt ist hier die Effizienzsteigerung der vorhandenen Prozesse durch technische und wissenschaftliche Innovationen. Dennoch brauchen wir auch im Bereich der häuslichen und industriellen Nutzer neue Energiekonzepte, die die nächsten Generationen eben nicht mit Erblasten und neuen Problemen konfrontieren.

Wir benötigen neue Methoden, um nutzbare Energie auch aus nachhaltigen Quellen zu erzeugen, und wir müssen die Energie in einer Form speichern können, die einfach transportiert und genutzt werden kann. So kann z.B. Sonnenenergie durch Solarpanels in Strom verwandelt werden, der wiederum in Energiespeichern wie neuartigen Höchstleistungsbatterien gespeichert wird.

Materialchemiker, die im Team mit anderen Wissenschaftlern und Ingenieuren arbeiten,

werden neue Formen der Energieerzeugung und Energiespeicherung entwickeln, die die Flexibilität aufweisen, sowohl privaten als auch industriellen Nutzern gerecht zu werden¹² und dabei gleichzeitig deutlich weniger Schadstoffe emittieren.

Energieerzeugung

Nutzung der Solarenergie

Sonnenlicht gibt es im Überfluss überall auf der Erde, und es ist die Energiequelle der Wahl für die Zukunft. Sonnenenergie kann direkt durch photovoltaische, photokatalytische oder photoelektrochemische Prozesse verwertet werden.

Materialchemiker können neue, effektivere und haltbarere photovoltaische Zellen (PV) entwickeln, die aus preiswerten, verfügbaren und einfach handhabbaren Stoffen bestehen.

Die Photovoltaik ist schon heute weitverbreitet, und es herrscht allgemeine Übereinkunft, dass diese Technologie eine tragende Rolle in der zukünftigen Energieversorgung spielen

wird.¹³ Der benötigte Fortschritt ist hier evolutionär: wir brauchen eine preiswertere, effizientere Photovoltaik, die auf nachhaltigen und langfristig verfügbaren Substanzen beruht und auch auf großer Skala angewendet wird, um wirklich zu einer globalen Bedeutung zu gelangen.¹⁴ Kosten, Toxizität, Haltbarkeit, einfache Herstellung und Verfügbarkeit der Grundstoffe sind hier die Kernpunkte, die bei zukünftigen Materialentwicklungen für die Sonnenenergienutzung gleich mit berücksichtigt werden müssen.

Neue chemische Lösungen werden benötigt, um das gesamte solare Spektrum auch effektiv adsorbieren und nutzen zu können. Die jetzige Generation Kohlenstoff-basierter („organischer“) Solarzellen, die mit preiswerten Produktionsverfahren hergestellt werden können, konvertieren nur einen kleinen Teil der Sonnenstrahlung und können nur 8% der Sonnenenergie nutzen, die auf sie fällt. Bei Silizium-basierten Systemen liegt dieser Wert heute bei bis zu 20%.

Photoelektrochemische Zellen verwandeln Sonnenenergie in einen Treibstoff, indem sie die Sonnenenergie zur Umsetzung einfacher Stoffe wie CO₂ oder Wasser in nutzbare chemische Substanzen nutzen. Photokatalyse ist die Effizienz- und Geschwindigkeitssteigerung einer solchen Reaktion durch ein katalytisches System. Diese Prozesse werden insgesamt oft als „Künstliche Photosynthese“ bezeichnet, weil sie das Verfahren nachahmen, mit dem die Pflanzen ihre chemische Energie aus Sonnenlicht erzeugen.

Eine Technologie der künstlichen Photosynthese ist im Moment noch nicht wirklich verfügbar. Neue, auch kommerziell nützliche, Photokatalyse-Ansätze werden daher benötigt.¹⁴

Thermoelektrische Materialien, die Elektrizität direkt aus Wärme erzeugen, werden vor-

aussichtlich auch eine wichtigere Rolle in der zukünftigen Energieerzeugung spielen. Ca. 90% aller Energie dieser Welt wird mit Wärmemaschinen erzeugt, die typischerweise mit einem Wirkungsgrad von 30 – 40% laufen.¹⁵ Thermoelektrische Einrichtungen können zumindest einen großen Teil der Restwärme in elektrische Energie verwandeln. Neue thermoelektrische Generatoren werden benötigt, die entweder mit Sonnenwärme oder mit Restwärme funktionieren und die Elektrizität kosteneffizient und effektiv erzeugen.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Chemiker müssen neue Solarzellen mit höherer Effizienz zu niedrigeren Kosten entwickeln. Dies bedingt die Herstellung eines breiten Spektrums neuer Moleküle, die im gesamten solaren Spektralbereich operieren und die mit höherer Effizienz hohe Ladungsströme erzeugen können.
- Es müssen alternative Technologien zur chemischen, künstlichen Photosynthese entwickelt werden, die deutlich effizienter als die besten Algen sind (~ 2 %). Diese Aktivitäten sind mittel- bis langfristig.
- Materialchemiker werden neue thermoelektrische Materialien erkunden und optimieren, die Sonnen- und Abfallwärme in wertvolle Elektrizität verwandeln.

Brennstoffzellen und biologische Energiewandlungssysteme

Eine Brennstoffzelle ist ein elektrochemisches System, welches eine Energiequelle, wie Methanol oder Biomasse, in Strom verwandelt. Für die Entwicklung von neuen, effizienteren und nachhaltigen Brennstoffzellen sind gleich mehrere materialchemische Lösungen gefordert.

Um auch anwendungstechnisch attraktiv zu werden, müssen preiswertere und effizientere Brennstoffzellen zugänglich gemacht werden. Neue Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEM) müssen für automobiler, transportable, sowie auch kleinere stationäre Anwendungen entwickelt werden. Die Entwicklung neuer Katalysatormaterialien, die das teure, aber auch recht langsam arbeitende Platin ersetzen können, ist dringend erforderlich.

Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) haben ein keramisches Oxid als Elektrolytmembran. Obwohl SOFC noch bei relativ hohen Temperaturen betrieben werden, kombiniert diese Klasse von Brennstoffzellen Effizienz, Langzeitstabilität, niedrige Emissionen und Treibstoffflexibilität mit vergleichsweise niedrigen Systemkosten. Neue Katalysesysteme, zusammen mit Elektrolytmaterialien aus häufig vorkommenden, gut zugänglichen Elementen könnten die jetzt schon erhältlichen SOFC nochmals deutlich verbessern.

Mikroben-gestützte Brennstoffzellen sind langfristig eine mögliche Lösung zur Ergänzung traditioneller Brennstoffzellentechnologie in ganz neue Anwendungen hinein. So könnte z.B. Strom direkt durch die Umsetzung von Abwässern und niederwertigem Bioabfall erzeugt werden.

Künstliche Ionenkanäle, welche natürliche Energieerzeugungsprozesse abbilden, haben ebenfalls das Potential zu Durchbruchtechnologien in diesem Feld.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Neue Polymermembranen und Hochtemperatur-Protonenleiter für Brennstoffzellen müssen entwickelt werden.
- Materialwissenschaftler werden neue Mischoxid-Ionenleiter entwickeln, die bei niedrigeren Temperaturen arbeiten und die aus häufig vorkommenden Elementen bestehen.
- Wir brauchen Technologien, die stabile und hochaktive Katalysatoren nutzen, die wiederum nicht auf klassischen Edelmetallen aufgebaut sind.
- Materialwissenschaftler und Biotechnologen müssen in interdisziplinärer Grundlagenforschung mikrobielle Brennstoffzellentechnologien und Ionenkanaltechnologien entwickeln.

Energiespeicherung

Es gibt einen wirklich drängenden Bedarf nach robusten, skalierbaren Technologien zur Energiespeicherung. Im Vergleich zur Energieerzeugung ist die Energiespeicherung ein eher unterschätztes und seltener diskutiertes Problem. Viele nachhaltige Energiequellen, wie Solarstrom oder Windenergie, arbeiten nur sehr unregelmäßig und sind daher nur schwer in das Netz einzuspeisen. Mit großen Speichern wäre aber eine kontinuierliche Erzeugung gar nicht notwendig. Wir brauchen gute Verfahren, diese Energie zu speichern und zu einem geeigneten Zeitpunkt der Verwendung zuzuführen.

Batterien und thermische Energiespeicher

Die Energiedichte jetziger Batterien muss schon kurzfristig erhöht werden. Fortschrittliche Lithiumbatterien sind eine sehr gute Übergangslösung für dieses Problem. Der Bedarf an Lithium wird jedoch schon bald die globale Verfügbarkeit übersteigen, und die nächste Generation an Batterien wird auf anderen, besser verfügbaren Elementen

beruhen, z.B. Natrium/Schwefel (siehe auch Kapitel 4). Festkörperbatterien, die nicht eine Flüssigkeit, sondern einen Festkörper als Elektrolyt und Speicher benutzen, sind schon jetzt erhältlich und werden machbar. Das gilt auch für eine Reihe anderer Technologien, wie z.B. Metall/Luft-Batterien.

Thermische Energiespeichersysteme, die Wärme in großen Speichern z.B. als geschmolzene Salze oder in Phasenübergangsmaterialien vorhalten, werden als Zwischenspeicher benötigt.

Eine Flussbatterie ist eine Art der aufladbaren Batterie, in der der Speicherelektrolyt durch die elektrochemische Zelle gepumpt wird. Der Speicherelektrolyt kann in Tanks gelagert werden, die Flussbatterie ist daher für schnellen Lastwechsel und auch großskalige Anwendungen geeignet. Auch hier müssen neue Materialien geschaffen werden, die verbesserte Flussbatterien mit höheren Speicherdichten erlauben.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Es werden neue, haltbare und sichere Materialien für Batterien mit höchster Leistungsdichte benötigt.
- Materialchemiker werden eine ganze Reihe von Energiespeichertechnologien als Alternative zu klassischen Batterien entwickeln, z.B. für Flussbatterien oder thermische Speichersysteme.
- Ein Großteil des benötigten Wissens und die Technologie sind bereits vorhanden, um kurzfristige Lösungen in diesem Feld anzubieten. Preiswerte organische Solarzellen, gekoppelt mit Lithium/Luft- bzw. Lithium/Schwefel-Batterien wären eine mögliche Übergangstechnologie.

Chemische Energiespeicherung

Viele chemische Bindungen speichern Energie, die bei der Reaktion mit Sauerstoff wieder frei wird, z.B. in einem Verbrennungsprozess. Chemische Energiespeichersysteme können mit einer geeigneten Methode zur Energieerzeugung (siehe oben) kombiniert werden, um Treibstoffe zu generieren, die bei Bedarf genutzt werden können.

Wasserstoff ist eine hoch nachhaltige Form von Energie, da bei seiner Verbrennung nur Wasser entsteht. Wasserstoff kann direkt verbrannt werden, kann aber auch mit CO_2 zu flüssigen Treibstoffen weiterreagiert werden (siehe auch Kapitel 2). Wasserstoff wird bis jetzt noch aus fossilen Quellen hergestellt (z.B. aus Methan und Erdgas). Diese Verfahren sind jedoch nicht nachhaltig, und es wird mehr Energie für die Erzeugung von Wasserstoff aufgebracht, als bei seiner anschließenden Verbrennung entsteht. Neue Methoden zur Wasserstoffherzeugung mit Hilfe einer nachhaltigen Energiequelle würden ermöglichen, dass sich Wasserstoff-basierte Technologien in effektivere und kosteneffiziente Formen der Energiespeicherung entwickeln ließen.

Die Elektrolyse von Wasser, d.h. seine elektrochemische Aufspaltung in Wasserstoff und Sauerstoff, ist wohl die vielversprechendste Methode zur Erzeugung von Wasserstoff. Unter Nutzung einer Energiequelle wie Solarstrom oder Windstrom könnte die Wasserelektrolyse eine nachhaltige Quelle für Wasserstoff werden, ohne dass fossile Ressourcen angegriffen werden. In dieser Weise könnten Energie gespeichert, flüssige Treibstoffe und Dünger erzeugt werden.

Die künstliche Photosynthese ist ebenfalls als Energiespeichertechnologie zu verstehen. Diese könnte Methan oder Methanol aus CO_2

erzeugen. Die Nutzung von CO₂ als Vektor wird in Kapitel 2 im Detail diskutiert. Die Umsetzungseffizienz der künstlichen Photosynthese muss besser als 3% sein, um Bedeutung zu erlangen.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Chemiker werden neue katalytische Materialien entwerfen, die die Wasserelektrolyse – einen bisher sehr ineffektiven Prozess – bei hohen Stromflussdichten optimieren helfen.
- Wir brauchen neue Technologien zur Gas-trennung und Gasreinigung.
- Materialchemiker werden photokatalytische Systeme und Kaskaden entwickeln, die Wasserstoff direkt aus Licht und Wasser erzeugen.

Groß- und kleinskalige Energiesysteme

Ein Energiesystem ist aus einem Bauteil zur Energiegewinnung, wie einem Solarpaneel und einem Energiespeichersystem, z.B. einer Batterie, aufgebaut. Sowohl großskalige als auch individuelle Energiesysteme haben ein großes Potential für Verbesserungen.¹⁶ Lösungen zur Energiespeicherung auf der großen Skala sind im Prinzip durch signifikante Verbesserung bestehender Systeme, z.B. Batterien, zu erreichen, es gibt aber auch begründetes Potential für ganz neuartige Technologien.

Wenn Energie überall einfach und sicher gespeichert werden kann, braucht man keine kontinuierliche Versorgung mehr. Größere Speichersysteme werden benötigt, um im gesamten Netz Spitzen bei der Energieerzeu-

gung und beim Energieverbrauch auszugleichen. Eine Lösung zur großskaligen Energiespeicherung ist das „intelligente Netz“, in dem ein Stromnetz mit einer Vielzahl dezentraler Energiespeicher regeltechnisch gekoppelt wird. Solche intelligenten Netze könnten den Energiebedarf auf der Ebene von Gemeinden bis hin zu Megastädten decken.

Kleinere Energiesysteme sind mobil und nützlich in abgelegenen Gegenden, in denen nur schwer ein intelligentes Netz bereitgestellt werden kann. Solche kleinere Systeme würden Haushalten oder kleineren Firmen auch eine Unabhängigkeit vom Netz erlauben. Dieses Modell der selbst-definierten „I-energy“ hat große Vorteile im Sinne von Effizienz, räumlichem Anschluss, Beweglichkeit und Versorgungssicherheit.

Neue Systeme können aus Hochleistungsbatterien, gekoppelt mit neuen Polymer-basierten Solarzellen bestehen (mit einer Effizienz von 10% und mehr). Auf diese Weise könnte jeder Haushalt seine Energie selbst aus der Sonne gewinnen und in lokalen Batterien „lagern“.

- Neue Materialien mit größerer Zuverlässigkeit, Effizienz und Haltbarkeit werden für die Bereitstellung der neuen Energiesysteme benötigt, einschließlich Energieerzeugung und Energiespeicherung. Die Haltbarkeit von organischen Solarzellen muss verbessert werden; hier ist zumindest eine Haltbarkeit von 15 – 20 Jahren anzustreben.
- Jetzige Technologien bauen auf Elementen auf, die zunehmend verknappen (siehe Kapitel 4), z.B. Ruthenium, Iridium oder Indium. Materialchemiker müssen umweltverträgliche Materialien zur Verfügung stellen, die gleichzeitig nachhaltig und nicht Ressourcen-beschränkt sind.

2 CO₂-Aktivierung, -Speicherung und -Nutzung

Es wird erwartet, dass sich die Erde in den nächsten 100 Jahren um durchschnittlich 2 bis 4,5 °C erwärmt, zum großen Teil als Ergebnis menschlicher CO₂-Emissionen. CO₂ kann im Moment nicht in ausreichendem Maße abgetrennt und gespeichert werden. Materialchemiker können „Carbon capture and storage“- Systeme (CCS) entwickeln helfen. Sie können auch neue Wege entwickeln, CO₂ als Rohstoff zu verstehen. Technologien zur Verwendung von CO₂ als Baustein für Polymere und Materialien können schon in den nächsten Jahren zur Verfügung gestellt werden. Überkritisches CO₂ ist ein industrielles Lösemittel, welches eine nachhaltige Alternative zu vielen klassischen petrochemischen Lösemitteln darstellen kann.

Die Herausforderung

Kohlendioxid (CO₂) ist ein Bestandteil der Erdatmosphäre, und Pflanzen brauchen es zum Aufbau von Zuckern und dem Wachstum. Gleichzeitig ist CO₂ ein Treibhausgas und ein Überschuss trägt zum Klimawandel bei. Das „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC)¹⁷ rechnet in den nächsten 100 Jahren mit einer Erwärmung der Erde zwischen 2 und 4,5 °C, zu großen Teilen verursacht durch die CO₂-Emissionen aus menschlicher Aktivität.

Von Seiten der Befürworter wird ins Feld geführt, dass die „Carbon capture and storage“ (CCS) Technologie die Emissionen von Kohlekraftwerken um bis zu 80 – 90 % senken kann.¹⁸ Es wird jedoch von anderen als kritisch angesehen, ob diese Technologie wirklich sicher, in einer solchen Größenordnung überhaupt anwendbar ist¹⁹ und ob damit CCS wirklich ausreicht, um die vereinbarten globalen Emissionsziele zu erreichen. Die CO₂-Emissionen müssen auch durch alternative, Kohlenstoff-neutrale Methoden der Energieerzeugung verringert werden (siehe Kapitel 1).

Viele Produkte unseres täglichen Lebens sind Kohlenstoff-basiert oder enthalten Kohlenstoff aus Erdöl. Allerdings werden im Moment nur 5% des gesamten Erdöls für die Erzeugung von Chemieprodukten benutzt, wie z.B. Kunststoffe, Pharmazeutika oder andere Verbraucherprodukte. Ist dieser Anteil auch vergleichsweise gering, so wird er trotzdem durch Technologiefortschritt und Bevölkerungswachstum steigen. Deswegen werden neue Verfahren und Produkte benötigt, um die Chemie aus der Abhängigkeit vom Erdöl zumindest teilweise zu befreien. (siehe Kapitel 5).

Durch die Einführung von CO₂ in die Versorgungskette und seine Nutzung als Rohstoff kann ein kleiner Teil des Kohlenstoff-Zyklus geschlossen werden. Dazu sind Fortschritte der Grundlagenforschung im Bereich der Materialchemie und Katalyse vonnöten. Die Wiederverwendung von CO₂ ist gegenüber der geologischen Speicherung vorteilhaft, da sie das CO₂ eher als Wertprodukt denn als Abfall behandelt. Die geologische Speicherung ist zudem mit potentiellen Gefahren wie z.B. Leckbildung verbunden.

Überkritisches CO₂ ist eine Form des Kohlendioxids, welches schon industriell als Lösemittel und in Reinigungsprozessen genutzt wird. Eine noch weitere Nutzung von überkritischem CO₂ kann den Bedarf an klassischen, nicht nachhaltigen Lösemitteln verringern. Organische Lösemittel werden allgemein gerade im Konsumentenbereich als kritisch angesehen.

Die Nutzung von CO₂ als Rohstoff und temporärer Energieträger ist auf Grund der damit verbundenen Mengen jedoch bei weitem nicht ausreichend, um zur Lösung des Klimaproblems auch nur annähernd beizutragen. Aber es gibt Lösungen aus der Materialchemie, die auch in anderer Weise mit dem CO₂-Problem umgehen. Viele der beschriebenen Technologien und Industrien sind jedoch noch in den Kinderschuhen, und die Vorhersage von realistischen Zeitskalen ist ohne weitere Forschung schwierig. Dennoch würde eine effektive CO₂-Entsorgungstechnologie unzählige Arbeitsplätze schaffen und eine signifikante Wirtschaftsleistung erbringen.

CO₂-Bindung und -Abtrennung

Regierungen in aller Welt haben sich verpflichtet, Demonstrationsanlagen auf kommerzieller Ebene für CCS²⁰ an kohlebefeuerten Kraftwerken zu installieren^{17,18,21} und die Nachhaltigkeit des Verfahrens unter Beweis zu stellen. CCS braucht jedoch in jedem Falle, und sei es zur Demonstration, kostengünstige Materialien, Prozesse und Technologien, sowohl für das Einfangen als auch für die Trennung des CO₂. Dies gilt sowohl für konzentrierte, stationäre Quellen, als auch für eher verdünnte, wie sie in mobilen Systemen zu finden sind.

Für die Trennung und Reinigung des CO₂ wären robuste, schmutzresistente Adsorben-

ten und Membranen auf der Basis von gut verfügbaren Elementen wichtig. Eine Zusammenarbeit von Ingenieurwissenschaften mit der Materialwissenschaft ist notwendig, um verlässliche CCS-Systeme zu entwickeln.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Materialchemiker werden potentielle CO₂-Abtrennungs- und -Reinigungstechnologien entwickeln, die auf flüssigen Aminen, Gas-Clathraten/Hydraten, ionischen Flüssigkeiten, porösen Festkörpern, biologischer Fixierung oder Membrantechnologien basiert sein können.

CO₂ als Energie-Vektor

Obwohl CO₂ im Normalfall recht unreaktiv ist, kann man durch die Reaktion mit anderen Stoffen in der Anwesenheit eines Katalysators ein chemisches Energiespeichersystem schaffen.²²

Da CO₂ beim Energieverbrauch wieder freigesetzt wird und deswegen nicht zum Energieinhalt beiträgt, redet man hier von einem Vektor, der den anderen Stoff immobilisiert und trägt. So können z.B. CO₂ und gasförmiger Wasserstoff effektiv zu Methanol umgesetzt werden, eine verdampfbare aber gut speicherbare organische Flüssigkeit. Da Flüssigkeiten üblicherweise eine viel höhere Dichte und Volumen-basierte Energiedichte als der schwer handhabbare Wasserstoff haben, können solche Technologien vorteilhaft für den einfachen Transport und die Speicherung von Wasserstoff eingesetzt werden. (siehe Kapitel 1). Das so erzeugte Methanol kann auch, Erdöl ersetzend, als Grundstoff für die Erzeugung chemischer Massenprodukte eingesetzt werden.

Solche flüssigen Träger können direkt in konventionellen Motoren verbrannt werden, ohne dass größere Modifikationen durchgeführt werden müssten. Sie können jedoch auch am Nutzungsort wieder in die entsprechenden Gase rückverwandelt werden. Man könnte sich so ein System als Leitbild vorstellen, in dem eine nachhaltige Energiequelle, z.B. Solarstrom, benutzt wird, um Wasserstoff zu erzeugen und gleich mit dem aus der Atmosphäre gewonnenen CO₂ zur Reaktion gebracht wird. Im Ergebnis könnte man das flüssige Energieprodukt bei gegebener Zeit einfach „ernten“.

Erzeugung von Methanol

CO₂ und Wasserstoff können zu Methanol verbunden werden, ein Flüssigtreibstoff, der einfach transportiert werden kann. Über bekannte Zeolith-Katalyse kann Methanol auch zu Benzin umgesetzt werden. Die Kommerzialisierung von Methanol könnte über Katalyse mit häufigen Elementen und einer nachhaltigen Quelle von Wasserstoff kurzfristig erreicht werden.²³

Die Umsetzung von CO₂ in Ameisensäure, Formaldehyd und höhere Alkohole mittels Reaktion mit Wasserstoff kann die chemische Grundlage für die Herstellung von vielen Massenchemikalien auf größter Skala darstellen. Solche Prozesse könnten durch Modifikation bestehender Industrieanlagen in nur wenigen Jahren eingeführt werden.

Erzeugung von Methan

Die Umsetzung von CO₂ und Wasserstoff zu Methan wäre eine andere potentielle Lösung. Methan ist energiereicher als Methanol und daher für Verbrennungsprozesse besser geeignet. Die jetzigen technischen Lösungen zur Verbrennung von Methan (Hauptkomponente von Erdgas bzw. Biogas) sind ausge-

reift, und es gibt entsprechende Transport- und Verteilungsnetze. Die Umsetzung von CO₂ zu Methan könnte auch die Abhängigkeit vom Erdgas vermindern und wäre dabei ein CO₂-neutraler Treibstoff. Die Etablierung solcher Kreisläufe kann als ein mittelfristig lösbares Problem angesehen werden.

Erzeugung von Synthesegas

Synthesegas (Syngas) ist eine Mischung aus CO₂, CO (Kohlenmonoxid) und Wasserstoff, welches üblicherweise durch die Zugabe von sehr heißem Wasserdampf zu Kohle oder Erdgas hergestellt wird; es kann aber auch aus Biomasse erzeugt werden.

Es kann als Brenngas oder als Ausgangsprodukt für chemische Prozesse zur Herstellung von Treibstoff oder chemischen Intermediaten, z.B. mit Hilfe der Fischer-Tropsch-Synthese, eingesetzt werden. Solche Prozesse sind in der Industrie weit verbreitet, und die breite Umsetzung von CO₂ in Syngas könnte in relativ kurzer Zeit realisiert werden. Die größte Hürde zur Umsetzung dieser Technologie ist nur die Konzeption geeigneter Fabriken. Durch Umsetzung von CO₂ in Methanol, Ameisensäure und höhere Alkohole durch Hydrogenierung könnten die Ausgangsprodukte für die Herstellung vieler jetziger Massenprodukte hergestellt werden. Auch diese Prozesse könnten in wenigen Jahren durch die Modifizierung bestehender Fabriken eingeführt werden.

Es sind mittlerweile katalytische Prozesse vorhanden, die CO₂ unter Einwirkung von Wasserstoff in Syngas umsetzen, und der Entwurf entsprechender Raffinerien wäre ein mögliches Nahziel einer CO₂ Kreislaufwirtschaft.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Wissenschaftler werden effektive Prozesse entwickeln, mit denen man Wasserstoff mittels nachhaltiger Energiequellen gewinnen kann, wobei Verfahren wie Elektrokatalyse oder Photokatalyse zum Einsatz kommen.
- Es müssen neuartige Katalysatoren entwickelt werden, die effektiv CO₂ und Wasserstoff bei niedrigen bis mittleren Temperaturen zu Methanol und Methan umsetzen.
- Industrielle Anlagen müssen auf die Erzeugung und Handhabung von Syngas umgerüstet werden.

CO₂ als ein Grundstoff für Kunststoffe und komplexe chemische Moleküle

Nachhaltige Produktion von hochwertigen Chemikalien, Kunststoffen und Treibstoffen aus CO₂ ist ein technologisch und wissenschaftlich machbares Ziel. Eine nachhaltige und erneuerbare Wasserstoffquelle ist dafür notwendig, z.B. durch Elektrolyse, aber auch aus Syngas aus Biomasse.

CO₂ kann auch in Hochpolymere eingebaut werden, und die benötigte Technologie könnte in wenigen Jahren etabliert werden. Der Einbau gasartiger Monomere in polymere Kunststoffe ist wohlbekannt und Massentechnologie. Die Entwicklung dieser Technologien kann zehn Jahre oder auch länger brauchen, und die Verwendung von CO₂ als breites Grundprodukt ist das ultimative Ziel. All diese Verfahren basieren aber auf vielen ähnlichen Entwicklungen.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Es müssen hochaktive, selektive, nachhaltige und stabile Katalysatoren für die Aktivierung und chemische Reduktion von CO₂ entwickelt werden.
- Elektrokatalytische und photokatalytische Verfahren, um CO₂ in die Versorgungskette einzuführen, müssen entwickelt werden.

CO₂ als Lösemittel und Prozesshilfsstoff

Überkritisches CO₂ ist eine spezielle Form von dichtem Kohlendioxid, welches schon jetzt in vielerlei industriellen Anwendungen genutzt wird, z.B. zur Entkoffeinierung von Kaffeebohnen oder als Kühlmittel.²⁴ Es hat sehr vorteilhafte Eigenschaften, wie z.B. niedrige Toxizität und niedrige Reaktivität, und es kann bei moderaten Temperaturen genutzt werden. Die breite Nutzung von überkritischem CO₂ zur Reinigung von synthetischen und natürlichen Stoffen ist schon kurzfristig möglich. Das könnte mancherlei gesundheitsschädliches und teureres organische Lösemittel ersetzen. Die Konzeption neuer Prozesse bedarf der Zusammenarbeit von Chemikern und Ingenieurwissenschaftlern.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Materialchemiker werden zusammen mit Ingenieuren neue Methoden zur Nutzung von überkritischem CO₂ zur Partikelherstellung, als Kühlmittel, in der Materialbehandlung und -verarbeitung sowie als Lösemittel in bekannten und neuen chemischen Reaktionen entwickeln.

3 Ersatzstoffe für fossile Treibstoffe und chemische Rohstoffe

Ungefähr 90% des aus der Erde gewonnenen Rohöls werden nicht stofflich, sondern als Treibstoff oder zur Energieerzeugung verwendet. Rohöl ist auch nötig, um das gesamte Spektrum vom Alltagskunststoff bis hin zu lebensrettenden Pharmazeutika herstellen zu können, und der Bedarf der Chemie an Rohöl wird noch steigen. Neue Quellen für Rohstoffe und Treibstoffe sind daher dringend erforderlich und ermöglichen globale finanzielle und politische Stabilität.

Verfahren können entwickelt werden, die effektiv mit Syngas, Methan, Biomasse und sogar Kohlendioxid als alternative Kohlenstoffquellen betrieben werden. Biomassebasierte Polymere werden vielleicht die petrochemisch basierten Kunststoffe in Bezug auf Eigenschaften und Funktionalität überholen.

Die Herausforderung

Unsere moderne Gesellschaft hängt von Kohlenstoff-basierten Treibstoffen und Chemikalien ab. Wir sollten anstreben, unsere Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu verringern (siehe Kapitel 1). Die Diversifizierung der Kohlenstoffquelle, aus der wir unsere chemischen Produkte und Materialien herstellen, ist ein damit verbundenes Thema. Diese neuen Kohlenstoffquellen sollten nachhaltig sein und keine neuen CO₂-Emissionen verursachen.

Belastbare Strategien zum Übergang weg von fossilen Brennstoffen sind schon auf der kurz- bis mittelfristigen Zeitskala vonnöten, um Wohlstand und Lebensstandard einer wachsenden Weltbevölkerung zu sichern.⁷ Das langfristige Ziel muss eine vollständige Unabhängigkeit vom Erdöl als Ausgangsprodukt für Chemieprodukte sein. Kurzfristig können nachhaltige Methoden zur Gewinnung von Erdölgrundstoffen aus niederwertigeren Quellen die Lücke füllen, langfristig ist die Nutzung von Biomasse das Ziel.

Eine langfristige Investitionskultur zur Unterstützung der Grundlagenforschung ist nötig, die die Entwicklung dieser Ersatztechnologien befördert. Es sind jedoch schon jetzt kurzfristige Möglichkeiten erkennbar, die neue Arbeitsplätze und wirtschaftliche Entwicklung im Rahmen der Umstellung auf eine Ressourcen-effiziente und CO₂-neutrale Gesellschaft schaffen können.

Um diese Herausforderung so schnell wie möglich anzunehmen, sollten die folgenden Themen in Chemie und Materialwissenschaften angegangen werden:

Verarbeitung niederwertiger fossiler Kohlenwasserstoffe

Chemiker können die saubere, sichere und effiziente Produktion von Treibstoffen und Chemikalien aus niederwertigen fossilen Quellen ermöglichen. Grundsätzliche Fortschritte sind innerhalb von 10 Jahren durch die Zusammenarbeit von Chemikern und Ingenieuren erzielbar.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Eine Technologie zur Nutzung von hochschwefelhaltigen Rohölen wird als Übergangstechnologie benötigt.
- Chemiker müssen neue Katalytische Prozesse entwickeln, um die Umweltbelastung durch Nutzung niederwertiger Kohlenwasserstoffe abzufangen.
- Es werden dafür verbesserte Konstruktions- und Reaktormaterialien benötigt.
- Materialchemiker werden neue Materialien für neue chemische Trennungstechnologien niederwertiger Rohöle entwickeln.

Syngas

Die Chemie des Syngas ist schon sehr gut verstanden. Es kann aus einer Vielzahl von Quellen hergestellt werden, darunter Erdgas, Bioabfälle oder Biomasse. Diese Flexibilität ist ein Vorteil und ermöglicht die Anpassung von vielerlei Industrieanlagen mit nur minimalen Änderungen an die Herstellung von Syngas. Die jetzigen Syngas-Fabriken sind üblicherweise sehr groß, während kleinere, mehr lokal aufgestellte Anlagen, sogenannte „Flexiplants“, deutliche Vorteile aufweisen würden.

Syngas wird oft als Ausgangsprodukt industrieller chemischer Prozesse zur Herstellung hochwertiger Chemieprodukte oder Treibstoffe benutzt (siehe auch Kapitel 2). Die Herstellung komplexer chemischer Strukturen aus Syngas bedingt jedoch komplizierte, teilweise sehr energieaufwendige Prozesse. Aus vielerlei Sicht ist Syngas daher noch nicht ausreichend als Ausgangsprodukt erkundet; sein jetziger Nutzen ist üblicherweise noch auf die Herstellung niederwertiger Produkte

beschränkt. Die richtigen technologischen Fortschritte vorausgesetzt, könnte Syngas zu einem sehr wertvollen und vielfältigen Ausgangsprodukt der Zukunft werden.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Materialchemiker werden selektive und widerstandsfähige Katalysatoren (siehe auch Kapitel 5) zur Herstellung neuer, hochwertiger, funktionaler Produkte aus Syngas entwickeln. Dabei sollen die jetzt üblichen hohen Energieverluste minimiert werden.

Methan

Methan ist ein Brennstoff, aber auch eine Grundchemikalie. Methan ist der Hauptbestandteil von Erdgas und kann auch aus Syngas hergestellt werden. Methan wird oft an Ölquellen als Beiprodukt freigesetzt. Bei isolierten Ölquellen lohnt sich Sammeln und Transport nicht, so dass es meistens nur abgefackelt oder rückinjiziert wird. Nachhaltige Wege zur Umsetzung von Methan in flüssige Wertprodukte im kleinen und mittleren Mengenbereich werden daher dringend benötigt (siehe auch Kapitel 2).

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Neue Katalysatoren für die direkte partielle Oxidation von Methan zu kleinen, funktionellen Verbindungen werden benötigt.
- Chemiker werden Methoden zur direkten Kupplung von Methan zu höheren Kohlenwasserstoffen und Wasserstoff entwickeln. Wasserstoff ist eine vielfältige Plattformchemikalie oder auch Energieträger (siehe Kapitel 1).

Bio-Rohstoffe

Biologische Rohstoffe können unsere Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen mindern. Die Nutzung von Biomasse für Treibstoffe und/oder Grundchemikalien darf allerdings nicht mit der Nahrungsmittelproduktion einer wachsenden Weltbevölkerung konkurrieren.⁵ Die nachhaltige Verarbeitung von Nicht-Nahrungsmittel-Pflanzen* oder von mariner Biomasse wie z.B. Algen kann sowohl Treibstoffe als auch Chemikalien erzeugen. Es ist allerdings wichtig, dass jeglicher Prozess, der Energieträger oder Grundchemikalien aus Biomasse herstellt, einer vollständigen Analyse des Lebenszyklus („life cycle analysis“) unterzogen wird.²⁵

Die Nutzung von Biomasse als Chemieplattform eröffnet die Gelegenheit, die molekulare Vielfalt natürlicher Systeme zu nutzen. Eine solche Nutzung der Komplexität erlaubt den effizienteren Einstieg an viel höherer Stelle der Synthesekaskade und ist damit potentiell viel effizienter als der klassische petrochemische Weg.

Bakterielle Prozesse und die „weiße Biotechnologie“ können verbessert werden, um spezielle hochwertige Chemikalien so zugänglich zu machen. Die erkennbaren Herausforderungen in diesem Bereich beinhalten die bessere Trennung der produzierten Stoffe von der wässrigen biologischen Fermentationslösung. Energieaufwendige Reinigungsschritte würden ansonsten die biologischen Einsparungen mehr als kompensieren. Eine andere Herausforderung ist die Kultivierung in salinen Medien.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Chemiker, Biotechnologen und Prozessingenieure werden selektive Methoden entwickeln, um holzartige Biomasse (Lignocellulose) und andere einfache pflanzliche Biomassen in Chemiegrundstoffe und Kunststoffe zu verwandeln.
- Materialchemiker werden Lösungen anbieten, die auch die inhärenten Nanostrukturen biologischer Rohstoffe im Material erhalten und so hochfunktionelle Komponenten aus Biomasse ermöglichen, z.B. Elektroden.
- Saubere katalytische oder chemische Routen für die Trennung und Nutzung gesamter Agrarpflanzen werden benötigt.²⁶
- Materialchemiker werden ganze Familien von Katalysatoren entwickeln, die in Wasser funktionieren und Biomasse in hoher Ausbeute, Aktivität und Effizienz in chemische Grundstoffe verwandeln. Hier sind kategorische Fortschritte der jetzigen Technologien vonnöten, um petrochemische Produkte durch biobasierte Produkte auf einer breiteren Basis zu ersetzen.

Bio-basierte Polymere mit verbesserter Leistungsfähigkeit

Im Moment ist die Leistungsfähigkeit biobasierter Polymere noch geringer als die der petrochemischen Gegenstücke. Intensive Forschung und Entwicklung wird nötig sein, um dies bei schon bestehenden Produkten zu ändern. Die Materialchemie kann biobasierte und bioabbaubare Polymere mit ge-

* Nicht-Nahrungspflanzen wie z.B. Schilf oder Miscanthus oder die robuste, Ölliefernde Familie der Euphorbiaceae sind Quellen pflanzlicher Biomasse, die nur minimaler Kultivierung bedürfen.

steigerter Leistungsfähigkeit und geringem ökologischem Fußabdruck schaffen. Diese haben eine verbesserte thermische und mechanische Leistungsfähigkeit, so dass sie mit konventionellen Polymeren konkurrieren können.^{6,7} Die biobasierten Kunststoffe werden wohl zuerst in höherwertigen Produkten zu finden sein, wo zusätzliche Funktionalität auch bezahlt werden kann.

In einem ersten Schritt werden biobasierte die klassischen Kunststoffe ergänzen, in einem weiteren Schritt zu großen Teilen ersetzen können.

Die technische Leistungsfähigkeit der jetzt verfügbaren biobasierten Kunststoffe ist oft den petrochemisch basierten unterlegen, im Prinzip sind jedoch deutlich höhere Leistungen – wie von der Natur vorgeführt – zu erwarten. Dieses Potential kann durch Forschung an entsprechenden Polymerisationskatalysatoren, aber auch durch die verstärkte Zusammenarbeit von Materialchemikern, Ingenieuren und Biotechnologen genutzt werden. Neue hochwertige Hochleistungspolymere auf der Basis alter und neuer Pflanzentypen können erwartet werden.²⁷

Es ist jedoch klar, dass es nicht möglich oder erstrebenswert ist, alle Treibstoffe aus Biomasse herzustellen. Hier sind allerdings Teillösungen im Bereich von Treibstoffen für Transportzwecke zu erkennen.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Die Materialchemie wird unser Verständnis der Struktur-Eigenschaftsbeziehungen von Kunststoffen so verbessern, dass Kunststoffe mit maßgeschneiderten Eigenschaften hergestellt werden können.

- Chemiker werden neue Kunststoffe, modifizierte Biopolymere, (Nano)Kompositmaterialien und Mischungen herstellen, um die vielen Anforderungen neuer Anwendungsbereiche zu erfüllen.
- Neue hocheffiziente, hochselektive Katalysatoren für neue Polymerisationsprozesse werden benötigt.
- Materialchemiker werden neue Prozessmethoden für die neuen Kunststoffe und deren Anforderungen entwickeln.

CO₂ als Rohstoff

Die nachhaltige Erzeugung von hochwertigen Chemierohstoffen, Kunststoffen und Treibstoffen aus CO₂ ist ein wissenschaftlich und technologisch machbares und hoch-attraktives Ziel, welches aber an anderer Stelle diskutiert wird (siehe Kapitel 2).

4 Bewahrung seltener natürlicher Rohstoffe

Die Vorräte seltener natürlicher Rohstoffe erschöpfen sich mit alarmierender Geschwindigkeit. Zudem kommen viele wichtige, seltene Mineralien aus politisch instabilen Ländern. Der Rohstoffmangel wird uns noch in dieser Generation treffen. Die Materialchemie kann helfen, den Einsatz seltener Rohstoffe zu reduzieren, sie zu ersetzen und besser zu recyklieren. Neue Methoden, Phosphor aus bio-geologischen Kreisläufen wiederzugewinnen, können entwickelt werden. Alternative Energiespeicher können entwickelt werden, die nicht auf Lithium basieren. Chemiker werden katalytische Prozesse bereitstellen, die nicht auf seltenen Edelmetallen basieren. Dies gilt auch für Solarzellen. Alternativen zu seltenen Erden sollten erkundet werden. Eine konzentrierte globale Strategie ist dringend als Zwischenlösung nötig, um die Versorgung mit Schlüsselrohstoffen zu sichern, bis die neuen technischen Lösungen zur Verfügung gestellt werden können.

Die Herausforderung

Metalle und andere Mineralien sind für praktisch alle Bereiche unseres täglichen Lebens notwendig. Phosphor (P) ist ein Hauptbestandteil von Düngemitteln (als Phosphat), und ohne Dünger können wir unsere Landwirtschaft nicht mehr aufrecht erhalten. Metalle wie Lithium (Li), Platin (Pt), Palladium (Pd), Indium (In) und die sogenannten seltenen Erden (eine Gruppe von 17 Elementen) werden in vielerlei Anwendungen benötigt, katalysieren komplexe chemische Reaktionen (bis hin zur Abgasentgiftung im Automobil), sind essentielle Komponenten für Computer, Solarzellen und Mobilfunkgeräte und werden für Hochleistungsmagneten für Hybridfahrzeuge und Windturbinen benötigt. Die Nutzung seltener chemischer Elemente in der Katalyse erlaubt es, industrielle Prozesse effektiv und bei niedrigeren Temperaturen zu betreiben.

Die schnelle Abnahme der Weltreserven von elementaren Rohstoffen und den sogenannten seltenen Erden ist bereits Realität und wahrscheinlich sogar viel bedrohlicher als die allseits wahrgenommene Erschöpfung der Ölreserven.²⁸ Die bekannten Lagerstätten von Phosphat-Mineralien werden zum Beispiel in den nächsten 30 – 100 Jahren erschöpft sein.²⁹ Ein hoher Preis und die unsichere Verfügbarkeit solcher seltener natürlicher Rohstoffe werden schon bald die Wirtschaft beeinflussen, und nationale Rohstoffsicherheit wird ein Thema sein, da eine vergleichsweise kleine Gruppe von Ländern die verbleibenden Reserven dieser lebensnotwendigen Stoffe kontrolliert. Einige Nationen betreiben bereits eine Politik der Beschränkung bestimmter Rohstoffexporte.

Die Rohstoffverarmung betrifft sehr viele Aspekte unseres täglichen Lebens. Dieser Tatbestand ist alarmierend, und hier bedarf es einer dringenden Lösung.

Ein chemischer Ersatz dieser seltenen Rohstoffe durch nachhaltige Alternativen ist dringend erforderlich. Die Materialchemie kann hier durch Minderverbrauch, Ersatz und Wiederverwertung Abhilfe schaffen. Auch die Politik kann durch verbesserte Maßnahmen zur Bewirtschaftung und Beschränkung der schrumpfenden natürlichen Ressourcen beitragen. Das Fernziel sollte jedoch sein, Forschung zu fördern, damit die meisten dieser seltenen Elemente in technischen Geräten und Prozessen durch häufigere und zugänglichere Materialien ersetzt werden können. Nachhaltigkeit muss ein integraler Teil jedes Entwicklungsprozesses werden; wir dürfen keine neuen Abhängigkeiten von Stoffen schaffen, die in der Zukunft voraussehbar knapp werden. Es muss schon jetzt gehandelt werden, damit wir Antworten haben, wenn sich der Mangel bedrohlich auswirkt.³⁰

Phosphor

Technologische Durchbrüche werden benötigt, um die Versorgung zukünftiger Generationen mit Phosphor zu sichern. Im Moment gibt es keine praktikable Methode, Agrarböden mit einer konstanten Phosphatversorgung zu versehen, ohne auf spezielle Phosphat-Mineralien zurückzugreifen. Der kommende Phosphatmangel kann mit dem Stickstoffmangel von vor 100 Jahren verglichen werden. Durch die Erfindung des Haber-Bosch-Prozesses konnte eine einfache und zuverlässige Quelle zu Ammoniak aus Stickstoff- und Wasserstoffgas geschaffen und so preiswerter Dünger zugänglich gemacht werden. Wir brauchen einen ähnlichen wissenschaftlichen Durchbruch, um die Versorgung mit Phosphat für die zukünftigen Generationen der Menschheit zu sichern.

Phosphat findet sich in Böden, Flüssen und Ozeanen, allerdings in hoch verdünnter Form.

Es kann im Prinzip von dort wieder zurückgewonnen werden, die dazu notwendigen Prozesse und Materialien müssen allerdings noch erfunden werden. Grundlagenforschung in diesem Bereich ist dringend nötig, um hier nachhaltige Lösungen bereitzustellen.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Materialchemiker werden neue Adsorptionsmaterialien (z.B. durch Wirt-Gast Komplexe oder Metallkoordination) zur Bindung und Anreicherung von Phosphat schaffen.
- Membrantechnologien zur Anreicherung von Dünger-haltigen Brauchwässern werden benötigt.

Lithium

Lithium (Li) ist bald das meistgebrauchte Metall in Batterien und wird durch Elektromobilität und intelligente Speichersysteme zumindest kurz- und mittelfristig eine stark wachsende Rolle spielen (siehe auch Kapitel 1). Neue Technologien zur Ergänzung bzw. Ersatz von Lithium werden hier benötigt. Es ist im Moment unklar, wie lange die gut zugänglichen Lithiumvorräte noch ausreichen, aber einige Abschätzungen reden von noch 45 Jahren. Diese Zeit wird wesentlich kürzer, wenn die Lithium-Technologie weiter verbreitet wird.^{31,32} Es ist zu erwarten, dass auch die Lithium-Wiedergewinnung mit zunehmender Verbreitung der Li-Batterien steigen wird, aber neue Methoden zu Li-Gewinnung sind sicherlich nötig.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Materialchemiker erforschen schon jetzt die übernächste Generation von Batterie-

materialien, z.B. auf Basis von Natriumsulfid (Na_2S), oder auf der Basis substituierter Kohlenstoffe.

- Materialchemiker verbessern die Effizienz und Lebensdauern von Batterien für eine längere Nutzung: eine 5 – 10fache Verbesserung jetziger Lebensdauern erscheint realistisch.
- Chemiker könnten Technologien zur Gewinnung von Lithium aus den Ozeanen erforschen, z.B. über Hauptgruppen-Koordinationschemie.

Platin

Platin wird im Moment z.B. als Zentralbestandteil von Brennstoffzellen benötigt. (siehe Kapitel 1), ist aber auch Katalysator für wesentliche chemische Transformationen. Auslaugen des Metalls ist ein gängiges Problem in Brennstoffzellenanwendungen, verbunden mit Effizienzverlust, aber auch Umweltbelastung mit dem Edelmetall. Preiswertere und haltbarere Brennstoffzellen aus einfacher zugänglichen Rohstoffen und neue nachhaltige katalytische Prozesse werden dringend benötigt (siehe Kapitel 5). Platin wird auch als Industriekatalysator für verschiedene, sehr wichtige chemische Transformationen in großem Umfang verwendet. Neue katalytische Prozesse, welche auf häufigeren Elementen beruhen, werden hier benötigt.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Chemiker werden Alternativen für Platin in der Brennstoffzelle und katalytischen Anwendungen auf der Basis einfach zugänglicher Elemente entwickeln (z.B. C, N, Fe). Hier sind besonders Stickstoff-dotierte

Graphene von Interesse und besitzen großes Potential.

- Materialchemiker müssen am rationalen Entwurf multimetallischer Systeme, z.B. Legierungen mit vorteilhaften katalytischen Eigenschaften arbeiten.

Indium

Viele der jetzigen Solarzellentechnologien, aber auch viele Geräte- und Computerbildschirme basieren stark auf der Nutzung von Indium als transparentem Elektrodenmaterial. Grundlagenforschung im Bereich transparenter Elektrodenmaterialien wird in den nächsten 5 – 10 Jahren zu nützlichen Alternativen zu Indium führen.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Materialchemiker werden billigere, stabile Materialien für Solarzellen, bessere und billigere Display-Technologien sowie OLEDs entwickeln.
- Neue licht- und temperaturstabile, transparente und elektrisch leitfähige Materialien mit vorteilhaften Eigenschaften für vielfältige Anwendungen werden benötigt.

Seltene Erden

Seltene Erdmetalle werden für Hochleistungsmagnete in vielen Anwendungen gebraucht, z.B. für Hybridfahrzeuge, Windgeneratoren oder in Kommunikationsgeräten. Eine sichere Versorgung mit hochmagnetischen Stoffen ist daher essentiell. Neue magnetische Legierungen und Systeme ohne seltene Erden müssen daher kurzfristig erforscht werden.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Materialchemiker verbessern das Verständnis von Oberflächendiffusion und dem physikalischen Verhalten von magnetischen Materialien.
- Chemiker werden das Verständnis von organischen Komplexen der seltenen Erden verbessern.

im Dezember 2010 seinen „Critical Materials Strategy“ – Report.³⁶

Maßnahmen zur Sicherung einer ausreichenden globalen Versorgung mit seltenen natürlichen Rohstoffen und der Regelung ihrer Nutzung müssen auch in allen anderen Ländern implementiert werden.

Versorgung und Regulierung

Strategien zur Beschaffung und Regulierung der Nutzung seltener natürlicher Rohstoffe werden dringend benötigt. Viele Länder schaffen gerade eine Gesetzgebung, um den Auswirkungen schwindender Ressourcen entgegenzuwirken bzw. diese zu mildern.

Ein Bericht der japanischen Regierung von 2007³³ hat vier Prinzipien für den Umgang mit seltenen Metallen und beschränkt gehandelten Elementen festgelegt: Reduktion, Ersatz, Wiedergewinnung und Regulierung. Auf der Basis dieser Prinzipien hat Japan seine „Elementstrategie“ als eine der wichtigsten Prioritäten für Wissenschaft und Technik definiert.

Ein ähnliches Programm wurde von der EU in 2009³⁴ begonnen. Hier wurde jedoch nur festgestellt, dass viele Informationen über die Reserven an verschiedenen Elementen noch fehlen, und dass diese Information beschafft und systematisiert werden muss.

In Großbritannien wurde im Wissenschaftsausschuss des Parlaments eine Anfrage zur Versorgungssicherheit mit Schlüsselmetallen im November 2010 gestellt, der Bericht an die Regierung wird 2011 erwartet.³⁵ Parallel dazu veröffentlichte das US Department of Energy

5 Nachhaltige Materialien und Prozesse

Die Auswirkungen einer wachsenden Weltbevölkerung schädigen unsere Umwelt. Wir müssen unseren Bedarf an Energie, Materialien und Wasser in einer nicht-umweltschädlichen und nachhaltigen Weise abdecken, die Regeln einer nachhaltigen Chemie nutzend. Materialchemiker können Katalysatoren schaffen, welche nicht auf giftigen oder seltenen Elementen beruhen und die hohe Produktausbeuten bei minimalen Abfällen ermöglichen. Neue industrielle Prozesse sollen entworfen werden, die energie- und wassereffizient sind und gleichzeitig die Umwelt wenig belasten. Neue Technologien zur Überwachung und Entfernung von Verunreinigungen in Luft, Wasser und Boden können entworfen werden, sowohl für die entwickelte als auch für die sich entwickelnde Welt. Eine neue Generation an Kunststoffen wird etabliert, die sicher, wiederverwertbar oder auch völlig bioabbaubar ist, um die Umwelt minimal zu belasten.

Die Herausforderung

Es werden umweltfreundliche Prozesse mit niedrigem Energieverbrauch benötigt, um nicht nur langfristig neue Materialien herzustellen, sondern auch kurzfristig die Produktion existierender Produkte zu verbessern. Diese Prozesse sollten den Regeln der "Green Chemistry" folgen (siehe Kasten). Folgt man

diesen Regeln, sind finanzielle, energetische und stoffliche Einsparungen zu erwarten. Dies macht es für akademische Forschung und Industrie attraktiv, sich in diesem Bereich zu engagieren.

Neue und verbesserte katalytische Prozesse werden benötigt, die bei niedrigeren Temperaturen und Drücken oder in günstigeren

Die Prinzipien der „Green Chemistry“³⁷:

- vermeide Abfall;
- entwerfe sichere Stoffe und Prozesse;
- entwerfe weniger gefährliche chemische Synthesen;
- nutze nachwachsende Rohstoffe;
- nutze Katalysatoren, keine stöchiometrischen Reaktions-Hilfsstoffe;
- vermeide chemische Derivate;
- maximiere die Atom-Ökonomie;
- verwende sichere Lösemittel und Reaktionsbedingungen;
- verbessere die Energieeffizienz;
- entwerfe Stoffe und Produkte, die nach der Nutzung abbaubar sind;
- analysiere in Echtzeit, um Verschmutzung zu vermeiden;
- minimiere das Risiko von Unfällen.

Lösemitteln arbeiten. Ca. 90% aller chemischen Produkte des Alltags werden durch einen katalytischen Prozess hergestellt, und als solches kann die Bedeutung der Katalyse für die moderne Gesellschaft gar nicht hoch genug bewertet werden.³⁸ Neue Ansätze für den katalytischen Prozessentwurf und innovative Methoden werden benötigt, um mögliche Verbesserungen industrieller Prozesse identifizieren zu können.

Die Freisetzung von Luft-, Boden- und Wasserschadstoffen bleibt ein weltweites Problem, besonders in urbanen Bereichen und den kommenden Megastädten. Die bestehende Verschmutzung muss wieder beseitigt und zukünftige Verschmutzung vermieden werden, um zu einem saubereren, lebenswerten Planeten Erde zu gelangen.

Es gibt einen wachsenden Druck, synthetische Materialien aus nachhaltigen Rohstoffen zu entwickeln, die eine nur geringe oder keine langfristige Umweltbelastung bedingen. Materialchemiker können Materialien entwickeln, die all diesen Ansprüchen genügen.

Neue Katalysatoren

Katalysatoren tragen essentiell zu unserem täglichen Leben bei. Anwendungen reichen von der Polymerherstellung über Massenchemikalien (wie Ammoniak, Polyethylen oder Essigsäure) bis hin zur Herstellung von Pharmazeutika oder Anlagen zur Abgasreinigung. Katalytische Prozesse können aber immer noch durch weiteres Absenken der Temperatur, höhere Produktausbeuten, oder die Entfernung schädlicher Nebenprodukte verbessert werden und sollten auf gut verfügbaren Elementen beruhen (siehe auch Kapitel 4).

Spezielle Katalysatoren für die Umsetzung von Biomasse werden benötigt, um Alterna-

tiven zur Chemikalienerzeugung aus Rohöl zu schaffen. Hier müssen ganze Katalysatorfamilien gefunden werden, die biobasierte Moleküle unter Erhalt hoher Effektivität, Aktivität und Selektivität in Wasser umsetzen können.

Immobilisierte (oder verankerte) Katalysatoren haben das Potential, viele industrielle Prozesse zu revolutionieren. Solche Katalysatoren können nach der Reaktion einfach entfernt und wiedergewonnen und so Chemikalien reiner hergestellt werden. Systematischere Ansätze für den Entwurf von neuen Immobilisierungsstrategien werden benötigt, um hier ganz Neues zu ermöglichen.

Wesentliche Durchbrüche bei dem Entwurf neuartiger katalytischer Prozesse und Systeme können schon binnen 5 – 10 Jahren erwartet werden.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Chemiker werden neue Katalysatoren entwickeln, die in Wasser, ionischen Flüssigkeiten und überkritischem CO₂ verwendet werden können (siehe Kapitel 2).
- Wir müssen neue Katalysatoren mit vorteilhafter Aktivität und Selektivität entwickeln, die nicht auf seltenen Elementen basieren.
- Chemiker werden neue lösemittelfreie chemische Umsetzungen entwerfen.
- Neue Katalysatoren zur direkten Umsetzung von Biomasse zu neuen Stoffen und Materialien werden benötigt, um entsprechende petrochemisch hergestellte Produkte zu ersetzen (siehe auch Kapitel 3).
- Systematischere Ansätze für den Entwurf heterogener Katalysatoren werden benö-

tigt, einschließlich katalytischer Cluster und Nanopartikel. Ein wissensbasiertes Design dieser Systeme erlaubt die saubere Produktion von Pharmazeutika und Werkstoffen ohne metallische Verunreinigungen.

Prozessentwicklung

Neue verbesserte Syntheseprozesse mit verbesserter Funktion müssen entworfen werden. Die Probleme des „Scaling-Up“ von Verfahren (von der 100 Milligramm- zur 1 Kilogramm-Skala) müssen sorgfältiger berücksichtigt werden. Die Deaktivierung von Katalysatoren und die Belastung der Umwelt müssen vermieden, Katalysatoren und ungenutzte Startprodukte wiederverwendet werden. Eine breite Modernisierung der Prozesstechnik bedarf nicht nur der interdisziplinären Zusammenarbeit von Wissenschaftlern und Ingenieuren, sondern auch einer Verpflichtung der Unternehmer.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Wir müssen bessere Kontrolle über die Größe, Form, Morphologie, Oberflächenstruktur und Porosität von Materialien gewinnen, um auch breit und in großem Maßstab chemische Funktionalität schaffen zu können.
- Materialchemiker werden neue Prozesse für großskalige Anwendungen schaffen, zum Beispiel für die Herstellung von Solarzellen.
- Neue theoretische Verfahren für die Prozessentwicklung und Modellierungen werden benötigt, um zu besseren industriellen Verfahren zu gelangen.

- Ein verbessertes Verständnis der *in situ* Detektion physikalischer Prozesse wird benötigt, um zu rationalen Verbesserungen zu kommen. So können z.B. verbesserte Werkzeuge der Grenzflächencharakterisierung zu besseren heterogenen Katalysatoren führen.

Detektion, Kontrolle und Minderung von Verunreinigungen

Luftverschmutzung

Die Luftverschmutzung bereitet weiterhin große Probleme für Umwelt und Gesundheit. Sensoren zur Luftanalyse für stationäre, mobile und industrielle Quellen der Verschmutzung müssen entwickelt werden, um die Luftverschmutzung besser zu überwachen. Die Chemie und auch die chemische Industrie sind die Vorreiter dieser Entwicklung und haben schon vielerlei innovative Technologie zur Reduzierung der Luftverschmutzung entwickelt.³⁹ Dennoch sind weitere technologische Durchbrüche sehr willkommen und notwendig.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Materialchemiker entwickeln einfache Methoden, um Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO₂), flüchtige organische Substanzen (VOCs), Ozon (O₃) und Feinstäube auch dezentral zu messen und zu verfolgen.
- Neue industrielle Prozesse und Verfahren der Energieerzeugung, die keinerlei Emissionen dieser genannten Substanzen aufweisen, werden benötigt.
- Materialchemiker werden neue Materialien zur Luftreinigung entwickeln.

Wasserverschmutzung

Die Verfügbarkeit von sauberem und sicherem Trinkwasser in ausreichenden Mengen ist lebenswichtig und eines der größten kommenden Probleme. Die Vereinten Nationen schätzen,^{40,41} dass ungefähr 1.1 Milliarden Menschen, ca. 18% der Bevölkerung, keinen sicheren Zugang zu Trinkwasser haben. Verschmutzungen mit Arsen, landwirtschaftlichen Rückständen, Industrieabfällen und Pharmazeutika sind überall anzutreffende Probleme. Die Probleme rund ums Wasser unterscheiden sich in Industrie- und Entwicklungsländern, und auch die Verschmutzung kann natürlichen und nicht-natürlichen Ursprungs sein. Die Lösungen für die sich entwickelnde Welt müssen einfach und portabel sein.⁴² Es existieren vielerlei Technologien, Verunreinigungen aufzuspüren und zu verringern/zu beseitigen. Diese Lösungen könnten relativ kurzfristig zur Verfügung gestellt werden, multidisziplinäre Forschung und passende industrielle Anreize vorausgesetzt.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Wissenschaftler werden Prozesse entwickeln, um Emissionen an der Quelle zu minimieren.
- Es werden neue Sorptions-, Membran- und Bioabbauverfahren benötigt, um Schadstoffe aus Abwässern zu entfernen.
- Es werden neue analytische Methoden für die kontinuierliche Überwachung der Umwelt und technischer Umgebungen benötigt.
- Materialchemiker entwickeln neuartige, preiswerte Adsorbentien und Filtermaterialien aus nachhaltigen Quellen (siehe Kapitel 4).
- Neue preiswerte Sensoren werden entwickelt, die gleichzeitig viele verschiedene Schadstoffe inklusive Feinstpartikel detektieren können.
- Wissenschaftler und Ingenieure entwickeln Wasser-basierte Prozesse, bei denen das Wasser nach der Nutzung gleich wieder gereinigt wird.
- Neue Prozesse werden benötigt, um organische Verunreinigungen in Abwässern in Energie umzuwandeln (siehe Kapitel 1).

Produktion von Kunststoffen

Eine nachhaltige Quelle für Kunststoffe wird verstärkt benötigt werden, wenn die menschliche Gemeinschaft weiter wächst. In vielen Ländern, aber auch auf den Weltmeeren, ist nicht-biologisch abbaubarer Kunststoffabfall ein großes Problem. Selbst wenn es Prozesse zur Wiederverwertung gibt, so sind diese im Hinblick auf Energie- und Materialverlust oft Ressourcen-ineffizient. Abbaubare Materialien werden zu großen Teilen (aber nicht ausschließlich) aus Bio-basierten Bausteinen bestehen. So wird auch die Abhängigkeit der Kunststoffindustrie von fossilen Rohstoffen vermindert werden (siehe Kapitel 3). Gleichzeitig müssen aber auch vielerorts bessere Recycling-Schemata implementiert werden.

Die Entwicklung von Kunststoffen, die in nützliche oder unschädliche Produkte zerfallen („funktioneller Bioabbau“), sollte hohe Priorität haben. Dabei sollte der komplette Lebenszyklus von Verbraucherprodukten zur Bewertung der tatsächlichen Umweltbelastung analysiert werden. „Bio-basiert“ ist kein Synonym für sicher, und weitverwendete Materialien müssen unbedenklich für Mensch und Umwelt sein. Die jetzt eingeführten Biokunststoffe z.B. stören das jetzige Kunststoffrecycling massiv und können nur schlecht abgetrennt

werden. Eine bessere Erziehung der Öffentlichkeit steigert die Bereitschaft, am Recycling von Wertstoffen teilzunehmen. Die Akzeptanz der Wertstofftrennung ist jedoch stark länderspezifisch: In Deutschland werden 55 Gewichts-% des Abfalls recycelt, bei Metall, Glas und Papier beträgt die Quote sogar über 90%.⁴³

In der nahen Zukunft werden Polymere das beliebteste Produktionsmaterial für viele Gegenstände und Komponenten sein, von Einsätzen in Verpackung über Konstruktion hin zu Konsumenten-Produkten. Kunststoffe werden für preiswerte Produkte benutzt werden, die haltbar und sicher bei ihrer Nutzung sind, während sie schnell in unschädliche Moleküle zerfallen, wenn sie nicht mehr benötigt werden.

Wie kann die Materialchemie hier konkret helfen?

- Materialchemiker werden neue biologisch abbaubare Kunststoffe auf der Basis biologischer Komponenten anstelle von petrochemischen Grundstoffen entwickeln.
- Neue Detektionssysteme und Trenntechnologien werden benötigt, damit (Bio) Kunststoffe identifiziert und recycelt werden können, ohne dass bestehende Abfallkreisläufe gestört werden.
- Chemiker und Biotechnologen werden polymere Bausteine mittels Fermentation und biochemischen Technologien herstellen, die dabei helfen, den Preis solcher Polymere deutlich zu verringern.

Literatur

- 1 *State of the world's cities 2008/2009: Harmonious Cities*, UN-HABITAT, 2008, <http://www.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=2562>
- 2 *Human Development Report 2010*, United Nations Development Programme, 2010, <http://hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2010>
- 3 *Growth isn't possible: why we need a new economic direction*, New Economics Foundation, January 2010, <http://www.neweconomics.org/publications/growth-isnt-possible>
- 4 *The Scientific Century: securing our future prosperity*, Royal Society, March 2010, <http://royalsociety.org/The-scientific-century>
- 5 *Chemistry for Tomorrow's World: a roadmap for the chemical sciences*, Royal Society of Chemistry, July 2009, <http://www.rsc.org/ScienceAndTechnology/roadmap/index.asp>
- 6 *Workshop Report: Chemistry for a Sustainable Future*, National Science Foundation Workshop on Sustainability and Chemistry, June 2006, http://www.chem.uiowa.edu/research/sustainability/2009_reprint_chemistry_sustainable_future.pdf
- 7 *Innovation for a Better Future: Putting Sustainable Chemistry into Action*, SusChem Implementation Action Plan, 2006, [http://www.suschem.org/upl/3/default/doc/SusChem_IAP_final\(1\).pdf](http://www.suschem.org/upl/3/default/doc/SusChem_IAP_final(1).pdf)
- 8 *The economic benefits of chemistry research to the UK*, Oxford Economics, September 2010, <http://www.rsc.org/ScienceAndTechnology/Policy/Documents/ecobenchem.asp>
- 9 *World energy outlook*, International Energy Agency, 2010, www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2010/WEO2010_es_english.pdf
- 10 *Global Oil Depletion: an assessment of the evidence for a near-term peak in global oil production*, UK Energy Research Centre, August 2009, www.ukerc.ac.uk/support/tiki-download_file.php?fileId=283
- 11 *BP Statistical Review of World Energy*, BP, June 2010, <http://www.bp.com/statisticalreview>
- 12 *Statistical Release: 2008 UK carbon dioxide emissions for Local Authority and Government Office region level*, UK Department of Energy and Climate Change, September 2010, http://www.decc.gov.uk/assets/decc/Statistics/climate_change/localAuthorityCO2/464-stat-release-2008-uk-co2-emissions.pdf
- 13 *Energieversorgung der Zukunft (Summary in English)*, December 2009, available from <http://www.dechema.de/studien-path-1,123212.html>
- 14 *Powering the World with Sunlight: a white paper describing the discussions and outcomes of the 1st annual Chemical Sciences and Society Summit (CS3)*, July 2009, http://www.rsc.org/delivery/_ArticleLinking/DisplayHTMLArticleforfree.cfm?JournalCode=EE&Year=2010&ManuscriptID=b924940k&Iss=2
- 15 *Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nanowires*, Hochbaum, A. I. et al., *Nature* 451, 163–167, 2008, <http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7175/abs/nature06381.html>
- 16 *Scaling Up Alternative Energy*, Science Online Special Collection, August 2010, www.sciencemag.org/site/special/energy
- 17 *Climate Change 2007: Synthesis Report*, fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm
- 18 *Clean coal roadmaps to 2030*, IEA Clean Coal Centre, September 2009, http://www.iea-coal.org.uk/publisher/system/component_view.asp?LogDocId=82200&PhyDocId=7212
- 19 *CO₂ Capture, Transport and Storage*, POSTNOTE 335, Parliamentary Office for Science and Technology (POST), June 2009, <http://www.parliament.uk/documents/post/postpn335.pdf>
- 20 „Verwertung und Speicherung von CO₂“ (English version), Dechema, 2009, <http://www.dechema.de/studien-path-1,123212.html>
- 21 *The Energy Bill* (summary), UK Department of Energy and Climate Change (DECC), 2010, http://www.decc.gov.uk/assets/decc/legislation/energybill/1_20100226093333_e_@@_energybillfactsheetsummary.pdf
- 22 *Transformation of Carbon Dioxide*, T. Sakakura, J.-C. Choi, H. Yasuda, *Chem. Rev.* 107, 2365–2387, 2007, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/chin.200736261/full>
- 23 *Methanol: The New Hydrogen*, Technology Review, MIT, 2006, http://www.technologyreview.com/BizTech/wtr_16629,296,p1.html
- 24 *CO as a Refrigerant*, BOC Factsheet, http://www.boconline.co.uk/pdf_downloads/products/products_by_type/r744_co2_refrig_factsheet.pdf
- 25 *Lifecycle Analysis Review*, Chemistry Innovation Knowledge Transfer Network, 2009, <http://www.chemistryinnovation.co.uk/roadmap/sustainable/files/dox/Lifecycle%20Analysis%20review.pdf>
- 26 *Roadmap der Deutschen Katalysatorforschung*, December 2010, <http://www.dechema.de/studien-path-1,123212.html>
- 27 Nobuyuki Kawashima in *“Biopolymers”*, edited by A. Steinbuchel and Y. Doi, Volume 3, Section 9 “Polylactic Acid” pp-251-274, Wiley, April, 2002.

- 28 *Scarcity of Minerals: a strategic security issue*, The Hague Centre for Strategic Studies, January 2010, <http://strategic-metal.typepad.com/strategic-metal-report/2010/10/scarcity-of-minerals-a-strategic-security-issue.html>
- 29 *The story of phosphorus: Global food security and food for thought*, D. Cordell, J.-O. Drangert, S. White, *Global Environmental Change*, 2009, 19, 292–305, http://www.agci.org/dB/PDFs/09S2_TCREWS_StoryofP.pdf
- 30 *Rohstoffbasis im Wandel* (English version), December 2010, <http://www.dechema.de/studien-path-1,123212.html>
- 31 NIMS-EMC Materials Data for the Environment No.8 Characterization Factor in the Category of the „Utilization of Material Resource“, NIMS, 2007
- 32 *Element Outlook*, National Institute for Materials Science, http://www.nims.go.jp/publicity/publication/files/element_outlook.pdf
- 33 *Strategic Proposal Catalog 2004-2010*, CRDS, JST, 2010, <http://crds.jst.go.jp/output/pdf/contents2010.pdf>
- 34 *Critical Raw materials for the EU*, European Commission, 2010, http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/documents/index_en.htm
- 35 *Committee announce new inquiry into strategically important metals*, press release, United Kingdom Parliament, 11 November 2010, <http://www.parliament.uk/business/committees/committees-a-z/commons-select/science-and-technology-committee/news/101111-new-inquiry---strategically-important-metals/>
- 36 *Critical Materials Strategy*, US Department of Energy, December 2010, <http://www.energy.gov/news/documents/criticalmaterialsstrategy.pdf>
- 37 *Green Chemistry, Theory and Practice*, Anastas, P. T.; Warner, J. C., Oxford University Press: New York, 1998, p. 30, <http://www.epa.gov/gcc/pubs/principles.html>
- 38 *Roadmap der Deutschen Katalysatorforschung*, December 2010, <http://www.dechema.de/studien-path-1,123212.html>
- 39 *Innovations for Greenhouse Gas Emission Reductions*, ICCA, 2009, <http://www.icca-chem.org/ICCADocs/LCA-executive-summary-english1.pdf>
- 40 *Water: A Shared Responsibility: The United Nations World Water Development Report 2*, World Water Assessment Programme: Paris and New York, 2006, <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001444/144409e.pdf>
- 41 *Beyond Scarcity: Power, Poverty and the Global Water Crisis*. Human Development Report 2006: United Nations Development Programme, <http://hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2006/>
- 42 *Africa's Water Quality: a chemical science perspective*, Pan Africa Chemistry Network (PACN), 2010, http://www.rsc.org/images/RSC_PACN_Water_Report_tcm18-176914.pdf
- 43 Data in <http://www.agenda21-treffpunkt.de/daten/muell.htm>

Appendix: Teilnehmerliste

Prof. Dr. Dongyuan Zhao	Fudan University, Shanghai (Mitglied des Wissenschaftlichen Komitees)
Prof. Dr. Xiaogang Peng	Zhejiang University, Hangzhou
Prof. Dr. Lei Jiang	Institute of Chemistry, CAS, Beijing
Prof. Dr. Lizhong Zhu	Zhejiang University, Hangzhou
Prof. Dr. Buxing Han	Institute of Chemistry, CAS, Beijing
Prof. Dr. Lin Zhuang	Wuhan University, Wuhan
Prof. Dr. Dr. h.c. Markus Antonietti	Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam-Golm (Mitglied des Wissenschaftlichen Komitees)
Prof. Dr. Walter Leitner	RWTH Aachen
Prof. Dr. Dr. h.c. Bernhard Rieger	Technische Universität München
Prof. Dr. Michael Fröba	Universität Hamburg
PD Dr. habil. Andrea Kruse	Karlsruher Institut für Technologie
Dr. Regina Palkovits	Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mühlheim
Prof. Dr. Kazuhito Hashimoto	University of Tokyo (Mitglied des Wissenschaftlichen Komitees)
Prof. Dr. Hideo Hosono	Tokyo Institute of Technology
Prof. Dr. Eiichi Nakamura	University of Tokyo
Prof. Dr. Takuzo Aida	University of Tokyo
Prof. Dr. Morinobu Endo	Shinshu University
Prof. Dr. Tadahisa Iwata	University of Tokyo
Prof. Dr. Steve Howdle	University of Nottingham (Mitglied des Wissenschaftlichen Komitees)
Dr. Karen Wilson	Cardiff University
Prof. Dr. Andrew Cooper	University of Liverpool
Prof. Dr. Neil Champness	University of Nottingham
Prof. Dr. Ton Peijs	Queen Mary University of London
Prof. Dr. Matt Davidson	University of Bath
Prof. Dr. Tobin Marks	Northwestern University, Illinois (Mitglied des Wissenschaftlichen Komitees)
Prof. Dr. Mike Heinekey	University of Washington, Seattle
Prof. Dr. Vicki Grassian	University of Iowa
Prof. Dr. Emily Carter	Princeton University
Prof. Dr. Luke Achenie	Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg
Prof. Dr. Marc Hillmyer	University of Minnesota, Minneapolis
Dr. Richard Miller	Head of Sustainability, UK Technology Strategy Board

ORGANISATIONSKOMITEE

Prof. Dr. Zhigang Shuai	Chinese Chemical Society and Tsinghua University, Beijing
Dr. Hans-Georg Weinig	Gesellschaft Deutscher Chemiker, Frankfurt am Main
Dr. Markus Behnke	Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn
Dr. Nobuyuki Kawashima	The Chemical Society of Japan, Tokyo
Prof. Dr. Yoshio Okahata	Japan Society for the Promotion of Science, Tokyo
Dr. Richard Pike	Royal Society of Chemistry, London
Dr. James Hutchinson	Royal Society of Chemistry, London
Katie Daniel	Engineering and Physical Sciences Research Council, Swindon
Dr. Brad Miller	American Chemical Society, Washington D.C.
Dr. Katharine Covert	National Science Foundation, Arlington
Dr. Carol Stanier	Science Writer

Herausgeber:

Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V. (GDCh)

Redaktion:

Dr. Hans-Georg Weing

Gesellschaft Deutscher Chemiker

Varrentrappstraße 40 – 42

60486 Frankfurt am Main

E-Mail: h.weinig@gdch.de

Homepage: www.gdch.de

Überarbeitete Fassung, März 2011

Layout und Satz:

PM-GrafikDesign

63607 Wächtersbach

www.pm-grafikdesign.de

Druck:

Seltersdruck GmbH

65618 Selters/Taunus

Das zweite Chemical Sciences and Society Symposium (CS3) wurde wissenschaftlich getragen und organisiert von fünf chemischen Gesellschaften:

American Chemical Society

Chemical Society of Japan

Chinese Chemical Society

Gesellschaft Deutscher Chemiker

Royal Society of Chemistry

und von den fünf nationalen wissenschaftlichen Förderorganisationen unterstützt:

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Engineering & Physical Sciences Research Council (EPSRC)

Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)

National Science Foundation (NSF)

National Science Foundation of China (NSFC)



Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.
Varrentrappstraße 40 – 42
60486 Frankfurt am Main
www.gdch.de