UNTER STROM

Für ein nachhaltiges Wirtschaftssystem werden enorme Mengen an grünem Wasserstoff benötigt. Evonik arbeitet mit Partnern an einer neuen Membran, die die umweltfreundliche Wasser-elektrolyse konkurrenzfähig machen soll.

TEXT **GEORG DAHM**

»Die Technologie kombiniert die Vorteile bisheriger Elektrolyseverfahren.«

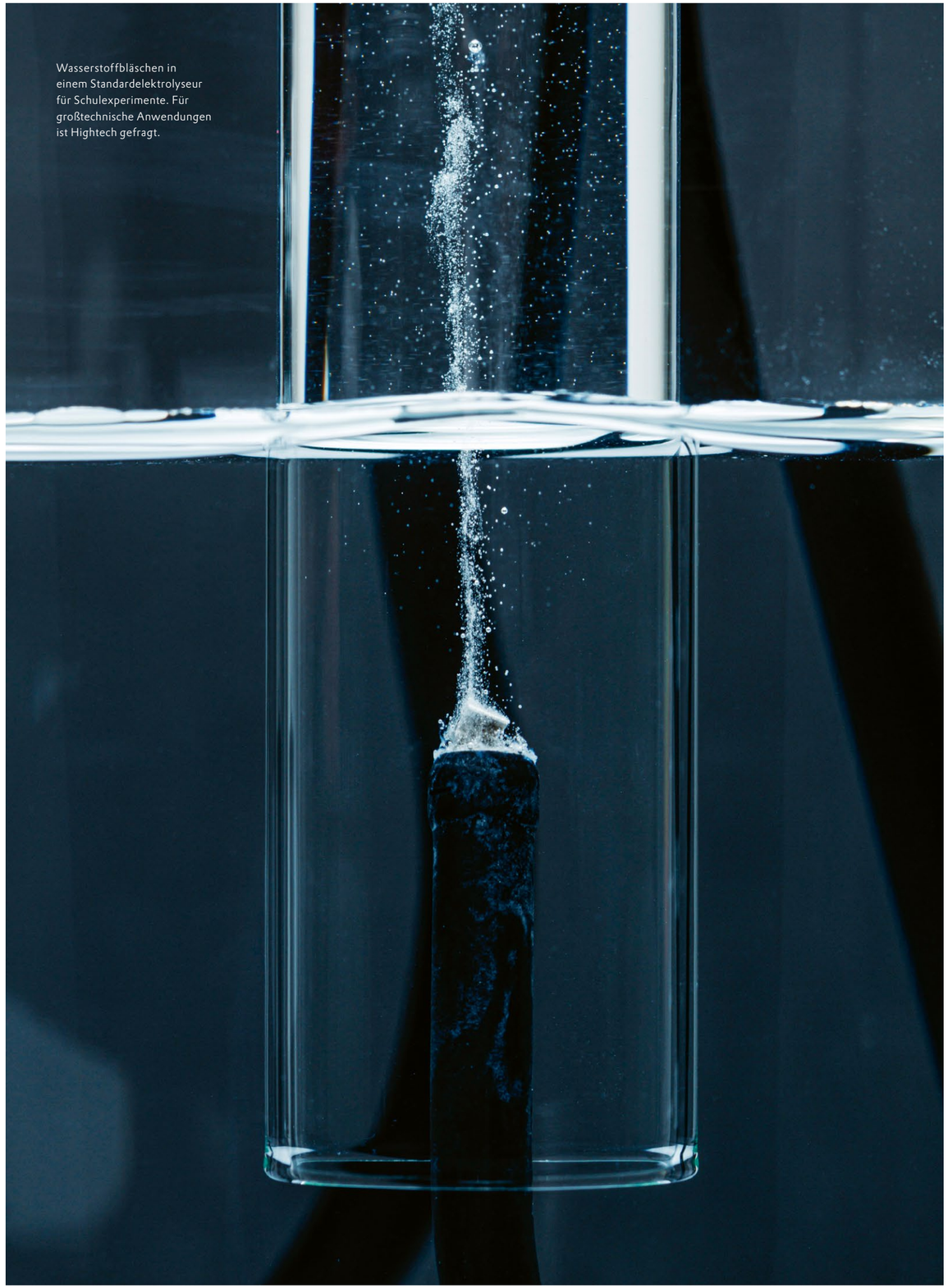
OLIVER CONRADI, CREAVIS

Zum Energieunternehmer ist Sebastian-Justus Schmidt rein zufällig geworden. Seit 2014 versorgt der Inhaber einer IT-Firma sein auf Nachhaltigkeit angelegtes Anwesen in Thailand mit Wasserstoff aus grünem Strom – hergestellt mit einem Elektrolyseur des italienischen Start-ups Acta. Das hat wunderbar funktioniert, doch dann ging 2017 dessen deutsche Mutterfirma in die Insolvenz. „Also haben wir die Technologie gekauft, das Team übernommen und unser eigenes Start-up Enapter gegründet“, erzählt Sohn Jan-Justus, Chief Operating Officer des jungen Familienunternehmens.

Mit diesem Schritt haben die Schmidts nicht nur die Stromversorgung ihrer Immobilie abgesichert, sondern eine führende Rolle in einer Technologie übernommen, mit der in den kommenden Jahrzehnten ganze Branchen kohlenstoffneutral werden könnten. Experten trauen der AEM-Elektrolyse (kurz für Anion Exchange Membrane, Anionenaustauschmembran) zu, die Wasserstoffproduktion aus regenerativem Strom massentauglich zu machen.

„Die Technologie kombiniert die Vorteile bisheriger Wasserelektrolyseverfahren“, sagt Oliver Conradi, der bei der Creavis für das Innovationsfeld Membranen verantwortlich ist. Die strategische Innovationseinheit von Evonik arbeitet gemeinsam mit Enapter in einem EU-geförderten Forschungsprojekt an neuen Membranmaterialien für die AEM-Elektrolyse. „Wenn das so funktioniert, wie wir es jetzt schon im Labor sehen, machen wir die industrielle Herstellung von umweltfreundlichem Wasserstoff wirtschaftlich tragfähig“, sagt Conradi.

Das Ziel des Verbundprojekts namens CHANNEL, an dem neben Evonik und Enapter der Energiekonzern Shell, das Forschungszentrum Jülich und das norwegische Forschungsinstitut SINTEF beteiligt sind: bis 2022 einen Demonstrator zu bauen, der die →



Wasserstoffbläschen in einem Standardelektrolyseur für Schulexperimente. Für großtechnische Anwendungen ist Hightech gefragt.

Noch fertigt Enapter seine Elektrolyseurmodule in Italien, die Serienproduktion soll in Deutschland anlaufen.

Leistungsfähigkeit von AEM beweist. Herzstück des Projekts ist eine neue ionenleitende Membran von Evonik, die in den Anlagen von Enapter getestet wird.

„Wir haben gelernt, dass es wahnsinnige Vorteile bietet, mit kleinen Firmen wie Enapter zusammenzuarbeiten, weil sie flexibel sind und sehr schnell Dinge ausprobieren können“, sagt Conradi. „Außerdem ist der unmittelbare Kontakt zu den handelnden Personen sehr hilfreich, wenn man eine Technologie validieren und implementieren möchte.“

Enapters AEM-Elektrolyseure sind keine Großanlagen – sie ähneln eher Serverschränken mit übereinander angeordneten Einschüben. Jeder davon bildet eine eigene Einheit, die einen halben Kubikmeter Wasserstoff pro Stunde produziert. „Das macht die Technik so gut skalierbar“, sagt Jan-Justus Schmidt, der Luft- und Raumfahrttechnik studiert hat und derzeit die Serienproduktion in Deutschland aufbaut.

In einer Wasserelektrolyse wird Wasser mithilfe von elektrischem Strom in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten. Der meiste Wasserstoff wird heute jedoch noch per Steam Reforming aus kohlenstoffbasierten Quellen wie Methan erzeugt – nicht zuletzt, weil das traditionelle Verfahren erheblich günstiger ist (siehe Artikel zur Wasserstoffwirtschaft Seite 10). „Das liegt zum einen an den relativ hohen Strompreisen“, erklärt Creavis-Experte Conradi. „Zum anderen erfordern Elektrolyseaggregate sehr hohe Investitionssummen.“ Evonik will die Kosten der Aggregate durch eine neuartige Membrantechnologie reduzieren helfen.

BEWÄHRTE TECHNIK MIT SCHWÄCHEN

Das Arbeitspferd unter den bisher üblichen Verfahren ist die alkalische Elektrolyse (AEL), die den Schulbuchbildern am nächsten kommt: Zwei Elektroden werden in eine stark konzentrierte Kalilauge gehalten (reines Wasser wäre nicht leitfähig genug). An der Kathode spalten sich Wassermoleküle in Wasserstoff- und Hydroxidionen. Der Wasserstoff steigt als Gas auf, die Hydroxidionen wandern durch die Lauge zur Anode, wo sie zu Wasser und Sauerstoff reagieren. Damit die Reaktionsprodukte getrennt bleiben und nicht mit einem großen Knall wieder zusammenfinden, trennt eine poröse Membran, ein sogenanntes Diaphragma, die Anoden- und die Kathodenseite des Elektrolyseurs.

Die Elektrolyseure können nach Bedarf zu größeren Anlagen kombiniert werden.

„Das ist eine robuste Technik, die mit recht günstigen Zellmaterialien auskommt“, sagt Conradi. In den Katalysatoren, die an den Elektroden dafür sorgen, dass die Reaktionen in Gang kommen, wird zum Beispiel Nickel, Kobalt oder Eisen verbaut, in den Gehäusekomponenten Edelstahl. Pro Kilowatt Leistung fallen so etwa 800 € Investitionskosten an, bis 2025 erwarten Experten einen Rückgang auf bis zu 600 €.

In Thailand kommt AEM-Technologie bereits in einer Wohnanlage zum Einsatz.

Ein Problem der AEL-Elektrolyse: Da das Diaphragma porös ist, also Gase durchlässt, können die Anlagen nur eingeschränkt unter Druck betrieben werden. Der Wasserstoff muss also unter hohem Energieaufwand komprimiert werden, damit er gespeichert und weitertransportiert werden kann. Die poröse Membran kann außerdem nur bei geringen Stromdichten betrieben werden: Maximal 600 Milliampere pro Quadratzentimeter Membranfläche hält das Diaphragma aus. Mehr als dreimal so viel, nämlich 2.000 Milliampere pro Quadratzentimeter Membranfläche, schafft das andere etablierte Verfahren, die PEM-Elektrolyse (kurz für Proton Exchange Membrane). Was in der Praxis bedeutet: Für die gleiche Menge Wasserstoff genügt ein deutlich kleinerer Elektrolyseur.

Bei der PEM-Elektrolyse fungiert die Membran nicht einfach nur als Trennschicht. Sie ersetzt vielmehr das gesamte Bad, weil sie aus einem elektrisch leitfähigen Polymer besteht, durch das Ionen wandern können. Die Elektroden liegen direkt auf der Membran auf. Das zu spaltende Wasser fließt über die Anode, die freigesetzten Wasserstoffionen wandern von der Anode durch die Membran auf die Kathodenseite, wo sie sich zu Wasserstoffmolekülen vereinen. Ein PEM-Elektrolyseur wird nicht nur bei höheren Stromdichten betrieben als eine AEL-Anlage, er hält auch größere Lastschwankungen aus. Und da er unter Druck betrieben werden kann, wird nachher weniger Energie für die Wasserstoffkompressoren benötigt.

»Unsere Technik ist gut skalierbar.«

JAN-JUSTUS SCHMIDT, COO ENAPTER

So groß die technischen Vorteile sind – die hohen Investitionskosten für eine PEM stellen eine erhebliche Markteintrittshürde dar: „PEM-Zellen arbeiten im sauren Milieu, erfordern also sehr robuste Materialien“, sagt Conradi. „Für die Katalysatoren benötigt man Edelmetalle wie Platin und Iridium, für die Zellen Titan oder sogar platiniertes Titan. Beim Stand der Technik rechnet man pro Kilowatt Leistung Investitionskosten von mindestens 1.000 €.“

MEHR LEISTUNG, WENIGER KOSTEN

Hier kommt der Hoffnungsträger AEM ins Spiel: 500 bis 600 € pro Kilowatt nennt Evonik als mittelfristiges Entwicklungsziel. Die Bauweise einer AEM-Zelle entspricht der einer PEM-Zelle, auch sie kann unter Druck und mit hoher elektrischer Leistung betrieben werden. Auch hier ist das Herzstück eine Membran aus einem ionisch leitfähigen Kunststoff, Ionomer genannt. Auf beiden Seiten liegen Elektroden auf, auch sie bestehen aus einem Ionomer und sind mit Katalysatorpartikeln durchsetzt. „Aber bei der AEM können wir dafür signifikant günstigere edelmetallfreie Materialien wie Nickel verwenden“, sagt Conradi. Denn das Verfahren arbeitet im alkalischen Milieu: Die Wasserspaltung findet wie beim AEL-Verfahren auf der Kathodenseite statt. Aus zwei H_2O-Molekülen entstehen ein Wasserstoffmolekül und zwei Hydroxidionen (OH^-); das Hydroxidion wandert durch die Membran zur Anode und reagiert dort zu Sauerstoff und Wasser (siehe Grafik Seite 33).

Diese Kombination zu realisieren bedeutet eine Herausforderung. „Auch eine alkalische Umgebung ist aggressiv“, sagt Alejandro Oyarce Barnett vom norwegischen Forschungsinstitut SINTEF, das die Partner für CHANNEL ausgesucht hat und das Konsortium koordiniert. „Es ist nicht trivial, eine Membran zu →

Erst fest, dann flüssig, dann flexibel: Im Creavis-Labor wird Polymerpulver komponiert (rechts oben), das dann in gelöster Form (rechts) zu Endlosmembranen (oben) gegossen wird.

entwickeln, die unter diesen Bedingungen arbeitet. Weltweit können das nur sehr wenige Firmen, und Evonik spielt hier ganz vorn mit."

SINTEF arbeitet ähnlich wie die deutsche Fraunhofer-Gesellschaft: Nur ein Teil des Etats kommt aus Staatsmitteln, das Geschäftsmodell beruht auf Kooperationen und Förderprojekten, bei denen wirtschaftlich verwertbares geistiges Eigentum entsteht. SINTEF will nun den Bau einer Zwei-Kilowatt-Anlage vorantreiben. Ein erster Schritt, so Barnett: „Wenn die funktioniert, dann ist es nur logisch, an eine 100, 200 oder sogar 500 Kilowatt starke Anlage zu denken."

Zwar übertreffen die Membranen aus dem Creavis-Labor bereits jetzt die meisten selbst gesteckten Zielwerte, aber noch arbeiten die Teams mit Prototypen etwa im DIN-A4-Format. Bevor das Material serienmäßig in Endlosbahnen produziert werden kann, muss das Creavis-Team unter anderem noch das Beschichtungsverfahren optimieren: In einer Pilotanlage wird noch in diesem Jahr getestet, wie im Rolle-zu-Rolle-Verfahren eine gleichbleibend hohe Qualität gesichert werden kann. Seit einigen Jahren forscht die Creavis gemeinsam mit den Experten des Bereichs High Performance Polymers an ionenleitenden Membranen für die Elektrochemie und konnte umfassendes Know-how in diesem Gebiet aufbauen. „Das Wissen um die Polymerchemie auf diesem Gebiet ergänzt hervorragend unsere Kenntnisse bei Membranen zur Gas- und Flüssigkeitstrennung", sagt Goetz Baumgarten, bei Evonik für das Innovationswachstumsfeld Membranen verantwortlich.

In der Entwicklungsphase wurde viel Vorarbeit geleistet. So arbeitet die Creavis bereits seit einer Weile an ionenleitenden Membranen für die Elektrochemie, ein weiteres zukunftsträchtiges Feld neben den Hohlfasermembranen, die bisher das Geschäft prägen. „Man braucht hier zum Beispiel ganz neue Methoden und Kompetenzen, um die Eigenschaft der Membranen zu messen", sagt Conradi.

ENTWICKLUNGSZIEL IST EIN SYSTEM

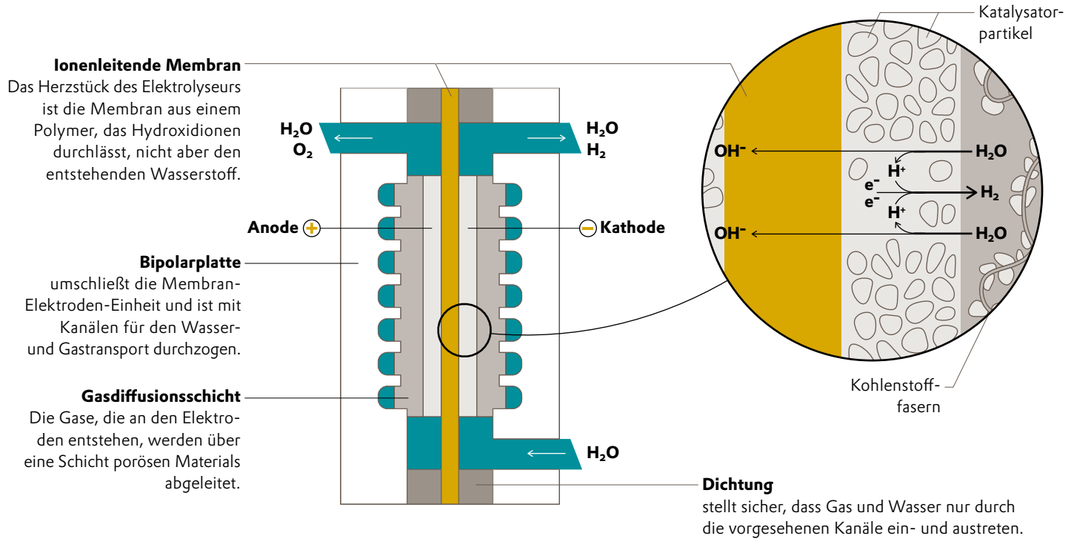
Noch geht es darum, die Formulierung der Membran zu optimieren. „Ein wichtiger Faktor für den Wirkungsgrad ist zum Beispiel der Kontaktwiderstand zwischen der Membran und der Elektrode", sagt Conradi. „Damit dieser möglichst klein wird, brauchen wir eine gute ionische Verbindung zwischen den beiden. Wir müssen also nicht nur die Polymerformulierung für die Membran weiter optimieren, sondern auch eine maßgeschneiderte Elektrodenpaste entwickeln, die auf diese Membran aufgebracht wird." Das Ziel: ein ganzes System zu entwickeln, mit dem Elektrolyseurhersteller wie Enapter beliefert werden können.

Projektleiter Barnett rechnet damit, dass eine Reihe von Membran- und Elektrodenformulierungen erprobt werden muss, bis die optimale Kombination gefunden ist – inklusive der richtigen Katalysatorsysteme, die vom Forschungszentrum Jülich und der Technisch-Naturwissenschaftlichen Universität Norwegens (NTNU) entwickelt werden. Wenn die neue Membrantechnologie in die kommerzielle Serienproduktion geht, würden weitere Katalysatorgenerationen von Evonik-Experten entwickelt werden.

„Bei der Formulierung der Elektrodenpasten hilft uns sehr, dass die Evonik-Kollegen über ein großes Wissen über Polymere und deren Eigenschaften verfügen", sagt Barnett. Das Team fängt also nicht bei null an, sondern kann aus erprobten Bausteinen schnell neue Materialien entwickeln und testen.

Jede neue Formulierung der Membran-Elektroden-Einheit (Membrane Electrode Assembly, kurz MEA) wirkt sich wieder auf die Konstruktion der Zelle aus, von denen am Schluss fünf zu einem sogenannten Stack kombiniert werden sollen. Da sind zum Beispiel die Bipolarplatten, massige Metallkonstruktionen, die die Membran-Elektroden-Einheit von beiden Seiten umschließen und den Zu- und Abfluss von Flüssigkeit und Gasen lenken. Oder die porösen Transportschichten auf den Elektroden, durch die das Gas abgeleitet wird. „Das ist eine Schlüsselkomponente, die es derzeit nicht auf dem Markt gibt", sagt Barnetts Kollegin Thulile Khoza. „Wir bauen zwar auf den Erfahrungen aus dem Bau von PEM-Zellen auf, aber wir arbeiten mit ganz anderen Materialien und müssen hier ständig Leistung und Kosten abwägen."

Getestet werden die neuen Module in Enapter-Anlagen. „Wir können neue Materialien im kleinen Maßstab testen und dann schnell in größerem Stil einsetzen", sagt Jan-Justus Schmidt. So könnte aus einer privaten Technikspielerei ein Produkt entstehen, das die Welt erobert.

Die AEM-Wasserelektrolyse

Hoher Druck und eine aggressive Umgebung: Das AEM-Verfahren stellt enorme Anforderungen an das Material. Damit die Wasserstoffproduktion unter kontrollierten Bedingungen stattfinden kann, bestehen Elektrolyseure aus vielen einzelnen Zellen, die zu Stacks (engl. für Stapel) in Reihe geschaltet werden. In diesen Zellen findet die eigentliche Reaktion statt, bei der Wasserstoff und Sauerstoff abgespalten werden.