

DIE ELEKTRISIERTE CHEMIE

Kohlendioxid mithilfe von elektrischem Strom und Bakterien in wertvolle Spezialchemikalien umwandeln: Bereits in wenigen Jahren wollen Forscher von Evonik und Siemens in einer ersten Pilotanlage zeigen, wie sich dieser Prozess industriell umsetzen lässt.

TEXT BERND KALTWASSER

Scheinbar ist es ganz einfach: Sonnenlicht, Kohlendioxid (CO₂) und Wasser genügen, und schon läuft in grünen Pflanzen die Fotosynthese ab, der wichtigste Prozess, um Biomasse aufzubauen. Mit der Zeit wird so aus einem zarten Pflänzchen ein mächtiger Baum. Doch wenn Chemiker und Ingenieure nachahmen wollen, was in der Natur so mühelos funktioniert, standen sie bisher vor nahezu unlösbaren Problemen. Im Projekt Rheticus wollen Siemens und Evonik nun zeigen, dass die künstliche Fotosynthese mithilfe von erneuerbarem Strom machbar ist: Durch eine Kombination von chemischen und biologischen Schritten entstehen aus CO₂, Wasser und Strom wertvolle Spezialchemikalien.

Bereits in den 1970er-Jahren gab es ernsthafte Bemühungen, das Konzept der künstlichen Fotosynthese umzusetzen. Doch trotz vieler kleiner Fortschritte in Teilbereichen: Den großen Durchbruch, mit dem sich das Verfahren wirtschaftlich und auf breiter Front einsetzen ließe, gab es bisher nicht. Dies könnte sich nun durch Rheticus ändern. Im Jahr 2021 soll eine erste Versuchsanlage am Evonik-Standort im nordrhein-westfälischen Marl in Betrieb gehen, die Chemikalien wie Butanol oder Hexanol erzeugt – beides Ausgangsstoffe beispielsweise für Spezialkunststoffe oder Nahrungsergänzungsmittel.

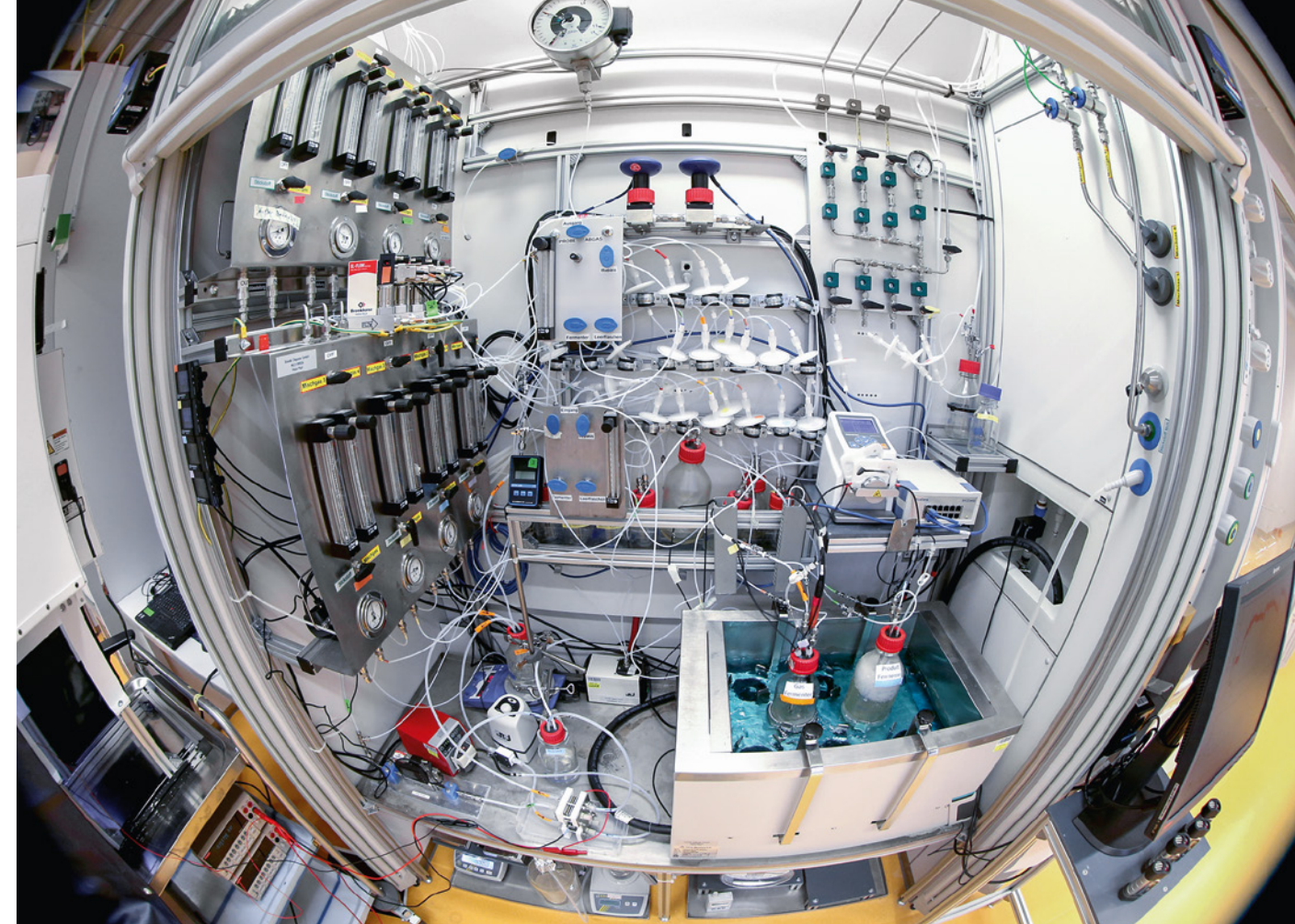
Rheticus steht im Zusammenhang mit der Kopernikus-Initiative für die Energiewende in Deutschland, die nach neuen Lösungen für den Umbau des Energiesystems sucht. Während in der ersten Förderphase von Kopernikus – auch hier sind Evonik und Siemens beteiligt – jedoch die Grundlagenforschung im Fokus steht, zielt Rheticus auf die rasche Umsetzung der Technologie in die Praxis. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert Rheticus mit 2,8 Millionen €. Die beiden Industriekonzerne investieren noch einmal ungefähr die gleiche Summe.

Mit dem Projekt geben Siemens und Evonik eine Antwort auf eine der zentralen Fragen der Energiewende: Wie lässt sich volatiler erneuerbarer Strom sinnvoll nutzen und die darin enthaltene Energie intelligent speichern?

Rheticus zeigt, welche Kraft in der Zusammenführung von Strom- und Chemiesektor steckt. Durch sogenannte Power-to-X-Konzepte – was so viel heißt, wie Strom für die Herstellung von Chemikalien, Gasen und Treibstoffen zu nutzen – wird elektrische Energie, die nicht gespeichert werden kann, in eine dauerhaft lagerfähige Form überführt. Damit kann die Chemie zur sogenannten Sektorkopplung beitragen, bei der es darum geht, Strom aus erneuerbaren Energien in allen Bereichen möglichst effizient zu verwerten – beispielsweise im Verkehr zum Antrieb von Elektroautos, in der Wärmeversorgung zur Produktion von Methan oder in der Chemie zur Herstellung von Spezialchemikalien. Bei Rheticus wird der Strom eingesetzt, um energiereiche organische Verbindungen zu schaffen, die dann als Spezialchemikalien unmittelbar wertschöpfend genutzt werden.

RHETICUS EBNET WEG IN INDUSTRIELLE ANWENDUNG

Die beiden Verfahren, die bei Rheticus miteinander verknüpft werden, sind schon lange bekannt – und doch ganz neu. So wurde die Elektrolyse bereits Ende des 19. Jahrhunderts genutzt, um Natron- und Kalilauge sowie Chlor industriell herzustellen. Mit Rheticus bereitet Siemens aber erstmals einem CO₂-Elektrolyseur den Weg in die industrielle Anwendung. Bei dem Gerät



In einer Fermentation – hier im Labormaßstab – verwandeln spezielle Bakterien CO₂-haltige Gase in wertvolle Chemikalien.

wird am Pluspol, einer mit Iridiumoxid beschichteten Titananode, Wasser zu Sauerstoff (O₂) oxidiert, zudem entsteht Wasserstoff (H₂). Der Minuspol, eine Silberkathode, wird von CO₂ umströmt. Ein Teil des Gases wird dort durch elektrischen Strom zu Kohlenstoffmonoxid (CO) reduziert. Das Ergebnis ist ein Synthesegas, ein Gemisch aus CO₂, CO und H₂. Das Verhältnis der Komponenten zueinander wird vor allem durch die Menge des einströmenden CO₂ bestimmt.

Für die anschließende bakterielle Fermentation muss das Synthesegas möglichst sauerstofffrei sein. Denn bei Rheticus kommen zwei unterschiedliche Bakterienstämme zum Einsatz, die durch Sauerstoff gehemmt oder sogar abgetötet werden. Biowissenschaftler nennen diese Clostridien deshalb obligat anaerob. In der industriellen Biotechnologie sind sie wahre Exoten. Die Entscheidung der Experten von der Creavis, der strategischen Forschungseinheit von Evonik, für diese Bakterien ist kein Zufall. Denn anders als die gewöhnlich genutzten Mikroorganismen wie *Escherichia coli* bringen sie für Rheticus einen unschätzbaren Vorteil

mit: Die beiden eingesetzten Clostridien-Arten produzieren von Natur aus die beiden Alkohole Hexanol und Butanol.

Das vereinfacht nicht nur die Stammentwicklung. Werden die Wildtypstämme auch für die Produktion genutzt, können Anlagen einfacher konzipiert werden – ohne die für den Umgang mit gentechnisch veränderten Mikroorganismen geforderten zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen. Da die Clostridien unter Sauerstoffausschluss wachsen, vereinfacht sich auch die Reinhaltung der Anlage. Keime aus der Umgebungsluft haben es in dieser für sie so lebensfeindlichen Umgebung schwer und können nicht überleben.

Weil die beiden Clostridien-Stämme bei jeweils unterschiedlichen Bedingungen optimal wachsen, ist für die Pilotanlage ein System mit zwei Fermentern vorgesehen. Im ersten Bioreaktor wird das einströmende Synthesegas von *Clostridium autoethanogenum* zu Acetat und Ethanol verstoffwechselt. Diese beiden Moleküle dienen dann im zweiten Fermenter dem Bakterium *Clostridium kluyveri* als Ausgangsstoff, um Butyrat →

»Wir entwickeln mit Rheticus eine Plattform, mit der chemische Produkte wesentlich **günstiger und umweltfreundlicher** als heute produziert werden können.«

GÜNTER SCHMID



Dr. Günter Schmid
ist bei Siemens Corporate Technology technisch verantwortlich für das Projekt Rheticus.

und Hexanoat zu formen. In einem letzten Schritt werden diese beiden Verbindungen abermals von *C. autoethanogenum* zu Butanol und Hexanol reduziert.

MODULARER AUFBAU SORGT FÜR FLEXIBILITÄT

Eine Besonderheit ist der modulare Aufbau der Rheticus-Plattform. Elektrolyseur und Fermenter sind als jeweils eigenständige Einheiten konzipiert. Dadurch lässt sich nicht nur die Größe von Anlagen beliebig skalieren und an lokale Gegebenheiten anpassen. Durch die Entwicklung weiterer Module entsteht auch eine bisher ungekannte Flexibilität hinsichtlich der Rohstoffquellen und der hergestellten Produkte. Im Zusammenspiel mit *C. autoethanogenum* könnte die ebenfalls obligat anaerobe Bakterienart *Pelobacter propionicus* beispielsweise CO₂ und Ethanol zu Acetat und Propionat verstoffwechseln. Ölhaltige Hefen wären in der Lage, die von *C. autoethanogenum* gebildeten Stoffe zu Lipiden umzusetzen. Dies sind nur zwei Beispiele, die das Potenzial der künstlichen Fotosynthese verdeutlichen – zahlreiche Chemikalien oder Treibstoffe ließen sich womöglich wesentlich günstiger und umweltfreundlicher produzieren als bisher.

Zudem dient die Rheticus-Plattform als Energiespeicher und kann auf Stromschwankungen reagieren. Sowohl Elektrolyseur als auch die Fermentereinheit werden so ausgelegt, dass sie zwar kontinuierlich betrieben werden können, aber nicht immer unter Volllast laufen müssen. So können darauf aufbauende Lösungen eines Tages sogar die sekundenschnell verfügbare Regelenergie zur Verfügung stellen, die für die Stabilisierung der Stromnetze von eminenter Bedeutung ist.

Siemens entwickelt und verkauft bereits H₂-Elektrolyseure, die den dafür geltenden strengen Anforderungen gerecht werden. Prinzipiell könnte das auch mit den im Rheticus-Projekt genutzten CO₂-Elektrolyseuren gelingen. Ernsthafte Bedenken, dass den Bakterien die schwankende Versorgung Probleme bereiten könnte, gibt es nicht. Schließlich werden sie in der Natur seit Jahrmillionen immer wieder mit wechselnden Bedingungen konfrontiert.

SKALIERUNG IM INDUSTRIEMASSSTAB MÖGLICH

Wie eine vergleichsweise kleine Anlage zur industriellen Nutzung ausgelegt sein könnte, ist in einer aktuellen Veröffentlichung des Fachmagazins *Nature Catalysis* beschrieben (doi:10.1038/s41929-017-0005-1). Demnach würde eine Anlage, die innerhalb eines Jahres 10.000 Tonnen Hexanol und Butanol herstellen kann, rund 25,5 Megawatt Leistung aufnehmen. Je nach Standort, Witterungsbedingungen und der Art der installierten Fotovoltaikmodule entspricht das

hierzulande ungefähr dem Jahresenergieertrag von Solarmodulen mit einer Fläche von 0,15 Quadratkilometern. Zum Vergleich: Nach Schätzungen des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme bedecken alle bis Anfang 2018 in Deutschland installierten Fotovoltaikmodule mit einer Nennleistung von insgesamt 40 Gigawatt rund 300 Quadratkilometer Fläche.

Für die Produktion der 10.000 Tonnen Hexanol und Butanol würden jährlich rund 25.000 Tonnen CO₂ gebraucht. Dieses Gas ist reichlich vorhanden, hat das Umweltbundesamt doch ermittelt, dass in Deutschland durch Industrieprozesse jährlich rund 45 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen entstehen. Rheticus ebnet damit den Weg, das mit Abstand wichtigste Klimagas als Rohstoff zu nutzen und so gar nicht erst in die Atmosphäre gelangen zu lassen.

Wie sich das Scale-up bewerkstelligen ließe, haben die Forscher in ihrer Publikation ebenfalls vorgezeichnet. Um die 25.000 Tonnen CO₂ umsetzen zu können, müsste der Elektrolyseur um den Faktor 270.000 wachsen – beispielsweise indem die Elektrodenfläche von 10 Quadratcentimeter auf 1 Quadratmeter vergrößert wird und 270 der Zellen parallel betrieben werden. Unrealistisch ist das nicht: Beides wurde mit anderen Elektrolyseuren schon umgesetzt.

Für die Fermentation nutzen die Wissenschaftler im Labor zwei Ein-Liter-Bioreaktoren. Um 10.000 Tonnen Alkohole pro Jahr herzustellen, müsste die Produktionsrate um den Faktor 21,6 Millionen angehoben werden. Zum Beispiel indem die Zelldichte in den Fermentern um den Faktor 30 und das Volumen der Behälter auf 700.000 Liter erhöht wird. Auch dies sind Werte, wie sie für andere industriell genutzte biotechnologische Prozesse schon erreicht wurden.

CHEMIE FOLGT DER BESTVERFÜGBAREN ENERGIEFORM

In den kommenden zwei Jahren werden rund 20 Mitarbeiter von Evonik und Siemens hart daran arbeiten, Rheticus aus dem Labor in eine technische Versuchsanlage im 25-Tonnen-Maßstab zu überführen. Noch sind einige Fragen offen: Wie müssen die Schnittstellen zwischen Elektrolyseur und Fermenter gestaltet werden? Werden sich anaerobe Clostridien auch im industriellen Maßstab bewähren? Gelingt es mit den beiden Rheticus-Modulen, einen vollkontinuierlichen Prozess zu gestalten?

Trotz dieser Herausforderungen: Die Zeit, mit einem Projekt wie Rheticus zur Energiewende beizutragen und eine neue energetische Grundlage für die Chemie zu schaffen, war noch nie so günstig wie heute. Denn ein Blick in die Vergangenheit zeigt: Bei der Wahl ihrer Rohstoffe folgte die Chemie immer der bestverfügbaren Energieform. Vor 100 Jahren erlebte die Kohlechemie

ihre Blüte, einige Jahrzehnte später folgte das goldene Zeitalter der Petrochemie. Nicht zuletzt dank des Ausbaus der erneuerbaren Energien ist die Verfügbarkeit von elektrischer Energie in den vergangenen Jahren immer besser geworden. Ein Ende dieses Trends ist nicht abzusehen. Damit wird Strom auch für die energieintensiven Prozesse der chemischen Industrie interessant. Immer mehr Experten erwarten perspektivisch eine Elektrifizierung der Chemie. Rheticus zeigt einen Weg, wie das gelingen könnte, und erlaubt so einen Blick in die Zukunft. —



Dr. Thomas Haas
ist bei der strategischen Innovationseinheit Creavis von Evonik verantwortlich für Rheticus.

»Mit der Rheticus-Plattform wollen wir zeigen, dass **künstliche Fotosynthese** machbar ist.«

THOMAS HAAS