

# IM FOKUS

---

## WIRTSCHAFT AUF DEM GRÜNEN ZWEIG

**22** | Sprit aus Stiel und Stängel

**30** | Pflanzen als Bioreaktoren

**38** | Eine Inventur des fossilen Zeitalters

Futter für Teller und Tank: Während die Körner von Gerste und anderen Getreidesorten zu Nahrungsmitteln verarbeitet werden, lassen sich aus dem Stroh Biokraftstoffe der zweiten Generation gewinnen.

FOTO: ISTOCK



# SPRIT AUS STIEL UND STÄNGEL

*TEXT: RALPH DIERMANN*

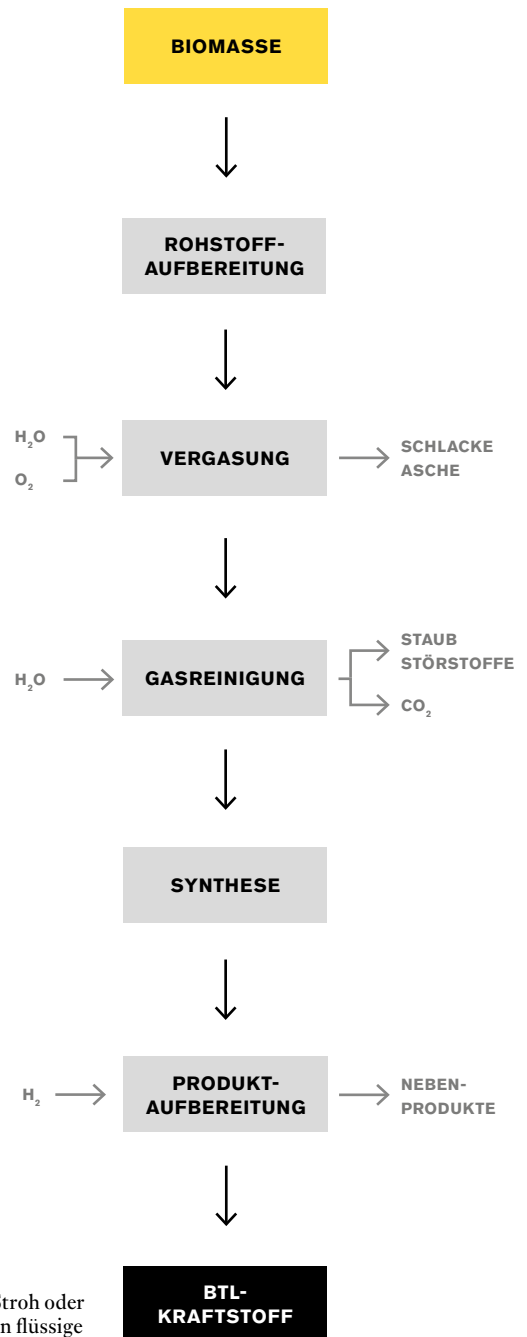
23

Biokraftstoffe der zweiten Generation könnten den Tank-Teller-Konflikt lösen. Denn für sie werden nicht eigens Energiepflanzen auf Ackerflächen angebaut, die dann nicht mehr für die Nahrungsmittelproduktion verfügbar sind. Weltweit arbeiten Forschende, unter ihnen auch Ferdi Schüth, Direktor am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, und Walter Leitner, Direktor am Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion, daran, Biotreibstoffe wirtschaftlich konkurrenzfähig zu machen – und emissionsärmer.

Millionen Jahre hat die Natur gebraucht, um den Rohstoff zu schaffen, der uns eine nahezu grenzenlose Mobilität ermöglicht – Erdöl, entstanden aus abgestorbenen Meeresorganismen, die unter Sedimentgestein begraben wurden. Dort waren sie über einen sehr langen Zeitraum hohem Druck und hoher Temperatur ausgesetzt. Kraftstoffe wie Benzin oder Diesel sind also ein Gruß aus der fernen Erdgeschichte.

Doch es geht auch wesentlich schneller: Raffinerien produzieren aus Raps, Getreide, Mais, Zuckerrüben oder -rohr hochwertige Biokraftstoffe, die Benzin und Diesel ähneln. Sie können deshalb in modernen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, ohne dass diese dafür grundlegend verändert werden müssen. Biokraftstoffe lassen sich über das bestehende Tankstellennetz verteilen. Ihre Energiedichte ist nahezu so hoch wie die fossiler Treibstoffe, Autofahrer kommen mit einer Tankfüllung also ähnlich weit. Vor allem aber sind sie wesentlich klimafreundlicher als ihre fossilen Gegenstücke, da bei ihrer Verbrennung im Motor nur so viel Kohlendioxid freigesetzt wird, wie die Pflanzen zuvor aufgenommen haben. Klimaneutral ist der Biosprit allerdings nicht, weil beim Anbau und bei der Verarbeitung der Pflanzen Treibhausgase entstehen.

TREIBSTOFF AUS BIOMASSE



Um aus Stroh oder Holzabfällen flüssige Treibstoffe zu gewinnen, wird Biomasse zerkleinert und getrocknet. Anschließend wird sie mithilfe von Sauerstoff in Synthesegas umgewandelt, das hauptsächlich aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff besteht. Nachdem Verunreinigungen daraus entfernt wurden, entstehen bei der Synthese flüssige Kohlenwasserstoffe, die nach der Aufbereitung als Treibstoffe zur Verfügung stehen.

Bioöl für Sprit und chemische Rohstoffe

Wer heute alternative Kraftstoffe wie Biodiesel oder Bioethanol zapft – sei es pur oder als Beimischung zu Benzin („E10“) und Diesel –, füllt sich sogenannte Biotreibstoffe der ersten Generation in den Tank. Sie werden aus Früchten und Samen von Pflanzen hergestellt. Damit stehen diese Biokraftstoffe jedoch in direkter Konkurrenz zur Produktion von Lebensmitteln. So lässt sich etwa aus Rapssamen nicht nur ein Kraftstoff, sondern auch ein gesundes Speiseöl herstellen. In Deutschland werden heute auf 800 000 Hektar Energiepflanzen für Treibstoffe angebaut, hat die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) ermittelt. Das entspricht immerhin sieben Prozent der gesamten Ackerfläche der Bundesrepublik. Angesichts der stetig wachsenden Weltbevölkerung und der knappen landwirtschaftlich nutzbaren Fläche auf der Erde entsteht mit den Biokraftstoffen der ersten Generation ein Tank-Teller-Konflikt.

Ein guter Grund für Forschende weltweit – darunter auch Wissenschaftler an Max-Planck-Instituten –, an Biokraftstoffen zu arbeiten, die sich aus anderen, nicht für die Ernährung geeigneten organischen Materialien herstellen lassen. Ziel ist, das Biomasse-Angebot für klimafreundliche Kraftstoffe zu erweitern, um dadurch den Konflikt zwischen Nahrungsmittel- und Treibstoffproduktion zu entschärfen.



Rohstoff Sägespäne: Holz besteht im Wesentlichen aus Lignocellulose, aus der sich sowohl Biosprit als auch Ausgangsstoffe für die chemische Industrie gewinnen lassen.

Dabei haben es die Forscher darauf abgesehen, möglichst viele Bestandteile der Biomasse zu nutzen. Im Fokus steht dabei die Lignocellulose, die aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin besteht und das Gerüst von Pflanzen bildet. Mit ihren hohen Anteilen an Kohlen- und Wasserstoff ist sie ein attraktiver Rohstoff für Alternativen zu Benzin und Diesel, die nichts anderes sind als Kohlenwasserstoffe. Aus ihnen lassen sich aber auch Substanzen gewinnen, aus denen chemische Erzeugnisse wie Kunststoffe hergestellt werden können. Für beide Anwendungen kommen als Ausgangsmaterial etwa Stroh oder die Abfälle von Baumpflegearbeiten infrage. Allein mit der in Deutschland jährlich anfallenden Strohmenge ließen sich theoretisch gut drei Prozent des heimischen Primärenergiebedarfs decken.

Biokraftstoffe der zweiten Generation lassen sich auf verschiedenen Wegen herstellen. Im sogenannten BtL-Verfahren (Biomass to Liquids) wird aus der Biomasse unter Hitze zunächst Synthesegas erzeugt, das vor allem aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid,

aber auch aus Schwefel- und Stickstoffverbindungen besteht. Letztere müssen entfernt werden, da sie den weiteren Prozess behindern. Das Synthesegas wird anschließend zu flüssigen Kohlenwasserstoffen verarbeitet – zum Beispiel im Fischer-Tropsch-Verfahren, das bereits vor fast hundert Jahren entwickelt wurde, um Kohle zu verflüssigen. Schließlich wird das entstandene Gemisch verschiedener Kohlenwasserstoffe mit Prozessen aus der Raffination von Erdöl zu Biokraftstoffen verarbeitet. „Mit diesem Verfahren ist es möglich, sogenannte Drop-in Fuels herzustellen, die sich problemlos in den heutigen Verbrennungsmotoren einsetzen lassen“, erklärt Ferdi Schüth, Direktor am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr. Außerdem eignet sich der BtL-Prozess für nahezu alle Arten von Biomasse.

Allerdings bringt das Verfahren eine logistische Herausforderung mit sich: Wegen des, gemessen am Volumen, recht geringen Energiegehalts der Biomasse sind gewaltige Mengen davon nötig, um eine Anlage aus-





Die Mischung macht's: Ferdi Schüth und sein Team arbeiten daran, Biokraftstoffe wettbewerbsfähiger zu machen. Im Labor suchen die Forschenden unter anderem nach Wegen, aus Biomasse neben Treibstoff auch hochpreisige Rohstoffe für die Chemieindustrie zu erzeugen.



lasten zu können. Das macht unzählige LKW-Fahrten notwendig, um ausreichend Stroh und andere Biomasse vom Acker zur Anlage zu bringen. Lösen lässt sich dieses Problem mit einer räumlich getrennten Pyrolyse, die den Syntheseprozessen vorgeschaltet wird. Dabei entsteht unter anderem ein sogenanntes Pyrolyse- oder Bioöl, das aus verschiedenen sauerstoffhaltigen organischen Verbindungen sowie Wasser besteht. Es enthält etwa drei Viertel des Energiegehalts der Biomasse – bei stark reduziertem Volumen. „Das Bioöl wird dann per Tankwagen oder

Zug in die BtL-Anlage transportiert und dort mit den Standardverfahren weiterverarbeitet“, erläutert Schüth. Der Umweg über die Pyrolyse hat aber nicht nur aus logistischer Sicht Charme – sondern auch, weil Raffinerien mit dem Bioöl neben Kraftstoffen auch chemische Rohstoffe herstellen können.

Eine Alternative zum BtL-Konzept sind die enzymatischen Verfahren. „Dabei wird die Biomasse nach einer mechanischen Vorbehandlung mithilfe spezieller Enzyme zerlegt“, erklärt Schüth. Dabei besteht die Herausforderung darin, das Lignin von der Cellulose und der Hemicellulose zu trennen. Letztere können zu Ethanol vergärt werden. Als Alternative zum enzymatischen Prozess lässt sich die Biomasse aber auch chemisch umwandeln. Auf diesem Wege kommt man zu einer breiteren Palette möglicher Kraftstoffkomponenten, zu Furanderivaten zum Beispiel. Ein Pluspunkt von Ethanol und Furanen: Sie verbrennen sauberer als etwa der BtL-Sprit.

Weltweit könnten Biokraftstoffe der zweiten Generation – einer Studie des Umweltbundesamtes zufolge – bis 2050 zwischen 13 und 19 Exajoule Energie bereitstellen. Das reicht zwar noch längst nicht aus, um den gesamten Energiebedarf für die Mobilität zu decken – der wird 2050 global bei insgesamt 100 bis 179 Exajoule liegen, schätzt die Bundesbehörde. Für den Klimaschutz im Verkehr seien sie jedoch eine notwendige Ergänzung zur Elektromobilität sowie zu anderen alternativen Treibstoffen.

Mit ihrer Arbeit am Biosprit sind die Forschenden aus Wissenschaft und Industrie bereits sehr weit gekommen: Große Demonstrationsanlagen sowohl für BtL- als auch für enzymatische Prozesse zeigen, dass die Verfahren, technisch gesehen, im Grundsatz gut funktionieren. Wären da bloß nicht die hohen

Kosten. „Die Prozesse sind derzeit alle noch viel zu teuer für einen breiten kommerziellen Einsatz“, sagt Schüth.

Beim BtL-Prozess treibt unter anderem die Reinigung des Synthesegases etwa von Schwefel- und Stickstoffverbindungen die Kosten in die Höhe. Bei den enzymatischen Verfahren wiederum gehen vor allem die Enzyme ins Geld. Zudem ist der Prozess alles andere als trivial. Das gilt auch für die Zerlegung der Biomasse auf chemischem Wege. Auch die Integration der enzymatischen und chemischen Verfahren in die Prozesse einer Bioraffinerie ist nicht gerade einfach. „Hier geht es vor allem darum, eine optimale Balance zwischen der Herstellung von Kraftstoff und Chemikalienprodukten zu finden“, erläutert Schüth.

Es gibt also noch viel zu tun für die Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie – auch für Max-Planck-Institute, von denen einige schon lange zu Biokraftstoffen forschen. Das Max-Planck-Institut für Kohlenforschung zum Beispiel arbeitet derzeit unter anderem an Synthesemethoden für die Veredelung von Bioöl, das durch eine Pyrolyse von Biomasse hergestellt wird. „Wir wollen dazu beitragen, dass Raffinerien aus Bioöl auf wirtschaftliche Weise eher hochpreisige Chemierohstoffe und Kraftstoffe im richtigen Verhältnis produzieren können“, sagt Schüth. Das Bioöl enthält neben Wasser verschiedene Verbindungen aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff – Carbonsäuren, Aldehyde oder Phenole zum Beispiel. Um das Bioöl zu Kraftstoffen und chemischen Rohstoffen verarbeiten zu können, müssen gezielt einzelne Sauerstoffatome aus den Verbindungen entfernt werden. Hier setzen die Max-Planck-Forschenden an: Sie suchen nach Katalysatoren, die eine solche selektive Desoxygenierung bei geringem Energieaufwand möglich machen.

## Weniger Schadstoffe

Darüber hinaus haben Forscher des Instituts einen neuartigen mechanochemischen Prozess entwickelt, bei dem Cellulose durch das Mahlen in einer Kugelmühle zerlegt wird. Das Verfahren ist schneller als herkömmliche Methoden, und es fallen weniger wertlose Nebenprodukte an. „Wir müssen aber ehrlich sagen: Bei der gegenwärtigen Marktsituation findet sich niemand, der den Prozess derzeit kommerziell anwenden könnte“, schränkt Schüth ein.

Wenn für die Produktion von Biokraftstoffen der zweiten Generation die Biopolymere aus der Biomasse erst einmal gespalten und dann quasi nach Belieben zu neuen Molekülen zusammengesetzt werden, dann lässt sich vielleicht auch ein anderes Problem angehen, für das der Verkehr – neben seiner schlechten CO<sub>2</sub>-Bilanz – immer wieder in die Kritik gerät: die Belastung vor allem der Innenstädte mit Schadstoffen,



## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Biokraftstoffe aus Pflanzenabfällen wie etwa Stroh stehen nicht in Konkurrenz zur Produktion von Nahrungsmitteln, sind aber noch zu teuer.

Biotreibstoffe werden in Pilotanlagen bereits im Biomass-to-Liquids-Verfahren oder enzymatisch erzeugt und könnten etwa ein Zehntel des weltweiten Energiebedarfs für die Mobilität decken.

Max-Planck-Forscher versuchen, die Nutzung von Lignocellulose rentabler zu machen, unter anderem indem sie daraus neben Treibstoffen auch eher hochpreisige Grundstoffe für die chemische Industrie gewinnen.

Über die molekulare Zusammensetzung lassen sich sowohl die Ruß- als auch die Stickoxidemissionen von Biotreibstoffen reduzieren. Bei fossilen Treibstoffen lässt sich der Ausstoß des einen Schadstoffs nur auf Kosten erhöhter Emissionen des jeweils anderen senken.

hauptsächlich mit Feinstaub und Stickoxiden. Denn das BtL-Verfahren lässt sich möglicherweise so gestalten, dass schadstoffärmerer Sprit entsteht.

Diesen Grundgedanken verfolgen Forschende an einem Exzellenzcluster der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH) namens „The Fuel Science Center“, an dem die Max-Planck-Institute für Kohlenforschung und für chemische Energiekonversion sowie das Forschungszentrum Jülich beteiligt sind. Dabei haben es die Wissenschaftler vor allem auf die Ruß-NO<sub>x</sub>-Schere abgesehen, die bei allen Kraftstoffen aus reinen Kohlenwasserstoffen, ob fossil oder erneuerbar, ein Problem darstellt. Sie bezeichnet einen Zielkonflikt bei der Verbrennung: Je weniger Sauerstoff dabei vorhanden ist, desto mehr Ruß in Form von gesundheitsschädlichem Feinstaub entsteht. Je mehr Sauerstoff jedoch im Spiel ist, desto mehr Stickoxide, kurz NO<sub>x</sub>, stößt der Motor aus. „Man hat also vermehrt entweder den einen oder den anderen Schadstoff im Abgas“, erklärt Walter Leitner, Direktor am Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion in Mülheim an der Ruhr.

Die Wissenschaftler des Fuel Science Center haben die molekulare Zusammensetzung der alternativen Kraftstoffe daher so verändert, dass sowohl der Ruß als auch der NO<sub>x</sub>-Ausstoß niedrig gehalten werden. „Wir haben die Kraftstoffe quasi auf die Emissionsminderung hin maßgeschneidert“, sagt Leitner. Dabei arbeiten die Forscher nicht nur mit biobasierten, sondern auch mit synthetischen, strombasierten Kraftstoffen. Dieser Treibstoff, auch E-Fuel genannt, wird aus Kohlendioxid und aus Wasserstoff hergestellt, der per Elektrolyse mit Strom aus Windrädern, Photovoltaikanlagen oder Wasserkraftwerken produziert wurde. Abstriche beim Wirkungsgrad des Motors müssen Autofahrer bei solchen Kraftstoffen nicht machen. „Hier kann man über die molekulare Zusammensetzung sogar Vorteile zum Beispiel bei der Klopfestigkeit und damit der Motorleistung erreichen“, erklärt der Wissenschaftler.

Das Exzellenzcluster setzt jedoch nicht nur bei den Kraftstoffen an, sondern auch bei den Motoren. „Die Kollegen aus den Ingenieurwissenschaften entwickeln die klassischen Otto- und Dieselmotoren so weiter, dass sie die Vorteile der optimierten Kraftstoffe bestmöglich nutzen können, mit Blick auf die Emissionen wie auf ihre Performance“, erläutert Leitner. So arbeiten die Forscher unter anderem an Motoren, die mit unterschiedlichen Kraftstoffen aus zwei Tanks gespeist werden – einer enthält einen Kraftstoff, der besonders schnell zündet und damit die Verbrennung optimal in Gang setzt; der andere liefert den Sprit für den eigentlichen Betrieb. Von der Serienreife sind solche Motorenkonzepte allerdings noch weit entfernt. „Das liegt nicht zuletzt daran, dass die Automobilindustrie derzeit sehr stark auf andere Pferde setzt“, so Leitner.

Gut möglich, dass sich dies ändert, wenn die Politik Rahmenbedingungen schafft, die innovative Motorenkonzepte dieser Art für die Autobranche attraktiver machen. Das gilt genauso für den Einsatz von Kraftstoffen regenerativen Ursprungs. „Sie werden sich nur dann durchsetzen, wenn der Markt ihren Einsatz belohnt. Und das verlangt, dass die Politik die Weichen neu stellt“, erklärt Ferdi Schüth vom Max-Planck-Institut für Kohlenforschung.

Zwar gibt es mit dem Bundesimmissionsschutzgesetz bereits heute einen Hebel, Ökosprit an die Zapfsäulen zu bringen. Es zwingt die Kraftstoffindustrie, die CO<sub>2</sub>-Emissionen ihrer Produkte kontinuierlich zu reduzieren. Um dem gerecht zu werden, mischen die Unternehmen dem Benzin und Diesel jedoch vor allem Biokraftstoffe der ersten Generation bei. Die sind deutlich billiger als solche aus Cellulose. Das liegt vor allem daran, dass die Branche Kraftstoffe aus Früchten, Samen wie Raps oder Zuckerrohr längst in industriellem Maßstab herstellt, was die Kosten trotz der teuren Ausgangsstoffe niedrig hält.

Um Biotreibstoffe der zweiten Generation in den Markt zu bringen, muss die Nachfrage stimuliert werden, sodass es sich für die Industrie lohnt, entsprechende Produktionskapazitäten aufzubauen. Denn je mehr hergestellt wird, desto stärker sinken die Kosten. Immerhin hat die EU mit der Neufassung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) festgelegt, dass der Anteil „fortschrittlicher Biokraftstoffe im Verkehrssektor“ – gemeint sind alle Kraftstoffe aus biologischen Abfall- und Reststoffen – bis 2025 mindestens ein Prozent und bis 2030 mindestens 3,5 Prozent betragen soll. Den Anteil von Biokraftstoffen der ersten Generation hat die EU wegen möglicher Landnutzungskonflikte auf sieben Prozent begrenzt. Da Biokraftstoffe der zweiten Generation doppelt ange-

**„Eine CO<sub>2</sub>-Abgabe auf fossile Kraftstoffe kann dazu beitragen, dass diese ihren Kostenvorteil verlieren.“**

FERDI SCHÜTH



rechnet werden dürfen, liegt das Ziel für diese real jedoch nur maximal halb so hoch.

Schüth und auch sein Forscherkollege Leitner bevorzugen allerdings statt einer Quote ein anderes Instrument: die CO<sub>2</sub>-Bepreisung. „Eine CO<sub>2</sub>-Abgabe auf fossile Kraftstoffe in angemessener Höhe kann dazu beitragen, dass diese ihren Kostenvorteil gegenüber klimafreundlicheren Alternativen verlieren“, sagt Schüth. Leitner weist darauf hin, dass dies aber nur dann gilt, wenn die Beimischung von biobasierten oder auch synthetischen, strombasierten Kraftstoffen als emissionsmindernd anerkannt wird. „Nach den aktuellen EU-Regularien ist das derzeit noch nicht der Fall“, sagt Leitner. „Hier besteht bei der bevorstehenden Novellierung ein dringender Handlungsbedarf, damit in der Bilanz nicht allein der CO<sub>2</sub>-Ausstoß am Motor betrachtet wird, sondern auch die Bindung des CO<sub>2</sub> bei der Produktion“, sagt Leitner. „Biotreibstoffe und E-Fuels verwerten ja zunächst CO<sub>2</sub>, um damit erneuerbare Energie nutzbar zu machen. Sie packen sozusagen Sonne in den Tank.“

<https://www.mpg.de/podcasts/biooekonomie>



## GLOSSAR

### *BIOMASS-TO-LIQUIDS-PROZESS (BTL)*

Der Begriff bezeichnet thermochemische Verfahren, durch die Biomasse in flüssige Treibstoffe umgewandelt wird. Dabei wird aus Biomasse zunächst Synthesegas, eine Mischung von Kohlenmonoxid und Wasserstoff, erzeugt. Daraus entstehen dann, zum Beispiel in der Fischer-Tropsch-Synthese, flüssige Kohlenwasserstoffe.

### *FISCHER-TROPSCH-SYNTHESE*

Das Verfahren wurde ursprünglich entwickelt, um aus Kohle flüssige Treibstoffe zu gewinnen; es lässt sich aber auch auf Biomasse anwenden. Dabei werden aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, die aus dem festen Ausgangsstoff gewonnen werden, flüssige Kohlenwasserstoffe synthetisiert.

### *LIGNOCELLULOSE*

bildet das Stützmaterial von Pflanzen und besteht aus den Vielfachzuckern Cellulose und Hemicellulose sowie dem komplexen Biopolymer Lignin.

Alternative zur Alternative: Biomasse ist für Walter Leitner nicht die einzige Quelle klimaneutraler Treibstoffe. Er treibt auch die Umwandlung von CO<sub>2</sub> und regenerativ erzeugtem Wasserstoff zu Kohlenwasserstoffen und anderen chemischen Produkten voran.

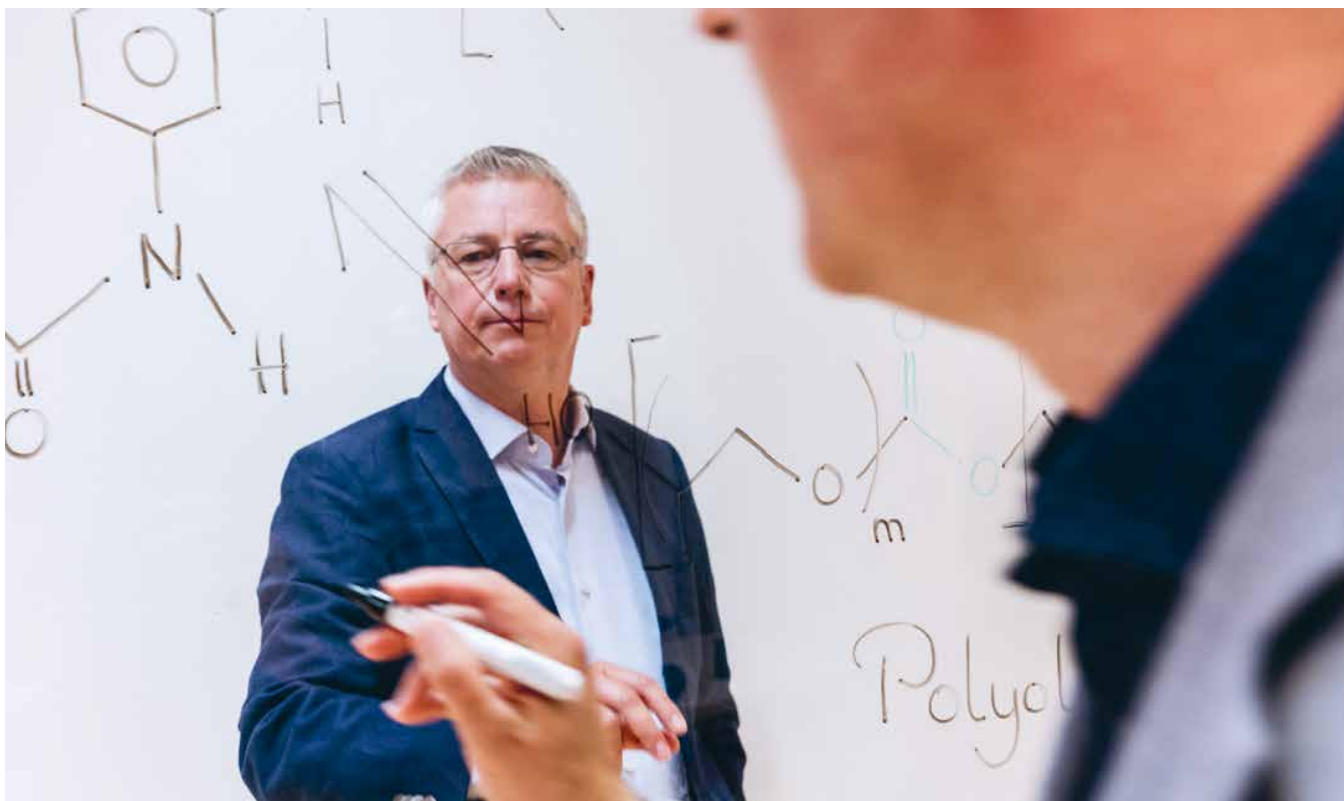


FOTO: ANSGAR PLUDENZ