AVENUE

Ausgabe Herbst 2021

Alternative Treibstoffe

Der lange Weg zum Ersatz der Fossilen

Roland Bilang
Geschäftsführer Avenergy Suisse

Fabian Bilger
Leiter HSSE und stellvertretender Geschäftsführer

Die vorliegende Ausgabe der «Avenue» widmet sich den nichtfossilen Treibstoffen. Exemplarisch und damit ohne Anspruch auf Vollständigkeit spannen wir einen Bogen von Projekten, die sich noch in einer Entwicklungsphase befinden, wie etwa die Treibstoffe aus Algen (Seiten 14–15), über Pilotanlagen wie jene für synthetische Treibstoffe (Seiten 18–23) bis hin zu marktfähigen Produkten wie den Sustainable Aviation Fuels (SAF), die gerade in der Flugwirtschaft Einzug halten (ab Seite 10). Für einmal nicht im Fokus stehen die Biotreibstoffe, die wir bereits heute an den Tankstellen dem Benzin und Diesel beigemischt beziehen. Und die Entwicklung der Wasserstoffmobilität in der Schweiz haben wir bereits in der «Avenue»-Ausgabe im Frühjahr 2020 thematisiert, die wie alle Nummern unseres Magazins unter www.avenergy.ch abrufbar ist.

Die Übersicht auf den Seiten 4–5 zeigt zum Einstieg die enorme Vielfalt an Alternativen zu fossilen Treibstoffen, die derzeit in Betracht gezogen werden. Die hier vorgestellten Techniken befinden sich oftmals noch in Entwicklungsstadien, dementsprechend kommt in dieser «Avenue»-Nummer ausgiebig die Wissenschaft zu Wort. Wir massen uns kein Urteil an, ob und welche der vorgestellten Technologien und Pfade dereinst die Erdölprodukte ersetzen können. Vielleicht gibt es sie tatsächlich, die Lösung für alle Probleme, die heute noch ein Dasein als unbeachtetes Nebenprojekt fristet. Eher realistisch scheint zurzeit, dass es nicht einen einzigen Sieger geben wird, sondern ein Nebeneinander vieler Ansätze.

Diese Alternativen sind heute teurer, zum Teil sehr viel teurer als Erdölprodukte. Trotzdem dürfte es dereinst nicht einmal eine Frage des Preises sein, ob sich eine Technologie durchsetzen wird. Wir können davon ausgehen, dass im einen oder anderen Fall dank der Optimierung und Skalierung der Produktionsverfahren ein konkurrenzfähiger Energieträger entstehen wird, zumindest unter der Voraussetzung, dass die CO_2-Emissionen weltweit angemessen bepreist werden. Aus der Sicht der Versorgungssicherheit werden wir uns synthetische Energieträger vielleicht eines Tages als Versicherung gegen Mangellagen einfach leisten müssen.

Hingegen ist die Frage der Grössenordnung der entscheidende Knackpunkt. Zwar werden viele der sich nun in Entstehung befindenden Pilotanlagen in den kommenden Jahren zu beeindruckenden Produktionsleistungen fähig sein. So tragen zum Beispiel die flüssigen Biotreibstoffe heute bereits weltweit rund zwei Prozent zum Treibstoffverbrauch bei. Und doch ist dies nur ein Tropfen auf den heissen Stein angesichts der beinahe 100 Millionen Fass Öl, die täglich weltweit verbraucht werden. Der gesamte globale Primärenergieverbrauch im Jahr 2020 belief sich laut dem Statistical Revue of World Energy von BP auf 556 Exajoules. Fast 83 Prozent davon entfielen auf die fossilen Energieträger Erdöl, Erdgas und Kohle. Die CO_2-armen Energieträger (Erneuerbare, Wasserkraft und Kernenergie) steuerten den Rest bei. Der vollständige Ersatz der Fossilen durch CO_2-freie Alternativen liegt noch in weiter Ferne, auch wenn die Marschrichtung stimmen mag.

«Wir massen uns kein Urteil an, ob und welche der vorgestellten Technologien und Pfade dereinst die Erdölprodukte ersetzen können.»

Obwohl diese Ausgabe der «Avenue» techniklastig ausfällt, wollen wir die politischen Rahmenbedingungen nicht ganz aus den Augen lassen. Die internationale Gemeinschaft ist gerade sehr intensiv dabei, diese weiter zu gestalten. Das letzte Kapitel auf den Seiten 26–27 ist daher dem «Fit for 55»-Paket der EU gewidmet und der Frage, inwiefern es Einfluss auf die Schweiz haben wird.

Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre.

Alternative Treibstoffe

CCU
Carbon Capture and Utilization
CO_2-Abscheidung und -Verwendung

→ DAC (Direct-Air-Capture)
→ Zementwerk
→ Kehrichtverwertungsanlage

S. 16–17 ZHAW neuer Katalysator

Kohlenstoffquellen

Biomasse

S. 14–15 Mikroalgen als Rohstoff

→ Algen
Als Algen werden Photosynthese betreibende, im Wasser lebende Lebewesen zusammengefasst. Algen können durch unterschiedliche Verfahren als Biotreibstoff genutzt werden.

→ Abfallholz
Etwa 5 bis 10 kg Holz sind notwendig, um 1 kg BtL zu produzieren.

→ Grünabfälle
Mit dem Biogasertrag aus 20 vergorenen Bananenschalen kann ein Erdgas-/Biogasauto 1 km fahren.

→ Altspeiseöle
Durch unterschiedliche Raffinerieverfahren ist es möglich, Altöle wiederaufzubereiten und als Sekundärrohstoff zu nutzen. Aus 1 L Altöl werden so etwa 0,9 L Treibstoff gewonnen.

→ Schlachtabfälle
Ob flüssiges Pflanzenöl oder festes bis halbfestes Tierfett, chemisch sind beide prinzipiell gleich aufgebaut, lediglich in der Natur ihrer Fettsäuren unterscheiden sie sich. Auch aus Tierfetten lässt sich relativ einfach Biodiesel herstellen.

→ Gülle und Mist
Damit Gülle als Treibstoff genutzt werden kann, braucht es Anlagen, die ihr Gas-Potenzial umsetzen und auf Erdgasqualität aufbereiten.

→ Klärschlamm
Der in Kläranlagen anfallende Klärschlamm kann in Faultürmen gesammelt und für die Produktion von Biogas verwendetet werden.

CO_2

CO_2

CO_2

CO_2
Kohlenstoffdioxid (auch Kohlendioxid)

Chemische Verbindung aus Kohlenstoff (→ C) und Sauerstoff (Symbol O, steht für «Oxygenium»). Kohlenstoffdioxid ist ein unbrennbares, saures, farbloses und wasserlösliches Gas.
Als wichtiger Bestandteil des weltweiten Kohlenstoffkreislaufs sowie als natürliche Komponente der Luft spielt CO_2 eine essentielle Rolle als Treibhausgas in der Erdatmosphäre.

C
Kohlenstoff
(Carbonium)

C kommt in der Natur in reiner Form (z. B. Graphit, Diamant) oder auch chemisch gebunden (z. B. Kohlenstoffdioxid, Biomasse) vor. Dank seiner besonderen Eigenschaft, vielfältige komplexe Moleküle bilden zu können, gilt Kohlenstoff und seine Verbindungen als Voraussetzung des Lebens auf unserem Planeten.

Erneuerbare Stromerzeugung

N_2
Stickstoff

H_2O
Wasser

S. 18–23 KIT PtX-Container

PtX
Power-to-X
Strom-zu-X (X = Gas, flüssig, z. T. fest)

Mithilfe von (überschüssigem erneuerbarem) Strom wird aus Wasser in der Elektrolyse Wasserstoff (→ H_2) hergestellt. Wasserstoff kann dann zusammen mit Kohlendioxid (→ CO_2) zur Herstellung von E-Methan oder flüssigen synthetischen Treibstoffen verwendet werden. Dieser Prozess heisst «Power-to-X». Wichtige Einsatzgebiete sind kaum zu elektrifizierende Anwendungen im Verkehrsbereich, insbesondere der Flug- und Schiffsverkehr, bei denen auch weiterhin Treibstoffe mit hoher Energiedichte benötigt werden.

BtX
Biomass-to-X
Biomasse-zu-X (X = Gas, flüssig, z. T. fest)

Biogas (BtG) wird hauptsächlich aus der Vergärung von Abfallbiomasse, Klärschlamm und Gülle gewonnen. Sämtliche Biomasse kann zu Synthesegas umgewandelt und anschliessend mit dem sogenannten Fischer-Tropsch-Verfahren zu synthetischen Treibstoffen wie Biodiesel verarbeitet werden (BtL).

Gasförmige Treibstoffe

S. 6–9 Gasbasierte Treibstoffe

S. 24–25 NH_3 als Treibstoff

H_2
Wasserstoff
(Hydrogenium)

H_2 ist ein farb- und geruchloses, brennbares Gas und ist das chemische Element mit der geringsten Atommasse. Bei der Verwendung in einer Brennstoffzelle entsteht elektrische Energie, mit der ein Elektromotor angetrieben wird. Als einziges «Abfallprodukt» entsteht reines Wasser.

NH_3
Ammoniak

Ammoniak ist eine chemische Verbindung von Stickstoff und Wasserstoff und ist ein stechend riechendes, farbloses, wasserlösliches und giftiges Gas. Ammoniak kann auch als Speicher- und Transportmittel für Wasserstoff dienen (→ S. 24).

$B\text{-}CH_4$
Bio-Methan/ Biogas

$E\text{-}CH_4$
Synthetisches Erdgas/ E-Methan

Verflüssigte Gase

LH_2
Liquid Hydrogen
Flüssigwasserstoff

LBG
Liquefied Biogas
Verflüssigtes Biogas

DME
Dimethylether

Dimethylether ist ein farbloses, hochentzündliches, narkotisch wirkendes Gas. DME entsteht als Nebenprodukt der Methanolsynthese und wird üblicherweise direkt aus Synthesegas (CO/H_2) hergestellt.

LNG
Liquefied Natural Gas
Verflüssigtes Erdgas

Der Begriff LNG wird vor allem für Erdgas mit fossiler Herkunft verwendet, aber auch bei E- oder Bio-Methan und Gemischen davon.

Flüssige Treibstoffe

Bioethanol
Der durch Vergärung von Biomasse hergestellte Alkohol darf in der Schweiz bis max. 5% dem Benzin beigemischt werden.

HVO
Hydrotreated Vegetable Oils
Hydrierte Pflanzenöle

Aus pflanzlichen Altölen und tierischen Fetten kann durch chemische Hydrierung mit Wasserstoff ein Treibstoff hergestellt werden, der mit dem synthetischen Diesel praktisch identisch ist.

FAME
Fatty Acid Methyl Ester
Fettsäuremethylester

In Europa ist derzeit FAME der am weitesten verbreitete Biotreibstoff. FAME der zweiten Generation wird z. B. aus ungeniessbaren Pflanzenölen oder aus tierischen Fetten hergestellt.

Methanol
Eine synthetisch hergestellte Flüssigkeit, welche sowohl als Treibstoff als auch als Basis für weitere synthetische Treibstoffe verwendet wird.

RME
Rapsmethylester auch Rapsölmethylester oder Rapsdiesel

Durch die chemische Umsetzung von raffiniertem Rapsöl mit Methanol wird Rapsmethylester gewonnen. In Europa macht RME den grössten Anteil des Biodiesels aus.

S. 10–13 SAF Flughafen Zürich

SAF
Sustainable Aviation Fuels
Nachhaltige Flugtreibstoffe

SAF kann problemlos in Flugzeugen bis maximal 50% Biofuel-Anteil eingesetzt werden und ist eine echte Alternative zu fossilem Kerosin. Die SAF-Produktion entspricht momentan ca. 0,01% der weltweiten Kerosinnachfrage und der Preis ist ungefähr 3× höher.

Gasbasierte Treibstoffe

Um die gesteckten Reduktionsziele für den CO_2-Ausstoss bis 2050 erreichen zu können, ist eine Defossilisierung des Mobilitätssektors unumgänglich. Eine Umstellung auf rein elektrische Antriebe ist bis dahin aber nicht in allen Bereichen realistisch. Jedoch werden bereits heute zahlreiche nichtfossile Treibstoffalternativen eingesetzt. Dazu zählen auch verschiedene erneuerbare gasbasierte Treibstoffe.

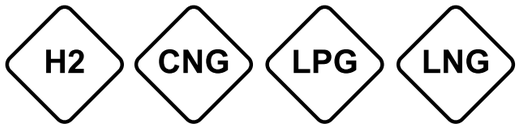
Spricht man heutzutage von Mobilität und Treibstoff, denkt man zuerst an Autos und an Benzin oder Diesel. Dies sind sicher die bekanntesten und am meisten verbreiteten flüssigen Treibstoffe, welche beide aus Erdöl hergestellt werden. Aber auch in anderen Bereichen der Mobilität werden hauptsächlich flüssige Treibstoffe verwendet. Beispielsweise in der Hochseeschifffahrt werden bei Kreuzfahrt- und Containerschiffen vor allem Schweröl und Diesel eingesetzt. In der Luftfahrt ist Kerosin der gebräuchlichste Treibstoff, und auch im öffentlichen Verkehr werden bei Bussen und Lokomotiven noch verbreitet Diesel und Benzin eingesetzt. Dasselbe gilt auch für die Bereiche Baumaschinen und Armee, wo fast ausschliesslich fossile Treibstoffe verwendet werden.

Gase in der Mobilität

Neben den flüssigen Treibstoffen werden in fast allen Bereichen der Mobilität auch verschiedene Gase als Treibstoff verwendet. Im Strassenverkehr am weitesten verbreitet ist der Einsatz von Erdgas. Dabei handelt es sich um das gleiche Gas, welches in vielen Haushalten zum Kochen und Heizen verwendet wird. Dieses besteht zum grössten Teil aus Methan (CH_4) und wird unter Druck in unterirdischen Gasleitungen transportiert. Um bei Erdgasautos eine ausreichende Reichweite erzeugen zu können, werden an der Zapfsäule die Gastanks der Fahrzeuge bei der Betankung auf einem Druck von 200 bar gefüllt. Deshalb wird Erdgas als Treibstoff als CNG (Compressed Natural Gas = komprimiertes Erdgas) bezeichnet. CNG wird im Fahrzeug in einem leicht modifizierten Benzinmotor verbrannt.

Um bei LKWs für den Langstreckenbetrieb noch grössere Reichweiten erreichen zu können, besteht die Möglichkeit, das Erdgas zu verflüssigen. Dazu muss es auf –161 °C abgekühlt werden, wodurch sein Volumen auf einen Sechshundertstel des Volumens von Erdgas bei Normaldruck reduziert wird. Dieses verflüssigte Erdgas wird LNG (Liquefied Natural Gas) genannt und anstatt über das Erdgasnetz in Tankfahrzeugen transportiert.

Ein weiteres Gas, welches verbreitet als Treibstoff verwendet wird, ist ein verflüssigtes Petrol-Gas-Gemisch aus Propan und Butan, das man als LPG (Liquefied Petroleum Gas) bezeichnet. Dieses ist auch unter dem Namen Autogas bekannt und von der Zusammensetzung her dem Gas in Campinggasflaschen oder Feuerzeugen sehr ähnlich. Im Unterschied zu Erdgas wird LPG immer in verflüssigter Form eingesetzt, da es schon bei Raumtemperatur und geringem Druck von unter 10 bar flüssig bleibt.



In den letzten Jahren bekommt mit Wasserstoff (H_2) ein weiteres Gas als Treibstoff für PKWs und LKWs immer grössere Bedeutung. Es unterscheidet sich in verschiedenen Punkten von CNG und LPG. H_2 wird im Gegensatz zu den anderen Gasen kaum in Verbrennungsmotoren eingesetzt, sondern in Brennstoffzellen in elektrische Energie umgewandelt, welche dann einen Elektromotor antreibt. Zudem wird bei der Umwandlung von H_2 in elektrische Energie neben nutzbarer Wärme nur reines Wasser produziert und somit kein CO_2 ausgestossen. Auch bei Wasserstoff besteht die Möglichkeit, das Gas auf verschiedene Arten zu verflüssigen, um die Energiedichte zu erhöhen. Man spricht dann von LH_2 (Liquid Hydrogen). Der Aufwand der Verflüssigung von H_2 ist jedoch deutlich höher als bei LNG.

«Erneuerbare Gase sind ein bedeutender Teil, wenn es um die Defossilisierung der Mobilität geht!»

Ein weiteres Gas, welches im Mobilitätsbereich eingesetzt wird, ist Ammoniak (NH_3). Dieses unterscheidet sich ebenfalls in verschiedenen Eigenschaften von den anderen Treibstoffgasen. So ist es beispielsweise keine Kohlenwasserstoffverbindung, weshalb bei dessen Umwandlung auch kein CO_2 entsteht. Auf Ammoniak als Treibstoff wird im Artikel auf Seite 24 genauer eingegangen.

Nachhaltige Gastreibstoffe

In der Energiestrategie 2050 des Bundesrates wird zur Erreichung der gesetzten CO_2-Reduktionsziele des Pariser Klimaabkommens der Ausstieg aus fossilen Energieträgern vorausgesetzt. Nun ist eine Gemeinsamkeit von CNG, LPG und Wasserstoff, dass sie derzeit zu einem grossen Teil einen fossilen Ursprung haben. Dadurch wird bei ihrer Produktion bei der Verbrennung CO_2 ausgestossen, welches aus fossilen Quellen stammt.

Damit eine CO_2-Neutralität erreicht werden kann, müssen diese Gase also aus erneuerbaren Quellen wie Biomasse oder erneuerbarem Strom hergestellt werden. Dies ist bei all den betrachteten Gasen technisch möglich und wird bereits jetzt mit verschiedenen Verfahren in grossem Massstab umgesetzt. Dabei wird der bei der Produktion benötigte Kohlenstoff (C) bzw. das CO_2 aus Biomasse oder der Umgebungsluft entnommen, sodass bei der Verbrennung des Treibstoffs gerade wieder gleich viel CO_2 ausgestossen wird, was zu einem neutralen CO_2-Kreislauf führt.

Herstellung von alternativen Gastreibstoffen

Für die Herstellung von nachhaltigen alternativen Gastreibstoffen gibt es zahlreiche unterschiedliche Verfahren, welche grob in zwei Gruppen eingeteilt werden können. Zum einen sind dies Verfahren, welche durch Umwandlung von Biomasse Gas erzeugen. Diese werden mit dem Begriff BtG (Biomass-to-Gas) zusammengefasst. Die zweite Gruppe bilden Verfahren, welche mit erneuerbarer elektrischer Energie und Rohstoffen wie Wasser oder Luft synthetische Gase erzeugen. Diese Verfahren nennt man auch PtG (Power-to-Gas).

Erdgaszapfsäule beim Bahnhof Zürich

Damit die produzierten Gase bei BtG als nachhaltig und erneuerbar gelten, darf die für die Produktion verwendete Biomasse nur aus Abfällen bestehen. Dies sind beispielsweise Grünabfälle aus Haushalten, Erntereste sowie Gülle und Mist von Landwirtschaftsbetrieben, Faulschlamm aus Kläranlagen oder Rest- und Altholz aus der Forstwirtschaft und Industrie. Auch Algen können als Biomasse verwendet werden (siehe separaten Artikel auf Seite 14). Zudem könnten Altspeiseöle und Schlachtabfälle verwendet werden, wobei diese eher als Rohstoff für sogenannte Biofuels (flüssige Biotreibstoffe) wie beispielsweise Biodiesel verwendet werden.

Solche nachhaltige Biomasse kann nun durch unterschiedliche Verfahren direkt zu Synthesegas vergast oder über Faul- und Gärungsprozesse in Rohbiogas umgewandelt werden, welches einen hohen Anteil an Bio-Methan enthält. Dieses wird in weiteren Verfahrensschritten gereinigt, getrocknet und konzentriert, sodass am Ende Biogas mit einem Methananteil von mindestens 96% entsteht, welches für die Einspeisung ins Erdgasnetz oder für das Betanken von Erdgasfahrzeugen geeignet ist. Auch dieses Biogas kann verflüssigt werden und wird dann als LBG (Liquefied Biogas) oder LBM (Liquefied Biomethane) bezeichnet und ist gleichwertig zu LNG.

Bei der Produktion von nachhaltigen synthetischen Gasen mit dem PtG-Verfahren muss die verwendete elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen wie Photovoltaik, Wind- oder Wasserkraft stammen. In den meisten PtG-Verfahren wird als erster Schritt mithilfe eines Elektrolyseverfahrens mit elektrischem Strom Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Dieser Wasserstoff wird als «grüner Wasserstoff» bezeichnet, sofern nur erneuerbarer Strom verwendet wurde. Wird für die Elektrolyse ein Strommix mit Kohlestrom oder Atomstrom verwendet, wird dieser als gelber oder rosa Wasserstoff bezeichnet und gilt nicht mehr als CO_2-neutrales Gas.

In weiteren Verfahrensschritten können aus diesem grünen Wasserstoff und CO_2, welches beispielsweise aus der Luft oder aus den Abgasen von Kehrichtverbrennungsanlagen gewonnen wird (siehe auch Artikel Seite 16 und 18), weitere Gase erzeugt werden. Zum Beispiel Methan (CH_4), welches zur Unterscheidung von Erdgas und Biogas auch E-Methan oder Synthetisches Erdgas (SNG) genannt wird, obwohl chemisch gesehen alle praktisch identisch sind.

Mit einem anderen Verfahren kann aus Synthesegas Dimethylether, oder kurz DME, gewonnen werden. Dieses Flüssiggas kommt in der Beschaffenheit und der Anwendung als Treibstoff sehr nahe an LPG heran und wird daher als nachhaltiger Ersatz dafür verwendet.

Vorteile von Gastreibstoffen

Bei nachhaltigen Gastreibstoffen ist ein entscheidender Vorteil, dass sie praktisch CO_2-neutral verbraucht werden können. Zudem sind die Betankungszeiten noch deutlich kürzer als bei batteriebetriebenen Fahrzeugen und nur wenig länger als bei flüssigen Treibstoffen. Sie eignen sich dank der hohen Energiedichte der verflüssigten Gase sehr gut für Langstrecken bei LKWs oder in der Schifffahrt.

Ein weiterer Vorteil neben der Reduktion der CO_2-Bilanz ist der verminderte Schadstoffausstoss von Biogas oder SNG. So wird bei deren Verbrennung praktisch kein Schwefeldioxid (SO_2) oder Feinstaub ausgestossen, und auch die Emission von Stickoxiden (NO_x) kann verglichen mit Diesel um über 80% gesenkt werden. Bei der Verwendung von Wasserstoff entstehen sogar gar keine schädlichen Emissionen.

Zudem kann durch das PtG-Verfahren der in Zukunft im Sommer anfallende ungenutzte Überschussstrom aus Wind- und PV-Anlagen in eine gut speicherbare Form gebracht werden, welche über die bestehende Erdgasnetz-Infrastruktur oder in verflüssigter Form einfach transportiert werden kann.

Nachteile von Gastreibstoffen

Einer der grössten Nachteile von nachhaltigen biogenen oder synthetischen Gastreibstoffen ist ihr Preis. Durch die aufwändigen BtG- und PtG-Prozesse sind sie derzeit um ein Mehrfaches teurer als entsprechende Gase aus fossilen Quellen. Dies kann sich aber durch Fortschritte bei der Technik, durch grössere Anlagen und durch steigende CO_2-Abgaben auf fossilen Energieträgern schon in wenigen Jahren ändern.

Ein weiterer Nachteil ist die begrenzte Menge der notwendigen Rohstoffe. So ist zum einen die verfügbare Biomasse aus Abfällen für die Biogasherstellung begrenzt. Zum anderen ist der verfügbare erneuerbare Strom für PtG-Prozesse derzeit noch zu teuer und kaum als Überschussstrom vorhanden. Dies wird sich erst ändern, wenn der Ausbau an Wind- und PV-Anlagen deutlich vorangeschritten ist. Da in anderen Regionen der Welt die Ausbeute von PV-Anlagen deutlich höher sein kann, ist davon auszugehen, dass die Produktion von synthetischen Gasen mit PtG-Verfahren aus wirtschaftlichen Gründen hauptsächlich dort stattfinden wird und die Treibstoffe dann von dort Importiert werden. Eine Selbstversorgung der Schweiz mit biogenen und synthetischen Gastreibstoffen ist kaum realisierbar.

Ein weiteres Problem für Gastreibstoffe stellt die Nachfrage nach Gas in anderen Sektoren dar. So wird bereits heute ein grosser Teil des produzierten Biogases in Blockheizkraftwerken (BHKW) in Wärme und Strom umgewandelt. Wenn in den nächsten Jahren in der Schweiz die Kernkraftwerke abgestellt werden, wird die Verstromung von Biogas eine grössere Bedeutung bekommen, insbesondere um im Winter die entstehenden Stromlücken decken zu können. Aber auch in der Industrie sind Wasserstoff und Methan gefragte Rohstoffe, und wenn der Preis der fossilen Gase steigt, wird die Nachfrage nach grünem H_2 und Biogas auch dort steigen. Zudem sind die Biomasse und die Synthesegase auch für die Herstellung von flüssigen Treibstoffen wie beispielsweise SAF (Sustainable Aviation Fuel) sehr begehrt, da dort kaum Alternativen bestehen (siehe dazu den Artikel auf Seite 10). Somit wird zwischen verschiedenen Sektoren ein Kampf um die Rohstoffe entstehen.

Ausblick

Gasbasierte Treibstoffe, insbesondere nachhaltig erzeugte wie Biogas oder grüner Wasserstoff, sind ein wichtiger Teil, um die Defossilisierung des Mobilitätssektors möglichst schnell vorantreiben zu können. In verschiedenen Bereichen steht noch keine andere Lösung bereit. Die notwendige Technik ist vorhanden und einsatzreif. Besonders im Gütertransport setzen immer mehr Transportunternehmen auf Gastreibstoffe, da sie dadurch weitestgehend CO_2-neutral sind, aber in Sachen Reichweite und Flexibilität deutliche Vorteile gegenüber batteriebetriebenen LKWs haben. Auch in der Schifffahrt steigt die Anzahl der gasbetriebenen Schiffe ständig, da auch dort eine CO_2-Neutralität kaum anders erreichbar sein wird.

Es ist davon auszugehen, dass in nächster Zeit die vorhandenen Biomassequellen intensiver für die Treibstoffherstellung genutzt werden. Später, wenn die Technik bei den PtG-Verfahren effizienter und dadurch konkurrenzfähiger geworden ist und durch den Zubau von PV- und Windkraftanlagen ausreichend überschüssiger Strom vorhanden sein wird, werden synthetische Treibstoffe so weit kommen, dass sie die fossilen Energieträger ersetzen können.

Übersicht über gasförmige Treibstoffe

Abkürzung	Bezeichnung	Gas	Verwendungsform
CNG	Compressed Natural Gas (Komprimiertes Erdgas)	Methan aus fossilen Quellen, Erdgas	Komprimiertes Gas
Biogas	Biogas	Biomethan	Komprimiertes Gas
SNG	Synthetic Natural Gas (Synthetisches Erdgas)	E-Methan	Komprimiertes Gas
H_2	Hydrogen	Wasserstoff	Komprimiertes Gas
NH_3	Ammoniak	Ammoniak	Komprimiertes Gas
LNG	Liquefied Natural Gas (Verflüssigtes Erdgas)	Methan	Verflüssigtes Gas
LBG/LBM	Liquefied Biogas/Biomethane (Verflüssigtes Biogas/Biomethan)	Biomethan	Verflüssigtes Gas
LH_2	Liquid Hydrogen (Flüssiger Wasserstoff)	Wasserstoff	Verflüssigtes Gas
LPG/Autogas	Liquefied Petroleum Gas (Verflüssigtes Petroleum Gas)	Propan Butan Gemisch	Flüssiggas
DME	Dimethylether	Dimethylether	Flüssiggas

Wie wir in Zukunft fliegen

Emanuel Fleuti kümmert sich um die Umweltfragen rund um den Flughafen Zürich. Aktuell vor allem um den Klimawandel.

Avenergy: Herr Fleuti, seit 1990 arbeiten Sie bei der Flughafen Zürich AG als Leiter der Abteilung Nachhaltigkeit und Umwelt. Wie hat sich Ihre Aufgabe in diesen drei Jahrzehnten verändert?
Emanuel Fleuti: Sehr stark, entsprechend den technologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen. Am Anfang hatte es unsere Abteilung mit lokalen Themen wie Abwasserverunreinigung rund um den Flughafen zu tun. Solche Probleme haben wir gelöst. Heute geht es um Probleme wie die Feinstaub- und vor allem die globale Klimabelastung.

Avenergy: Welches ist das Ziel Ihrer Tätigkeit?
Emanuel Fleuti: Immer noch das gleiche wie vor 30 Jahren: Es geht darum, unerwünschte Auswirkungen unserer Geschäftstätigkeit als Flughafenbetreiberin auf die Umwelt zu minimieren. Also eine Balance zu finden zwischen dem Mobilitätsbedürfnis unserer Gesellschaft und dem Umweltschutz. Für beides wollen wir das Beste herausholen.

«Bei der Sicherheit darf es in der Luftfahrt keine Kompromisse geben.»

Emanuel Fleuti
Leiter Abteilung Nachhaltigkeit und Umwelt, Flughafen Zürich AG

Avenergy: Ein Versprechen für mehr Klimaschutz im Flugverkehr sind die «Sustainable Aviation Fuels» (SAF). Tragen die SAF die Nachhaltigkeit zurecht in ihrem Namen?
Emanuel Fleuti: Ja, SAF kann man als nachhaltig betrachten, auch bereits die heute verfügbaren. Sie sind erstens weitgehend fossilfrei und stehen zweitens nicht in Konkurrenz zu anderen existenziellen menschlichen Bedürfnissen.

Avenergy: Was meinen Sie damit?
Emanuel Fleuti: Eine erste Generation von biogenen Treibstoffen bestand noch aus Nahrungsmitteln wie Soja. Es ist wenig gewonnen, wenn wir zwar «sauber» fliegen, aber gleichzeitig mehr Menschen auf der Welt Hunger leiden. Die heutige zweite Generation kommt ohne Rohstoffe aus, die man essen könnte, und sie beansprucht auch kein Land, welches man dafür abholzen muss oder besser für den Anbau von Lebensmitteln verwenden würde.

Avenergy: Wie werden denn heutige SAF hergestellt?
Emanuel Fleuti: Es gibt synthetisch und nach wie vor biogen hergestellte SAF. Die Zukunft gehört den synthetischen, bestehend aus Wasser, Kohlenstoffdioxid und einer hohen Zufuhr erneuerbarer Energien. Diese Treibstoffe werden ganz ohne fossiles CO_2 auskommen, aber leider noch längere Zeit nicht in grösseren Mengen verfügbar sein. Die heute bereits eingesetzten biogenen SAF der zweiten Generation sind zu 80 Prozent fossilfrei. Sie werden nicht mehr aus Nahrungsmitteln gewonnen, sondern aus altem Speiseöl oder Schlachtabfällen. Neuerdings wird auch Altholz beigemischt. Also alles Abfallprodukte, die über einen hohen Energiegehalt verfügen, aber das CO_2, welches bei der Verbrennung entsteht, bereits gebunden haben.

Der Betankungsvorgang

Avenergy: Ist es schwierig, genügend Rohstoffe für biogene SAF dieser zweiten Generation zu finden?
Emanuel Fleuti: Essen Sie mehr Pommes-frites, wenn Sie nachhaltige Treibstoffe unterstützen wollen! Im Ernst: Als wegen der Pandemie die Restaurants geschlossen waren, hat sich die Verfügbarkeit der Rohstoffe für biogenen SAF tatsächlich verschlechtert. Die Corona-Krise hat deren Beschränkung aufgezeigt. Auch das spricht langfristig für synthetische Treibstoffe.

Avenergy: Wie sicher sind die heutigen nachhaltigen Treibstoffe? Muss man sich als Passagier fürchten, wenn das Flugzeug SAF getankt hat?
Emanuel Fleuti: Überhaupt nicht. Bei der Sicherheit darf es in der Luftfahrt keine Kompromisse geben. Es gibt eine zweifache Zertifizierung. Zuerst wird der Treibstoff als biogen zertifiziert, dann auch noch als Flugtreibstoff. Oder detaillierter: SAF werden zuerst nach dem Standard ASTM D7566 geprüft, anschliessend mit fossilem Treibstoff gemischt und dann nochmals nach dem Jet-A1-Standard ASTM D1655 zertifiziert. Damit sind sie identisch mit dem konventionellen Kerosin und nicht mehr von diesem unterscheidbar.

Avenergy: Wozu und in welchem Verhältnis braucht es das Gemisch von SAF mit fossilem Treibstoff?
Emanuel Fleuti: Die Mischung ist derzeit noch nötig, da einige Triebwerke noch darauf angewiesen sind, dass ihre Dichtungen geschmiert werden. Dazu braucht es Kerosin, weil dieses einen höheren Aromatengehalt hat als SAF. Die maximale SAF-Beimischung ist deshalb auf 50% limitiert. Als Marktusanz mit einer gewissen Sicherheitsmarge hat sich ein SAF-Anteil von ca. 35% ergeben. Der effektive SAF-Anteil pro Flugzeugtank ist aber bei sämtlichen Flügen verschwindend klein. Auch dann, wenn eine Fluggesellschaft ausschliesslich SAF bestellen würde.

Avenergy: Warum das?
Emanuel Fleuti: Aus technischer Sicht kann man mit SAF in der Logistik genau gleich verfahren wie mit Kerosin. Beide Treibstoffe sind ja identisch. Das heisst, es macht keinen

Sinn, eine zweite Logistikkette aufzubauen und beispielsweise teuren und CO_2-intensiven Stahl für zusätzliche Tanks zu verbauen. Letztlich funktioniert das System gleich wie bei der Bestellung und Lieferung von Strom. Ob ich Ökostrom oder eben SAF bestelle: Ich kriege das gleiche Produkt wie Besteller von konventionellem Strom oder Kerosin: ein Gemisch, welches den Kaufanteilen insgesamt entspricht.

Avenergy: Vermindert das nicht den Anreiz, SAF zu bestellen, wenn ich dann trotzdem mit einem Flugzeug unterwegs bin, welches fast nur mit Kerosin betankt ist?
Emanuel Fleuti: Emotional wäre es natürlich schön, wenn ich sagen könnte: Heute fliegen wir ausschliesslich mit SAF! Aber rational gesehen bleibt die Wirkung auf die Umwelt dieselbe. Auch wenn alle letztlich den gleichen Treibstoff bekommen, kann ich mir trotzdem guten Gewissens auf die Fahne schreiben: Ich habe SAF bestellt und bezahlt und somit meinen Anteil am Umweltschutz geleistet.

Avenergy: In der Schweiz gab es 2020 im Umfeld des WEF in Davos ein Pilotprojekt zum Einsatz der SAF. Welches waren die Erkenntnisse daraus?
Emanuel Fleuti: Das Projekt hat uns auf zwei Herausforderungen hingewiesen, an denen wir seither weiterarbeiten. Die erste betrifft den Beschaffungsprozess. Die Schweiz ist ein hochreguliertes Land. Das Importverfahren von Flugtreibstoffen mit biogenen Anteilen war bisher noch nicht definiert. Beispielsweise müssen die neuen Chemikalien dokumentiert und registriert werden. Hier haben wir inzwischen bereits Lösungen gefunden, zusammen mit dem Bundesamt für Gesundheit oder der Zollverwaltung. Avenergy hat dabei mitgeholfen, diesen Prozess zu beschleunigen.

Avenergy: Die zweite Herausforderung?
Emanuel Fleuti: Das Pilotprojekt hat gezeigt, wie anspruchsvoll die SAF-Logistik ist. Die relativ kleine Treibstoffmenge, die wir für die WEF-Business-Flieger bestellt haben, wurde mit fünf Tanklastwagen aus Belgien nach Zürich geliefert. Wir brauchten drei Stunden, um die ersten 70 000 Liter zu entladen. In der gleichen Zeit entlasten wir sonst einen Block-Zug à 1,6 Millionen Liter Kerosin, also mehr als das Zwanzigfache. Das bedeutet für uns: Es ist unabdingbar, dass die Lieferung von SAF-Treibstoffen nicht über Lastwagen, sondern über einen vollgetankten Block-Zug erfolgt, der ab Abgangsort nach Zürich fährt.

Avenergy: Mit der Logistik-Effizienz verbunden ist eine weitere Herausforderung, die womöglich die grösste ist: die hohen Kosten der SAF.
Emanuel Fleuti: Das ist richtig. Während die Preisbildung für konventionelles Kerosin primär von geopolitischen Faktoren abhängig ist, werden die Preise für SAF bestimmt durch die Produktions- und Lieferkosten. Sie sind abhängig von Rohstoffpreisen, Produktionsverfahren, Liefermöglichkeiten und damit verbunden vor allem mit der Nachfragemenge. Derzeit liegen die Marktpreise für reine SAF mit CHF 2400 pro Tonne viermal höher als jene fürs Kerosin, welches rund CHF 600 pro Tonne kostet. Synthetisches SAF ist ja noch nicht verfügbar. Nach heutigen Schätzungen wird es bei seiner Markteinführung nochmals mindestens doppelt so teuer sein wie die biogenen SAF.

Avenergy: Kann eine Fluggesellschaft langfristig überhaupt ökologischen Treibstoff finanzieren?
Emanuel Fleuti: Wie sagt man doch? «There is no free lunch.» Es braucht ein Bewusstsein dafür, dass Mobilität in Zukunft mehr kosten muss. Airlines haben schon Erfahrung damit, einen Preisaufschlag weiterzugeben. In den Siebzigerjahren hat sich das Erdöl so schnell verteuert, dass sie mit dem normalen Tarifsystem nicht darauf reagieren konnten. Sie haben deshalb über Nacht einen Treibstoffzuschlag eingeführt, die sogenannte Fuel Surcharge, die uns auch nach der Erdölkrise als Surcharge auf den Flugtickets erhalten geblieben ist.

Avenergy: In der Schweiz hatte die Revision des CO_2-Gesetzes ebenfalls eine Verteuerung der Flugtickets vorgesehen, über eine CO_2-Abgabe. Doch das Stimmvolk hat die Revision und somit teurere Flugtickets abgelehnt. Ein Rückschlag für SAF?
Emanuel Fleuti: Ja und nein. Ja, weil die Revision ein erster Schritt gewesen wäre in Richtung nachhaltigerem Flugpreis. Nein, weil der Revisionsvorschlag alles andere als ideal war. 51 Prozent der CO_2-Abgabe wäre an die Bevölkerung zurückgeflossen, somit in den Konsum, der wiederum die Umwelt belastet und CO_2 verursacht hätte. Auch die restlichen 49 Prozent wären nicht direkt in SAF geflossen, sondern in einen Klimafonds mit unklarer Mittelverwendung. Die Ablehnung der Revision bedeutet: Wir sind wieder auf Feld 1 und können eine Lösung suchen, die effektiv ist und keine helvetische Insellösung, sondern über die Landesgrenze hinaus harmonisiert.

Avenergy: Letztlich bleibt das SAF-Kostenproblem eng mit der SAF-Mengennachfrage verbunden.

Fakten

2–3%
So gross ist der Anteil des Flugverkehrs weltweit an den menschengemachten CO_2-Emissionen.

10%
So gross ist der Anteil des Inlandluftverkehrs, der Luftwaffe und des internationalen Luftverkehrs in der Schweiz.

2050
Bis dann soll die Schweiz klimaneutral sein: unter dem Strich keine Treibhausgase mehr ausstossen.

100%
Mit diesem SAF-Anteil hat Rolls-Royce erste erfolgreiche Tests an einem Triebwerk für Geschäftsreiseflugzeuge durchgeführt. Damit wäre laut dem Unternehmen der Grundstein für die Zulassung dieses Treibstofftyps gelegt. Derzeit ist SAF nur für Beimischungen von bis zu 50 Prozent mit konventionellem Kerosin zugelassen.

300 000
Ungefähre Anzahl der Flüge, die seit 2016 mit einer SAF-Beimischung absolviert wurden.

Emanuel Fleuti: Das ist so. Auch in diesem Zusammenhang ist die Entwicklung im Ausland wichtig. Die Europäische Kommission arbeitet zurzeit an einem Rechtsakt, der eine EU-weite Beimischungspflicht von SAF vorsieht, anfangs beispielsweise mit einem Anteil von 2 bis 5 Prozent. Die Kommission strebt an, dass dieser Rechtsakt bereits 2023 in Kraft tritt, schneller, als sich das viele Airlines heute vorstellen.

Avenergy: Wie wichtig sind SAF fürs künftige Geschäftsmodell von Fluggesellschaften?
Emanuel Fleuti: Ich halte sie für essentiell. Auch die Luftfahrt kann sich dem globalen Ziel nicht entziehen, bis 2050 klimaneutral zu sein. 80% der Aviatik-Emissionen können nicht durch alternative Energien ersetzt werden. Deshalb führt kein Weg an den synthetischen SAF vorbei. Die biogenen SAF sind nur ein wichtiger, aber unabdingbarer Zwischenschritt. Wir können nicht nichts tun, bis synthetischer Treibstoff marktfähig ist.

Avenergy: Haben die Fluggesellschaften die Bedeutung der SAF erkannt? Beteiligen sie sich an der Entwicklung derselben?
Emanuel Fleuti: Ich identifiziere drei verschiedene Haltungen zum Thema. Die eine Gruppe von Fluggesellschaften hat den Handlungsbedarf erkannt und ist bereit, eine Pionierrolle zu spielen, die sich auch vermarkten lässt. Eine zweite Gruppe sieht zwar, dass nachhaltige Treibstoffe wichtig sind, gibt aber Gründe vor, warum sie sich an der Entwicklung noch nicht beteiligen kann oder will. Eine dritte Gruppe blendet das Thema aus, fokussiert ganz auf den Preis. Durch die Pandemie und den Einbruch der Flugzahlen ist die dritte Gruppe eher wieder gewachsen.

Avenergy: Und die Flughafen Zürich AG? Geht sie mit gutem Bespiel voran?
Emanuel Fleuti: Das versuchen wir, auch wenn unsere Tätigkeit die Umwelt viel weniger belastet als jene der Fluggesellschaften. Aber auch wir haben uns dem Ziel «Netto 0 bis 2050» verpflichtet, haben eine Roadmap definiert, die den Einsatz von synthetischen Brenn- und Treibstoffen vorsieht. Schon heute fördern wir die Forschung und Entwicklung von solar hergestellten synthetischen Treibstoffen, indem wir den Treibstoff zu den Gestehungskosten abkaufen und ihn bei den Bodenfahrzeugen am Flughafen einsetzen werden. Auch initiieren wir Pilotprojekte wie dasjenige am WEF, setzen sie um und gewinnen wichtige Erkenntnisse daraus für die Branche.

Avenergy: Blick in die Zukunft: Wie wird sich das Fliegen in den nächsten 20 Jahren verändern?
Emanuel Fleuti: Das ist schwierig vorauszusagen. Was ich zu wissen glaube: Mobilität wird es auch in Zukunft geben, und sie wird zunehmen, mindestens im Ausmass, wie die Bevölkerung weiterhin zunimmt. Fliegen wird es in Zukunft genauso noch geben: Was früher der Tagesritt war, ist heute der Tagesflug: Wir haben uns an die grössere Mobilitätsreichweite gewöhnt. Es gibt kein Zurück. Fliegen wird aber teurer werden, dadurch werden wir es bewusster tun. Letztlich ist ja nicht das Fliegen das Problem, sondern das CO_2, welches hinten beim Triebwerk rauskommt. Hier müssen wir ansetzen. Gemäss aktuellen Prognosen sollten die synthetischen Treibstoffe ab 2030 marktfähig sein. Dann wäre wie einst das Abwasserproblem am Flughafen auch das CO_2-Problem beim Fliegen gelöst.

Emanuel Fleuti
Leiter Abteilung Nachhaltigkeit und Umwelt, Flughafen Zürich AG

Emanuel Fleuti hat an der Universität Bern Geografie und Klimatologie studiert. Seit 1990 arbeitet er bei der Flughafen Zürich AG als Leiter der Abteilung Umweltschutz. Er hat als Experte für Umweltschutz weltweit Einsitz in diversen Luftfahrtgremien.

Biotechnologie für erneuerbaren Treibstoff

Algen als Grundlage für erneuerbare Treibstoffe bieten eine verlockende Perspektive, die bereits seit vielen Jahren erforscht und entwickelt wird. Der Weg vom Biotech-Labor in den Treibstoffmarkt erweist sich unter den aktuellen Rahmenbedingungen allerdings als lang und beschwerlich.

Wer an Algen denkt, dem kommen wohl häufig unliebsame Bilder in den Sinn: der idyllische Sandstrand, der sich über Nacht in einen unappetitlichen Abfallhaufen aus Seetang verwandelt hat (das Wort Alge stammt vom lateinischen *alga* = Tang ab). Oder der giftgrüne Stich, der sich auf der einstmals weissen Hausfassade ausbreitet. Auch das kristallklare Wasser im Bio-Swimmingpool ist nicht vor einer farbenprächtigen Algenblüte gefeit.

Dabei sind Algen ausserordentlich interessante und vielseitige Organismen (siehe Box). Immer häufiger werden sie in kommerziellen Anwendungen eingesetzt. Bekannt sind sie als Nahrungsmittel und Nahrungsmittelzusätze: In Asien bereits weit verbreitet, kommen Algen in zunehmendem Masse auch auf unsere Teller. Algen können ernährungsphysiologisch, therapeutisch und pharmakologisch interessante Eigenschaften besitzen. Sie können zudem auch als Ausgangsmaterial für Baustoffe oder Bioplastik dienen.

Algen als vielversprechende Energiequelle

Im Zusammenhang mit der Energiegewinnung sind insbesondere die einzelligen Mikroalgen von Interesse. Algen speichern die durch Photosynthese eingefangene Energie des Sonnenlichts in Form von Zuckern und Fetten. Die Fette sind das eigentlich Interessante bei der Suche nach neuen Treibstoffquellen, denn aus ihnen kann man durch einen chemischen Prozess Biodiesel gewinnen. Mikroalgen wachsen schnell und lassen sich relativ unproblematisch züchten, ja sogar gentechnisch verändern. Im Vergleich zu den Landpflanzen ist der Ertrag an Biomasse pro Fläche und Jahr wesentlich höher: So kann zum Beispiel eine ergiebige Algenkultur mehr als das Zehnfache an Öl erzeugen als Raps.

Vor allem aber kann man Mikroalgenkulturen unabhängig von wertvollen Ackerflächen betreiben. Denkbar ist die Aufzucht von Algenkulturen in gläsernen, übereinander gestapelten Bioreaktoren, die überall aufgestellt werden können, bevorzugt auf Land, das sich anderweitig nicht nutzen lässt. Könnten Mikroalgen angesichts dieser Vorteile also die idealen Rohstoffe zur Herstellung von Treibstoffen sein und gar zu einer Konkurrenz für die Fossilen werden?

© Paula Jones/istockphoto.com

Könnten Mikroalgen die idealen Rohstoffe zur Herstellung von Treibstoffen sein und zu einer Konkurrenz für die Fossilen werden?

Auf und Ab in der Algenforschung

Die Forschung im Bereich der Biotreibstoffe aus Algen erlebte in den 1970er- und 1990er-Jahren einen ersten Aufschwung. Dann, in einem kurzen Zeitfenster von etwa 2009 bis etwa 2017, wurde diese alternative Treibstofftechnologie zum Liebling der Industrie für erneuerbare alternative Energien und als Lösung für das Klimaproblem gepriesen. Biotechfirmen taten sich mit grossen Unternehmen wie Shell, Chevron und Exxon zusammen. Ihr Ziel war, Algenstämme zu finden, zu testen und genetisch zu verbessern, damit sie stärker und schneller wachsen, mehr Fettanteile bilden und damit zu eigentlichen Superstars der Biotreibstoffbranche würden.

Doch nach zahlreichen Rückschlägen, fehlgeschlagenen Tests und enormen, nicht vorhergesehenen Produktionskosten hat der Algen-Biotreibstoff seine Favoritenrolle unterdessen wieder verloren. Für die erneute Zurückhaltung der Unternehmen dürfte unter anderen Faktoren auch der zeitweise Zerfall des Erdölpreises eine Rolle gespielt haben. Zudem verzeichneten andere erneuerbare Energieproduktionstechnologien, namentlich Photovoltaik und Wind, unterdessen grosse Fortschritte.

Der beschwerliche Weg zum Algen-Treibstoff

Die Schaffung der perfekten Mikroalgen im Biotech-Labor ist demgegenüber ein teurer und zeitaufwändiger Prozess. Und trotzdem ist er bloss der erste Schritt auf einem langen Weg in den Treibstoffmarkt. Methoden mussten entwickelt und verfeinert werden, um die Algen zu ernten, die Zellwände mit chemischen Lösungsmitteln aufzubrechen und dann die Inhaltstoffe wie Fette, Proteine und Kohlenhydrate zu extrahieren, damit sie in einem letzten Verarbeitungsschritt in Biotreibstoff umgewandelt werden können. Viele aktuelle Forschungsvorhaben widmen sich den Fragen einer möglichst effizienten Verarbeitung des Algen-Rohstoffs. Die grösste Herausforderung liegt allerdings darin, den gesamten Prozess in grossem Massstab durchzuführen. So müssen die Mikroalgen in riesigen Freilandbecken gezüchtet werden können, wofür grosse Flächen und enorme Mengen an Süss- oder Salzwasser benötigt werden.

Diese beeindruckende Komplexität erklärt, warum die Algen-Biotreibstoffindustrie auch heute noch ein spezialisiertes und sehr teures Spiel ist, das nur von denen gespielt wird, die es sich leisten und ein hohes Risiko in Kauf nehmen können.

Das letzte Wort ist nicht gesprochen

Bei nüchterner Betrachtung bleiben die Biotreibstoffe aus Algen eine verlockende Option, auch wenn der ursprüngliche Glanz etwas verblasst ist. Zunächst einmal bilden sie – wie andere Energieträger biogenen Ursprungs – eine Alternative zu den strombasierten erneuerbaren Energien. Der Erfolg letzterer hängt schliesslich davon ab, dass ausreichend CO_2-freier Strom zur Verfügung gestellt werden kann. Dieselben Voraussetzungen gelten allerdings auch für die Biotreibstoffe der zweiten Generation: Deren Konkurrenzfähigkeit und Verfügbarkeit beruhen auf biogenen Abfällen und Reststoffen. Bereits zeichnet sich ab, dass diese Rohstoffe knapp werden für eine weltweite flächendeckende Versorgung. Die rasch nachwachsenden Algen könnten da die Lösung sein. Steigende Erdöl- und Erdgaspreise wie in jüngster Zeit könnten dann das Übrige zum Erfolg von Algen-Biotreibstoffen beitragen.

«Was sind Algen?»

erweist sich als eine überraschend komplexe Frage. Sie gehören zu den einfachsten Organismen und nutzen Licht und Kohlendioxid zur Herstellung von Biomasse. Grünalgen zum Beispiel nutzen die Photosynthese, um zu wachsen. Aber Algen werden nicht nur zu den Pflanzen gezählt. Vielmehr handelt es sich um eine äusserst vielfältige und genetisch unterschiedliche Gruppe von Organismen, die aus vier biologischen Reichen stammen: Bakterien, Chromisten, Pflanzen und Protozoen.
Jüngste Forschungen gehen davon aus, dass es auf der Erde zwischen 30 000 und 1 Million Algenarten gibt, deren Vielfalt verblüffend ist und von mikroskopisch kleinen Kieselalgen (einzellige Meeresorganismen, die mehr als 20% des weltweiten Sauerstoffs produzieren) bis hin zu riesigen Seetangen (die eine Höhe von 30 Metern erreichen können) reicht. Algen enthalten die Bausteine allen organischen Lebens: Proteine, Lipide, Kohlenhydrate und Nukleinsäuren – vor allem Lipide, die für die Energiegewinnung nützlich sein können.

Quelle: mongabay.com

Auf dem Weg zur direkten Abscheidung von CO_2 aus der Atmosphäre

Das Institute of Materials and Process Engineering (IMPE) entwickelte eine neue Materialklasse, um CO_2 aus der Atmosphäre und aus Abgasströmen abzufangen. Das Material kann zudem bei der niedrigsten bis anhin berichteten Temperatur regeneriert und das CO_2 mit stark reduziertem Energieaufwand zurückgewonnen werden.

Prof. Dr. Daniel M. Meier
Leiter Labor für Verfahrenstechnik,
ZHAW School of Engineering

Dr. Nobutaka Maeda
Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Verfahrenstechnik,
ZHAW School of Engineering

© ZHAW/Conradin Frei

Labor für Verfahrenstechnik: Reaktorbefüllung

Unter «Carbon Capture» ist die CO_2-Abscheidung aus der Umgebungsluft oder aus Verbrennungsabgasen zu verstehen. Dabei wird das Kohlendioxid zwischenzeitlich gebunden – dazu eignen sich verschiedene flüssige oder feste Substanzen. Anschliessend muss das CO_2 wieder gelöst werden, um es einerseits zu speichern (man spricht dann von Carbon Capture and Storage, CCS) oder als Rohstoff für chemische Prozesse zu verwenden – Carbon Capture and Usage (CCU) ist ein wichtiger technologischer Zwischenschritt bei der Herstellung von E-Fuels aus regenerativen Rohstoffquellen (siehe Seiten 18–23).

Das Labor für Verfahrenstechnik am Institute of Materials and Process Engineering (IMPE) der ZHAW School of Engineering in Winterthur hat – unter der Leitung von Prof. Dr. Daniel M. Meier und mit der wissenschaftlichen Arbeit von Dr. Nobutaka Maeda – die derzeit verfügbaren Technologien zur direkten Abscheidung von CO_2 aus der Atmosphäre um ein Hybridmaterial (im Folgenden IMPE-Cap genannt) erweitert. Wie konventionelle Materialien dieser Art kann dieses hybride Filtermaterial bei Umgebungstemperatur CO_2 aus der Luft adsorbieren.

Es handelt sich dabei um ein festes Trägermaterial, das mit verschiedenen chemischen Komponenten beschichtet ist. Dies erlaubt, mildere Prozessbedingungen für wiederholte Zyklen, d. h. Adsorbieren und Regenerieren, zu erreichen. Eine hochmoderne spektroskopische Technik zeigte, dass IMPE-Cap die chemische Bindung zwischen CO_2 und der Materialoberfläche schwächt, was zu einer CO_2-Freisetzung (Regeneration des Materials) bei lediglich 50 °C führt – die für diesen Prozess niedrigste jemals berichtete Temperatur.

Dank der niedrigen Regenerationstemperatur hat IMPE-Cap Potenzial, bei industriellen Anwendungen im Langzeitbetrieb Energie zu sparen und die Betriebskosten für die CO_2-Abscheidung aus der Atmosphäre oder aus Abgasen von Kraftwerken und Fabriken zu senken. Die Arbeit des Labors für Verfahrenstechnik wurde im Journal «Energy & Fuels» von ACS Publications (Energy Fuels 2021, 35, 9059–9062) veröffentlicht.

In der Zwischenzeit hat die Forschungsgruppe ein weiteres Material zum selben Zweck entwickelt, das mehr CO_2 adsorbiert und bei noch tieferen Temperaturen als 50 °C regeneriert werden kann. Diese vielversprechenden Erkenntnisse zeigen, dass die Forschung kontinuierlich daran arbeitet, günstigere Rahmenbedingungen für industrielle Anwendungen zu ermöglichen, die unter anderem dem anthropogenen Klimawandel entgegenwirken können, ohne den gewohnten Lebensstandard beschränken zu müssen.

Prof. Dr. Daniel M. Meier

Prof. Dr. Daniel M. Meier hat an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich studiert und promoviert. Seit August 2021 ist er Professor an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW). Seine Forschungsgruppe ist spezialisiert in folgenden Bereichen: Trennverfahren, Heterogene Katalyse, Prozessanalytik, Partikelherstellung und Reaktionstechnik für kontinuierliche und chargenweise Prozesse.

Dr. Nobutaka Maeda

Dr. Nobutaka Maeda hat an der Kanagawa University in Japan studiert und promoviert. Seit April 2020 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Verfahrenstechnik an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) in Winterthur, wo er verschiedene Projekte im Bereich CO_2-Abscheidung und -Nutzung, Energieumwandlung, Abgasreinigung, Abwasserbehandlung und Feinchemikaliensynthese betreut.

Der Treibstoff, der aus der Luft kommt

Ohne synthetische Treibstoffe sind klimaneutrale Flüge, Schiffsreisen oder andere Schwertransporte nicht denkbar. Zu Besuch bei Professor Roland Dittmeyer, einem Hoffnungsträger der Klimapolitik.

Roland Dittmeyer
Chemie-Ingenieur und Professor für Mikroverfahrenstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

I: Was auf dem Spiel steht

Professor Roland Dittmeyer sitzt im schmucklosen Sitzungszimmer des Baus 605 auf dem weitläufigen Gelände des KIT: Karlsruher Institut für Technologie, eine Art ETH des deutschen Bundeslands Baden-Württemberg, Forschungszentrum von nationaler Bedeutung.

Seit zehn Jahren versucht Dittmeyer, Leiter des Instituts für Mikroverfahrenstechnik, synthetische Treibstoffe voranzubringen. Anfangs interessierte sich nur die nähere Forschungscommunity für seine Arbeit. Nun aber, im Herbst 2021, diskutieren sogar die Kandidatin und die beiden Kandidaten ums Bundeskanzleramt Vor- und Nachteile synthetischer Treibstoffe.

Dittmeyers Thema hat es vom Rand der Gesellschaft in die Mitte geschafft, ins Scheinwerferlicht der politischen Öffentlichkeit.

«Dafür ist es höchste Zeit», sagt Dittmeyer und legt für einen Moment seine wissenschaftliche Zurückhaltung ab. «Ganz oben steht das Ziel, den Klimawandel zu stoppen. Seit der Klimabewegung um Greta Thunberg hat dieses Ziel viel Beachtung erhalten. Das stimmt mich optimistisch. Heute ist unbestritten, dass etwas gegen die Klimaerwärmung getan werden muss, auch in der Mobilität. Und zwar in den nächsten zehn Jahren, sonst ist es zu spät.»

Unter den Studierenden am KIT findet Dittmeyers Forschungsfeld grossen Zuspruch. Viele wollen etwas beitragen für eine bessere Welt.

Und auch ausserhalb des Campus sind sich heute alle einig: Es braucht eine neue Mobilität. Die Frage ist nur: Welche und auf welche Weise erreicht man sie?

II: Der charmante Kreislauf

Neues entsteht meist dadurch, dass man Bestehendes optimiert und miteinander in Verbindung setzt – oder eben: aneinanderkoppelt.

Weltweit erstmals ist es Dittmeyer und seinem Team gelungen, eine integrierte Anlage in Betrieb zu nehmen, die aus Luft, Wasser und erneuerbarem Strom klimafreundliche Treibstoffe produziert – Benzin, Diesel oder Kerosin. Und dabei vier Prozesse aneinanderkoppelt (siehe Seiten 20–21).

Der international viel beachtete Erfolg stellte sich ein im Rahmen eines Kopernikus-Projekts, das vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wurde – in Summe mit 10 Millionen Euro pro Jahr seit 2016, nicht nur für Dittmeyers Thema.

Der Forscher Dittmeyer, sonst ganz der Nüchternheit, dem rationalen Argument und der stringenten Beweisführung verpflichtet, benutzt das überschwängliche Wort «Charme».

Charme habe die kompakte Power-to-Fuel-Anlage, welche mit Stromzufuhr flüssige Treibstoffe herstellt, aufgebaut auf dem Gelände des KIT. Das für den Prozess benötigte Kohlendioxid stammt direkt oder indirekt aus der Atmosphäre. Damit wird das CO_2, welches am Ende bei der Nutzung der Treibstoffe ausgestossen wird, zuvor aus der Luft entnommen, was den CO_2-Kreislauf schliesst und den Treibstoff CO_2-neutral macht.

Den in sich geschlossenen Kreislauf bezeichnet Dittmeyer als Goldstandard, der möglichst auch in anderen Bereichen zur Anwendung kommen sollte, die auf Rohstoffe angewiesen sind: «Wir müssen lernen, unsere Ressourcen zu regenerieren.»

Regenerativ, sprich erneuerbar, ist auch der Strom oder eben der Power, der benutzt wird, um den Treibstoff herzustellen. Er stammt aus Wind- oder Sonnenenergie.

III: Die technologische Offenheit

Kampf dem Klimawandel auch dank synthetischen Treibstoffen: Der grossen Verantwortung begegnet Dittmeyer mit der Akribie der Wissenschaft. Er geht Schritt für Schritt, unüberwindbare Hürden sieht er nicht, glaubt daran, dass synthetische Treibstoffe sich in bestimmten Gebieten durchsetzen werden.

Im Rahmen der allgemeinen weltweiten Mission, den Klimawandel zu stoppen, verfolgt Dittmeyer ein fokussiertes Ziel: Treibhausgasemissionen von Flugreisen und Schwertransporten, wie Schiffs- oder Lastwagenverkehr, zu minimieren.

«Es braucht die technologische Offenheit», sagt Dittmeyer. Und beeilt sich zu präzisieren: Mit technologischer Offenheit meine er nicht, dass man an veralteten Technologien festhält, nur weil sie noch rentieren – sondern dass man für neue Herausforderungen unterschiedliche Lösungen entwickelt, im gesunden Wettbewerb zueinander.

Heisst aus Dittmeyers Sicht: Wer nur auf die Elektro-Mobilität setzt, vergibt sich Chancen, den Ausstoss von Treibhausgasemissionen auch sonstwie

Prof. Roland Dittmeyer

Roland Dittmeyer ist Chemie-Ingenieur und Professor für Mikroverfahrenstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Er leitet dort das Energy Lab 2.0 – ein Reallabor, in dem man die Energiesysteme der Zukunft erforscht.

© Markus Breig und Amadeus Bramsiepe, KIT

Synthese von Biotreibstoffen und strombasierten Treibstoffen im Energy Lab 2.0 des KIT

Kopernikus-Projekte

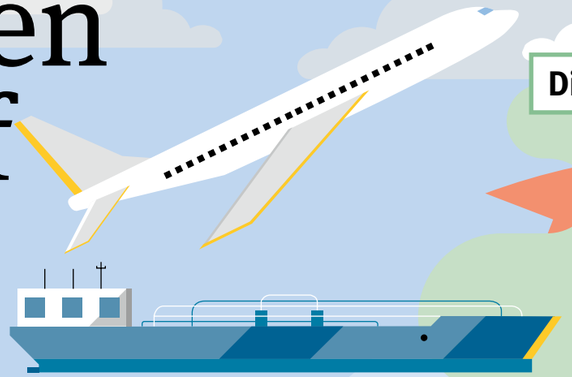
Das sogenannte Power-to-X (P2X) Projekt, in dem das Karlsruher Institut für Technologie für die Herstellung von E-Fuels die Federführung hat, ist eines von vier sogenannten Kopernikus-Projekten. Diese sollen – wie Nikolaus Kopernikus mit dem heliozentrischen Weltbild – einen Paradigmenwechsel in Wissenschaft und Gesellschaft herbeiführen. Kopernikus-Projekte erforschen, entwickeln und demonstrieren Lösungen und Technologien, die ein klimaneutrales Deutschland 2050 möglich machen, bis hin zur Marktreife.

Mehr wissen: www.kopernikus-projekte.de

In vier Schritten zum Treibstoff

Von der Luft zum Treibstoff: Die weltweit erstmalige Koppelung von vier Prozessschritten wurde möglich dank einer Kooperation, die das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) unter Federführung von Professor Roland Dittmeyer initiiert hat und drei privatwirtschaftliche Unternehmen einbindet. Das KIT-Spin-off INERATEC, die Firma Sunfire sowie Climeworks, ein Spin-off der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich, sind am Projekt beteiligt.

Das Verfahren ist vielversprechend, weil es modular aufgebaut ist und dezentral installiert werden kann. Das Skalierungsrisiko ist im Vergleich zu einer zentralen, chemischen Grossanlage tief. Das Verfahren kann dort eingesetzt werden, wo Solar-, Wind- oder Wasserkraft zur Verfügung stehen.



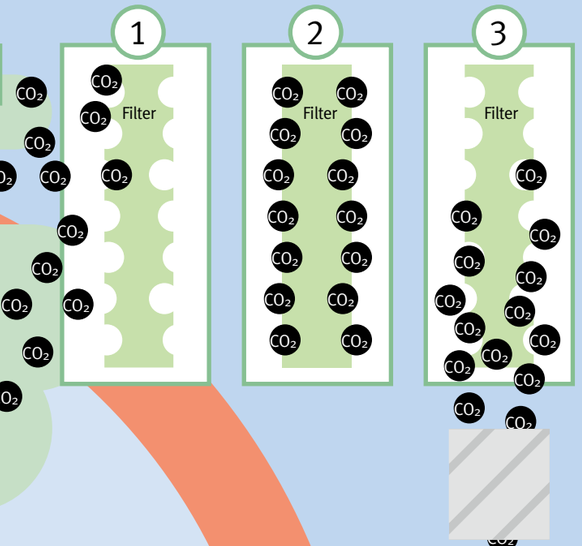
1 Direct-Air-Capture-Technologie

Die Anlage filtert Kohlendioxid (CO_2) direkt aus der Umgebungsluft. Die Direct-Air-Capture-Technologie von **Climeworks** nutzt dazu ein speziell behandeltes Filtermaterial.

Das DAC-Verfahren

Wie ein Schwamm (1) nehmen die luftdurchströmten Filter (2) Kohlendioxidmoleküle auf. Unter Vakuum und bei 95 Grad Celsius löst sich das anhaftende Kohlendioxid wieder von der Oberfläche (3), wird abgepumpt und kann so in reiner Form für den darauffolgenden Prozessschritt gewonnen werden.

climeworks



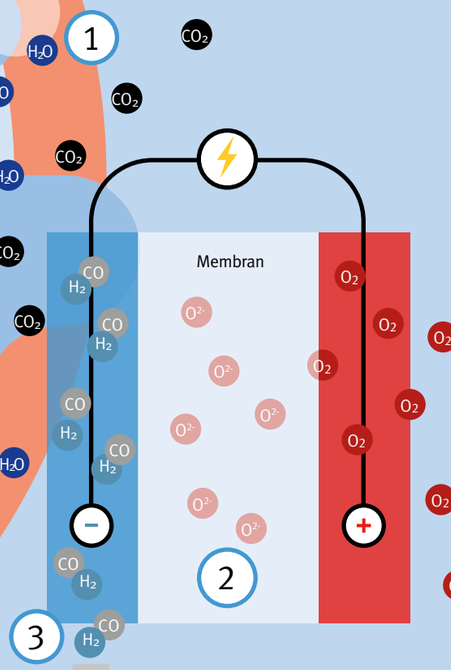
2 Co-Elektrolyse

Das CO_2 wird zusammen mit Wasserdampf elektrochemisch in Synthesegas umgewandelt, erstmals in einem einzigen Prozessschritt, in einer sogenannten Co-Elektrolyse (Hochtemperatur-Elektrolyse) des Technologieunternehmens **Sunfire**. Diese Co-Elektrolyse besticht durch einen hohen Wirkungsgrad. Sie kann im industriellen Massstab bis zu 85% des eingesetzten Ökostroms chemisch im Synthesegas binden. Das Synthesegas, eine Mischung aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2), ist die Grundlage für synthetische Treibstoffe und vielfältige Verfahren der chemischen Industrie.

sunfire

Die Co-Elektrolyse

CO_2 wird zusammen mit Wasserdampf in das Elektrolyse-System (1) eingeleitet. Jede Elektrolysezelle besteht aus einer Kathode (–), einer Anode (+) und der Membran dazwischen. Die besondere keramische Membran lässt nur Sauerstoff-Ionen (2) durch. Wasserdampf und CO_2 werden an der Kathode in Wasserstoff (H_2) und Kohlenmonoxid (CO) gespalten, das sogenannte (3) Synthesegas. Die dabei gebildeten Sauerstoff-Ionen (O^{2-}) wandern durch die Membran auf die Anodenseite und werden dort zu Sauerstoffmolekülen (O_2) – übrig bleibt das gewünschte Synthesegas.

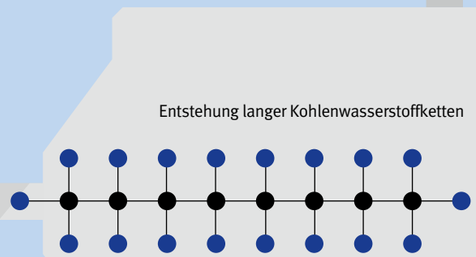


3 Fischer-Tropsch-Synthese

Aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid entstehen über die sogenannte F-T-Synthese lange Kohlenwasserstoffketten.

Die Synthese

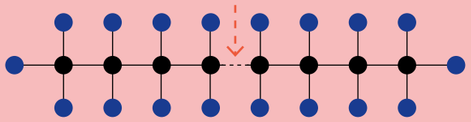
Das Synthesegas aus der Elektrolyse wird in den mikrostrukturierten Reaktor geführt. An der Oberfläche des Katalysators werden Kohlenwasserstoffe verschiedener Kettenlänge gebildet. Bei der Reaktion wird Wärme freigesetzt, die aufgrund der grossen Wandfläche im Reaktor hervorragend abgeführt wird und an anderen Stellen im Prozess genutzt werden kann. Die Kohlenwasserstoffe gelangen in den vierten und letzten Prozessschritt.



4 Hydrocracking

Ohne diese Weiterverarbeitung, welche das **KIT,** das Karlsruher Institut für Technologie, in die Prozesskette integriert hat, kann das Produktgemisch aus der F-T-Synthese noch nicht als Treibstoff eingesetzt werden. Direkt nach dem F-T-Reaktor werden in einem letzten Schritt mithilfe von Wasserstoff und einem Katalysator die zu langen Kohlenwasserstoffketten in kürzere geteilt. Gleichzeitig werden verzweigte Moleküle mit der gleichen Zahl von Kohlenstoffatomen gebildet, die sogenannten Isomere. Durch anschliessende Destillation lassen sich Kerosin, Benzin und Diesel gewinnen.

= H
= C



! Nicht umgesetztes Synthesegas und gasförmige Nebenprodukte werden in die Elektrolyse zurückgeführt. Konkret finden sich ›90% des im ersten Schritt aus der Luft gewonnenen Kohlenstoffs im flüssigen Produkt wieder.

KIT Karlsruher Institut für Technologie

INERATEC 2021

Für die F-T-Synthese in diesem Prozess liefert die Firma **INERATEC** einen mikrostrukturierten Reaktor, der auf kleinstem Raum eine grosse Oberfläche bietet, um Prozesswärme sicher abzuleiten und für andere Prozessschritte zu nutzen. Die aus der Synthese gewonnenen Moleküle sind die wesentlichen Bestandteile synthetischer Treibstoffe. Sie entsprechen chemisch gesehen bereits den Molekülen, die in den fossilen Treibstoffen enthalten sind.

1925

zu senken. «Und was den Klimawandel betrifft, können wir es uns nicht leisten, Chancen zu vergeben», ist er überzeugt.

Technologische Offenheit, fährt er fort, bedinge eine möglichst objektive und ganzheitliche Bewertung der verschiedenen Optionen. In einer ganzheitlichen Betrachtung spielen viele Bewertungsfaktoren eine Rolle. Etwa: Synthetische Treibstoffe brauchen keine neue Infrastruktur, also keine neuen Ladestationen, sondern können über bestehende Zapfsäulen vertrieben werden.

Das spart bei der Markteinführung Geld und vor allem Zeit, dieses knappe Gut angesichts der Klimaszenarien.

Oder auch: Power-to-Fuel-Anlagen können irgendwo auf der Welt aufgebaut werden, auch direkt neben Wasser-, Wind- oder Sonnenkraftwerken, wo es viel überschüssige erneuerbare Energie gibt.

IV: Das bessere Argument

Die technische Offenheit fordert Dittmeyer zuallererst von sich selbst. Steter Blick über den Tellerrand hinaus, prüfen, ob das, was man selber tut, überhaupt noch zukunftsweisend ist – oder in absehbarer Zeit überholt.

Nach KIT-Berechnungen lassen sich mit Power-to-Fuel-Anlagen ab einer gewissen Grösse bis zu 60% des aufgewandten Stroms in synthetisch hergestelltem flüssigem Treibstoff speichern.

Das ist mehr, als bisher möglich war. Aber eben trotzdem weniger als bei der E-Mobilität.

«Beim Gesamtwirkungsgrad darf man sich nicht in die Tasche lügen», sagt Dittmeyer, sich selber entwaffnend. Für die Anwendung in Privatautos sieht er den Elektroantrieb gegenüber synthetischen Treibstoffen im Vorteil.

Es zählt das bessere Argument: Die Kennzahl «Energiebedarf pro gefahrenen Kilometer» mache den Unterschied – zumindest in Ländern wie Deutschland oder der Schweiz, wo ein leistungsfähiges Stromnetz für die Infrastruktur zur Verfügung steht.

Privat hat Dittmeyer, der Erforscher eines CO_2-neutralen Treibstoffs, sein Dieselauto vor Jahresfrist gegen ein kleines Elektrofahrzeug ausgewechselt. «Und», bilanziert er, «ich bin zufrieden damit!»

Aber: Mit Strom könne man in absehbarer Zeit nicht weit fliegen, schwere Schiffe oder Gütertransporte antreiben. «Deswegen liegt unser Fokus auf Anwendungen, die batterieelektrisch noch lange nicht funktionieren, wie der Flug- oder Schiffsverkehr.»

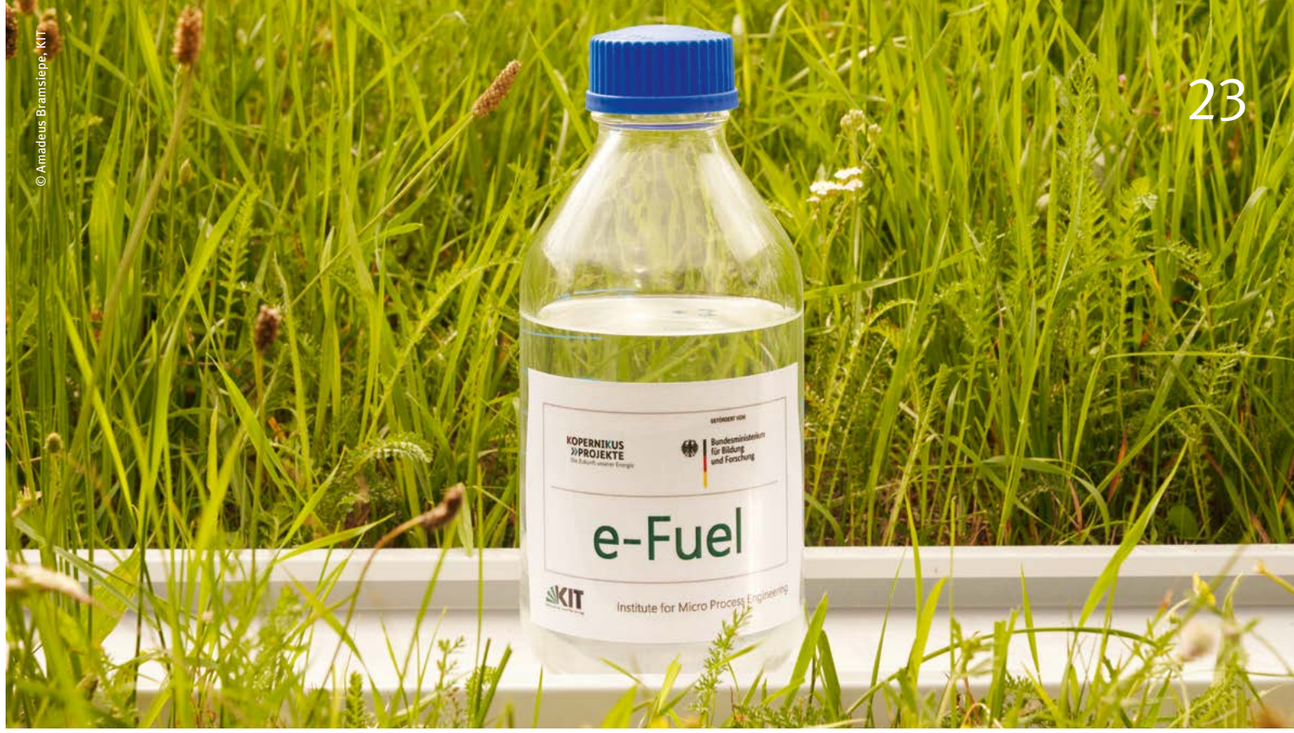
Auch haben Flugzeuge, Schiffe oder Transportlokomotiven viel längere Lebenszyklen als Autos – bis zu 50 Jahre. Es macht daher Sinn, die Bestandsflotte auf eine Sicht von Jahrzehnten nicht einzumotten, sondern mit synthetischem Treibstoff zu betreiben.

Dittmeyers Mission heisst nicht «synthetische Treibstoffe zuerst», sondern «jeder Mobilitätsanwendung der möglichst umweltfreundliche Antrieb». Immer in einer Gesamtbetrachtung.

V: Wie es weitergeht

Wer den Anlageverbund des Energy Lab 2.0 am KIT besichtigt, dem fallen die grossen Container ins Auge. Blau und Weiss lackiert stehen sie neben einem Photovoltaikfeld. Sie erinnern an Schiffshafen und vermitteln Aufbruchsstimmung. Tatsächlich soll das, was in den Containern steckt, möglichst bald die grosse Welt erobern. Als möglichst marktreife Entwicklungen für eine umweltfreundliche Energiezukunft.

Kompakte Pilotanlage für die dezentrale Herstellung von E-Fuels (ca. 200 Liter täglich)



E-Fuel, hergestellt aus Kohlendioxid der Umgebungsluft, Wasser und erneuerbarem Strom

In eben einem solchen Container haben Dittmeyer und sein Team 2019 die erste sehr kompakte und integrierte Power-to-Fuel-Anlage aufgebaut. Die Leistung war auf 200 Liter pro Tag beschränkt.

Jetzt sind die Projektpartner um Dittmeyer dabei, eine grössere Anlage aufzubauen, um grössere Mengen zu produzieren, die praktische Umsetzung zu demonstrieren und letzte Forschungsfragen zu klären. Um beispielsweise zu beweisen, dass man mit dem Treibstoff, der aus der Luft kommt, auch fliegen kann.

Die Hochskalierung ist der nächste wichtige Schritt auf dem Weg zur Marktreife CO_2-neutraler synthetischer Treibstoffe. Nur ausreichend grosse Pilotanlagen liefern aussagekräftige Daten für die industrielle Einführung.

Angestrebte Kapazität des sogenannten Energy Lab 2.0, welches im März 2022 seinen Betrieb aufnehmen soll: ungefähr 100 Tonnen synthetischer Treibstoff pro Jahr, wenn die Anlage rund um die Uhr mit Volllast laufen würde – auch das nur ein Tropfen auf den heissen Stein – immer heisseren Stein aufgrund der Klimaerwärmung.

Bis synthetischer Treibstoff zum Massenprodukt wird, daure es ungefähr noch ein Jahrzehnt, schätzt Dittmeyer. Denn dafür müsse man grosse Anlagen bauen, die eine gewisse Vorlaufzeit und eventuell internationale Abkommen bedingen. Und vor allem: grosse Investitionen.

Deshalb versucht Dittmeyer, mit anderen Konzepten für dezentrale Anwendungen im kleineren Massstab schneller Marktnischen zu bedienen. Und gleichzeitig das Vertrauen in die Technologie potenzieller Investoren weiter zu fördern.

In Deutschland oder in der Schweiz könnte zur Speisung dezentraler und kleiner Anlagen überschüssiger und somit Ökostrom verwendet werden. Bei kräftigem Wind und Sonnenschein erzeugen Windräder und Photovoltaikanlagen oft viel mehr Strom, als gerade verbraucht wird. Der Ökostrompreis sinkt, bis hin ins Negative, um die Netze zu entlasten, was die Anwendung interessant macht.

Denn die zweite Zukunftshürde für die Einführung synthetischer Stoffe ist der künftige Treibstoffpreis, abhängig von regulatorischen Rahmenbedingungen. Der Treibstoffpreis, heute praktisch das einzige Bewertungskriterium, dürfe nicht das einzige bleiben, fordert Dittmeyer, denn: «Es wird immer billiger sein, ein Loch zu graben und fossile Treibstoffe aus dem Boden zu holen, die während Millionen von Jahren natürlich gereift sind, als selber eine solche Synthese durchzuführen.»

Es brauche Labels für verschiedene Energie-Nachhaltigkeitsstandards, ähnlich der zehn Energieklassen von G bis A+++ für Haushaltsgeräte, eine Art CO_2-Fussabdruck, basierend auf den objektiven Bewertungskriterien. Daran müssten sich die Besteuerung orientieren oder Fördermassnahmen der Politik, wie sie seinerzeit beispielsweise der Photovoltaik widerfahren sei. «Ermöglicht man der Industrie durch Subventionen einen ersten Durchlauf, so ist sie in der Lage, über die Lernkurve den Preis runterzubringen.»

In der internationalen Preisdiskussion sind auch Beimischquoten oder ein CO_2-Preis für Treibstoffe ein Thema, der dafür sorgt, dass für die Markteinführung umweltfreundlicher Mobilitätsenergie wirtschaftliche Geschäftsmodelle überhaupt machbar sind.

Dittmeyer, der seit zehn Jahren seinen Weg geht, ist überzeugt: «Synthetische Treibstoffe sind ein wichtiges Puzzleteil unserer Energie- und Mobilitätszukunft.»

Ammoniak – vom Nährstoff zum Speichermittel und Treibstoff

Als Rohstoff für die Herstellung von Düngemittel konnte Ammoniak seit Anfang des 20. Jahrhunderts viele Böden nähren. Nun soll es als Speicher- und Transportmittel für Wasserstoff aus CO_2-neutraler Herkunft der Menschheit zusätzlich dienen. Auch als Treibstoff werden verschiedene Szenarien getestet.

© Funtay/istockphoto.com

© kirisa99/istockphoto.com

Auch die klassische Produktion von Ammoniak als Düngemittel könnte dank grünem H_2 klimafreundlicher werden.

Als Fritz Haber und Carl Bosch erstmals sahen, wie das nach ihnen benannte Verfahren im Jahre 1913 in einer BASF-Anlage in Betrieb genommen wurde, hätten sie wahrscheinlich nicht gedacht, dass ihrem Syntheseweg für Ammoniak direkt aus den Elementen Stickstoff und Wasserstoff mehr als 100 Jahre später industriell immer noch eine wichtige Bedeutung zugesprochen würde.

«Brot aus Luft»

Bereits früh im 19. Jahrhundert wurde erkannt, dass Stickstoffverbindungen eine positive Wirkung auf das Pflanzenwachstum ausüben. Durch die wachsende Weltbevölkerung konnte aber bald der Bedarf an natürlichen Düngemitteln nicht mehr gedeckt werden. Einen möglichen Ausweg aus diesem Problem erahnten die damaligen Chemiker in der Bindung von Stickstoff aus der Luft in einer Substanz, die von Pflanzen aufgenommen werden konnte – diese Versuche waren unter dem Schlagwort «Brot aus der Luft» bekannt.

Erst viele Jahre später, unter Einbezug von verschiedenen technischen Fortschritten, konnten die zwei deutschen Chemiker Haber und Bosch, ihren Syntheseweg industriereif präsentieren. Heutzutage wird Ammoniak immer noch grösstenteils mit demselben Verfahren hergestellt.

Ammoniak – eine weltweit etablierte Chemikalie

Im Laufe des letzten Jahrhunderts wurden grosse Mengen Ammoniak produziert, sodass mittlerweile dessen Produktionsmenge weltweit an zweiter Stelle anzusiedeln ist, mit über 150 Millionen Tonnen jährlich. Dies bedingt eine ausgeklügelte und gut etablierte Transport- und Lagerinfrastruktur.

Daraus entsprang die Idee von Ammoniak als Speicher- und Transportmittel für Wasserstoff aus CO_2-neutraler Gewinnung. Im Vergleich zu Wasserstoff kann Ammoniak bei milderen Bedingungen verflüssigt werden – bei Standardumgebungstemperatur (25 °C) und ungefähr 10 bar bzw. bei Umgebungsdruck (ca. 1 bar) und –33 °C.

Das Haber-Bosch-Verfahren, wie seine Entwickler es planten, ist allerdings ziemlich energie- und CO_2-intensiv, was die Speicherung vom grünen Wasserstoff alles andere als klimaneutral ermöglichen würde. Einige Forschungsgruppen in Australien und Japan versuchen gerade, die ganze Ammoniak-Produktion CO_2-neutral zu gestalten – dies soll mithilfe eines neuartigen Katalysators erreicht werden.

Treibstoff aus Luft …

Weitere Forschungsgruppen gehen einen Schritt weiter: Da sich Ammoniak im Vergleich zu Wasserstoff viel einfacher und effizienter speichern und transportieren lässt, weshalb soll dann ein zusätzlicher Schritt den Wirkungsgrad nochmals reduzieren, um aus dem Speichermittel wieder Wasserstoff freizusetzen? Viel günstiger wäre es, Ammoniak direkt als Treibstoff für Brennstoffzellen zu nutzen. Mittlerweile soll dank sogenannter Cracker die Ammoniak-Umsetzung im Motor erheblich verbessert worden sein.

Vor allem für die Schifffahrt soll Ammoniak in naher Zukunft eine geeignete Alternative zu Schweröl und Diesel darstellen. Es ist jedoch zu beachten, dass im Vergleich zum fossilen Treibstoff Ammoniak sowohl eine grössere Masse wie auch ein grösseres Volumen für die gleiche Energiemenge beanspruchen würde. Dies muss in der Konstruktion neuer Schiffe mitberücksichtigt werden.

Rein theoretisch liesse sich die Brennstoffzellen-Technologie mit Ammoniak als Treibstoff auch im Strassenverkehr umsetzen. Grosse Bedenken haben die Forscher jedoch mit dem Umgang der giftigen Chemikalie im Alltag. Während die Herstellung im Grossmassstab sowie die Transport- und Lagerinfrastruktur für Ammoniak jahrelang erforscht wurden und einen hohen Sicherheitsstandard erreicht haben, könnte man diese Sicherheit beim Betanken der PKWs und LKWs nicht gewährleisten. Ein Leck oder eine Unaufmerksamkeit an der Tankstelle könnte schnell zu schweren Verätzungen führen.

Nichtsdestotrotz werden, um die Klimaneutralität in den nächsten Jahrzehnten erreichen zu können, viele Technologien und CO_2-Reduktionswege kombiniert werden müssen. Der Produktionsausbau von grünem Ammoniak stellt bloss ein weiteres Puzzleteil dar.

© artjazz/istockphoto.com

Europäische Union «Fit for 55»

Im Juli dieses Jahres hat die EU-Kommission ihren Vorschlag für ein neues Klima-Gesetzespaket vorgestellt. «Fit-for-55», so der Name des Programms, soll der europäischen Union bis 2030 eine CO_2-Emissionsreduktion von 55% bringen.

Medial hat die Ankündigung für wenig Echo gesorgt, was nicht nur am Zeitpunkt der Ankündigung mitten in den Sommerferien gelegen haben dürfte, sondern auch an der Zurückhaltung der Kommission unter Präsidentin von der Leyen. Es scheint, als sei man sich durchaus bewusst, dass die vorgesehenen Änderungen an den bisherigen Energie-, Verkehrs- und Klimavorschriften sowie die neu geplanten Instrumente bei den Mitgliedsstaaten nicht nur auf Gegenliebe stossen werden. Nachfolgend wollen wir einzelne Bausteine von Fit-for-55 und ihre möglichen Auswirkungen auf die Schweiz genauer beleuchten.

EU-Gesetzgebungsprozess

Zunächst einmal steht dem Klimapaket der Weg durch die EU-Instanzen bevor – und der kann durchaus weit sein. Der Vorschlag der Kommission wird zunächst in den verschiedenen Fachgruppen des EU-Rates diskutiert. Im EU-Rat sind die Minister der 27 Mitgliedsstaaten vertreten, jedoch immer nur jene Minister, die für den jeweiligen Fachbereich zuständig sind. Wenn jeder Vorschlag fachlich ausdiskutiert ist, muss sich der Rat zu jedem Gesetzesgeschäft einzeln auf eine gemeinsame Position einigen. Mit dieser Position wiederum tritt der Rat in Verhandlungen mit dem EU-Parlament. Nur wenn Parlament und Rat sich auf eine gemeinsame Position einigen können, wird aus dem Vorschlag auch wirklich ein EU-Gesetz.

Schon angesichts des Zeitplans darf die Vermutung aufkommen, dass die EU ihre Ziele wohl verfehlen wird. Denn für die Umsetzung der möglichen Gesetzesänderungen bleiben den Mitgliedsstaaten auf jeden Fall weniger als 8 Jahre, wobei eine Einigung in allen Punkten schon im Jahr 2022 einem kleinen Wunder gleichkäme. Nichtsdestotrotz sollte sich auch die Schweiz mit den Initiativen der europäischen Nachbarn befassen und entsprechend vorbereitet sein.

Fit-for-55 lässt sich am besten verstehen, wenn man es in drei wesentliche Gruppen von Massnahmen aufteilt: Bepreisung, Vorschriften und Unterstützungsmassnahmen.

Höhere Abgaben auf fossile Energie

Geht es nach der Kommission, so sollen die Kosten sowohl für fossil erzeugte Energie wie auch für direkte CO_2-Emissionen steigen. Die angepasste Energiebesteuerungsrichtlinie enthält deshalb höhere Mindeststeuersätze für fast alle Energieträger, was zwangsläufig zu höheren Konsumentenpreisen führen wird. Die Bepreisung von CO_2-Emissionen findet in der EU heute vor allem über das EU-Emissionshandelssystem (EU-EHS) statt. Bisher waren diesem jedoch nur gewisse Sektoren unterworfen wie Energieerzeugung oder energieintensive Industriezweige – beispielsweise Ölraffinerien und Stahlwerke. Diese bisherigen Akteure sollen nun bis 2030 noch einmal wesentlich stärkere Reduktionen erreichen, nämlich 61% gegenüber 2005. Parallel dazu soll das EHS-System auf die Seefahrt sowie den Strassenverkehr und den Gebäudesektor ausgedehnt werden. Letztere bringen gleichzeitig auch einen massiven Paradigmenwechsel im EHS mit sich. Während bisher innerhalb des EHS immer die eigentlichen Emittenten entsprechende Zertifikate erwerben mussten, so werden es beim Strassenverkehr und den Gebäuden die Inverkehrbringer der Treib- und Brennstoffe sein. Die Kommission sieht in diesem Mechanismus einen Anreiz, in erneuerbare Treib- und Brennstoffe zu investieren und diese in den Markt zu bringen. Kurz- bis mittelfristig jedoch dürfte sich der erweiterte EHS vor allem in höheren Energiepreisen niederschlagen.

Vorschriften und Verbote

In ihrer Kommunikation zu Fit-for-55 sagt es die Kommission gleich selbst: Bepreisungsmechanismen werden nicht genug sein, um die massiven Reduktionsziele zu erreichen. Folglich bleiben nur noch Verbote und Vorschriften – und davon gibt es reichlich im neuen Paket. Da wären allen voran die neuen Emissionsvorschriften für PKW und leichte Nutzfahrzeuge. Die Flotte neu zugelassener Fahrzeuge soll nach dem Willen der Kommission ihre Emissionen bis 2030 um 55 Prozent und bis 2035 um 100 Prozent gegenüber 2021 senken. Für neue leichte Nutzfahrzeuge lauten die Reduktionsvorgaben 50 Prozent bis 2030 bzw. 100 Prozent bis 2035. Zwar besteht der neue Regulierungsvorschlag aus technologieneutralen Formulierungen, die Absicht ist aber klar: Man will den Verbrennungsmotor auf der Strasse verbieten. Gleichzeitig weiss man in der EU aber auch: Der Aufbau alternativer Lade- und Tankinfrastrukturen für Strom- und Wasserstoff hinkt ausserhalb der reichsten EU-Länder den Erwartungen deutlich hinterher. Deshalb kommt mit der «Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Treibstoffe» auch gleich das angepasste Gesetzeswerk mit, welches den Ländern vorschreibt, auf Autobahnen und grossen Überlandstrassen bis 2025 alle 60 Kilometer Elektro-Schnellladestationen und bis 2030 alle 150 km Wasserstofftankstellen zu errichten. Aspekte wie Wirtschaftlichkeit und der langfristige Betrieb und Unterhalt werden dabei jedoch geflissentlich ignoriert.

In Schiff- und Luftfahrt sollen es derweil erneuerbare Treibstoffe richten. Hier besteht der Vorschlag ebenfalls aus Vorgaben zur Errichtung von Versorgungsinfrastrukturen und gleichzeitig der Vorgabe für Reedereien und Airlines, in europäischen Häfen und an europäischen Flughäfen Mindestmengen an erneuerbarem Treibstoff aufzunehmen. So soll verhindert werden, dass Schiffe und Flugzeuge sich ausserhalb von Europa mit günstigerem Treibstoff versorgen und damit dann innereuropäische Routen abdecken. Bis 2030 sollen 5% aller Treibstoffmengen im Luftfahrtbereich erneuerbar sein. Diese Quote wiederum soll bis 2050 sukzessive auf 63% steigen.

«Fit-for-55» wird mit Vorschriften, Verboten und höheren Klimaabgaben die Deindustrialisierung in Europa weiter beschleunigen.

Ausgleichsmassnahmen

Man muss kein Experte sein, um absehen zu können, dass die strengeren EU-Vorschriften – sofern sie denn kommen – ein Nachteil für die in Europa produzierenden Unternehmen sein werden im Vergleich zur Konkurrenz aus Asien und Amerika. Diesen «CO_2-Nachteil» versucht die EU auszugleichen, indem sie versucht, auf bestimmte Importprodukte von ausserhalb der EU den europäischen CO_2-Preis anzulegen. Mit dem sogenannten CO_2-Grenzausgleichssystem müssen ab 2026 beim Import von Zement, Eisen, Stahl, Aluminium, Düngemittel und Strom aus nicht EU-Staaten Zertifikate erworben werden. Der Preis dieser Zertifikate soll der Abgabe für CO_2 entsprechen, die bei der Produktion innerhalb der EU anfallen würde. Dieser Ausgleichsmechanismus hat sich schon in der ersten informellen Beratung der Staaten als hochumstritten erwiesen. So oder so wird die Schweiz wohl nicht von diesem Grenzausgleich betroffen sein, bereits im Entwurf der Kommission sind Länder mit ähnlichen oder höheren CO_2-Bepreisungen ausgenommen – namentlich auch die Schweiz.

Höhere Preise, Investitionsvorgaben und De-facto-Technologieverbote – insbesondere die ärmeren EU-Staaten werden sich gegen das Fit-for-55-Paket stellen, da sie eine zusätzliche Verstärkung der Ungleichheit innerhalb der Union fürchten. Um dem zuvorzukommen, schlägt die Kommission einen «Klima-Sozialfonds» vor, in den insbesondere die reicheren Staaten einzahlen sollen, um die ärmeren Mitglieder und besonders betroffene Bevölkerungsgruppen zu unterstützen. Wer in welcher Form bezugsberechtigt sein wird, dürfte dann ein Teil der Verhandlungsmasse in Rat und Parlament sein.

Bedeutung für die Schweiz

Alles in allem dürfte das Paket Europa als Industriestandort weiter unattraktiver machen. Unternehmen müssen sich auf höhere Energie-, Transport- und Produktionskosten einstellen, welche zwangsläufig auch zu höheren Konsumentenpreisen führen werden. Auch die Schweiz, die rund zwei Drittel aller Importe aus der EU bezieht, wird dieses generell höhere Preisniveau zu spüren bekommen. Mit einer absehbaren Fortsetzung der europäischen Deindustrialisierung werden globale Abhängigkeiten insbesondere von den asiatischen Produktionsräumen nochmals zunehmen. Die Schweiz wird gut daran tun, in den nächsten Jahren viel Fokus auf Versorgungssicherheit und multilaterale Abkommen mit nicht-europäischen Staaten zu legen.

Glossar

Alle wichtige Abkürzungen und Begriffe inkl. kurzer Erklärung

Ammoniak – NH_3
Ein aus Stickstoff und Wasserstoff bestehendes Gas, welches als Grundstoff für verschiedene Produkte wie Dünger verwendet wird, aber auch als Treibstoff Verwendung findet.

Autogas
Eine andere Bezeichnung für den Flüssiggastreibstoff LPG (siehe auch Flüssiggas, LPG).

BHKW – Blockheizkraftwerk
Anlage, welche zum Beispiel mit einem Gasmotor gleichzeitig elektrische Energie und Wärme produziert (siehe auch WKK).

Bioethanol
Aus Biomasse hergestellter Alkohol, der in der Schweiz bis max. 5% dem Benzin als Treibstoff beigemischt werden darf (siehe auch Ethanol).

Biodiesel
Oberbegriff für Dieseltreibstoffe und Dieselbrennstoffe, welche aus Biomasse hergestellt werden (siehe auch BtL).

Biofuel – (Biotreibstoff bzw. Biobrennstoff)
Flüssige Treib- und Brennstoffe, welche aus Biomasse hergestellt werden (siehe auch BtL).

Biogas
Methanhaltiges Gas, welches aus Biomasse hergestellt wird. Es entspricht nach entsprechender Aufbereitung normalem Erdgas (siehe auch BtG).

Biomasse
Im Bereich der Energietechnik wird der Begriff Biomasse für sämtliche biologischen Stoffe verwendet, welche zur Energiegewinnung genutzt werden können. Dazu gehören insbesondere zur Erzeugung von nachhaltiger Energie Abfallstoffe wie Gülle, Grünabfälle, Restholz, Klärschlamm oder Schlachtabfälle.

Biomethan
Methangas, welches aus Biomasse hergestellt wird (siehe auch BtG). Es entspricht nach entsprechender Aufbereitung normalem Erdgas.

BtG/B2G – Biomass-to-Gas (Biomasse-zu-Gas)
Verfahren, welche beispielsweise durch Vergasung oder Vergärung aus Biomasse Gas produzieren (siehe auch BtL, BtX).

BtL/B2L – Biomass-to-Liquid (Biomasse-zu-Flüssigkeit)
Verfahren, welche aus Biomasse direkt oder über Umwandlung von Biogasen flüssige Brenn- oder Treibstoffe produzieren (siehe auch BtG, BtX).

BtX/B2X – Biomass-to-X (Biomasse-zu-X)
Überbegriff für Verfahren, bei welchen Biomasse in eine andere Form von nutzbarer Energie wie Wärme, Strom oder Treibstoffe umgewandelt wird (siehe auch BtG, BtL).

C – Kohlenstoff
(siehe Kohlenstoff)

CCS – Carbon Capture and Storage (Kohlendioxidabscheidung bzw. CO_2-Abscheidung und Speicherung)
Verfahren, bei dem aus einem Prozess oder der Luft CO_2 abgeschieden und gesammelt wird, um dieses beispielsweise unterirdisch auf lange Zeit einzulagern (siehe auch DAC).

CCU – Carbon Capture and Utilization (Kohlendioxidabscheidung bzw. CO_2-Abscheidung und Verwendung)
Verfahren, bei dem aus einem Prozess oder der Luft CO_2 abgeschieden und gesammelt wird, um dieses für weitere Prozesse wie die Herstellung von synthetischen Treibstoffen zu verwenden (siehe auch DAC).

CH_4 – Methan
(siehe Methan)

CNG – Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas)
Für den Transport und die Speicherung wird Erdgas verdichtet. Der Begriff CNG ist besonders im Bereich Gastreibstoffe verbreitet (siehe auch LNG).

CO – Kohlenstoffmonoxid
(siehe Kohlenstoffmonoxid)

CO_2 – Kohlenstoffdioxid, auch Kohlendioxid
(siehe Kohlendioxid)

CtG/C2G – Coal-to-Gas (Kohle-zu-Gas)
Verfahren zur Umwandlung von Braun- oder Steinkohle in gasförmige Energieträger (siehe auch CtL, CtX).

CtL/C2L – Coal-to-Liquid (Kohle-zu-Flüssigkeit)
Verfahren zur Umwandlung von Braun- oder Steinkohle in flüssige Brenn- und Treibstoffe (siehe auch CtG, CtX).

CtX/C2X – Coal-to-X (Kohle-zu-X)
Verfahren zur Umwandlung von Braun- oder Steinkohle in andere Energieformen (siehe auch CtG, CtL).

DAC – Direct Air Capture (Direktes Einfangen aus der Luft)
Verfahren, um CO_2 direkt aus der Umgebungsluft herauszufiltern (siehe auch CCU, CCS).

DME – Dimethylether
Ein Flüssiggas, welches üblicherweise aus Synthesegas hergestellt wird, welches aus Biomasse gewonnen wird. Es ähnelt in seinen Eigenschaften dem Flüssiggas LPG und kann als Ersatz dafür eingesetzt werden.

E-Gas
Bezeichnung für Gase, welche mit Elektrolyseverfahren aus Wasser und elektrischem Strom hergestellt werden. Dies sind hauptsächlich Wasserstoff und daraus hergestellte Gase wie E-Methan (siehe auch PtG).

E-Fuel
Flüssige Treib- und Brennstoffe, welche mit verschiedenen Verfahren mit elektrischem Strom synthetisch hergestellt werden (siehe auch PtL).

E-Methan
Methangas, welches aus CO_2 und Wasserstoff aus einem Elektrolyseverfahren synthetisch hergestellt wird (siehe auch PtG).

Erdgas
Ein zum grössten Teil aus Methan bestehendes Gas, welches aus fossilen Quellen gewonnen wird.

Ethanol
Eine chemische Verbindung mit der Summenformel C_2H_6O. Sie ist bei Normaltemperatur flüssig und unter der Bezeichnung «gewöhnlicher Alkohol» bekannt (siehe auch Bioethanol).

EU-EHS – Emissionshandelssystem der europäischen Union
System zur Bepreisung von CO_2-Emissionen, welches neu auch auf die Sektoren Schifffahrt, Strassenverkehr und Gebäude erweitert werden soll.

FAME – Fatty Acid Methyl Ester (Fettsäuremethylester)
Wird umgangssprachlich als Biodiesel bezeichnet und aus pflanzlichen Ölen und tierischen Fetten hergestellt. Er ist dem herkömmlichen Diesel sehr ähnlich und darf diesem gemäss Norm bis zu einem Anteil von sieben Volumenprozent beigemischt werden.

FC – Fuel Cell (Brennstoffzelle)
Brennstoffzellen sind technische Komponenten, welche Brennstoffe wie Wasserstoff in elektrische Energie umwandelt.

FF55 – Fit-for-55
Vorschlag der EU-Kommission für ein Gesetzespaket, welches eine Reduktion der CO_2-Emissionen der europäischen Union von 55% bis ins Jahr 2030 ermöglichen soll.

Fischer-Tropsch-Synthese
Ein von Franz Fischer und Hans Tropsch entwickeltes Verfahren, um aus Synthesegas flüssige Kohlenwasserstoffe wie Diesel, Benzin oder Kerosin herzustellen.

Flüssiggas
Dieser Ausdruck meint nicht nur allgemein Gase in flüssigem Zustand, sondern wird im Treibstoffbereich auch als Bezeichnung für den Gastreibstoff LPG verwendet (siehe auch Autogas, LPG).

Flüssigwasserstoff – LH_2
Wasserstoffgas, welches, um eine höhere Energiedichte zu erhalten, bei −252 °C verflüssigt wird. Als Flüssigwasserstoff kann das Gas als Treibstoff für LKWs verwendet und besser in grossen Mengen als in komprimierter Form transportiert werden.

F-T-Synthese – Fischer-Tropsch-Synthese
(siehe Fischer-Tropsch-Synthese)

GtL/G2L – Gas-to-Liquid (Gas-zu-Flüssigkeit)
Verfahren, welches aus einem Gas wie Methan flüssige Treib- und Brennstoffe erzeugen können.

GuD – Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk oder Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk
Kraftwerkanlage zur Stromerzeugung, bei der die heissen Abgase einer Gasturbine dazu benutzt werden, Dampf für eine Dampfturbine zu generieren. Dadurch kann der Wirkungsgrad der Gesamtanlage gegenüber der einfachen Gasturbine deutlich gesteigert werden (siehe auch WKK).

H_2 – Wasserstoff
(siehe Wasserstoff)

Haber-Bosch-Verfahren
Ein von Fritz Haber und Carl Bosch entwickeltes Verfahren zur Herstellung von Ammoniak aus Wasserstoff und Stickstoff aus der Umgebungsluft.

HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)
In der Schweiz verwendete Bezeichnung für HVO (siehe HVO).

HUCO – Hydrotreated Used Cooking Oil (hydriertes Altspeiseöl)
Untergruppe von HVO, bei welcher zur Herstellung nur gebrauchte Speiseöle verwendet werden.

HVO – Hydrotreated Vegetable Oils (hydrierte Pflanzenöle)
Wird aus pflanzlichen (Alt-)Ölen und tierischen Fetten durch sogenannte chemische Hydrierung mit Wasserstoff hergestellt. Der entstehende Biodiesel hat praktisch identische Eigenschaften wie fossiler Dieselbrenn- bzw. Treibstoff.

Kohlendioxid – CO_2
Kohlenstoffdioxid ist eine chemische Verbindung aus Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O). CO_2 ist als Gas ein wichtiger Bestandteil des globalen Kohlenstoffkreislaufes und als natürlicher Bestandteil der Luft ein wichtiges Treibhausgas in der Erdatmosphäre.

Kohlenstoff – C
Ein chemisches Element, welches in einer Vielzahl von Verbindungen vorkommt, welche die Grundlage für das Leben auf der Erde bilden.

Kohlenstoffmonoxid – CO
Kohlenstoffmonoxid ist ein Gas aus Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O).
Es entsteht bei der unvollständigen Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Stoffen.

LBG – Liquefied Bio Gas (verflüssigtes Biogas)
Wird Biogas verflüssigt, um beispielsweise als Treibstoff verwendet zu werden, wird dies als LBG bezeichnet (siehe auch LNG).

LBM – Liquefied Biomethane (verflüssigtes Biomethan)
Andere Bezeichnung für LBG (siehe auch LBG, LNG).

LH_2 – Flüssigwasserstoff
(siehe Flüssigwasserstoff)

LNG – Liquefied Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
Die Energiedichte von Erdgas kann für die Speicherung oder den Transport durch Verflüssigung erhöht werden. Dazu muss es auf unter –161 °C abgekühlt werden. LNG wird vermehrt als Treibstoff für Lastwagen für Langstrecken eingesetzt (siehe auch LBG).

LOHC – Liquid Organic Hydrogen Carriers (flüssige organische Wasserstoffträger)
Organische Flüssigkeiten, welche die Eigenschaft besitzen, durch chemische Reaktionen Wasserstoff aufnehmen und wieder abgeben zu können. Dadurch können sie zur Speicherung von Wasserstoff verwendet werden.

LPG – Liquefied Petroleum Gas (verflüssigtes Erdölgas)
Als Treibstoff auch als Flüssiggas oder Autogas bekannt. Es besteht aus einem Gasgemisch aus Propan und Butan und wird hauptsächlich bei der Erdöldestillation gewonnen (siehe auch Autogas, Flüssiggas).

Methan – CH_4
Gas, welches hauptsächlich aus fossilen Quellen (Erdgas) oder aus Biomasse (Biomethan) gewonnen wird.

Methanol
Eine chemische Verbindung mit der Summenformel CH_4O. Sie ist bei Normaltemperatur flüssig und unter der Bezeichnung «Holzgeist» bekannt. Methanol kann als Treibstoff für Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren genutzt werden oder als Ausgangsstoff für die Herstellung von weiteren synthetischen Treibstoffen.

N_2 – Stickstoff
(siehe Stickstoff)

NH_3 – Ammoniak
(siehe Ammoniak)

NO_x – Stickoxide
(siehe Stickoxide)

OME – Oxymethylenether
(siehe Oxymethylenether)

Oxymethylenether – OME
Ein flüssiger Stoff, der aus Biomasse gewonnen werden kann. Er besitzt ähnliche Eigenschaften wie Diesel und kann diesem als Zusatzstoff beigemischt werden, um eine Verbrennung mit kleinerer Schadstoffemission zu erreichen.

PtF/P2F – Power-to-Fuel (Strom-zu-Brennstoff/Treibstoff)
Verfahren zur Umwandlung von (vorzugsweise überschüssiger erneuerbarer) elektrischer Energie in Brenn- und Treibstoff. Entspricht dem Begriff PtL (siehe auch PtL, PtX).

PtG/P2G – Power-to-Gas (Strom-zu-Gas)
Verfahren zur Umwandlung von (vorzugsweise überschüssiger erneuerbarer) elektrischer Energie in Gas. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Elektrolyseverfahren (siehe auch E-Methan, PtL, PtX).

PtL/P2L – Power-to-Liquid (Strom-zu-Liquid)
Verfahren zur Umwandlung von (vorzugsweise überschüssiger erneuerbarer) elektrischer Energie in flüssige Brenn- und Treibstoffe. Dabei wird meist in einem ersten Schritt mit Elektrolyseverfahren Wasserstoff hergestellt, welcher in weiteren Schritten mit CO_2 zu flüssigen Stoffen gewandelt wird (siehe auch E-Fuel, PtG, PtX).

PtX/P2X – Power-to-X (Strom-zu-X)
Überbegriff für Verfahren zur Umwandlung von elektrischer Energie in eine andere Form von Energie. Damit dabei nachhaltige Produkte entstehen können, muss für die Prozesse überschüssiger erneuerbarer Strom aus PV oder Wasserkraft verwendet werden (siehe auch PtG, PtL).

PV – Photovoltaik
Erzeugung von erneuerbarem elektrischem Strom aus Sonnenlicht mit Hilfe von Solarzellen.

ReFuel – Renewable Fuel (erneuerbare Brenn- und Treibstoffe)
Ein Oberbegriff für synthetisch hergestellte Brenn- und Treibstoffe aus nichtfossilen Quellen wie Biomasse oder Strom.

RME – Rapsmethylester
Wird auch als Rapsölmethylester oder Rapsdiesel bezeichnet. Dieser Biodiesel wird durch die chemische Umsetzung von raffiniertem Rapsöl mit Methanol gewonnen. Er macht in Europa den grössten Anteil des Biodiesels aus.

SAF – Sustainable Aviation Fuels (nachhaltige Flugtreibstoffe)
Hierbei handelt es sich um erneuerbare Flugtreibstoffe, welche herkömmlichem Kerosin beigemischt oder dieses zukünftig ganz ersetzen sollen. Sie können sowohl aus Biomasse gewonnen oder mit PtL-Verfahren ganz synthetisch hergestellt werden (siehe auch BtL, PtL).

Schwefeldioxid – SO_2
Gasverbindung aus Schwefel (S) und Sauerstoff (O). Es entsteht bei der Verbrennung von fossilen Brenn- und Treibstoffen und ist als Luftschadstoff für die Bildung von saurem Regen verantwortlich.

SNG – Synthetic/Substitute Natural Gas (synthetisches Erdgas)
Dieser Ausdruck bezeichnet hauptsächlich Biogas, welches auf die Qualität von Erdgas aufbereitet wurde. Er wird aber teilweise auch für synthetisches E-Methan verwendet.

SO_2 – Schwefeldioxid
(siehe Schwefeloxid)

Stickoxide – NO_x
Mit NO_x werden verschiedene Stickoxide zusammengefasst. Sie entstehen bei der Verbrennung von Treibstoffen und gelten als Luftschadstoffe.

Stickstoff – N_2
Gas, welches ca. 78% der Luft ausmacht. Stickstoff wird in einer Vielzahl von chemischen Verbindungen verwendet, wie beispielsweise Dünger oder Sprengstoff.

Synfuel – Synthetic Fuel (synthetischer Brenn- bzw. Treibstoff)
Oberbegriff für sämtliche synthetisch hergestellte Brenn- und Treibstoffe.

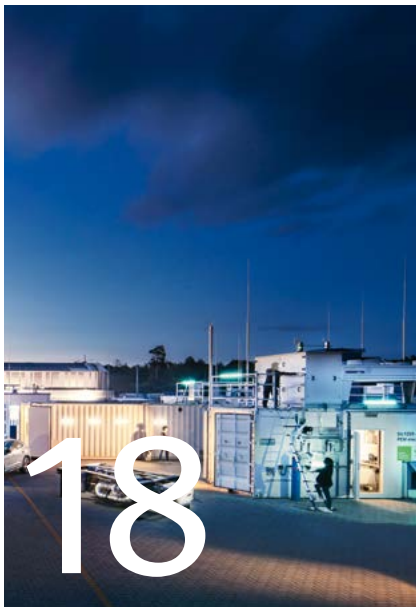
Syngas – Synthesis Gas (Synthesegas)
Ein Gasgemisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid (CO), welches beispielsweise bei der Vergasung von Kohle entsteht. Es wird als Ausgangsstoff für die Herstellung von Stoffen wie Methan, Methanol und Ammoniak verwendet.

UCOME – Used Cooking Oil Methyl Ester (Altspeiseöl Methylester)
Biodiesel-Brenn- oder -Treibstoff, welcher aus Altspeiseölen, wie altem Frittieröl hergestellt wird (siehe auch FAME).

Wasserstoff – H_2
Wasserstoff ist ein Gas, welches derzeit hauptsächlich durch Dampfreformierung aus fossilem Erdgas gewonnen, aber zukünftig immer mehr durch Elektrolyse aus elektrischem Strom und Wasser erzeugt wird. Zur einfacheren Unterscheidung wird der Wasserstoff je nach Herstellungsprozess mit einer anderen Farbe bezeichnet: beispielsweise Grüner H_2 > Elektrolyse mit erneuerbarem Strom, Gelber H_2 > Elektrolyse mit nichterneuerbarem Strom, Rosa oder Roter H_2 > Elektrolyse mit Atomstrom, Grauer H_2 > Dampfreformierung von Erdgas, Blauer H_2 > Dampfreformierung von Erdgas mit CCS, Türkiser H_2 > Methanpyrolyse (siehe auch LH_2, PtG).

WKK – Wärme-Kraft-Kopplung
Verfahren, bei dem sowohl die Antriebsenergie als auch die Abwärme genutzt wird, um den Wirkungsgrad einer Anlage zu steigern (siehe auch BHKW).

AVENERGY SUISSE
Energie für Mobilität und Gebäude



2 **Editorial**
«Wir massen uns kein Urteil an, ob und welche der vorgestellten Technologien und Pfade dereinst die Erdölprodukte ersetzen können.»

4 **Alternative Treibstoffe**
Die Übersicht auf einen Blick.

6 **Gasbasierte Treibstoffe**
Um die gesteckten Reduktionsziele für den CO_2-Ausstoss bis 2050 erreichen zu können, ist eine Defossilisierung des Mobilitätssektors unumgänglich.

10 **Wie wir in Zukunft fliegen**
Emanuel Fleuti kümmert sich um die Umweltfragen rund um den Flughafen Zürich. Aktuell vor allem um den Klimawandel.

14 **Biotechnologie für erneuerbaren Treibstoff**
Algen als Grundlage für erneuerbare Treibstoffe bieten eine verlockende Perspektive, die bereits seit vielen Jahren erforscht und entwickelt wird.

16 **Auf dem Weg zur direkten Abscheidung von CO_2 aus der Atmosphäre**
Das Institute of Materials and Process Engineering (IMPE) entwickelte eine neue Materialklasse, um CO_2 aus der Atmosphäre und aus Abgasströmen abzufangen.

18 **Der Treibstoff, der aus der Luft kommt**
Ohne synthetische Treibstoffe sind klimaneutrale Flüge, Schiffsreisen oder andere Schwertransporte nicht denkbar. Zu Besuch bei Professor Roland Dittmeyer, einem Hoffnungsträger der Klimapolitik.

24 **Ammoniak – vom Nährstoff zum Speichermittel und Treibstoff**
Als Rohstoff für die Herstellung von Düngemittel konnte Ammoniak seit Anfang des 20. Jahrhunderts viele Böden nähren.

26 **Europäische Union «Fit for 55»**
Im Juli dieses Jahres hat die EU-Kommission ihren Vorschlag für ein neues Klima-Gesetzespaket vorgestellt. «Fit-for-55», so der Name des Programms, soll der europäischen Union bis 2030 eine CO_2-Emissionsreduktion von 55% bringen.

28 **Glossar**
Alle wichtigen Abkürzungen und Begriffe inkl. kurzer Erklärung

Impressum
Auflage D 31500/F 11000 | **Redaktion** Avenergy Suisse | **Autoren** Roland Bilang, Fabian Bilger, Natascia Turrà, Bernhard Wüest
Bilder Avenergy Suisse, Cover: © Butusova Elena/Shutterstock | Flughafen Zürich AG | istockphoto.com | ZHAW | KIT | **Grafiken** wapico AG
Gestaltung Avenergy Suisse | **Kontakt** Avenergy Suisse, Spitalgasse 5, 8001 Zürich | T 044 218 50 10, F 044 218 50 11 | info@avenergy.ch, www.avenergy.ch, twitter@avenergysuisse | Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier