



# SONNENLICHT ALS ENERGIEQUELLE FÜR DIE ERDE

White Paper mit Beiträgen und Ergebnissen  
des ersten Chemical Sciences und Society Symposium (CS3)

**Kloster Seeon · Deutschland · 23. – 25. Juli 2009**

Überarbeitete Fassung, März 2010



Dieses *White Paper* wurde von der Wissenschaftsautorin Leslie A. Pray (PhD) in Absprache mit der Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V. und der American Chemical Society erstellt und durch das Wissenschaftliche Komitee des CS3 überprüft. Der Originaltext wurde in englischer Sprache erstellt.

<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>Forschungsempfehlung</b>	<b>5</b>
<b>Über dieses White Paper</b>	<b>6</b>
<b>I. Umwandlung von Solarenergie in Chemische Kraftstoffe: Was ein Blatt kann, können wir auch</b>	<b>7</b>
Entwicklung von Katalysatoren für die Wasserstoffproduktion	7
Entwicklung von Katalysatoren für die Sauerstoffproduktion	9
Selbst-Heilung: Eine wünschenswerte aber flüchtige Eigenschaft	10
Bau eines "artificialen Blattes": Kopplung von Wasserspaltung und Kohlenstoffdioxid-Reduktion bei der künstlichen Photosynthese	10
– Katalysatoren für die Kohlenstoffdioxid-Reduktion	11
– Kohlenstoffdioxid-Reduktion: Nicht nur für Kraftstoff	11
<b>II. Zugriff auf die in der Biomasse gespeicherte Solarenergie</b>	<b>13</b>
Ist Biokraftstoff eine Lösung?	13
Wege zur Verbesserung der Biokraftstoffproduktion	15
Energie ist eine Größe auf Systemebene	16
Verwendung von Biokraftstoff	17
<b>III. Solarenergie und Elektrizität: Photovoltaik-(PV)-Technologien der nächste Generation</b>	<b>18</b>
Überblick über PV-Technologien: Chemiker suchen nach Wegen der Kostensenkung	18
Existierende und künftige PV-Technologien	19
– PV-Technologie auf der Basis von kristallinem Silizium (c-Si)	19
– Dünnschicht-Solarzellen (DS, engl.: TFSC)	20
– Neue Konzepte in PV-Technologien	22
Suche nach Materialien mit ausreichender Verfügbarkeit	23
Zukunft der PV-Technologien	24
<b>IV. Speicherung von Solarenergie</b>	<b>26</b>
Wege zur Speicherung von Solarenergie	26
Dezentrale Speicherung von Energie	27
Welche Art von chemischem Kraftstoff?	28
Großtechnische netzgebundene Speicherung von Solarenergie	29
<b>Anhang A: Programm</b>	<b>30</b>
<b>Anhang B: Teilnehmerliste</b>	<b>32</b>

# Zusammenfassung

Die Sonnenergie, die in einer einzigen Stunde auf der Erde ankommt, ist größer als die Energiemenge, die die gesamte Menschheit in einem Jahr verbraucht. Mehr noch – für die Erzeugung der Energiemenge einer Stunde Sonnenenergie waren auf der Erde eine Million Jahre notwendig! Eine wachsende Weltbevölkerung mit steigender Lebenserwartung verbraucht immer mehr Energie. Wissenschaftler rechnen mit einer Verdoppelung des Gesamtenergieverbrauchs bis zum Jahr 2050, wenn es beim gegenwärtigen Energiebedarf bleibt. Fossile Brennstoffe sind nicht nachhaltig. Deshalb müssen wir von ihnen unabhängig werden. Hierbei ist die Solarenergie eine der vielversprechendsten Alternativen. Aber – wie können wir diese Energie in der erforderlichen Größenordnung nutzbar machen?

Um die internationale Zusammenarbeit zu fördern und innovative Denkansätze zur Nutzung solarer Energie anzuregen, kamen dreißig führende Wissenschaftler von fünf nationalen chemischen Gesellschaften<sup>2</sup> sowie Vertreter nationaler wissenschaftlicher Förderagenturen jedes Landes im Juli 2009 in Kloster Seeon, Deutschland, zusammen. Das „First Chemical Sciences and Society Symposium“ (CS3) war das erste Treffen dieser neuen, jährlich stattfindenden Reihe von Symposien, bei denen führende Wissenschaftler darüber diskutieren, wie die Chemie zur Lösung der größten derzeitigen Herausforderungen beitragen kann. Die Vorträge, Diskussionen und Ergebnisse des ersten Symposiums bewegten sich um die beiden folgenden Fragen: Wie kann Sonnenenergie in der benötigten Menge gesammelt, umgewandelt und gespeichert werden? Welche drängenden wissenschaftlichen Probleme sind zu lösen, bevor die Solarenergie maßgeblich zur Deckung des Weltenergiebedarfes beitragen kann?

Durch Internationalität und Interdisziplinarität des Symposiums ergeben sich völlig neue

Möglichkeiten zum Austausch von Ideen. Dies ist gerade für die Nutzbarmachung der Sonnenenergie besonders wichtig. In vielen Themenbereichen stimmten die auf verschiedenen Gebieten arbeitenden internationalen Experten fast einhellig überein. Dies belegt nachdrücklich die Bereitschaft der internationalen chemischen Gemeinschaft, gemeinsam die Fragen des globalen Energiebedarfs des 21. Jahrhunderts mit Hilfe der Solarenergie zu lösen.

Genauso wichtig ist es, dass sich nationale und internationale Energieinitiativen stärker der zentralen Rolle der Chemie bewusst werden, die notwendig ist, um das Potential der Sonnenenergie zu nutzen. Denn die Umwandlung chemischer Energie ist immer mit einer chemischen Reaktion verbunden. Deshalb ist das Verständnis der molekularen Eigenschaften dieser chemischen Reaktionen unerlässlich, um neue finanzierbare und nachhaltige Materialien und Prozesse zu entwickeln, die zur Steuerung dieser Reaktionen dienen.

<sup>2</sup> Chinese Chemical Society; Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.; Chemical Society of Japan; Royal Society of Chemistry; American Chemical Society. Das Treffen wurde von nationalen wissenschaftlichen Förderorganisationen der fünf Länder unterstützt: National Science Foundation China; Deutsche Forschungsgemeinschaft; Japan Society for the Promotion of Science; UK Engineering and Physical Sciences Research Council; U.S. National Science Foundation.

Neben mehreren übergreifenden Themen, die sich im Laufe des zweieinhalbtägigen Dialoges herausbildeten, erarbeiteten die CS3-Teilnehmer drei Schlüsselbotschaften:

- **Die Wissenschaft von heute ist die Technologie von morgen:** Es gibt keine „beste Lösung“ des Energieproblems. Wissenschaft und Gesellschaft müssen nach finanzierbaren, nachhaltigen Antworten auf die globale energetische Herausforderung suchen, indem sie alle Optionen der Folgegeneration untersuchen und berücksichtigen. Es ist schwer voraussagbar, wie sich Forschungsergebnisse und daraus entstehende technologische Innovationen in Zukunft entwickeln.
- **Investition in die chemische Forschung ist Investition in die Zukunft:** Eine starke Grundlagenforschung in Chemie ist unabdingbar, um das Potential der Solarenergie nutzbar zu machen. Neue Mate-

rialien und neue Prozesse sind essenziell, damit Solarenergie eine finanzierbare Option für einen wesentlichen Beitrag zur Energieversorgung wird.

- **Die Chemiestudenten von heute sind die Energiewissenschaftler von morgen:** Die Gesellschaft braucht eine neue Generation von Energiewissenschaftlern – junge Menschen, die sich für die Erforschung von innovativen Wegen begeistern, Sonnenenergie einzufangen, umzuwandeln und zu speichern. Energietechnologien für eine Versorgung mit solarer Energie in großem Maßstab zu entwickeln und zu optimieren, ist ein Langzeitprojekt. Junge Wissenschaftler sollten ermutigt werden, sich der ganzen Bandbreite wissenschaftlicher Herausforderungen zu stellen, die noch gelöst werden müssen, bevor man das gewaltige Potential der Solarenergie ausschöpfen kann.

## Forschungsempfehlung

Die Silizium-basierte photovoltaische (PV) Zelle ist die am weitesten verbreitete Art, Sonnenenergie zu nutzen. Allerdings verhindern Kosten von hoch gereinigtem Silizium ihren weit verbreiteten Einsatz. Unabhängig von der Effizienz einer Energieumwandlungstechnologie wird ein großer Teil der Welt diese nicht nutzen können, wenn sie nicht bezahlbar ist. Zum Abschluss des Symposiums diskutierten die Teilnehmer die bedeutendsten Herausforderungen sowie die vorrangigsten Forschungsziele auf vier Gebieten der Solarenergieforschung. Nahezu alle Ziele beinhalten die Notwendigkeit, nicht nur effiziente, sondern auch finanzierbare Technologien der Solarenergie zu entwickeln:

- (1) **Umwandlung von Solarenergie in chemischen Kraftstoff:** Künstliche Photosynthese ist jeder Prozess, der solare Energie in chemische Energie umwandelt und Pflanzen während der Photosynthese kopiert. Bevor die Künstliche Photosynthese eine finanzierbare, nachhaltige Lösung für einen weit verbreiteten Einsatz wird, müssen Chemiker
  - **chemische Katalysatoren für die beiden Kernprozesse der künstlichen Photosynthese entwickeln – die Spaltung von Wasser und die Kohlenstoffdioxid-Reduktion – , die kommerziell genutzt werden können und die aus finanzierbaren auf der Erde reichlich vorhandenen Materialien bestehen,**

- ein **“artifizielles Blatt”** entwickeln, indem sie die **Wasserspaltung und die Kohlenstoffdioxid-Reduktion** derart koppeln, dass ein **externer Elektronendonator** unnötig ist.

**(2) Auf die in der Natur schon vorhandene Solarenergie zugreifen:** Durch Biokraftstoffe, die nicht aus Feldfrüchten, sondern aus anderer Biomasse gewonnen werden, ist der Zugriff auf das enorme Reservoir an solarer Energie möglich, die schon auf natürlichem Wege in Pflanzenmasse umgewandelt wurde. Bevor Biokraftstoff eine finanzierbare nachhaltige Energiequelle für einen weit verbreiteten Einsatz wird, müssen Chemiker

- **geeignete biochemische Methoden entwickeln, die mehr Biomasse hervorbringen, und katalytische Prozesse entwickeln, die die Effizienz der Umwandlung von Biomasse verbessern.**

**(3) Umwandlung von Solarenergie in Elektrizität:** Der weit verbreitete Gebrauch von Silizium-basierten photovoltaischen Zellen, welche Solarenergie direkt in Elektrizität

umwandeln, ist durch deren hohe Kosten begrenzt. Bevor PV-Zellen finanzierbar und nachhaltig werden, müssen Chemiker

- **preiswerte, ungiftige und auf der Erde in genügendem Maße verfügbare PV-Materialien für den Einsatz von PV-Zellen der nächsten Generation entwickeln.**

**(4) Speicherung der neu gewonnenen Solarenergie:** Wir müssen Systeme entwickeln, die nicht nur den Solarbrennstoff in andere Energieformen umwandeln, sondern auch die umgewandelte Energie für einen zukünftigen Gebrauch speichern. Dies ist besonders kritisch in Gebieten ohne ein zentralisiertes Versorgungssystem. Bevor preiswerte nachhaltige solare Speichersysteme gebaut werden können, müssen Chemiker

- **neue Katalysatoren und Materialien aus preiswerten und auf der Erde in genügendem Maße vorhandenen Elementen entwickeln, die für den Bau von finanzierbaren, nachhaltigen Solarenergie-Transformations- und Speichersystemen geeignet sind.**

## Über dieses White Paper

Dieses White Paper behandelt zusammenfassend die Hauptthemen und Ergebnisse des ersten CS3, mit besonderem Augenmerk auf die vier oben genannten Themenfelder: Kapitel I konzentriert sich auf die Umwandlung von Solarenergie in chemischen Kraftstoff (z. B. Spaltung von Wasser und Kohlenstoffdioxid-Reduktion), Kapitel II auf die Umwandlung von Biomasse in Biokraftstoff, Kapitel III auf die

Umwandlung von Solarenergie in Elektrizität (z. B. PV- oder Solarzellen) und Kapitel IV auf die Speicherung von Solarenergie. Das CS3-Programm findet sich im Anhang A und die Teilnehmerliste in Anhang B. Dieses Papier soll nicht als umfassender Bericht der vielen Details gesehen werden, die im Laufe der zweieinhalb Tage angesprochen wurden, noch enthält es alle Kommentare der CS3-Teilnehmer.

# I. Umwandlung von Solarenergie in chemische Kraftstoffe: Was ein Blatt kann, können wir auch<sup>3</sup>

Pflanzen nutzen ständig solare Energie – sie fangen das Licht ein und wandeln es durch Photosynthese in chemischen Kraftstoff um. In der Sprache des Chemikers ist Photosynthese die Umwandlung von Wasser und Kohlenstoffdioxid in Kohlenhydrate und Sauerstoff. Die tatsächliche Umwandlung umfasst mehrere Reaktionen. Die beiden Hauptreaktionen sind die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff („Wasserspaltung“) und die Reduktion von Kohlenstoffdioxid unter Verwendung der Elektronen, die während der Wasserspaltung freigesetzt werden („Kohlenstoffdioxid-Reduktion“<sup>4</sup>). Die Frage ist, können Chemiker diesen Prozess nachahmen, der in Pflanzen auf natürlichem Wege abläuft?

Tatsächlich haben Chemiker im Großen und Ganzen die Funktionsweise dieser Einzelreaktionen erforscht. Im Wesentlichen haben sie also die Photosynthese nachgebildet. Es ist jedoch nicht nur sehr schwierig, diese verschiedenen Reaktionen in einem ganzheitlichen System, also miteinander verzahnt, durchzuführen, sondern auch noch derart, dass eine großtechnische kommerzielle Nutzung möglich wird. Beispielsweise haben Wissenschaftler erst kürzlich eine Reaktion zur Sauerstoff-Produktion entwickelt, deren

breiter Einsatz finanzierbar ist. Die meisten gegenwärtigen Produktionsmethoden für Sauerstoff basieren auf der Verwendung von teuren Platin-Katalysatoren.

Die Diskussion um die Umwandlung von solarer in chemische Energie bewegt sich schwerpunktmäßig um laufende Forschungsvorhaben mit dem Ziel, kostengünstige Katalysatoren für die verschiedenen photosynthetischen Reaktionen zu entwickeln. Das erste Kapitel fasst die Diskussionen zusammen.

## Entwicklung von Katalysatoren für die Wasserstoffproduktion

Kazunari Domen, University Tokyo, Japan, eröffnet die Sitzung, indem er die derzeitigen Forschungsvorhaben für die Entwicklung effizienterer und erschwinglicherer Produktionskatalysatoren beschreibt, die eine neue Form der Technologie zur Wasserspaltung nutzen, die so genannte „photokatalytische

Gesamtwasserspaltung“ (engl.: photocatalytic overall water splitting). Diese Technologie nutzt nanostrukturierte photokatalytische Teilchen in Lösung: Die katalytischen Reaktionen und damit die Produktion von Wasserstoff und Sauerstoff kommen durch den Kontakt mit diesen Teilchen zustande.

<sup>3</sup> Dieser Abschnitt fasst die Vorträge und Diskussionen während der ersten Sitzung des CS3 „Künstliche Photosynthese, Photokatalytische Spaltung von Wasser, CO<sub>2</sub> Fixierung“ zusammen, die von Dr. Haruo Inoue, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, organisiert wurde.

<sup>4</sup> Eine Reduktion erfordert einen Elektronendonator. Bei der natürlichen Photosynthese dient Wasser als Elektronendonator.

Dies unterscheidet sich von herkömmlichen Ansätzen, die voneinander getrennte katalytisch-beschichtete Elektroden für die Wasserstoff- und Sauerstoff-Produktion verwenden. Der entscheidende Vorteil dieser photokatalytischen Wasserspaltung ist die Verwendung von kostengünstigeren Materialien, verglichen mit denen in photoelektrochemischen Zellen (PEC). Dadurch kann für eine breite Anwendung kostengünstiger kalkuliert werden.

Zunächst erläutert Domen die beiden herkömmlichen Technologien zur Wasserspaltung. Die erste kombiniert eine photovoltaische Zelle (diese wird oft „Solarzelle“ oder einfach PV genannt; s. Kap. III) mit einem Elektrolysegerät. Dabei absorbiert die PV die Sonnenenergie und wandelt sie in Elektrizität um, die dann für die Elektrolyse von Wasser, also die Wasserspaltung, genutzt wird. Er erwähnt, dass Honda diesen ersten Ansatz über mehrere Jahre nutzte, um eine experimentelle „solar-angetriebene wasserelektrolysierende Wasserstoff-Tankstelle“ zu entwickeln, an der mit Wasserstoff angetriebene Autos „auftanken“ könnten. Die zweite Technologie verwendet eine photoelektrochemische Zelle (PEC), die beide Komponenten, also die PV und das Elektrolysegerät, enthält. Diese Kombination der chemischen Prozesse – Nutzung von Licht und Wasserspaltung – in einem Gerät (PEC-Zelle) ermöglicht eine unkompliziertere und kostengünstigere Möglichkeit, Solarenergie für die Wasserspaltung zu nutzen. Domen verweist auf mehrere Beispiele für diesen zweiten Ansatz.

Beide konventionellen Ansätze sind weiter fortgeschritten als die „photokatalytische Gesamtwasserspaltung“, die nach Domen immer noch in der Entwicklung steckt und für eine kommerzielle Nutzung bisher nicht ge-

eignet ist. Denn während es bereits beispielsweise PEC-Zellen mit einer solaren Energieumwandlungseffizienz von fünf Prozent gibt, erreicht man mit der neuen Methode bestenfalls etwa eine Effizienz von ein bis fünf Prozent. Domen sagt voraus, dass es weitere zehn Jahre Entwicklung braucht, um die mittlere solare Energieumwandlungseffizienz auf fünf Prozent zu erhöhen. Dies liegt unter anderem daran, dass die meisten photokatalytischen Materialien nur durch ultraviolettes Licht und nicht durch sichtbares Licht aktiviert werden<sup>5</sup>. Er beschreibt die derzeitigen Anstrengungen seiner und anderer Forschungsgruppen, neue Materialien zu entwickeln, die bei sichtbarem Licht effizient sind. So hat zum Beispiel sein Arbeitskreis nach Untersuchung einer Reihe von Metalloxiden eine gute Photoaktivität bei einer Mischung aus Galliumnitrid und Zinkoxid nachgewiesen.

Nach Domens Ausführungen schließen sich einige ergänzende Kommentare über technische Einzelheiten der Wasserstoff-Produktion an. Haruo Inoue, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, erläutert auf molekularer Ebene, wie die in der Wasserstoff-Produktion verwendeten Elektronen während der Wasserspaltprozesses aus Wasser gewonnen werden. Er argumentierte, dass der Ansatz einer Zwei-Elektronen-Oxidation bei der photochemischen Wasserspaltung vielversprechender sein kann als der Ein- oder Mehrelektronenansatz, um künstliche photosynthetische Systeme zu entwickeln, die Wasser als Elektronendonator verwenden (also anstelle eines anderen externen Elektronendonators). Chen-Ho Tung und Can Li, Chinesische Akademie der Wissenschaften, diskutieren die detaillierte Chemie der Wasserstoff-Produktion während der Wasserspaltung.

<sup>5</sup> Ein Teil des Sonnenlichts liegt im UV-Bereich (<400 nm), der größte im sichtbaren Bereich (400-800 nm).

## Entwicklung von Katalysatoren für die Sauerstoffproduktion

Während der folgenden Sitzung zum Thema „Biomasse“, soweit sie für die Wasserspaltung relevant ist (s. Kap. II), gibt James Barber, Imperial College London, Großbritannien, eine kurze Übersicht über die Geschichte der Wasserspaltung, angefangen mit der Arbeit von Bessel Kok in den späten 1960er Jahren. Die Grundlagen der Wasserspaltung zu verstehen – etwa wo und wann sich Sauerstoff-Moleküle bilden – war für Jahrzehnte Thema intensiver Studien. Anschließend erläutert er die jüngsten Forschungsergebnisse seines Teams, das die erste vollständige Struktur derjenigen Schlüsselproteinkomplexe aufgeklärt hat, die an der Sauerstoff-Produktion während der Wasserspaltung beteiligt sind (PSII). Das Team identifizierte sowohl die Größe als auch den Mangan- und Kalziumgehalt von PSII und ermöglicht damit endlich einen kurzen Blick auf die Maschinerie, die auf diesem Planeten seit 2,5 Milliarden Jahren arbeitet.

Wie Barber und später während des Symposiums (s. Kap. IV) Daniel Nocera einhellig bestätigten, hat Barbers Aufklärung der Struktur von PSII Nocera und seiner Forschergruppe am Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Mass., U.S.A, den Weg gewiesen bei ihren Arbeiten zu einem künstlichen wasserspaltenden System, das auf einem neuartigen Kobalt-basierten Sauerstoff-Produktionskatalysator basiert. Noceras Gruppe konnte zeigen, dass durch Zugabe von Kobaltionen und gelöstem Kaliumphosphat zu einer Indium-Zinnoxid-Elektrode und Anlegen von elektrischem Strom, die kontinuierliche Herstellung von Sauerstoff möglich ist. Wenn Strom durch die Lösung fließt, sammeln sich Kobalt, Kalium und Phosphat auf der Elektrode und bilden einen amorphen Ka-

talysator, der die Sauerstoff-Produktion während der Wasserspaltung antreibt. Gleichzeitig bildet sich Wasserstoff an einer separaten Platin-beschichteten Elektrode<sup>6</sup>.

Nocera weist auf die bemerkenswerten Ähnlichkeiten sowohl der katalytischen Funktion als auch des Selbstaufbaus zwischen dem Kobaltkatalysator und dem natürlich bestehenden Mn-basierten Proteinkomplex hin. Beide Komplexe haben die gleiche Grundstruktur mit dem Unterschied, dass der synthetische Katalysator Kobalt anstelle von Mangan enthält. Entscheidend ist, dass sich der synthetische Katalysator selbst aufbauen – organisieren – kann (und wieder abbauen). Damit ist es weder notwendig, während der Wasserspaltung neues Rohmaterial zuzufügen, noch die Reagenzien am Ende der Reaktion zu entsorgen. Genau wie PSII baut sich der Katalysator laufend ab und auch wieder auf. Da PSII nicht sehr stabil ist, laufen in Pflanzen etwa alle 30 Minuten Reparaturmechanismen ab.

Während die von Noceras Gruppe gezeigte Wasserspaltung an und für sich keine neue Errungenschaft ist, so ist doch die Verwendung eines kostengünstigen (also nicht Platin-basierten) Katalysators zumindest für die Sauerstoff-Halbreaktion bemerkenswert. Nocera sagt, wenn es Chemikern gelingt, eine kostengünstige Methode der Wasserspaltung mithilfe der Sonnenenergie zu entwickeln und Wasserstoff herzustellen, ist die Gesellschaft durch die im Sekundentakt erfolgende Spaltung eines Drittel des Wassers im MIT-Schwimmbad in der Lage, die Welt anzutreiben. Ein unwiderstehliches Bild.

6 Zur Wasserstoff Katalysator Komponente seines Wasserspaltungssystems befragt, erwähnte Nocera, dass er und sein Team Legierungen aus Nickel im Vergleich zur normalerweise verwendeten übermäßig teuren Platin-basierten – Elektrode entwickelt haben, aber noch keine Aussage über gute oder bessere Eignung möglich seien.

### **Selbst-Heilung: Eine wünschenswerte, aber flüchtige Eigenschaft**

Mit Bezug auf Noceras Betonung der Bedeutung der Selbstorganisation nennt Kazuhito Hashimoto, University of Tokyo, Japan, während dieser Sitzung zwei wünschenswerte Aspekte jeder PV-Technologie der nächsten Generation: Erstens die Fähigkeit des Selbstaufbaus oder der Reorganisation und zweitens die Fähigkeit der Selbstheilung. Da die maximale Effizienz der natürlichen Photosynthese bei nur etwa viereinhalb bis fünf Prozent (s. Kap. II) liegt, sind künstliche Systeme schon heute "besser" als die natürliche Photosynthese bezüglich der solaren Energieumwandlung. Allerdings fehlt künstlichen Systemen offensichtlich etwas, was es in der Natur gibt – insbesondere die Fähigkeit

der Selbstorganisation und der Selbstheilung. Hashimoto beschreibt ein „Reisfeld-Energieerzeugungssystem“, das mikrobielle Treibstoffzellen nutzt (Bakterien zur Umwandlung von Biomasse in Treibstoff), um gespeicherte Kohlenwasserstoffe in Elektrizität umzuwandeln. Unter den richtigen Bedingungen kann dieses System aus eigener Kraft überleben und erfüllt damit das erste Kriterium – Selbstorganisation – eines natürlichen Systems. Aber er und seine Kollegen müssen erst noch lernen, wie man ein System baut, das auch das zweite Kriterium – Selbstheilung – erfüllt. Derzeit liegt der Umwandlungskoeffizient dieses Systems bei nur 0.3 Prozent, obgleich Hashimoto sagt, dass durch Verbesserung technischer Komponenten eine zehnfache Verbesserung möglich ist.

### **Bau eines „artificialen Blattes“: Kopplung von Wasserspaltung und Kohlenstoffdioxid-Reduktion bei der künstlichen Photosynthese**

Domen gibt an, dass das ultimative Ziel künstlicher Photosynthese die Kombination von Wasserspaltung und von Reaktionen mit Kohlenstoffdioxid-Reduktion ist. So können die während der Wasserspaltung frei werdenden Elektronen genutzt werden, um die Kohlenstoffdioxid-Reduktion anzukurbeln und flüssigen Kraftstoff wie etwa Methanol zu erzeugen. Gelingt dies, dann hat man die Vision eines „künstlichen Blattes“ realisiert – einem Gerät, das nicht nur Wasser spaltet, sondern auch die Spaltprodukte nutzt, um besser verwendbaren organischen Kraftstoff zu erzeugen und damit das nachahmt, was Blätter tun.

Wie Haruo Inoue, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, erläutert, ist die Kopplung von Wasserspaltung und Kohlenstoffdioxid-Reduktion, die die bei der Wasserspaltung frei werdenden Elektronen zur Kohlenstoffdioxid-

Reduktion nutzt, ein ideales System sowohl aus der Sicht der Energieumwandlung als auch aus der Sicht der „Elementzirkulation“. Ein künstliches Blatt erfordert weder Energie (also keine andere als die von der Sonne zu Verfügung gestellte) noch emittiert es Kohlenstoffdioxid. Die Kohlenstoffdioxid-Reduktion muss jedoch nicht mit Wasserspaltung gekoppelt werden, um für die Kraftstoffproduktion genutzt werden zu können. Unglücklicherweise wird der Wasserstoff, der in den meisten derzeit funktionierenden Kohlenstoffdioxid-Reduktionsprozessen verwendet wird, durch Dampfreformierung von Methanol hergestellt, was nicht nur Energie erfordert (derzeit in Form fossiler Brennstoffe), sondern auch Kohlenstoffdioxid emittiert.

Etsuko Fujita, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, stimmt überein,

dass zumindest ein übergreifendes Ziel der Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der künstlichen Photosynthese die Kombination von Kohlenstoffdioxid-Reduktion mit der Spaltung von Wasser ist. Sie beschreibt eine Zukunftsvision, in der Kohlenstoffdioxid in fossilen Kraftstoff verbrennenden Anlagen, vor der Übertragung in die Atmosphäre, eingefangen und dann unter Verwendung von Elektronen (und Protonen) während der Wasserspaltung reduziert wird. Es besteht keine Notwendigkeit eines externen Elektronendonators. Aber die Herausforderung bleibt gewaltig. Fujita und Anthony Harriman, Newcastle University, Großbritannien, diskutieren, dass die Kombination der beiden Teile, die ein Blatt ausmachen, das Zusammenfügen verschiedener komplizierter Mehrelektronenreaktionen erforderlich mache.

Bis jedoch die Wasserstoff-Produktion mit der Kohlenstoffdioxid-Reduktion gekoppelt werden kann, entwickeln Chemiker Systeme, die Wasserstoff als Endprodukt nutzen. Zum Beispiel beschreibt Nocera, wie sein Kobalt-basierter Sauerstoff-Katalysator in ein größeres PV-Treibstoff-Zellensystem für die Produktion und Speicherung von Wasserstoffkraftstoff integriert werden kann: Der bei der Wasserspaltung entstandene Wasserstoff wird als Treibstoff verwendet (in einer Brennstoffzelle, wo er mit Sauerstoff für die Erzeugung von Energie reagieren könnte). Eine Kohlenstoffdioxid-Reduktion ist nicht an diesem Ablauf beteiligt. Ein erster Schritt zur Verwirklichung dieser Vision ist die Zusammenarbeit von Nocera mit Sharp Electronics, um nach einer Möglichkeit zu suchen, das System in Sharps PV-Technologie zu integrieren.

### **Katalysatoren für die Kohlenstoffdioxid-Reduktion**

Wie Koji Tanaka, Institut für Molekularwissenschaften, Okazaki, Japan, und andere Teilnehmer diskutieren, wird der Bau eines künstlichen Blattes die Entwicklung besserer Katalysatoren erfordern, nicht nur für die Wasserstoff- und Sauerstoff-Produktion, sondern auch für die Kohlenstoffdioxid-Reduktion. Tatsächlich weist Can Li, Chinesische Akademie der Wissenschaften, Beijing, China, darauf hin, dass das „Erreichen der Kohlenstoffdioxid-Reduktion“ drängender ist als die „Lösung der Wasserspaltung“. Fujita stimmt darin überein, dass genau wie bei der Wasserstoff- und Sauerstoff-Produktion Chemiker auch noch die Katalyse der Kohlenstoffdioxid-Reduktion optimieren müssen. Sie beschreibt, wie sowohl Osamu Ishitanis Gruppe am Tokyoter Technologieinstitut, Japan, und ihre Gruppe, in den letzten 20 Jahren an der Reduktion von Kohlenstoffdioxid gearbeitet haben. Ishitanos Team hat kürzlich einen neuartigen Ruthenium-Rhenium-Photokatalysator entwickelt, aber einige Herausforderungen sind noch ungelöst. Zum Beispiel dauert die Kohlenstoffdioxid-Reduktion mit zehn Stunden übermäßig lang, bedingt durch die extreme Stabilität der Kohlenstoffdioxid-Moleküle und die Instabilität des Katalysators. Li sagt, ein anderes Problem ist, dass das Kohlenwasserstoff-Endprodukt der Kohlenstoffdioxid-Reduktion sehr schnell reoxidiert wird und damit die gesamte Kohlenwasserstoff-Ausbeute gering ist. Er betont die Notwendigkeit, natürliche Systeme zu untersuchen, um dies zu vermeiden.

### **Kohlenstoffdioxid-Reduktion: Nicht nur für Kraftstoff**

Ob gekoppelt an Wasserspaltung oder nicht, für die Kohlenstoffdioxid-Reduktion gibt es neben der Kraftstoffherstellung noch andere

Anwendungen. Tatsächlich wird Kohlenstoffdioxid oft als Ausgangsstoff für die Produktion einer breiten Palette anderer Produkte verwendet, einschließlich Harnstoff (eine wichtige Komponente der Stickstoffdünger), Salicylsäure (eine pharmazeutische Chemikalie), cyclische Carbonate, Ethylen- und Propylen-Polycarbonate sowie Polyurethane. Es wurde in der Vergangenheit vorgeschlagen, die chemische Industrie könne durch Verwendung von Kohlenstoffdioxid als chemischem Ausgangsstoff sowie während der Herstellungsprozesse zur Minderung des Kohlenstoffdioxid-Gehalts der Atmosphäre beitragen. Tatsächlich aber ist, wie sowohl Fujita als auch Walter Leitner vom Institut für Technische und Makromolekulare Chemie, Aachen diskutieren, der Kohlenstoffdioxid-Verbrauch

klein gegenüber dem gesamten Kohlenstoffdioxid-Ausstoß. Die chemische Industrie nutzt das Äquivalent von weniger als 0.5 Prozent des gesamten vom Menschen verursachten Kohlenstoffdioxid-Ausstoßes. Darüber hinaus müssten viele Polymer-Produkte, die theoretisch durch den Einsatz von Kohlenstoffdioxid als Ausgangsmaterial hergestellt werden könnten, haltbarer gemacht werden, bevor man sie großtechnisch herstellen kann. Es sei klar, argumentiert Fujita, dass wir uns nicht auf den Kohlenstoffdioxid-Einsatz in der chemischen Industrie verlassen können, um die Kohlenstoffdioxid-Emission aus der Verbrennung von fossilem Kraftstoff zu mindern. Leitner weist darauf hin, weil der Kohlenstoffdioxid-Verbrauch der chemischen Industrie den Kohlenstoffdioxid-Ausstoß von fossilen Treibstoff nicht mindern könne, sei die Frage nicht: „Wie viel Kohlenstoffdioxid sind wir in der Lage zu binden?“ Die Frage sei eher: „Was unterscheidet den Gebrauch von Kohlenstoffdioxid gegenüber einem anderem Ausgangsmaterial bei der Produktfertigung?“ Anstrengungen sollen darauf gerichtet sein, über eine Wertschöpfung bei der Verwendung von Kohlenstoffdioxid als Ausgangsstoff für die Chemie nachzudenken und nicht über die Verwendung von Kohlenstoffdioxid als Rohmaterial zur Minderung der Kohlenstoffdioxid-Gesamtemission.

## Umwandlung von Solarenergie in chemischen Kraftstoff

Künstliche Photosynthese ist jeder Ablauf, der Solarenergie in chemische Energie umwandelt und dabei Pflanzen während ihrer natürlichen Photosynthese nachahmt. Welche Ziele müssen erreicht werden, bevor künstliche Photosynthese eine finanzierbare nachhaltige Lösung für den breiten Gebrauch wird? Im Laufe der Schlussitzung des CS3 identifizierte eine Wissenschaftlergruppe die dringlichsten wissenschaftlichen Herausforderungen:

**Entwicklung chemischer Katalysatoren für die beiden Hauptprozesse der künstlichen Photosynthese – Spaltung von Wasser und Kohlenstoffdioxid-Reduktion – die für eine kommerzielle Anwendung geeignet sind und aus finanzierbaren, auf der Erde im Überfluss vorhandenen Materialien bestehen.**

**Bau eines “künstliches Blattes” durch die Kopplung von Wasserspaltung und Kohlenstoffdioxid-Reduktion unter Vermeidung eines externen Elektronendonators.**

## II. Zugriff auf die in der Biomasse gespeicherte Solarenergie<sup>7</sup>

In seinem Eröffnungsvortrag zur zweiten Sitzung der CS3 beschreibt James Barber, Imperial College London, Großbritannien, den Planeten Erde als ein durch einen photosynthetischen Prozess angetriebenes „makroskopisches Reaktionsgefäß“, das seit nunmehr 2.5 Milliarden Jahren arbeitet. Weder die Pflanzenmasse auf der Erde noch die fossilen Brennstoffe unterhalb der Erdoberfläche würden ohne Photosynthese – also ohne Umwandlung von Solarenergie in Kohlenwasserstoffe – existieren. Obwohl viele Länder diese Ressourcen bereits existierender, natürlich umgewandelter Sonnenenergie anzapfen, ist es ungewiss, in welchem Ausmaß aus pflanzlicher Biomasse gewonnener Kraftstoff („Biokraftstoff“) den Weltenergiebedarf zu decken vermag. Ein Großteil der Diskussion dreht sich um diese Ungewissheit sowie um die Möglichkeiten, die Produktion von Biokraftstoff zu verbessern. Dieses Kapitel fasst diese Diskussion zusammen.

### Ist Biokraftstoff die Lösung?

Die CS3-Teilnehmer stimmen darin überein, dass mit Biomasse allein das globale Energieproblem nicht zu lösen ist. Wie Barber erläutert, wird die Nutzung von Biomasse durch zwei Faktoren begrenzt. Erstens ist die Photosynthese ein verhältnismäßig ineffizienter Prozess, bei dem die meisten Pflanzen nicht mehr als höchstens 4.5 Prozent der absorbierten Sonnenenergie in Biokraftstoffe umwandeln können. (Eine anschließende Diskussion befasst sich mit dem sehr optimistischen Koeffizienten der Energieumwandlung von 4.5 Prozent. Einige Teilnehmer sagen einen wesentlich kleineren solaren Umwandlungskoeffizienten bei Pflanzen voraus. Es wird nicht nur viel von dem eintreffendem Licht reflektiert, also nicht absorbiert, sondern die Photosynthese erreicht bei hoher Lichtintensität eine Sättigung. Barber erläutert, dass der Wert von 4.5 Prozent ein Maximum ist. Der Umwandlungskoeffizient schwankt je

nach Zeit und Pflanzenart. Zum Beispiel ist die Umwandlung von Lichtenergie in chemische Bindungen während der Wachstumsdauer viel höher, so dass Pflanzen zu gewissen Zeiten schneller Biomasse ansammeln. Hinzu kommt, dass einige Pflanzen bei einer vorgegebenen Lichtmenge infolge ihrer genetischen Veranlagung mehr Biomasse als andere akkumulieren.) Deshalb müssen die Umwandlungskoeffizienten angebaute Pflanzen zur Gewinnung von Biomasse durch genetische oder biochemische Techniken erhöht werden, bevor Biokraftstoff in großem Umfang praktisch angewendet werden kann.

Zweitens erfordert die Erzeugung von Kraftstoff aus Biomasse Agrarland. Der Umfang, in dem auf der Erde Lichtenergie in Biomasse, also in chemische Bindungen umgewandelt wird, entspricht etwa 100 Terawattstunden<sup>8</sup> pro Jahr. Dies ist nicht viel, merkt Barber an,

<sup>7</sup> Dieser Abschnitt fasst Höhepunkte der Vorträge und Diskussionen während der zweiten Sitzung des CS3 „Von Solarer Strahlung zur Energiegewinnung mittels Biomasse“ zusammen, die von Dr. Laurie Peter, Universität Bath, Großbritannien, organisiert wurde.

<sup>8</sup> Ein Terawatt (TW) ist eine Trillion oder  $10^{12}$  Watt. Eine Terawatt Stunde (TWh) ist ein Maß der Gesamtenergie über die Zeit.

wenn man den globalen Energieverbrauch von jährlich 14 Terawattstunden bedenkt, zumal sich dieser Wert bis 2050 wahrscheinlich verdoppeln wird. Er sagt, es sei unrealistisch anzunehmen, dass 2050 ein Drittel der gesamten irdischen Biomasse für Biokraftstoff nutzbar gemacht werden könne. Dies weist wieder auf die Notwendigkeit hin, den solaren Umwandlungskoeffizienten bei der Herstellung von Biokraftstoffen zu erhöhen.

Obgleich die Produktion von Biokraftstoff möglicherweise keine praktikable globale Lösung ist, sind sich CS3-Teilnehmer einig darüber, dass sich die Biokraftstoff-Produktion unter manchen Bedingungen gut als lokale oder regionale Lösung eigne. Zum Beispiel wird in Brasilien seit mehreren Jahrzehnten Zuckerrohr (*Saccharum sp.*) erfolgreich in Bioethanol umgewandelt. Heute deckt Zuckerrohr-basierter Biokraftstoff etwa ein Drittel von Brasiliens Gesamtenergiebedarf, etwa die Hälfte aller Fahrzeuge fährt mit einem Bioethanol-Benzin-Gemisch. Die Vereinigten Staaten decken dagegen nur etwa drei Prozent ihres Gesamtenergiebedarfs mit Mais-basiertem (*Zea mays*) Biokraftstoff. Barber äußert sich skeptisch zu der Voraussage des US-amerikanischen Energieministeriums, die Nutzung von Biokraftstoff auf 30 Prozent zu steigern. Es ist zum Beispiel nicht klar, ob ausreichende (oder dafür vorgesehene) Flächen zur Verfügung stehen, um derart viel Biokraftstoff zu herzustellen.

Ob nun die Biokraftstoff-Produktion eine praktikable globale Lösung ist oder nicht, die Bioethanol-Produktion wächst jedenfalls weltweit. So erwähnt Barber zum Beispiel eine norditalienische Kunststofffirma, die durch den Anbau verschiedener Feldpflanzen in Sommer und Winter fünf bis zehn Tonnen Trockenmaterie pro Hektar erreicht. Nach Voraussagen des Unternehmens führt dies zu einer Aus-

beute von etwa einer Tonne Bioethanol pro Hektar. Barber verweist darauf, dass für ein Unternehmen im Endeffekt nicht die Effizienz entscheidend ist, sondern die Kosten sowie die Gewinnerzielung durch die Produktion. In diesem Fall hat das Unternehmen entschieden, dass die Menge an erzielter Biomasse sowie deren Umwandlung in Biokraftstoff genügt, um einen ausreichenden Profit zu erzielen. In der Diskussion wird die Frage gestellt, ob der Ertrag von einer Tonne nicht zu optimistisch ist, und wie bei der Rechnung Faktoren wie Düngermenge, Wasser und Energie berücksichtigt worden sind. Barber bestätigt, dass die Firma diese Faktoren berücksichtigt hat. Er äußert die Hoffnung, dass zukünftige Bio-Kraftstoff-Feldpflanzen weniger Energie beanspruchen als die heutigen.

Die CS3-Teilnehmer sind sich einig darüber, dass Biokraftstoff zwar nicht die globale Lösung des weltweiten Energieproblems ist, aber nichtsdestoweniger eine besondere Rolle spielt. Mark Davis, U.S. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, kommentiert dessen Eignung als Flüssigkraftstoff für Transportzwecke. Er sagt, andere Solartechnologien, wie PV-Zellen, werden wahrscheinlich eher bei der Erzeugung von Elektrizität eine Rolle spielen. Es ist aber schwerlich anzunehmen, dass PV-Zellen sowie einige andere in der Entwicklung befindliche Technologien für die Kraftstoffproduktion nützlich sein werden. Ferdi Schüth, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim, stellt fest, dass es viele überzogene Erwartungen über die Größenordnung gibt, in der Biokraftstoff dazu beitragen kann, den Energiebedarf der Welt zu decken. Auch wenn unser zukünftiges Energiesystem wahrscheinlich überwiegend Elektrizitäts-basiert sein wird, wird ein Teil stofflich basiert sein, und Biomasse ist einer der am günstigsten verfügbaren stofflich basierten Kraftstoffe.

## Wege zur Verbesserung der Biokraftstoff-Herstellung

Barber diskutiert auch, welche Richtung die Forschung einschlagen sollte, um die Biokraftstoffproduktion zu optimieren und Biokraftstoff im Wettbewerb mit fossilem Kraftstoff zu produzieren. Weil der Rohstoffanbau zur Biokraftstoffherstellung oft mit dem Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln konkurriert, haben Wissenschaftler vorgeschlagen, verstärkt Zellulose zu nutzen. Damit die Biokraftstoffproduktion statt Futtermittel-basiert mehr Zellulose-basiert wird, müssen Wissenschaftler „Energie-Agrarprodukte“ (also non-food Pflanzen) sowie neue agronomische Vorgehensweisen entwickeln, um diese Pflanzen anzubauen und zu ernten. Zum Beispiel untersuchen Chemiker das Potential von *Miscanthus*, einer hochergiebigen Graspflanze, anstelle von Mais (oder anderen Futterpflanzen) als Biokraftstoffquelle. Darüber hinaus müssen Wissenschaftler bessere organische und synthetische Katalysatoren entwickeln, um Zellulose zunächst in einfache Zucker und dann in Kraftstoff-Produkte umzuwandeln. Wie Barber erläutert, hat Zellulose eine sehr komplexe Struktur und ist schwer aufzubrechen. Einige Chemiker nähern sich diesem Problem, indem sie die natürlichen Enzyme von Termiten und anderen Insekten untersuchen und prüfen, ob die gleichen Enzyme in einem System zur Energieumwandlung genutzt werden können.

In der Diskussion von Barbers Vortrag stimmt Davis zu, dass bessere Katalysatoren für die Ausgangsprodukte (Aufbrechen von Polysacchariden in kleinere Moleküle) und Endprodukte (Wiedereinbau dieser kleineren Moleküle in Kraftstoff-Produkte) bei der Umwandlung von Biomasse nötig sind. Bessere Katalysa-

toren werden den Anteil der für das Aufbrechen und die Bildung chemischer Bindungen benötigten Energie vermindern. Davis kommentiert auch die Notwendigkeit, einige Prozessschritte bei der Biokraftstoff-Produktion zu ändern, um eine Kostensenkung in der Produktion und damit für Biokraftstoff zu erreichen. Insgesamt wird die Verwendung verschiedener Arten von Feldfrüchten (wie zum Beispiel *Miscanthus* anstelle von Zucker oder Mais), die Entwicklung besserer Erntebedingungen sowie die Abänderung einiger Prozessschritte die Position von Biokraftstoffproduktion im Wettbewerb gegenüber fossilem Kraftstoff stärken.

Als Beispiel für die Arbeit im Zusammenhang mit der Entwicklung besserer Katalysatoren berichtet Michikazu Hara, Tokyoter Technologieinstitut, Japan, über die Arbeit seiner Forschungsgruppe mit einem Teilchen- und Kohlenstoff-basierten sauren Feststoff-Katalysator für die Umwandlung von Zellulose in Zucker. Während andere saure Katalysatoren nicht wieder verwendet werden können, sondern nach der Reaktion abgetrennt und entsorgt werden müssen, kann sein Katalysator für weitere Reaktionen wieder eingesetzt werden.

Während sich die Diskussion vor allem auf Biokraftstoff aus an Land erzeugter Biomasse konzentriert, beschreibt Fang Huang, Botanisches Institut der Chinesischen Akademie der Wissenschaften, Peking, China, die Experimente ihrer Forschungsgruppe zur Nutzung einer Mikroalge als Ressource für Kraftstoff-Biomasse.

## Energie ist eine Größe auf Systemebene

Davis Beitrag zu den Kosten der Biokraftstoffproduktion führt zu einer Diskussion darüber, wie wichtig es ist, den vollen Lebenszyklus der Biomasse-Biokraftstoff-Umwandlung zu untersuchen. Wie viel Energie ist für die Produktion von Biokraftstoff erforderlich? Welche Abläufe sind entscheidend für den Energieverlust? Welche Verbesserungen können gemacht werden? Selbst in Brasilien ist trotz jahrzehntelanger Erfahrung und weit verbreitetem Einsatz von Bioethanol der volle Lebenszyklus dieses Biokraftstoffs noch nicht geklärt. Die CS3-Teilnehmer stimmen überein, dass der vollständige Lebenszyklus für alle solaren Energieumwandlungssysteme betrachtet werden muss, nicht nur für Biokraftstoff. Selbst bei künstlicher Photosynthese wird es

zum Beispiel wichtig sein, nicht nur den Energiegewinn zu berücksichtigen, sondern auch die für die Geräteherstellung und den Betrieb notwendige Energie. Davis betont, dass man vorsichtig sein muss bei der Bewertung einer Ökobilanz oder einer Systemanalyse von solaren Umwandlungstechnologien, weil die Ergebnisse hochgradig von den berücksichtigten Faktoren und den Annahmen der Analyse abhängen. Viele Systemanalysen von Biokraftstoff basieren auf Annahmen über Mais, der hochintensiven landwirtschaftlichen Einsatz erfordert. Werden die gleichen Annahmen bei der Bewertung von Biokraftstoff gemacht, der aus weniger energieintensiven Pflanzen stammt, werden die Ergebnisse weniger vorteilhaft ausfallen als sie sollten.

## Zugriff auf die in der Natur schon vorhandene Solarenergie

Biokraftstoff aus einer nicht aus Feldfrüchten stammenden Biomasse erlaubt den Zugriff auf das enorme Reservoir an Solarenergie, die schon auf natürlichem Weg in Pflanzenmasse umgewandelt wurde. Was muss erreicht werden, bevor Biokraftstoff eine finanzierbare nachhaltige Energiequelle für den flächendeckenden Einsatz wird? Im Laufe der zusammenfassenden Sitzung des CS3 identifizierte eine Arbeitsgruppe die dringlichsten wissenschaftlichen Herausforderungen:

**Entwicklung der notwendigen biochemischen Methoden zur Schaffung neuer Biomasse<sup>9</sup>.**

**Entwicklung von katalytischen Abläufen zur Effizienzverbesserung der Umwandlung von Biomasse<sup>10</sup>.**

9 Das Enzym (bekannt als „RuBisCO“), welches CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre aufnimmt und in Pflanzen einbaut, ist sehr träge und unterscheidet nicht deutlich zwischen CO<sub>2</sub> und Sauerstoff. Oft nimmt es Sauerstoff anstelle von CO<sub>2</sub>. Bei diesem Fehler von RuBisCO verschwendet eine Pflanze nicht nur Energie, sondern sie verschwendet noch mehr Energie bei der Reparatur dieses Fehlers. Durch die Verbesserung der Leistung mit Hilfe von Protein Engineering glauben Chemiker, die in Pflanzen verfügbare Biomasse um 50% erhöhen zu können.

10 Die am weitesten verbreiteten Formen der Biomasse enthalten ein hohes Maß an Sauerstoff, und zu viel Sauerstoff vermindert den Betrag an verfügbarer Energie (pro Einheit Biomasse). Die Entwicklung von Ressourcen und energieeffizienten Methoden, um den Sauerstoff aus den komplexen an der Biomasse Umwandlung beteiligten Molekülen zu entfernen, würde die in Biomasse verfügbare Energie erhöhen

## Verwendung von Biokraftstoff

Walter Leitner, Institut für Technische und Makromolekulare Chemie, Aachen, regt eine Diskussion über die Verwendung von Biomasse nicht nur als Ressource für Kraftstoff, sondern auch als Quelle für andere chemische Produkte, also für eine eigene Wertschöpfungskette, an. Biomasse wird bereits zur Produktion hochwertiger Kohlenstoff-basierter Chemikalien verwendet, etwa in der pharmazeutischen Industrie oder zur Herstellung von High Electrolyte Oils, die als Schmierstoffe verwendet werden. Leitner wiederholt, dass der Biokraftstoff der „Ersten Generation“, also Ethanol aus Zuckerrohr und Mais oder Biodiesel (etwa aus Sonnenblumen und Sojabohnen), außer in bestimmten Regionen, definitiv keine nachhaltige Lösung ist. Biokraftstoff der „Zweiten

Generation“ (auf Basis von Lignocellulose als Rohmaterial) ist wegen seines höheren Energiegehalts und anderer Faktoren die bessere Option. Jedoch, sagt Leitner, sind sie keine globale Lösung. Dementsprechend drängt er darauf, den Ansatz zur Umwandlung von Biomasse der „Dritten Generation“ zu betrachten, mit der sich Wissenschaftler seines Forschungsinstituts befassen: die Umwandlung von Biomasse in Produkte einer Wertschöpfungskette. Diese Produkte können Kraftstoff, aber auch Chemikalien, Schmierstoffe, Pharmazeutika und andere Produkte sein – solche, die nicht mit anderen Technologien erzeugt werden können.

# III. Solarenergie und Elektrizität: Photovoltaik-PV-Technologien der nächsten Generation<sup>11</sup>

Photovoltaische (PV) Zellen („Solarzellen“) wandeln Sonnenlicht in elektrische Energie um.<sup>12</sup> Obwohl die PV-Technologie heutzutage unbestreitbar die verbreitetste Art ist, Sonnenenergie zu nutzen, etwa durch Sonnenpaneele auf dem Dach, trägt sie nur zu einem Bruchteil zur globalen Energieproduktion bei. Nach Alvin Compaan, University von Toledo, Ohio, wurden 2008 weltweit 20 Terawatt Elektrizität erzeugt – davon jedoch lediglich sieben Gigawatt – das entspricht 0,035 Prozent – durch PV-Module. Die breite Anwendung der PV-Technologie wird durch die hohen Kosten von Silizium begrenzt. Die meisten der geläufigen und weltweit gebrauchten PV bestehen aus Solarsilizium<sup>13</sup>. Während des Symposiums gab es viele Fragen nach finanzierbaren PV-Materialien und Herstellungsmethoden. Tatsächlich forschen viele Wissenschaftler an der Entwicklung verschiedener halbleitender Materialien sowie Solarzellstrukturen. Dabei gibt es erhebliche Herausforderungen. Während zum Beispiel innovative organische Molekül-basierte PV-Technologien potentiell viel preisgünstiger sind als Silizium-basierte Solarzellen, sind die Stabilität und Langlebigkeit organischer Materialien ein großes Problem. In der dritten Sitzung des Symposiums diskutieren die CS3-Teilnehmer die Herausforderungen und Möglichkeiten einiger PV-Technologien der „nächsten Generation“. Dieses Kapitel fasst diese Diskussion zusammen.

## Überblick über die PV-Technologien: Chemiker suchen nach Wegen der Kostensenkung

Junhao Chu, Shanghai Institut für Technische Physik, Shanghai, China, eröffnet die Sitzung mit einem Überblick über PV-Technologien. PVs gehörten zu den ersten Technologien zur Nutzung der Solarenergie, entwickelt von Wissenschaftlern der Bell Laboratories in den 1950er Jahren. Die weltweite Produktion hat sich seit dem praktisch exponentiell erhöht. Nach Chu betrug die weltweite Stromerzeugung durch PVs im Jahr 1997 etwa 125.8 Megawatt im Vergleich zu 3733.4 Megawatt im Jahr 2007. Chu erwartet in naher Zukunft

eine starke Zunahme der jährlichen Installationen von PVs, was – vorsichtig geschätzt – zu mehr als 13.000 Megawatt erzeugter Solarenergie im Jahr 2012 führen wird.

Der größte Teil der hauptsächlich für den Export bestimmten PV-Produktion befindet sich in China, gefolgt von Deutschland (21 Prozent), Japan (16 Prozent), Taiwan (7 Prozent), übriges Europa (7 Prozent), übriges Asien (7 Prozent), USA (6 Prozent), und Indien (1 Prozent). Es wird erwartet, dass bis 2011 China

<sup>11</sup> Dieser Abschnitt umfasst die Höhepunkte von Vorträgen und Diskussionen während der dritten Sitzung des CS3, „Photovoltaik, einschließlich organische, anorganische und Farb-sensibilisierte Solarzellen“ und wurde von Chen-Ho Tung, Chinesische Akademie der Wissenschaften, Beijing, China, organisiert

<sup>12</sup> Durch Belichtung des Halbleitermaterials innerhalb einer PV wird elektrischer Strom erzeugt.

<sup>13</sup> Solarsilizium unterscheidet sich von reinem Silizium. Unter anderem wird es mit Chemikalien behandelt, um die elektrische Leitfähigkeit zu erhöhen.

und Deutschland mit 19 Prozent beziehungsweise 13 Prozent die beiden weltweit führenden Hersteller von PV-Technologie bleiben, gefolgt von Malaysia mit 11 Prozent. Obgleich China der größte Hersteller kommerzieller PV-Technologie ist, verwendet es wenig davon selber. Sein Anteil am globalen Markt betrug 2008 nur 0,17 Prozent.

Chu konstatiert mit Nachdruck, dass trotz des rasanten Fortschritts in der PV-Produktion in den vergangenen Jahren die PV-Wissenschaften und -Technologien ein sehr

aktuelles Forschungs- und Innovationsfeld blieben. Kontinuierliche Forschung und Innovation werden wesentlich für die Entwicklung bezahlbarer Materialien sein, obwohl die Kosten des Solarsiliziums fielen, von 350 bis 400 US-Dollar pro Kilogramm im Dezember 2007 auf 100 US-Dollar pro Kilogramm im Dezember 2008. Silizium ist immer noch die kostenintensivste Komponente der PV-Herstellung mit einem Kostenanteil von 60 Prozent bei der Herstellung eines einzigen Solarzellenmoduls oder Paneels.<sup>14</sup>

## Existierende und entstehende PV-Technologien

Chu beschreibt drei verschiedene Typen von PV-Technologien:

### PV-Technologie auf der Basis von kristallinem Silizium (c-Si)

Derzeit beherrscht c-Si-Technologie den Markt. Etwa 87 Prozent aller solaren Flächeninstallationen bestehen aus c-Si-Zellen. Dennoch gibt es einen weiten Spielraum für Verbesserungen. Obwohl die c-Si-PV-Technologie mit einer mittleren Effizienz von 15 bis 20 Prozent der Umwandlung von Sonnenlicht in Elektrizität die effizienteste aller PV-Technologien ist (und vermutlich aller solaren Energie-Technologien), so sind die derzeitigen Kosten der c-Si-Technologie für eine breite Anwendung unerschwinglich hoch. Chu betont die Notwendigkeit, die Schichtdicke der Silizium-Wafer, dem Hauptbestandteil jeder c-Si-PV-Zelle der ersten Generation, weiter zu reduzieren. Obgleich die mittlere Waferdicke innerhalb der letzten Jahre mehr als halbiert werden konnte, von etwa 300 bis 350 Mikrometer in 2003 auf etwa 150 in 2010, ist eine weitere Verflachung notwendig, um die Kosten dieser Technologie in einen besser finanzierbaren Rahmen zu bringen.

Während die Reduzierung der Waferdicke wirtschaftlich sinnvoll ist, schafft sie technisch neue Herausforderungen. Insbesondere wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass nicht alle Photonen absorbiert werden. Ein Teil wird reflektiert, und damit wird die solare Umwandlungseffizienz der Zelle herabgesetzt. Chu erwähnt zwei Arten der Modifikation von Zellen, um dies zu vermeiden: (1) „Anzapfen von Licht“ und (2) verbesserte Oberflächen-Passivierung. Das Anzapfen von Licht erhöht die Menge an absorbiertem Licht, welches „eingefangen“ wird, etwa durch eine invertierte Siliziumoberfläche oder durch die Zugabe stärker verspiegelter Schichten auf der Rückseite des Schichtsystems. Passivierung macht die Oberfläche des Halbleiters chemisch und elektrisch „passiv“, vermindert damit seine chemische Reaktivität und verbessert die Wahrscheinlichkeit, dass Ladungsträger (also die Elektronen und Löcher) dem äußeren Stromkreis zugeführt werden. Chu führt einige Beispiele an, bei denen diese Techniken zum Einsatz kamen, um c-Si-Zellen effizienter zu machen. Beispielsweise wurde vom Fraunhofer-Institut für Solare Energie Systeme (ISE), Freiburg, eine 21,6 Prozent

<sup>14</sup> Ein Solarmodul oder Paneel ist eine aus zusammengesetzten Solarzellen bestehende Komponente. Es ist die funktionale Einheit der meisten PV-Systeme.

effiziente LFC-PERC (Laser-Fired Contacts – Passivated Emitter Rear Cell) -Solarzelle durch das Aufbringen passivierender Schichten auf der Vorder- und Rückseite entwickelt. Sowohl SunPower Corporation, San Jose, California, als auch Sanyo Electric Company, Moriguchi, Japan, haben Passivierungstechniken verwendet, um die Kosten zu senken und die Effizienz ihrer jeweils eigenen c-Si-PV-Technologien zu verbessern. SunPower berichtet über eine Effizienz von 21 Prozent, Sanyo über 22.3 Prozent.

Chu erörtert auch neuere Forschungen, die sich mit anderen Materialien – außer Siliziumdioxid – für die Passivierung befassen. So haben Wissenschaftler der RWTH Aachen den Einsatz von Siliziumnitrid als Passivierungsmaterial untersucht. Wissenschaftler der Applied Materials, Inc., Santa Clara, Calif. verwenden eine Kombination aus Siliziumdioxid und Siliziumnitrid und Wissenschaftler der Technischen Universität Eindhoven, Niederlande, des Instituts für Solare Energie Forschung der Leibniz-Universität, Hannover und des Technischen Instituts Tokyo, Japan, befassen sich mit Aluminiumoxid-Filmen als Passivierungsmaterial. Den derzeitigen „Weltrekord“<sup>15</sup> durch den Gebrauch solcher Passivierungsmaterialien hält Sanyo mit 22.3 Prozent Effizienz.

### **Dünnschicht-Solarzellen (DS, engl.: TFSC)**

Breiten Raum in seinem Vortrag gibt Chu der Diskussion zu PV-Dünnschicht-Solarzellen der „zweiten Generation“. Dazu gehören sowohl Dünnschicht-Solarzellen aus amorphem Silizium als auch solche, die aus anderen chemischen Komponenten bestehen, wie beispielsweise polykristallinem Kupfer-Indium-(Di)Selenid, Kupfer-Indium-Gallium-(Di)Selenid, Cadmium- Tellurid oder epitaktischen<sup>16</sup>

Schichten aus Indium-Gallium-Phosphid und Gallium-Arsenid (GaAs).

Die meisten DS haben im Vergleich zu c-Si-Zellen eine geringe Effizienz mit typischen Werten im Bereich von 10 bis 13 Prozent. Die meisten DS-Produktionsmodule haben eine Effizienz von 5 bis 10 Prozent. Insgesamt variiert die DS-Effizienz, so Chu, was unter anderem davon abhängt, ob es sich um eine Multi-Junction-Solarzelle handelt oder nicht. Multi-junction-PV-Zellen enthalten eine Vielzahl von Schichten aus verschiedenen Halbleitermaterialien, wobei jeder Materialtyp eine andere Wellenlänge absorbiert. Durch die Vergrößerung des absorbierbaren Wellenlängenbereichs wird die Menge an einfangbarer Sonnenenergie erhöht, die für eine Umwandlung in elektrische Energie geeignet ist. Einige mehrzählige epitaktische Schichtzellen, wie etwa „Triple-Junction“-Zellen haben Wirkungsgrade von über 40 Prozent. Als ein derzeit erforschtes, für den Einsatz in Multi-Junction-Zellen geeignetes Material, weist Chu auf die von Wissenschaftlern des U.S. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, verwendeten Gallium-Indium-Nitrid-Arsenid- und Bor-Gallium-Indium-Arsenid-Phosphid-Schichten hin.

Zusätzlich zu ihrem geringen Wirkungsgrad (im Vergleich zu Silizium-Wafer-PV-Zellen) ist die Stabilität eine zentrale Herausforderung für DS. Viele der Dünnschicht Solarzellen sind von Natur aus instabil, weil deren Materialien unter Sonneneinwirkung mit der Zeit degenerieren. Wie Chu erläutert, kann fehlende Stabilität materialbedingt sein (während zum Beispiel Zellen aus Kupfer-Indium-Gallium-Selenid relativ stabil sind, sind Zellen aus amorphem Silizium empfindlich für lichtinduzierten Abbau), haftbedingt (Abplatzen zwischen den Schichten oder vom Substrat) oder verschluchsbedingt

<sup>15</sup> „Weltrekord Wirkungsgrade“ von Forschungseinrichtungen werden in der Praxis nicht erreicht.

<sup>16</sup> Eine epitaktische Schicht ist ein Typ halbleitender Schicht mit einer partikularen kristallinen Struktur.

(Feuchtigkeit kann in das verkapselte Modul über beschichtete Enden eintreten).

Trotz Rückschlägen bezüglich Wirkungsgrad und Stabilität erfordern Dünnschicht-Solarzellen weniger Rohmaterial und sind kostengünstiger herstellbar als c-Si-Zellen. Sie haben außerdem eine kürzere Dauer der „Energierückzahlung“, das heißt, alle Solarzellenmodule erfordern für ihre Herstellung Energie, aber DS-Module „zahlen“ – im Vergleich zu Silizium-Wafer-Solarzellen – „diese Energie“ in Einheiten von erzeugter Elektrizität schneller zurück. Nimmt man ihre geringeren Kosten und kürzere Energierückzahlungsdauer, so machen ihre Formbarkeit und ihr geringes Gewicht sie besser geeignet für alle Anwendungen, die für die konventionelle Silizium-Wafer-Technologie unmöglich sind (zum Beispiel im Weltraum, im militärischen Bereich und bei in Gebäuden integrierten Systemen). Auch wenn DS nicht so weit verbreitet sind wie c-Si-PVs, nimmt dennoch der Dünnschicht-basierte Anteil an PV-Systemen zu. So erwähnt Chu zum Beispiel die Planung eines 1.3 Megawatt Kraftwerks in Deutschland (Dimbach Solar Park), das Solarzellen auf Cd-Te-Basis nutzt. Ein anderes Beispiel ist ein amorphes Silizium-basiertes Dünnschichtsystem auf dem Dach des Neuen Hauptstadt-Museums in Peking, das 300 Kilowatt Energie durch die Verwendung formbarer Paneele liefert. Gebaut wurde dieses Kraftwerk von United Solar Ovonic, einem Tochterunternehmen von Energy Conversion Devices, Rochester Hills, MN. Bis 2012 prognostiziert Chu 75 Prozent c-Si-basierte Systeme (derzeit 87 Prozent), und 25 Prozent Dünnschicht-basierte Systeme.

### Mehr über Dünnschicht-Solarzellen

Alvin Compaan, Universität von Toledo, Ohio, bestätigt Chus Einschätzung, dass sich DS

in Zukunft besser durchsetzen werden. Tatsächlich produzieren die USA einen Großteil ihrer Silizium-basierten Solarzellen mit der Technologie der Dünnen Schichten und nicht mit der Wafer-Technologie (zum Beispiel das Unternehmen Uni-Solar). Compaan erwähnt drei anorganische Dünnschicht-PV-Technologien, die innerhalb der letzten vier Jahre zur großtechnischen Produktion führten: Die ersten Cadmium-Tellurid-Zellen von Solar aus Ohio, DS-Zellen aus amorphem Silizium von Uni-Solar in Michigan und Kupfer-Indium-Gallium-(Di)Selenid-(CIGS)-DS-Zellen von Global Solar in Arizona.

Dennoch bleiben viele chemische Herausforderungen, bevor einige DS-Technologien zunächst weiterentwickelt werden oder andere für einen breiteren Einsatz großtechnisch genutzt werden können. Compaan erwähnt zwei Herausforderungen: (1) Aus polykristallinem Material hergestellte DS zeigen die gleichen Passivierungsprobleme wie einige in der c-Si-Technologie verwendete Materialien. (2) Während einige DS relativ hohe Wirkungsgrade unter Laborbedingungen zeigen, ist der in einer großtechnischen Produktion erreichte Wirkungsgrad wesentlich geringer. Kupfer-Indium-Gallium-Selenid ist beispielsweise ein schwer herstellbares Material. Während daraus hergestellte DS unter Laborbedingungen einen Wirkungsgrad von 20 Prozent aufweisen, zeigen industriell hergestellte Module einen Wirkungsgrad kleiner als 10 Prozent.

Compaan berichtet über seine Zusammenarbeit mit First Solar und über die Zukunft der CdTe-DS-Technologie. Wie bei Indium (das im Anschluss an Chus Ausführungen zu organischen PV-Technologien erwähnt wurde -, s.u.) herrscht Unsicherheit über die Verfügbarkeit von Tellur. 2008 verbrauchte die CdTe-Modul-Produktion eine Gesamtmenge

von 50 Tonnen Tellur, das ausschließlich aus Rückständen von Kupferminen<sup>17</sup> stammte. Derzeit wird Tellur mit einer Effizienz von nur 33 Prozent aus Kupferrückständen gewonnen, mit einer Ausbeute von 500 Tonnen pro Jahr. Sollte die Extraktionseffizienz auf 80 Prozent gesteigert werden können, könnte dies zur jährlichen Produktion von etwa 25 Gigawatt CdTe-basierten PV-Systemen führen, erklärt Compaan.

Compaan äußert sich auch zur Toxizität von Cadmium und stellt fest, dass die meisten Cd-Emissionen indirekt durch die für die Produktion des Moduls benötigte Elektrizitätserzeugung durch Kohlekraftwerke entstehen. Da die Herstellung von CdTe-Modulen weniger Elektrizität verbraucht als die der c-Si-Wafer, sind Cd-Emissionen tatsächlich im Vergleich ziemlich gering. Zu den Rückgewinnungskosten am Ende des Lebenszyklus der CdTe-Zelle befragt, erläutert Compaan, dass First Solar ein Treuhandkonto für jede verkaufte Paneele angelegt hat, das für die Rückführung aller verbrauchten Paneelen eingesetzt wird, um sicherzugehen, dass das Cd sachgerecht endgelagert wird. Dennoch, Dan Nocera vom MIT erwähnt die „immensen versteckten Kosten“ bei der CdTe-Technologie.

### **Neue Konzepte der PV-Technologie, einschließlich Farb-sensibilisierter und anorganischer Zellen**

Chu erwähnte drei Arten neuer Konzepte der Solarzellentechnologie der „Dritten Generation“

#### **1. Farb-sensibilisierte Zellen (DSSC, engl.: dye-sensitized solar cells)**

Zuerst von Michael Grätzel 1991 entwickelt, nutzen DSSC (auch bekannt als „Grätzel“-Zellen-Farbstoffmoleküle für die Absorption des einfallenden Lichts. Die durch Photonen

angeregten Farbstoffmoleküle (zum Beispiel Titandioxid) erzeugen in einem separaten nicht-Silizium-basierten Halbleitermaterial einen Strom. Chu erläutert, dass DSSC kostengünstiger sind als c-Si-Zellen, aber einen geringeren Wirkungsgrad haben als c-Si sowie DS (berichtet wird ein maximaler Wirkungsgrad von circa einem Prozent). Zudem haben sie ähnliche Stabilitätsprobleme wie andere DS<sup>18</sup>-Zellen.

Im Anschluss an Chus Vortrag merkt Qingbo Meng, Chinesische Akademie der Wissenschaften, Beijing, China, an, dass DSSC nicht nur kostengünstiger seien, sondern auch einfacher herstellbar. In China untersuchen Forscher, inwieweit Lithiumjodid, das traditionell in DSSC verwendete Elektrolytmaterial, durch das kostengünstigere Aluminiumjodid ersetzt werden kann, um die Kosten noch weiter zu senken.

Laurie Peter, University Bath, Großbritannien, beschreibt die Geschichte der DSSC-Technologie einschließlich der Grätzel-Erfindung und die Kommerzialisierung der DSSC durch das in Massachusetts beheimatete Unternehmen Konarka Technologies. Heute vermarktet das in England ansässige Unternehmen G24 Innovations (G24i) eine eigene, patentrechtlich geschützte Technologie. Des Weiteren erforschen Wissenschaftler am Fraunhofer-Institut für Solare Energie Systeme ISE, Deutschland, neue Wege, um die Effizienz der DSSC-Technologie zu erhöhen. Der höchste nachweisbare solare Wirkungsgrad einer DSSC liegt unter Laborbedingungen bei 11,4 Prozent und unter normalen Bedingungen in der Größenordnung von acht bis neun Prozent.

#### **2. Leitende Polymer-Solarzellen**

Genau wie DSSC sind auch leitende Polymer-Solarzellen potentiell kostengünstiger

<sup>17</sup> Es gibt einige Te-angereicherte Reserven in einigen Gebieten Chinas, die gerade erst erschlossen werden, aber gegenwärtig wird sämtliches Te aus anderen Abbauprodukten extrahiert.

<sup>18</sup> Auch wenn Chu dies „new concept“ Technologie bezeichnet, werden DSSC auch als DS betrachtet.

herzustellen als andere Arten von PV-Technologien, wenn sie anstelle von Silizium leitende Polymermaterialien verwenden, aber sie sind nicht so effizient, erklärt Chu. Mit einer typischen Lebensdauer von 3 bis 5 Jahren sind die leitenden Polymerzellen zudem nicht sehr stabil. Im Anschluss an Chus Darstellungen bemerkt Peter Bäuerle, Universität Ulm, Deutschland, dass Konarka kürzlich von einem Wirkungsgrad von 6.4 Prozent berichtet habe, die höchste derzeitige Leistung für eine Polymer-Solarzelle unter Laborbedingungen. Trotzdem beträgt der von Unternehmen berichtete Wirkungsgrad derartiger Zellen auf Dächern nur 3.3 Prozent. Zhigang Shuai, Tsinghua University, Peking, China, kommentiert einige der Forschungsansätze, die unternommen werden, um den Wirkungsgrad von polymeren Solarzellen zu erhöhen. Dazu gehört unter anderem die Verwendung verschiedener Arten von Polymeren sowie nanostrukturierter Materialien.

### 3. Molekulare (oder „small molecule – niedermolekulare“) organische Zellen

Wie andere neue Konzepte sind auch molekulare organische Solarzelltechnologien potentiell kostengünstiger als Silizium-Wafer und Dünnschichttechnologien, sowohl wegen der verwendeten Materialien als auch wegen des Herstellungsprozesses. Dennoch

beträgt deren solarer Umwandlungskoeffizient nur vier Prozent. Bäuerle weist nach Chus Darstellungen auf einen Wirkungsgrad von etwa sechs Prozent bei Solarzellen der Firma Heliatek GmbH, Dresden, Deutschland, hin, was augenblicklich ein Rekord für niedermolekulare organische Solarzellen ist. Deren begrenzter Wirkungsgrad ist zum Teil dadurch bedingt, dass die meisten der derzeit verfügbaren molekularen Halbleitermaterialien nur einen geringen Anteil des Lichtspektrums absorbieren und so nicht in der Lage sind, viel Licht umzuwandeln.

Nach Chus Vortrag wird auch die Frage nach Indium-Zinnoxid gestellt, einem meistens als Elektrode in organischen Solarzellen<sup>19</sup> eingesetzten Material, sowie nach den Anstrengungen, einen Ersatz für Indium-Zinnoxid zu finden (Für eine großtechnische Produktion gibt es nicht genug Indium auf der Erde). Jedoch stimmten nicht alle Teilnehmer zu, dass Nachhaltigkeit ein Thema sei. In China betrachtet man zum Beispiel den Vorrat an Indium-Zinnoxid nicht als gering. Abgesehen von der Nachhaltigkeit werden auch Bedenken über die Verwendung von Indium-Zinnoxid geäußert wegen Leistungs- und Stabilitätsproblemen, bedingt durch die chemische Reaktivität des Indiums mit organischen Materialien in der Zelle.

## Suche nach Materialien mit ausreichender Verfügbarkeit

Wie wirken sich die Rohstoffreserven auf die zukünftige potentielle Ausbreitung CdTe-basierter DS aus? Diese Frage führt Laurie Peter, University Bath, Großbritannien, dazu, über die Verfügbarkeit von PV-Technologie im allgemeinen zu spekulieren, sowie darüber, inwieweit die Erde tatsächlich genügend Materialien für eine großtechnische Gewinnung von Energie solaren Ursprungs bereitstellt.

Peter erläutert, dass beispielsweise sowohl Cadmium als auch Tellur ziemlich selten in der Erdkruste vorhanden sind im Vergleich zu anderen Elementen wie Zink, Kupfer und Zinn. Auch sind Zink, Kupfer und Zinn relativ billig im Vergleich zu einigen für die PV-Technologie der nächsten Generation in Betracht gezogenen Materialien wie Indium. Er fragt: Gibt es einen Weg, einige der teureren, selteneren

<sup>19</sup> Das organische Material wird typischerweise zwischen einer Schicht ITO und einer anderen Schicht Elektrodenmaterial eingepackt.

und potentiell umweltschädlichen Materialien, die derzeit zusammen mit preiswerten, häufiger vorhandenen Materialien verwendet werden, zu ersetzen? Tellur und viele andere der heute verwendeten Materialien würden zum Teil nur aus historischen Gründen verwendet werden. Seiner Meinung nach sollen sich Chemiker sowohl auf das Periodensystem der Elemente als auch auf Arbeit in der Ver-

gangenheit besinnen und mit neuen Materialkombinationen arbeiten, welche die gleichen Eigenschaften auswiesen, zum Beispiel Kupfer-Indium-Gallium-Selenid, welches für einen langzeitbasierten industriellen Gebrauch geeignet ist. Nach Peter gibt es nur eine Hand voll Forschergruppen, die sich mit alternativen Materialien in PV-Zellen beschäftigen.

## Die Zukunft der PV-Technologie

Chu nennt vier Schritte zur Weiterentwicklung von Solarzellen-Technologie:

1. Verbesserung der vorhandenen Technologien für c-Si-Solarzellen der ersten Generation. Selbst wenn der Preis für Silizium deutlich fallen sollte, wird dies nur 60 Prozent der Gesamtkosten eines c-Si-Solarzellen-Moduls betragen. Die Verarbeitung und Herstellung von Materialien und Zellen müssen effizienter werden, um die verbleibenden 40 Prozent der Kosten der c-Si-Technologie zu senken.

2. Entwicklung neuer Materialien sowohl für Dünnschicht- als auch New-concept-PV-Technologien, nicht nur zur Kostensenkung, sondern auch aus Gründen der Leistungsfähigkeit.

3. Kontinuierliche Entwicklung neuer Strukturen, Abläufe und Konzepte für Dünnschicht- und New-concept-PV-Technologien, um die Leistungsfähigkeit dieser potentiell weniger teuren Technologien zu verbessern.

4. Vernetzung der Anstrengungen von Chemikern mit denen von Wissenschaftlern anderer Disziplinen (zum Beispiel Physikern, Materialwissenschaftlern und Ingenieuren).

### Umwandlung von Solarenergie in Elektrizität

Der weit verbreitete Gebrauch von Silizium-basierten PV-Zellen, die Solarenergie direkt in Elektrizität umwandeln, wird durch deren hohe Kosten begrenzt. Was muss erreicht werden, bevor Energie mit PV-Zellen finanzierbar und nachhaltig erzeugt werden kann? In der Zusammenfassung der CS3-Diskussion identifiziert eine Wissenschaftlergruppe die folgende dringlichste wissenschaftliche Herausforderung:

**Entwicklung kostengünstiger, nicht-toxischer, auf der Erde in ausreichender Menge verfügbarer PV-Materialien für den Einsatz in PV-Zellen der nächsten Generation.**

Chus Überblick führt zu Fragen darüber, welche - wenn überhaupt - der vielfältigen heute untersuchten und entwickelten PV-Technologien die wahrscheinlich erfolgreichste in Bezug auf eine weltweite großtechnische Versorgung mit Elektrizität sein wird. Zum Beispiel, welche dieser Technologien ist mehr (oder weniger) ressourcen- oder kostenbegrenzt und wird daher mehr (oder weniger) wahrscheinlich angenommen werden? Chu erwidert, dass Silizium immer noch das „beste“ Material bezüglich des Wirkungsgrades sei

und dass etwa innerhalb der nächsten zehn Jahre Si-basierte Zellen bezahlbarer werden, weil sie mit weniger Silizium hergestellt werden. Jedoch werden auch einige der anderen Dünnschicht-Materialien wie CIGS mit der Zeit bedeutender werden. Er sagt voraus, dass speziell organische Solarzellen in Zukunft wegen ihrer geringen Kosten an Bedeutung gewinnen werden, obgleich ihr Wirkungsgrad und besonders ihre Stabilität noch verbessert werden müssen.

Die Tatsache, dass der Wirkungsgrad und die Stabilität molekularer organischer Solarzellen verbessert werden müssen, bevor sie eine rentable Option für einen großtechnischen Gebrauch werden, führt zu einer weiteren Diskussion über die vielen grundlegenden wissenschaftlichen Herausforderungen, die noch zu bewältigen sind. Peter meint „There is still a lot of chemistry that needs to be figured out“.

# IV. Speicherung von Solarenergie<sup>20</sup>

Reduzierte Kosten für wasserspaltende Katalysatoren, Erhöhung des Wirkungsgrads von Biomasse sowie der Bau leistungsfähigerer PV-Technologien der nächsten Generation sind unerlässlich, damit Solarbrennstoffe im Vergleich zu fossilen Brennstoffen konkurrenzfähig werden. Genauso wichtig ist es nach Meinung einiger CS3-Teilnehmer herauszufinden, wie sich diese umgewandelte Energie speichern lässt. So stellt Daniel Nocera, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., fest. „Eine Gesellschaft darf nicht nur funktionieren, wenn die Sonne scheint“. Er argumentiert, dass Solarenergie mit weniger als 0.1 Prozent am Energiemarkt beteiligt ist, und zwar nicht nur wegen der Kosten und anderer herstellungsbedingter Faktoren, sondern auch, weil langzeitige Speichermöglichkeiten<sup>21</sup> fehlen. Solange nicht die Solarenergie langfristig gespeichert werden kann, werden Solarenergie-Umwandlungssysteme es schwer haben, auf dem Markt zu bestehen. Im Fokus der vierten Sitzung des CS3 stehen solare Energiespeicherungstechnologien. Die Diskussion dreht sich um die Frage nach der individuellen dezentralen oder zentralisierten Speicherung sowie um den Typus chemischer Kraftstoffe, die gespeichert werden können und sollen. Dieses Kapitel fasst diese Diskussion zusammen.

## Wege zur Speicherung von Solarenergie

Nocera eröffnet die Sitzung mit einem kurzen Überblick über die verschiedenen Arten, Solarenergie zu speichern:

- 1. Mechanisch: Energiespeicherung durch Luftkomprimierung.** Solarenergie kann dazu verwendet werden, Luft in unterirdischen Reservoirs wie etwa wasserführenden Schichten oder Salzkavernen zu komprimieren, so dass bei der Dekompression der Luft ungefähr 0.5 Megajoule Energie pro Kilogramm frei werden.
- 2. Hydroelektrische Pumpsysteme:** Solarenergie kann dazu verwendet werden, Wasser in hochgelegene Behälter zu pumpen und dort zu speichern, so dass beim Rückfluss des Wassers etwa 0.001 Megajoule Energie pro Kilogramm frei werden. Nocera bemerkt, dass die Energiedichte beim Einsatz dieser Methode so gering
- 3. Batterien:** Die Energiedichte von Batterien liegt zwischen 0.54 und 0.72 Megajoule pro Kilogramm für Lithium-Batterien, zwischen 0.14 bis 0.22 Megajoule pro Kilogramm für Nickel-Cadmium-Batterien und zwischen 0.14 bis 0.17 Megajoule pro Kilogramm für Blei-Batterien. Das ist die höchstmögliche Energiedichte, um Batterien nicht noch schwerer als gegenwärtig zu machen. Nocera bemerkt, dass Batterien zwar für den Transport gut geeignet sind, weil die Energie sofort verfügbar ist, sie aber keine gute Wahl für eine nichtnetzgebundene Langzeitspeicherung sind.
- 4. Kondensatoren:** Kondensatoren können zwar Energie speichern, ihre Dichte liegt

ist, dass hydroelektrisches Pumpen nicht wirklich für den praktischen Gebrauch einsetzbar ist.

<sup>20</sup> Dieser Abschnitt umfasst die Höhepunkte der Vorträge und Diskussion während der vierten Sitzung der CS3, "Speicherung, Transport und Verteilung von nicht-kontinuierlicher Energieversorgung" und wurde organisiert von Dr. Alvin Compaan der Universität Toledo, Toledo, Ohio.

<sup>21</sup> Speicherung ist auch ein wichtiges Thema im Zusammenhang mit der Nutzung von umgewandelter Sonnenenergie für Transportzwecke, eine Art der Energienutzung, die angesprochen, aber während des CS3 nicht ausgearbeitet wurde. Die Diskussion bewegte sich vornehmlich um den stationären Gebrauch von Energie

aber nur bei etwa 0.01 Megajoule pro Kilogramm für Superkondensatoren sowie bis 0.0206 Megajoule pro Kilogramm bei Ultrakondensatoren.

**5. Chemische Bindungen:** Chemische Bindungen haben die höchsten Energiedichten aller Solarenergiesysteme. Komprimiertes Wasserstoffgas (70 Megapascal Wasserstoff) hat zum Beispiel eine Dichte von 143 Megajoule pro Kilogramm, und andere Flüssiggase haben eine Ausbeute von 44 Megajoule pro Kilogramm. Wie Nocera erläutert, „wählt die Natur chemische Bindung“ wegen dieser hohen Energiedichte als Speicherungsmedium und darüber hinaus „wählt sie die Bindung

von Wasserstoff an Kohlenstoffdioxid“. Er argumentiert, dass wir möglicherweise unsere Schlüsse daraus ziehen und nicht nur chemische Bindungen als primäre Speicherung für langzeitbasierte Solarenergiespeicher nutzen, sondern auch Wasserstoff (also den Wasserstoff der Wasserspaltung) an Kohlenstoffdioxid binden und flüssige Treibstoffe herstellen. Wie in Kap. I erläutert, müssen Chemiker zunächst eine praktische solarbetriebene Art der Reduktion von Kohlenstoffdioxid entwickeln. Bis dieses Ziel erreicht ist, ist Noceras Vision eines individuellen dezentralen Energiesystems an dem Gebrauch von Wasserstoff als Treibstoff gebunden.

## Dezentrale Speicherung von Energie

Speicherungstechnologien sind nicht nur entscheidend für die Marktakzeptanz, merkt Nocera an. Speziell die dezentralen Speichertechnologien spielen eine zentrale Rolle, damit Solarenergie für Kleinverbraucher eine zumutbare Option wird – derzeit sind es drei Milliarden Menschen, die für diese Art von dezentraler personalisierter Energieversorgung in Frage kommen, im nächsten Jahrhundert werden es weitere drei Milliarden sein. Der größte Anstieg des weltweiten Energieverbrauchs wird in den nächsten Jahrzehnten auf diese sechs Milliarden Menschen zurückzuführen sein. Während die industrialisierte Welt besser durch zentralisierte Netze versorgt wird, etwa durch die Speicherung von umgewandelter Solarenergie in Batterien (s. Diskussion unten), so wird für den anderen Teil ein dezentralisiertes System besser sein, bei dem jedes Haus oder jeder Gebäudekomplex seine individuelle Speichereinheit nutzt. Jedoch müssen neue Speicherungssysteme für Solarenergie entwickelt werden, um aus der Solarenergie eine zumutbare Option für

Personen zu machen, die netzunabhängigen Strom verbrauchen. Die Herausforderung ist nicht nur eine Verkleinerung derzeit bestehender Systeme. Nocera vergleicht die Herausforderung mit derjenigen bei einem PC: „Es ist nicht möglich, Mainframes einfach zu verkleinern. Man muss ganz von vorne beginnen und einen dezentralen Rechner entwerfen. Genauso ist es nicht möglich, bestehende Systeme zu verkleinern, um der Nachfrage aller neuen Energieverbraucher nachzukommen. Man muss neue personalisierte Systeme schaffen.“ Dies ist der Fall bei vielen Solarenergietechnologien der nächsten Generation. Die Frage ist, wie macht man das? Nocera beschreibt seine Vision eines personalisierten Energiesystems, das teilweise auf der Arbeit seiner Laborgruppe mit einem neuen wasserspaltenden Katalysator aufbaut (zur Diskussion der Chemie dieses Katalysators siehe Kapitel I): Eine Anordnung von PV auf dem Dach wandelt Solarenergie in Elektrizität für täglichen Gebrauch um und leitet die überschüssige elektrische Energie zu einem

wasserspaltenden Gerät, um Wasserstoff und Sauerstoff herzustellen. Wasserstoff und Sauerstoff werden vor Ort in einem Tank gespeichert und nachts – wenn die Solarzellen nicht aktiv sind – in einer Brennstoffzelle<sup>22</sup> zur Erzeugung von Elektrizität für den Hausgebrauch rekombiniert. Theoretisch würde die Versorgung eines einzelnen Hauses oder einer Gebäudeansammlung nur eine sehr kleine

Menge Wasser als Rohmaterial erfordern. Wie in Kap. I erwähnt, ist Nocera mit Sharp Electronics übereingekommen, den wasserspaltenden Teil des Systems in Sharps Technologie der Solarzellen zu integrieren. Nocera betont, dass seine Arbeit nicht zwangsläufig „die Antwort“ sei, sondern eher der Anfang einer neuen Ära von Forschung und Entwicklung dezentralisierter Speicherung von Solarenergie.

## Welche Art von chemischem Kraftstoff?

Im Anschluss an Noceras Darstellung und durch Rekapitulation der Diskussionen während der ersten Sitzung (siehe Kap. I) stellt Robert Schlögl, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin, fest, dass in der Vergangenheit Wasserstoffkraftstoff als einzige Option für die chemische Speicherung von Solarenergie angesehen wurde, heute aber andere Optionen und andere Kraftstoffarten bekannt sind. Er merkt an, dass je nach Situation verschiedene Kraftstoffarten herstellbar sind. Etsuko Fujita, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, kommentiert die Attraktivität von Methanol, weil es sowohl stationär als auch für die Fortbewegung genutzt werden kann und weil es viele Möglichkeiten für seine Herstellung gibt. So oder so – ob Wasserstoff (etwa durch Wasserspaltung produziert) alleine als Kraftstoff verwendet oder in anderen Kraftstoff umgewandelt wird – Wasserstoff wird eine sehr wichtige Komponente zukünftiger Energiesysteme vieler Länder werden. Deshalb, so Schlögl, müssen wir notwendigerweise damit beginnen, über Arten der Speicherung nachzudenken. Er hebt nochmals hervor, dass obgleich Chemiker erfolgreich gezeigt haben, dass es möglich ist, Solarenergie zu nutzen, um verschiedene chemische unter Wasserspaltung ablaufende Reaktionen anzutreiben, keiner dieser Prozesse bisher zu einem Punkt weiterentwickelt wurde, ab dem

diese anwendbar sind. Chemiker müssen noch Katalysatoren für die künstliche Photosynthese entwickeln, die nicht nur effizient genug arbeiten, um sie in Kraftanlagen oder anderen Energieumwandlungssystemen zu betreiben, sondern die auch aus Materialien bestehen, die in hinreichender Menge verfügbar sind.

Nocera fragt anschließend, ob es möglich ist, den Kohlenstoffdioxid-Reduktionsprozess soweit zu reduzieren, dass er in einem dezentralisierten Energiespeichersystem anwendbar sei. Gibt es Katalysatoren, um Kohlenstoffdioxid zu reduzieren und so andere Treibstoffe, außer Wasserstoff, für den Einsatz in kleinen Energiesystemen herzustellen. Schlögl hält dies für möglich, es würde aber die Entwicklung eines Reaktors und einfacherer Prozessabläufe erfordern. In anderen Worten, auch wenn die Chemie der Katalyse offensichtlich ein sehr wichtiges Thema für viele Gebiete der Wissenschaft und der Technologie von Solarenergie ist, sind in diesem Fall andere Probleme von Belang. Sossina Haile, Kalifornisches Technologie-Institut, Pasadena, Kalifornien, merkt an, dass Wissenschaftler des Pacific Northwest National Laboratory miniaturisierte energieumwandelnde Technologien entwickeln, die möglicherweise für diese Art eines Kohlenstoffdioxid-Reduktionsszenarios in kleinem Maßstab anwendbar seien.

<sup>22</sup> Eine Brennstoffzelle ist ein Gerät, welches chemische Energie in elektrische Energie umwandelt. Die einfachsten verwenden Wasserstoff als Energiequelle, lassen Wasserstoff mit Sauerstoff reagieren und erzeugen unter Freisetzung von Energie Wasser. Andere Brennstoffzellen verwenden verschiedene Kohlenwasserstoffe, wie Methan als chemische Quelle und wandeln Methan erst in Wasserstoff um und lassen diesen dann mit dem Sauerstoff unter Freisetzung von Energie reagieren.

## Großtechnische netzgebundene Speicherung von Solarenergie

In der Diskussion nach Noceras Vortrag wiederholt Ferdi Schüth, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim, die Notwendigkeit, verschiedene Arten von Speichersystemen für verschiedene Gebiete abhängig vom Bedarf und der lokalen Infrastruktur in Betracht zu ziehen. Während es sinnvoll sein kann, Solarenergie als Gas oder flüssigen Kraftstoff zu speichern (etwa Wasserstoff, Methanol oder Methan), macht es in netzgebundenen Gebieten mehr Sinn, so lange wie möglich „elektrisch zu bleiben“. Ein zentralisiertes auf Solarenergie aufgebautes Energiesystem wird nichtsdestoweniger immer eine Pufferung erfordern (also Speicherkapazität). In Deutschland ist beispielsweise ein 90-Tage-Vorrat an Ölreserven vorgeschrieben. Dies entspricht etwa 20 Millionen Tonnen. Sich vom Öl weg zu bewegen, macht es erforderlich, alternative Wege zur Speicherung eines 90-Tage-Vorrats an Energie zu finden.

Jürgen Janek, Universität Giessen, kommentiert die Möglichkeit, Batterien als Alternative einzusetzen. Er merkt an, dass hierbei – anders als bei den meisten anderen während des Symposiums diskutierten Technologien – die Elektrochemie sowie die Koordination eines auf Batterien basierenden Speichernetzes die eigentliche Herausforderung ist. Ein vernetztes Batteriespeichersystem dieser Größenordnung müsse lediglich korrekt entworfen und organisiert werden.

Zuletzt beschreibt Haile einen möglichen zukünftigen zentralisierten Solarenergiespeicher, dem ein ähnlicher Ansatz zugrunde liegt, wie bei dem von Nocera für den persönlichen Gebrauch skizzierten: Zusätzlich zur Energieerzeugung während des Tages würden zentral an einem Ort befindliche An-

lagen einen Teil der tagsüber eingefangenen Solarenergie nutzen, um die für den Nachtverbrauch erforderliche Energie mithilfe eines Cerdioxid-basierten thermochemischen Prozesses zu erzeugen. Haile und ihre Forschergruppe haben gezeigt, dass Cerdioxid als thermochemisches Reaktionsmedium für die Erzeugung von Wasserstoff, Synthesegas<sup>23</sup> oder Methan unter Einwirkung von Wasser und Kohlenstoffdioxid genutzt werden kann. Abhängig vom derzeit verfügbaren Cerdioxid-Anteil (etwa 40 Megatonnen weltweit, relativ häufig im Vergleich zu anderen Elementen) kann man voraussichtlich 50.000 solcher 100-Megawatt-Kraftanlagen oder das Äquivalent von 140-tausend US-Dollar pro Stück bauen (in Cerdioxid Rohmaterialkosten).

### Speicherung neu erschlossener umgewandelter Solarenergie

Chemiker müssen Systeme entwickeln, die nicht nur solaren Kraftstoff in andere Formen der Energie umwandeln, sondern diese umgewandelte Energie auch für einen späteren Gebrauch speichern. Dies ist ein besonders kritisches Thema für solche Gebiete auf der Erde ohne Zugriff auf ein zentralisiertes Energieversorgungssystem. Was muss erreicht werden, um preiswerte, nachhaltige solare Speichersysteme zu entwickeln? In der Schlussitzung des CS3 identifiziert eine Wissenschaftlergruppe die dringlichste wissenschaftliche Herausforderung:

**Entwicklung neuer Katalysatoren und Materialien mit kostengünstigen Elementen, die in genügender Menge vorhanden sind und für den Bau von finanzierbaren nachhaltigen solaren Energie-Transformations-und-Speichersystemen genutzt werden können.**

<sup>23</sup> Synthesegas ist ein brennbares Gasgemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff – es kann als Kraftstoff oder intermediär bei anderen Arten der Kraftstoffproduktion genutzt werden.

# ANHANG A

## PROGRAMM

### Chemical Sciences und Society Symposium (CS3)

Kloster Seeon, Germany, 23 – 25 Juli, 2009

### Sonnenlicht als Energiequelle für die Erde

#### MITTWOCH, 22. JULI 2009

---

Nachmittag Ankunft und Registrierung  
18.00 Begrüßung und informelles Abendessen

#### DONNERSTAG, 23. JULI, 2009

---

7.30 Frühstück  
8.45 – 9.00 **Begrüßung und Eröffnung durch Klaus Müllen, GDCh Präsident**  
**Sitzung 1**  
**Künstliche Photosynthese, photokatalytische Wasserspaltung und Kohlenstoffdioxid-Fixierung**  
organisiert von Dr. Hairo Inoue, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan  
9.00 – 9.40 **Einführungsvortrag**  
von Dr. Kazunari Domen, University Tokyo, Japan  
9.40 – 10.30 **Kommentare und Diskussionen**  
10.30 – 11.00 Pause  
11.00 – 12.00 **Kommentare und Diskussionen, Forts.**  
12.30 – 14.00 Mittagessen  
**Sitzung 2**  
**Von Solarstrahlung zu Energie durch Biomasse**  
organisiert von Dr. Laurie Peter, Universität Bath, England  
14.00 – 14.40 **Einführungsvortrag**  
von Dr. James Barber, Imperial College London, England  
14.40 – 15.30 **Kommentare und Diskussionen**  
15.30 – 16.00 Pause  
16.00 – 17.00 **Kommentare und Diskussionen, Forts.**

**FREITAG, 24. JULI 2009**

---

7.30 Frühstück

**Sitzung 3****Photovoltaik. Organische, anorganische und Farb-Sensibilisierte Solarzellen**

organisiert von Dr. Chen-Ho Tung, Chinesische Akademie der Wissenschaft, Beijing, P.R. China

9.00 – 9.40 **Einführungsvortrag**  
von Dr. Junhao Chu, Shanghai Institut für Technische Physik, Shanghai, P.R. China9.40 – 10.30 **Kommentare und Diskussionen**

10.30 – 11.00 Pause

11.00 – 12.00 **Kommentare und Diskussionen, Forts.**

12.30 – 14.00 Mittagessen

**Sitzung 4****Speicherung, Transport, und Verteilung einer Nicht-kontinuierlichen Energieversorgung**

organisiert von Dr. Alvin Compaan, Universität von Toledo, Toledo, Ohio, USA

14.00 – 14.40 **Einführungsvortrag**  
von Dr. Daniel G. Nocera, Technisches Institut von Massachusetts, Cambridge, Mass., USA14.40 – 15.30 **Kommentare und Diskussionen**

15.30 – 16.00 Pause

16.00 – 17.00 **Kommentare und Diskussionen, Forts.**

18.00 – 19.30 Abendessen

**SAMSTAG, 24. JULI 2009**

---

7.30 Frühstück

9.00 – 10.30 **Schlussdiskussion**  
organisiert von Dr. Ferdi Schüth, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung  
Kaiser-Wilhelm-Platz, Mülheim, Deutschland.

10.30 – 11.00 Pause

11.00 – 12.00 **Zusammenfassung und Empfehlung**

# ANHANG B

## TEILNEHMERLISTE

### CHINA

---

<b>Prof. Dr. Chen-Ho Tung</b>	Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing (Mitglied des Wissenschaftlichen Komitees)
<b>Prof. Dr. Junhao Chu</b>	Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai
<b>Prof. Dr. Fang Huang</b>	Research Center for Photosynthesis, Institute of Botany; Chinese Academy of Sciences, Beijing
<b>Prof. Dr. Can Li</b>	Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian
<b>Prof. Dr. Qingbo Meng</b>	Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing
<b>Prof. Dr. Zhigang Shuai</b>	Department of Chemistry (CCS und NSFC), Tsinghua University, Beijing

### DEUTSCHLAND

---

<b>Prof. Dr. Ferdi Schüth</b>	Max-Planck-Institut für Kohlenforschung Kaiser-Wilhelm-Platz, Mülheim: Mitglied des Wissenschaftlichen Komitees
<b>Prof. Dr. Peter Bäuerle</b>	Universität Ulm, Abteilung Organische Chemie II, Ulm
<b>Prof. Dr. Jürgen Janek</b>	Physikalisch-Chemisches Institut, Justus-Liebig-Universität Gießen
<b>Prof. Dr. Walter Leitner</b>	Institut für Technische und Makromolekulare Chemie, Aachen
<b>Prof. Dr. Dr. h.c. Hartmut Michel</b>	Max-Planck-Institute für Biophysik, Abteilung Molekulare Membranbiologie, Frankfurt am Main
<b>Prof. Dr. Klaus Müllen</b>	Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Mainz
<b>Prof. Dr. Robert Schlögl</b>	Fritz-Haber-Institute der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin
<b>Dr. Kurt Begitt</b>	Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. (GDCh), Frankfurt am Main
<b>Dr. Markus Behnke</b>	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Bonn

### JAPAN

---

<b>Prof. Dr. Haruo Inoue</b>	Department of Applied Chemistry, Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University, Tokyo (Mitglied des Wissenschaftlichen Komitees)
<b>Prof. Dr. Kazunari Domen</b>	Department of Chemical System Engineering, School of Engineering, University of Tokyo
<b>Prof. Dr. Michikazu Hara</b>	Materials and Structures Laboratory, Tokyo Institute of Technology, Yokohama

<b>Prof. Dr. Kazuhito Hashimoto</b>	Department Applied Chemistry, School of Engineering, The University of Tokyo
<b>Prof. Dr. Osamu Ishitani</b>	Department of Chemistry, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
<b>Prof. Dr. Koji Tanaka</b>	Institute for Molecular Science, Okazaki
<b>Dr. Teruto Ohta</b>	Chemical Society of Japan (CSJ), Executive Director, Secretary General, Tokyo
<b>Prof. Dr. Yoshio Okahata</b>	Senior Program Officer, Chemistry Group, Research Group for Science Systems, Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) and Professor, Graduate School of Bioscience and Biotechnology, Tokyo Institute of Technology

#### GROSSBRITANNIEN

---

<b>Prof. Dr. Laurie Peter</b>	Department of Chemistry, University of Bath, Bath (Mitglied des Wissenschaftlichen Komitees)
<b>Prof. Dr. James Barber</b>	Imperial College London
<b>Prof. Dr. Anthony Harriman</b>	Professor of Physical Chemistry and Co-Director of the Molecular Photonics Laboratory, Newcastle University, Newcastle upon Tyne
<b>Prof. Dr. Timothy Jones</b>	Department of Chemistry, University of Warwick, Coventry
<b>Prof. Dr. Andrew Mills</b>	Department of Pure & Applied Chemistry, University of Strathclyde, Glasgow
<b>Prof. Dr. Chris Pickett</b>	School of Chemical Sciences & Pharmacy, University of East Anglia, Norwich
<b>Dr. Richard Pike</b>	Chief Executive, Royal Society of Chemistry (RSC), London
<b>Katie Daniel</b>	Senior Portfolio Manager, Engineering & Physical Sciences Research Council (EPSRC), Swindon

#### USA

---

<b>Prof. Dr. Alvin Compaan</b>	Department of Physics and Astronomy, University of Toledo, Toledo, Ohio (Mitglied des Wissenschaftlichen Komitees)
<b>Dr. Mark Davis</b>	Principal Scientist & Group Manager of Chemical and Catalyst Sciences, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado
<b>Dr. Etsuko Fujita</b>	Senior Chemist, Chemistry Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

<b>Prof. Dr. Sossina M. Haile</b>	Materials Science and Chemical Engineering, California Institute of Technology, Pasadena, California
<b>Prof. Dr. Stephen Maldonado</b>	Department of Chemistry, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan
<b>Prof. Dr. Daniel G. Nocera</b>	Department of Chemistry, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts
<b>Prof. Dr. Mary Jane Shultz</b>	Department of Chemistry, Tufts University, Medford, Massachusetts
<b>Dr. Julie Callahan</b>	Global Network Content Development Manager, American Chemical Society (ACS), Washington, D.C.
<b>Dr. Carol A. Bessel</b>	Program Director, Inorganic, Bioinorganic, and Organometallic Chemistry Program, National Science Foundation (NSF), Arlington, Virginia
<b>Dr. Luis Echegoyen</b>	Director, Division of Chemistry, National Science Foundation (NSF), Arlington, Virginia

#### **ANDERE TEILNEHMER**

---

<b>Dr. Leslie A. Pray</b>	Wissenschaftsautorin, Holyoke, Massachusetts, USA
<b>Sarah Everts</b>	Europäische Korrespondentin, Chemical & Engineering News, Berlin, Deutschland

**Herausgeber:**

Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V. (GDCh)

**Redaktion:**

Dr. Kurt Begitt

Gesellschaft Deutscher Chemiker

Varrentrappstraße 40 – 42

60486 Frankfurt am Main

E-Mail: [K.Begitt@gdch.de](mailto:K.Begitt@gdch.de)

Homepage: [www.gdch.de](http://www.gdch.de)

Überarbeitete Fassung, März 2010

Die vorliegende Schrift „Sonnenlicht als Energiequelle für die Erde“ wurde erstellt mit Diskussionsbeiträgen und Ergebnissen des ersten Chemical Sciences and Society Symposium (CS3). Es ist eine Übersetzung des White Paper, welches von der Wissenschaftsautorin Leslie A. Pray (PhD) in englischer Sprache erstellt wurde.

Das erste 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](http://www.gdch.de)