



Synergie sichert **Energie**

*Grundlagenforschung bündeln und sie auf umschriebene Probleme fokussieren: Mit diesem Ansatz will die Max-Planck-Gesellschaft die Distanz zwischen zweckfreier und angewandter Forschung verkürzen. Ein erster Schritt zu diesem Ziel ist das Projekthaus ENERCHEM, das im Januar 2005 seine Arbeit aufgenommen hat: Forscher aus fünf Max-Planck-Instituten loten im Rahmen dieses Forschungsverbunds aus, welche Beiträge Chemie – namentlich Nanochemie – und Materialforschung für eine nachhaltige Energieversorgung leisten können. **MARKUS ANTONIETTI** beschreibt die Ansätze, die dieser Spürtrupp in Richtung einer nachfossilen Zukunft verfolgt.*

Das Projekthaus ENERCHEM versteht sich als trans-institutioneller Verbund. Es soll sich, im Unterschied und ergänzend zu herkömmlichen Instituten der Max-Planck-Gesellschaft, nicht auf einzelne, spezielle Fragen eines naturwissenschaftlichen Fachs beschränken, sondern große und gesellschaftlich bedeutsame Probleme angehen. Als Gegenstand für dieses neuartige Forschungsexperiment boten sich die chemisch-materialwissenschaftlichen Fragen, die es mit Blick auf eine künftig notwendige nachhaltige Energieversorgung zu lösen gilt. Dazu gehören Themen wie die chemischen Grundlagen einer Wasserstoff-Kreislaufwirtschaft, die Entwicklung nanochemisch optimierter Materialien für mobile Energiespeicher oder Entwürfe für eine effektive dezentrale Erzeugung von Energie.

Was diese Themen für die Zukunft unserer Gesellschaft bedeuten, ist zwar grundsätzlich auch der breiten Öffentlichkeit bewusst. Weit weniger bekannt ist aller-

dings, dass hinter diesen geläufigen Schlagworten wissenschaftliche Probleme stecken, die sich nur mittels konzentrierter und langfristig angelegter Grundlagenforschung lösen lassen – und die damit zur angestammten Domäne der Max-Planck-Gesellschaft zählen.

Die Gründung von Projekthäusern, die sich wie ENERCHEM gesellschaftlich anerkannten Fragen anstelle reiner Expertenprobleme widmen, könnte über den wissenschaftlichen Ertrag hinaus einen positiven Nebeneffekt haben: An ihrem Beispiel lässt sich konkret die Bedeutung und Notwendigkeit der Grundlagenforschung für die Zukunft unserer Gesellschaft aufzeigen und einem breiten Publikum nahe bringen.

In ENERCHEM arbeiten im Moment chemische Abteilungen aus fünf Instituten zusammen: aus dem Fritz-Haber-Institut (Robert Schlögl, Anorganische Chemie) sowie aus den Max-Planck-Instituten für Kohlenforschung (Ferdinand Schüth, Heterogene Katalyse), Festkörper-

forschung (Joachim Maier, Elektrochemie), Polymerforschung (Klaus Müllen, Supramolekulare Chemie) und für Kolloid- und Grenzflächenforschung (Markus Antonietti, Kolloidchemie und Nanostrukturen).

Der Schwerpunkt der Forschungen des Projekthauses liegt auf den Nanowissenschaften. Doch im Unterschied zu anderen Nanozentren stehen umrissene Probleme im Mittelpunkt – und das Ziel liegt darin, diesen Problemen über nanotypische Strategien und Materialien beizukommen. Dabei werden die Themen so gewählt, dass die Stärken aller beteiligten Gruppen zum Tragen kommen und synergetisch zusammenfließen. Damit ist ENERCHEM in einem Zwischenraum angesiedelt: zwischen angewandter Forschung, die auf Verkaufsprodukte auch ohne letzte Grundlagenkenntnisse zielt, und Grundlagenforschung, die nach reiner Erkenntnis strebt, ohne deren Nützlichkeit zu erwägen. Dieser Mittelweg schließt an die eigentlichen, vorindustriellen Traditionen der Wissenschaft an.

Bei der Chemie liegt noch vieles im Argen

Das Thema dieses ersten Projekthauses wurde mit Blick auf die Tatsache gewählt, dass die Chemie in jüngerer Zeit eine für viele unerwartete Renaissance erlebt. Diese neue Stärke wächst ihr durch verfeinerte physikalisch-chemische Messmethoden zu, durch Rückbefruchtung aus der Biologie sowie durch die systematische Erkundung im Skalenbereich jenseits von Molekülen. Auch nach Meinung politischer Entscheidungsträger und Forschungsmanager hat die chemische Nanotechnologie mit der Genetik und Molekularbiologie als viel versprechende Zukunftsperspektive inzwischen zumindest wieder gleichgezogen: Das wurde in einem gerade erschienenen strategischen Bericht des National Research Council der USA sehr deutlich dargestellt und auch detailliert begründet.

Aus einer *commodity* im sicheren Inneren der Wissenschaft wurde damit ein Fach, das zum Teil als einziges Antworten auf die zunehmend anspruchsvoller werdenden technischen Bedürfnisse der modernen Gesellschaft geben kann. Dieser Trend ist in der deutschen Forschungslandschaft noch kaum erkannt: So werden weiterhin Forschungskapazitäten im Bereich der Lebenswissenschaften oder der Biophysik stark ausgebaut, doch die Chemie ist selbst im Vergleich zu Spartenfächern unterrepräsentiert. Im Hinblick auf die wissenschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung der Chemie ist dies nur schwer verständlich.

Die Arbeitspakete des Projekthauses ergeben sich aus dem auch der Öffentlichkeit bekannten Problem, die Energieversorgung für die folgenden Generationen zu sichern, was der UN-Definition von Nachhaltigkeit ent-

spricht. Aus Gründen des Klimaschutzes, aber auch angesichts der rasanten Industrialisierung Asiens sowie der absehbaren Erschöpfung fossiler Ressourcen erscheint eine simple Fortschreibung jetziger Technologie nicht mehr statthaft. Also müssen Schlüsselkonzepte wie eine Wasserstoff-Kreislaufwirtschaft, erheblich verbesserte Energiespeicher (Batterien), die Brennstoffzelle, Nanoisolierschäume zur besseren Gebäudeisolierung, ein jahreszeitliches Energiemanagement oder eine effektivere solare Energiegewinnung jetzt nicht nur politisch diskutiert, sondern auch wissenschaftlich angegangen werden.

Zwar werden diese Arbeitsgebiete bereits intensiv von einer erheblichen Anzahl Gruppen und Zentren bearbeitet; doch die wichtigen Lösungsansätze orientieren sich noch stark an heutigen Technologien, Märkten und Interessengruppen. Erstaunlich war die Erfahrung der an der Gründung von ENERCHEM Beteiligten, dass vielfach ein strukturell bedingter Mangel an mittelfristiger, nicht interessegebundener Grundlagenforschung in diesem Bereich herrscht. Oftmals sind die gegenwärtig verfolgten Ansätze auch zu wenig fortschrittlich und erfüllen nicht den grundsätzlichen Anspruch an einen Beitrag zu einer Systemlösung. Und teilweise werden auch einfach nicht die richtigen Fragen gestellt. Zudem sind Konzepte, die von der gegenwärtigen Energieversorgung als Vorgabe absehen, nur spärlich entwickelt.

Damit bot sich hier ein Forschungsfeld für die Max-Planck-Gesellschaft, die unabhängig von ökonomischen Zwängen und Einflüssen Lösungsansätze so weit verfolgen kann, dass ein Vergleich mit den üblichen Energiekonzepten möglich wird. Dieser finale Systemvergleich, da außerhalb der Statuten der Max-Planck-Gesellschaft liegend, sollte in Kooperation entweder mit industriellen Partnern oder institutionell mit anderen Forschungsorganisationen durchgeführt werden – wie etwa durch Einbindung von Fraunhofer-Instituten nach entsprechendem Fortschritt des Projekts.

Eine systemische Analyse des Forschungsbedarfs liefert eine Fülle offensichtlicher Ansätze und Projekte. So soll Energie verbessert erzeugt werden, sich aber zudem transportieren und speichern lassen, und die Verluste bei Transport und Anwendung sollten minimiert werden. Jedes dieser Probleme nimmt eine Dimension an, bei der schon kleine Verbesserungen Großes bewirken.

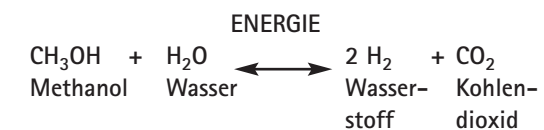
Die weitere Argumentation verlangt eine Klassifizierung, und zwar die von zentraler versus dezentraler Energiegewinnung. Das derzeit gültige Dogma lautet auf eine zentrale Energiegewinnung und -verteilung, sei es durch immer größere Kraftwerke, sei es sogar in ferner Zukunft durch Kernfusion. Diese Energie muss dann aber optimal transportiert und gespeichert werden, da

ein Großteil der Verbraucher, wie etwa Autos oder Flugzeuge, dezentral agiert. Weiterhin bedingt das zentrale Konzept den Nachteil, dass dezentral anfallende Energie nicht effektiv genutzt werden kann. Das bedeutet: Die Sonnenenergie bleibt in der Wüste, die Windenergie kommt unter großen Verlusten beim Verbraucher an, und Erdgas wird immer noch in vielen Millionen Tonnen pro Jahr abgefackelt, weil der Transport nicht lohnt. Darin liegen die prinzipiellen Schwächen eines zentralistischen Ansatzes.

Bei der dezentralen Energiegewinnung steht zunächst die verbesserte Gewinnung und Speicherung im Vordergrund, etwa durch neue Solarzellen und neue Elektrodennmaterialien, die vielleicht sogar Sonnenlicht ohne den Umweg über Strom direkt in chemische Energie umsetzen. Die an vielen Orten gewonnene Energie muss dann gelagert, transportiert, verteilt und wieder verbraucht werden – und somit gilt es, Kandidaten für die neuen Stoffströme ideologiefrei zu identifizieren und zu evaluieren. Weiterhin muss das Speichermedium dann in der Lage zu sein, die Energie wieder in einfacher Weise effektiv abzugeben, wie etwa in einer Brennstoffzelle.

Der bisher fast ausschließlich genutzte Kohlenstoff/Kohlenwasserstoff-Kreislauf bietet zwar den Vorteil einer dichten und lagerfähigen Transportform der Energie, hat aber den Nachteil, dass das erzeugte Kohlendioxid nicht wirklich kreislauffähig ist und als Treibhausgas wirkt. Demgegenüber erscheint der potenzielle Wasserstoffkreislauf angesichts seines Endprodukts Wasser hoch attraktiv. Allerdings lässt sich Wasserstoff nur sehr ineffektiv lagern und transportieren: 2 Gramm Wasserstoff beanspruchen ein Volumen von 22,4 Litern, und selbst bei unangenehmen 500 bar Druck beträgt die Dichte nur 50 Gramm pro Liter.

Hier liegt die Stärke chemischer Speichersysteme: So ist etwa ein Liter Methanol einfach zu lagern und zu transportieren und bindet nicht weniger als 100 Gramm Wasserstoff, der ein Volumen von 1000 Litern einnimmt. Die obige Argumentation verlangt jetzt nur noch nach einer chemischen Reaktion, die auch dezentral die Kreislauffähigkeit des Wasserstoff/Methanol-Systems sicherstellt. Dafür bietet sich das *Forming/Reforming*-Gleichgewicht an, beschrieben durch die Reaktionsgleichung:



Katalysatoren zu finden, die diese Reaktion auch dezentral – und in kleinstem Maßstab wie etwa in einem Laptop – zuverlässig laufen lassen, ist ungemein schwierig und wird im Rahmen von ENERCHEM unter Robert Schlögl am Fritz-Haber-Institut verfolgt. Mit ihrer Hilfe könnte die Energie von Windrädern oder Solarzellen gespeichert und bei Bedarf angezapft werden.

Um Gase wie Wasserstoff oder Methan als Energieträger zu speichern, kann man Drucktechniken einsetzen, sie verflüssigen. Es bietet sich jedoch auch an, Gase praktisch frei von äußerem Druck in porösen Systemen zu lagern: Die Speicherung geschieht dabei über den Gewinn an Grenzflächenenergie. Dieser Effekt wird auch in Form eines Kapillardrucks beschrieben, der vom Material und der Porengröße abhängt – und der bei sehr kleinen Poren Werte bis zu 1000 bar annehmen kann. Aus einer Reihe von Gründen (Zugänglichkeit, chemische Variabilität, chemische und mechanische Stabilität) erscheint dafür poröser Kohlenstoff als die vielversprechendste Zielstruktur. Die Fähigkeit, Substanzen hoch effektiv und auch reversibel aufzunehmen, ist von Aktivkohle in Klimaanlage und auch Gasmasken her bekannt. Doch die chemische Struktur und auch Architektur moderner poröser Kohlenstoffe ist inzwischen weit von diesem Urmaterial entfernt.

Kohlenstoff entfaltet mächtiges Potenzial

So hat die Gruppe um Ferdi Schüth am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung durch die Verwendung des so genannten Nanocasting (Nanoguss) inzwischen Kohlenstoffe hergestellt, die 2000 Quadratmeter Oberfläche pro Gramm Kohlenstoff aufweisen. Diese Kohlenstoffe sind zum einen strukturell sehr leicht und bergen bis zu 3,3 Kubikzentimeter Porenvolumen pro Gramm Kohlenstoff, zum anderen chemisch variabel und monolithisch – bestehen also aus einem Stück, im Unterschied etwa zu Pulvern aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen. Die Erforschung solcher Strukturen zur Gasspeicherung, aber auch als Hydridspeicher oder zum Ablegen von Elektroden, etwa in Hochleistungskondensatoren künftiger Elektroautos, zählt zu den Themen von ENERCHEM.

Das Prinzip der Katalyse spielt eine zentrale Rolle bei allen Energieumwandlungs- oder Reinigungsschritten. So lebt die elektronische Verbrennung von Wasserstoff in der Brennstoffzelle von einer dünnen Schicht eines Edelmetallkatalysators, meist aus Platin oder Palladium. Doch seltene Elemente wie etwa die Edelmetalle bieten dafür keine nachhaltige technische Lösung: Die Vorräte

der Erde an diesen Elementen sind nicht groß genug, um auch nur alle Kraftfahrzeuge auf die Brennstoffzelle umzustellen.

Von daher stellt sich die wichtige und ungewöhnliche Frage, ob die elektronischen und chemischen Besonderheiten derartiger Katalysatoren nicht auch durch einfachere und häufigere Elemente zu kopieren wären. Nach dem sorgfältigen Studium der Elementarprozesse erscheint hier ebenfalls Kohlenstoff als eine mögliche Alternative. So konnte Robert Schlögl mit seiner Gruppe zeigen, dass spezielle Kohlenstoff-Nanostrukturen eine Dehydrierungsreaktion katalysieren. Das lässt hoffen, umgekehrt auch Wasserstoff zur elektrokatalytischen Verbrennung aktivieren zu können. Forschungsziel ist hier die entsprechende chemische Dotierung von Kohlenstoff mit geometrischen Fehlstellen, Stickstoff und Sauerstoffgruppen zur Einstellung spezieller chemischer Reaktionsprofile.



für die solare Energiegewinnung, sei es für die Brennstoffzelle. Auch diese Materialien sollten eine möglichst große Oberfläche für den Austausch von Elektronen bieten, also idealerweise nanoporös sein; gleichzeitig sollte aber die Porenstruktur die elektronische Leitfähigkeit und das elektrochemische Potenzial nicht mindern, sondern tunlichst verbessern.

Meine Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung hat in den vergangenen Jahren chemische Templatetechniken zum Aufbau von kristallinen Schichten aus mesoporösen Oxiden entwickelt. Dabei gelang erst kürzlich auch die Herstellung strukturperfekter Schichten aus komplizierteren funktionellen Oxiden aus der Klasse der Perovskite und Spinelle.

Mit solchen Techniken, so die Hoffnung, lässt sich die elektronische Struktur von Elektroden immer feiner an deren energetische Aufgabe heranführen – und das für vielerlei potenzielle Einsatzbereiche. Das wohl höchste Ziel liegt hier in der fotochemischen Spaltung von Wasser durch Licht, also in der direkten Gewinnung und Speicherung von Lichtenergie durch künstliche Photosynthese. Jedenfalls dürften auch auf diesem Gebiet schon kleine Verbesserungen Großes bewirken, da sich Systeme einer solch feinen Strukturkontrolle bisher entzogen haben.

Auch wenn ENERCHEM zunächst die kurzen Kommunikations- und Handlungswege der Max-Planck-Gesellschaft nutzt, um schnell eine gewisse Sichtbarkeit zu erzielen, so soll das Projekthaus dennoch von Anfang an auch durch wissenschaftliche Kontakte in die deutsche Forschungslandschaft integriert werden. Konkrete Kooperationen können sich aus der inhaltlichen Notwendigkeit und der jeweils optimalen Kompetenzverteilung ergeben. Dabei darf – jeweils mit angemessener Rücksicht auf den notwendigen Schutz geistigen Eigentums – auch eine Politik des freien Zugangs erwartet werden, wie das einer interessenfreien Grundlagenforschung ansteht. So könnte aus der Gründung des Projekthauses ein neues, zukunftssträchtiges Modell für die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie erwachsen.

Welche der angepeilten Ziele mittelfristig auch tatsächlich erreicht werden, bleibt abzuwarten. Der Verlauf der Gründungsveranstaltungen sowie die ersten, schon jetzt erzielten Ergebnisse geben jedoch allen Grund zum Optimismus. ●

MARKUS ANTONIETTI ist Direktor am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Golm und Leiter des Forschungsverbunds ENERCHEM.

Kleinste Strukturen bilden größte Oberflächen

Ein weiteres Ziel der ENERCHEM-Forscher liegt in der Herstellung von Batteriematerialien mit höherer Leistung. Daran arbeitet eine Gruppe um Joachim Maier am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung: Durch gezielte Nanostrukturierung des Pluspols einer modifizierten Version üblicher Lithiumbatterien wurde bereits eine deutliche höhere Speicherkapazität im Vergleich zu den gängigen Systemen erreicht.

Das gleiche Ziel verfolgen der ENERCHEM-Partner Klaus Müllen und sein Team am Mainzer Max-Planck-Institut für Polymerforschung. Dort gelang es, die Grafit-elektrode am Minuspol von Lithiumbatterien aus einer neuen Art von Kohlenstoff herzustellen: Im Unterschied zu konventionellem Grafit, der aus parallel liegenden Plättchen im Mikrometerbereich besteht, wurden Kohlenstoff-Nanoscheibchen lose zu einem dreidimensionalen Netzwerk verknüpft, in das die Lithiumatome eindiffundieren können. Das neuartige Material ist schwierig herzustellen, aber attraktiv, denn bisher waren zur Speicherung von einem Lithiumatom etwa sechs Kohlenstoffatome nötig; nun aber sind dafür nur noch drei bis vier erforderlich. Auch wenn Batteriematerialien prinzipiell nicht die Energiedichten chemischer Speicher erreichen, so sind sie doch für die zentralen Energieszenarien von großer Bedeutung. Es entspricht zudem der Philosophie des Projekthauses, Komponenten der zentralen wie der dezentralen Energiekreisläufe gleichwertig zu behandeln.

In eine verwandte Richtung geht auch die Suche nach neuen nanostrukturierten Elektrodenmaterialien, sei es