

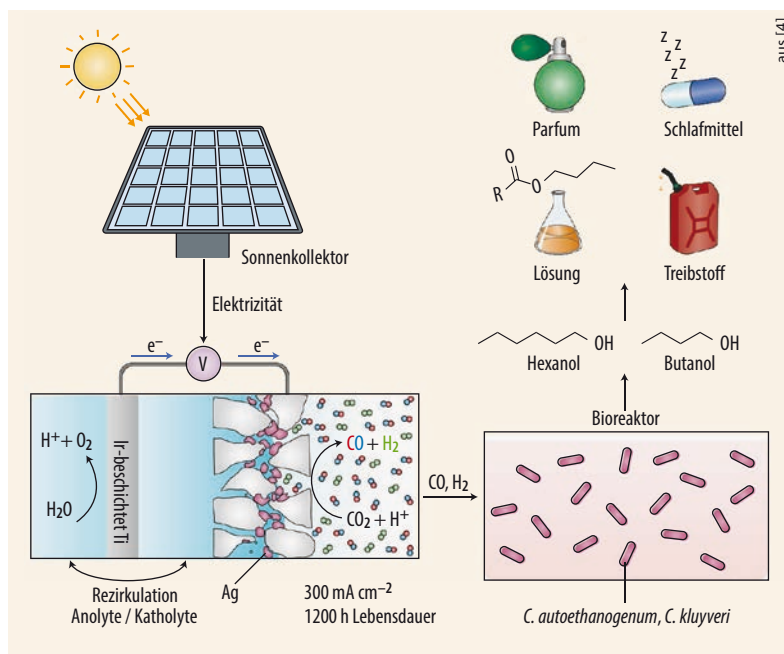
Mit Elektrolyse und Bakterien zum Treibstoff

Auf dem Weg zur nachhaltigen Herstellung von Grundstoffen für die Chemie ist Forschern ein wichtiger Schritt gelungen.

Eine nachhaltige Herstellung von Treibstoffen und von Grundstoffen für die chemische Industrie erfordert Prozesse, die ohne fossile Rohstoffe wie Erdöl auskommen. Verfahren, die mit erneuerbarer Energie CO_2 aus industriellem Abgas in wertvolle Kohlenwasserstoffe transformieren, sind dabei besonders interessant.

Das Fischer-Tropsch-Verfahren war vor rund einhundert Jahren der erste großtechnisch bedeutsame Ansatz, um synthetische Treibstoffe herzustellen. Ausgehend von Kohlevergasung wird dabei in einem ersten Schritt ein Wasserstoff-Kohlenmonoxid- CO_2 -Gemisch, das so genannte Synthesegas, hergestellt. Aus ihm lässt sich über heterogene Katalyse eine Mischung von flüssigen, festen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen gewinnen. Problematisch sind dabei das breite Produktgemisch und damit einhergehend die geringe energetische Effizienz. Versuche, diesen Prozess großtechnisch mit Biomasse zu betreiben, waren bislang wirtschaftlich wenig erfolgreich.¹⁾ Nach wie vor ist daher die Suche nach geeigneteren Methoden hochaktuell [1].²⁾ Dabei ist nun ein wichtiger Fortschritt erreicht worden.

In ihrer aktuellen Arbeit berichtet eine Gruppe um Günther Schmidt von Siemens Erlangen mit Beteiligung von Evonik und Covestro über ein im Labormaßstab realisiertes Verfahren, das wirtschaftliche Anwendungen verspricht [2]. Dabei nutzen die Forscher aus, dass die Biologie der Laborchemie bei der Katalyse mitunter voraus ist: Mikroorganismen können äußerst selektiv Kohlenwasserstoffe fermentieren, wie es von Hefen für den Ethylalkohol in Bier und Wein bekannt ist. Bakterielle Fermentierung ist seit über einhundert Jahren bekannt,³⁾ heute kommt sie in vielen biotechnischen Anwendungen zur Zersetzung oder Synthese von Stoffen großtechnisch zum Einsatz [3].



Per Elektrolyse, die angetrieben wird durch ein Array aus Photovoltaikzellen, erfolgt die Reaktion von CO_2 und Wasser zu CO und H_2 . In einem Bioreaktor wandeln Bakterien diese Reaktionsprodukte

um zu Alkoholen, Hexanol und Butanol, die als wertvolle chemische Grundstoffe oder Treibstoff verwendbar sind. Das Konzept ist modular und skalierbar.

Der beschriebene Prozess läuft in zwei getrennten Schritten ab (**Abbildung**): Einer elektrolytischen CO_2 -Reduzierung zu Synthesegas folgt in einem Bioreaktor mittels zwei verschiedener Bakterien die Fermentation industriell wertvoller Kohlenwasserstoffe wie Acetat oder Alkoholen. Diese Experimente gelten als ein Meilenstein auf dem Weg zu nachhaltiger Erzeugung von Kohlenwasserstoffen [4].

Kohlenstoffdioxid ist in salzbasierten Elektrolyten bei Umgebungsdruck und -temperatur nur schwach löslich. Dies begrenzt die Stromdichten – und damit die Reaktionsrate – üblicherweise auf einige mA/cm^2 . Beim ersten Schritt des neuen Verfahrens ist es aber gelungen, diese Begrenzung zu überwinden: Die Forscher nutzen eine kommerzielle, bisher nur für Chlor-Alkali-Elektrolyse verwendete silberbasierte Gas-Diffusions-Kathode, durch die von der Rückseite reines gasförmiges CO_2 diffundiert und zu CO reduziert wird. Ihr steht, durch eine Zirkon-

oxid-Membran getrennt, eine mit Iridiumoxid beschichtete Titan-Anode gegenüber, an der Wasser gespalten wird.⁴⁾ Dies erlaubte im geschlossenen Elektrolytkreislauf eine konstante Produktion eines 65/35 mol% $\text{CO}-\text{H}_2$ -Gemisches bei 30 °C und Normaldruck mit bis zu 300 mA/cm^2 . Entsprechend höhere Reaktionsraten sind möglich.

Der zweite Schritt zielt darauf ab, das erzeugte Synthesegas anaerob im Bioreaktor durch das in der Biotechnologie wohlbekannte Bakterium *Clostridium autoethanogenum* mit einer Energieeffizienz von fast 80 Prozent zu Acetat und Ethanol zu fermentieren. Durch Hinzufügen des Bakteriums *C. kluyveri* lassen sich daraus Butanol und Hexanol metabolisieren.

Die hohe Selektivität dieses Prozesses zeigt sich am erzielten Faraday-Wirkungsgrad – also die tatsächliche gegen die theoretisch mögliche Alkoholproduktion – von nahezu 100 Prozent. Für den Elektrolyseur war ein konstanter Betrieb über 1200 Stunden ohne

1) Für einen Überblick siehe de.wikipedia.org/wiki/BtL-Kraftstoff

2) Methodisch werden insbesondere elektrokatalytisch, „biohybrid“- (wie hier beschrieben), biologisch und „photokatalytisch“ (d. h. Halbleiter-)basierte Verfahren zur CO_2 -Reduktion verfolgt. Der AK Energie hat sich mit diesen Verfahren u. a. auf der DPG-Frühjahrstagung in Erlangen befasst.

3) Maßgebliche Pioniere waren Louis Pasteur, Eduard Buchner und Chaim Weizmann.

4) Die Autoren betrachten auch die Option, für die H_2 -Herstellung einen separaten Elektrolyseur zu verwenden.

relevante Degradation möglich. Die Bioreaktoren waren nach einer Formationsphase für rund 45 Stunden mit gleichbleibender Wandlungsrate (um die 60 mg Alkohol per Liter und Stunde) in Betrieb.

Die Autoren diskutieren auch die Wirtschaftlichkeit und Skalierung auf industrielle Größe: Als kostengünstige CO₂-Quelle setzen sie auf gereinigtes Abgas, beispielsweise von Brauereien, Zementfabriken oder Biomasseverstromungsanlagen. In deren Nachbarschaft sind Anlagen in passender Größe denkbar, typisch wären rund 10 000 Tonnen Jahresproduktion. Zum Vergleich: Die gesamte Butanol-Erzeugung Deutschlands beträgt das rund 60-Fache. Vom Labormaßstab ausgehend erfordert eine solche Anlage beim ersten Prozessschritt eine Skalierung von etwa $2,7 \times 10^5$. Das wäre möglich durch 270 Stacks und eine Vergrößerung der Elektrodenoberfläche von zehn Quadratzentimetern auf ein Quadratmeter. Für die Weiterverarbeitung des Synthesegases gilt es, von einigen Litern im Labor auf industriell bereits übliche Bioreaktor-Volumina von 700 m³ zu skalieren und dabei die Konzentration um einen Faktor

30 zu erhöhen, was für machbar gehalten wird. Dabei ist von Vorteil, dass die Anlage keinen sterilen Betrieb erfordert.

Für die anvisierte dezentrale Produktion schlagen die Autoren die Nutzung von (Überschuss-) Strom aus regionaler Photovoltaik vor, für den sie 2,5 ct/kWh ansetzen. Mit rund 20 Prozent Umwandlungseffizienz von Licht zu Strom und einer Energieeffizienz von bis zu 47 Prozent für die CO₂- bzw. 70 Prozent für die H₂-Erzeugung erreichen sie einen Gesamtwirkungsgrad (von Photonenenergie zu chemischer Produktenergie) von rund acht Prozent. Das ist für diese Art von Konzepten eine der höchsten bisher erzielten Gesamteffizienzen! Die Kosten sollten gemäß der Abschätzung mit der gegenwärtigen Herstellung vergleichbar sein (etwa 1,20 € pro kg Butanol). Über die Investitions- und Betriebskosten sowie die Frage, ob der Betrieb bei fluktuierendem Stromangebot möglich ist, ohne dass Stromspeicherung in die Rechnung eingehen muss, gibt es keine Angaben.

In einer ersten Bewertung [4] des Prozesses wird auf die außer-

gewöhnlich hohe erreichte Stromdichte und stabile Betriebsdauer des Elektrolyseurs, auf die Energieeffizienz des Gesamtverfahrens und insbesondere auf seine Modularität hingewiesen, die für die Skalierung und weitere Optimierungen Vorteile bieten könnte gegenüber Entwicklungen, die teils ohne Fermenter rein elektrochemisch vorgehen oder eine Fermentation in die elektrochemische Zelle zu integrieren suchen. Auf der Grundlage des Laborerfolges wollen Siemens und Evonik bis 2021 mit Förderung des BMBF in Marl eine Pilotanlage als Zwischenschritt hin zu kommerziellen Anlagen bauen [5].

Hardo Bruhns

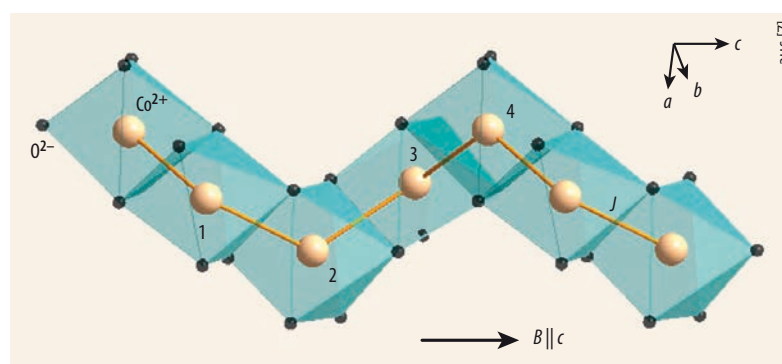
- [1] O. S. Bushuyev et al., *Joule* 2018, [www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(17\)30076-4](http://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(17)30076-4)
- [2] Th. Haas et al., *Nat. Catal.* 1, 32 (2018). Die Arbeiten werden im Kontext der vom BMBF geförderten Kopernikusprojekte P2X und Rheticus durchgeführt.
- [3] H. Sahm et al. (Hrsg.), *Industrielle Mikrobiologie*, Springer, Berlin, Heidelberg (2013)
- [4] E. B. Creel und B. D. McCloskey, *Nat. Catal.* 1, 6 (2018)
- [5] www.fona.de/de/kickoff-rheticus-projekt-22925.html

String-Zustände aus Magnonen

In Strontiumkobaltvanadat ist es zum ersten Mal gelungen, die schon von Hans Bethe für eindimensionale Quantenmagnete vorhergesagten String-Zustände experimentell nachzuweisen.

Wir kennen alle das Konzept der Punktteilchen, also nulldimensionaler Objekte ohne Ausdehnung. Sie stellen eine Idealisierung dar, die in sehr vielen Bereichen der Physik erfolgreich verwendet wird. In der makroskopischen Physik handelt es sich dabei um eine Näherung. Mikroskopisch gibt es jedoch tatsächlich Elementarteilchen, wie Elektronen oder Quarks, denen man keine Ausdehnung zuordnen kann. Sie sind in der Tat Punktteilchen gemäß heutiger Messmöglichkeiten.

Viele Varianten von String-Theorien behandeln elementare Objekte nicht als punktiert, sondern als eindimensional. Man



Strontiumkobaltvanadat besitzt eine Kettenstruktur mit vierfacher Schraubenachse entlang der *c*-Achse des Kristalls.

Eine starke Ising-Anisotropie der magnetischen Wechselwirkung richtet die Spins bevorzugt entlang dieser Achse aus.

muss sie sich als Saiten oder unendlich dünne Fäden, eben Strings, vorstellen. Daneben werden auch höherdimensionale Objekte disku-

tiert, so genannte Branes (von Englisch: membrane). Solche Ansätze sollen eine große vereinheitlichte Theorie von Gravitation und Stan-