



Klimaneutralität für 1,3 Milliarden PKW und LKW: Ohne E-Fuels geht es nicht

Vorbemerkung

Um 2050 herum werden etwa zehn Milliarden Menschen auf der Erde leben, zwei Milliarden mehr als heute. Schon aus diesem Grund wird der Energiebedarf weiter steigen. Global Energy Solutions (GES) geht der Frage nach, ob und gegebenenfalls wie diese zehn Milliarden Menschen in Freiheit und Wohlstand werden leben können. Dies ist ein Kernanliegen der Sustainable Development Goals (SDG), bei denen es um weitere Ziele geht, etwa die Überwindung der Armut, der Erhalt der biologischen Vielfalt und die Stabilisierung des Klimasystems. Unsere Überlegungen beim Klimaschutz orientieren sich insbesondere an den Vermeidungskosten für CO₂: Wieviel kostet es, eine Tonne CO₂ einzusparen, zu vermeiden oder der Atmosphäre wieder zu entziehen? Dabei denken wir letztlich immer global. Entscheidend ist, die Konzentration von CO₂ (und anderen Klimagasen) in der Atmosphäre rasch abzusenken – um insbesondere das Überschreiten von Kippunkten der Ökosysteme (Tipping-Points) und eine Klimakatastrophe zu verhindern. GES versteht sich als Technologie- und Ergebnis-offen. Einen Schwerpunkt unserer Arbeit bilden regenerativ hergestellte Kraftstoffe (Re-Fuels). Darunter fallen Biomasse-basierte Treibstoffe (Bio-Fuels) und solche, die Strom-basiert sind (E-Fuels). Bereits heute ist absehbar, dass E-Fuels bei der Lösung der Klima- und Energiefragen eine entscheidende Rolle spielen werden.

Was sind E-Fuels?

E-Fuels sind regenerativ hergestellte Kraftstoffe, die mithilfe von Strom erzeugt und wie fossile Treibstoffe genutzt werden können. Der Herstellungsprozess von E-Fuels wird als „Power-to-X“ bezeichnet. „Power“ steht für Strom, „X“ für Benzin, Diesel oder Kerosin. E-Fuels können kostengünstig gespeichert, transportiert und fossilen Kraftstoffen beigemischt werden, um diese dann letztlich zu ersetzen. Die bestehende Energie- und Mobilitätsinfrastruktur ist weiter nutzbar. Dazu zählen Pipelines, Tanker, Tankstellen, außerdem Flugzeuge, Schiffe und nicht zuletzt die weltweite Bestandsflotte von PKW und LKW. Auch können viele existierende Heizungen mit regenerativ erzeugten Energieträgern betrieben werden. Eine globale Energiewende, bei der man „alles neu“ machen würde, ist jenseits aller Realität.

Ein universeller Baustein jeder grünen Energiewende ist Wasserstoff, der emissionsfrei verbrannt werden kann. Allerdings ist dessen Transport über weite Entfernungen aufwendig. An dieser Stelle kommen E-Fuels ins Spiel, als Strom-basierte Kohlenstoff-Wasserstoff- oder Stickstoff-Wasserstoff-Verbindungen. Ammoniak beispielsweise enthält keinen Kohlenstoff. Er ist als Energieträger gut geeignet, auch als Treibstoff für Schiffe. Ammoniak wird bei minus 33 Grad flüssig, muss also für den Transport gekühlt werden. Die bei der Verbrennung von Ammoniak entstehenden Stickoxide müssen katalytisch entfernt werden, das ist Stand der Technik. Konventionell erzeugter Ammoniak (meist aus Erdgas) ist eine Grundsubstanz der chemischen und der Düngemittelindustrie. Die Zukunft gehört jedoch dem „grünen“ Ammoniak, der mit regenerativem Strom aus Wasserstoff und Luftstickstoff erzeugt wird. GES hält die Erzeugung von E-Fuels – mit Ausnahme von Ammoniak – aus blauem Wasserstoff in der Regel für wenig geeignet. In einem solchen Fall würde CO₂ zuerst abgefangen (durch CCS), um es aus einer anderen Quelle wieder hinzuzufügen. Das macht wenig Sinn.

Methanol ist mit über 100 Millionen Tonnen pro Jahr eine der meist hergestellten organischen Chemikalien, bisher fast ausschließlich aus

fossilen Quellen. Methanol kann in gewissen Prozentsätzen direkt in Motoren verbrannt werden, ohne dass es größerer Anpassungen bedarf. In China weit verbreitet ist M15, also eine 15-prozentige Zumischung von (fossil erzeugtem) Methanol zu Benzin. Anders als Ammoniak liegt Methanol unter normalen Umständen in flüssiger Form vor. Um herkömmliche Fahrzeuge zu betanken, kann es zu „erdöl-gleichem“ Benzin, Diesel oder Kerosin weiterverarbeitet werden. Dies ist ebenfalls Stand der Technik. Regeneratives Methanol wird gewonnen aus Wasserstoff und CO₂. Um Methanol klimaneutral zu stellen, muss das CO₂, das bei der Verbrennung freigesetzt wird, im Kreislauf geführt oder eingelagert werden. Als Zwischenschritt ist die Mehrfachnutzung von CO₂ durch Abtrennung aus einer fossil betriebenen Punktquelle, z.B. einem Kohlekraftwerk, und weiterer Verwendung für Methanol anzusehen.

Unter den regenerativ hergestellten Treibstoffen gibt es neben E-Fuels auch Biomasse-basierte Kraftstoffe (z.B. aus Mais oder aus Abfällen wie Stroh, Gülle oder Altholz), kurz: Bio-Fuels. Beide Stoffgruppen können klimaneutral produziert werden. Bio-Fuels sind in ihrer Anwendung und in ihren Eigenschaften mit E-Fuels vergleichbar und werden von GES in einem separaten Positionspapier behandelt.

Wer braucht E-Fuels?

Bei der Dekarbonisierung der Luftfahrt geht auf absehbare Zeit kein Weg an E-Fuels vorbei. Batterien sind zu schwer und der Einsatz von Wasserstoff ist noch in der Entwicklung. Eine Beimischung von Sustainable Aviation Fuels (SAF) bringt dagegen eine sofortige Entlastung fürs Klima. Entsprechend fordert das Parlament der EU bis 2025 zunächst eine SAF-Quote von 2 Prozent und bis 2050 sogar von 85 Prozent.

Auch in der Schifffahrt ist zu E-Fuels keine Alternative in Sicht. Die erfolgversprechenden Kandidaten im Rennen um den Schiffsantrieb der Zukunft sind Ammoniak und Methanol, als Zwischenschritt LNG anstelle von Schweröl. Ammoniak kann direkt in entsprechend ausgelegten Schiffsmotoren genutzt werden. Er enthält keinen Kohlenstoff, dafür ist er giftig und bei der Verbrennung entstehen Stickoxide, für die es eine

Abgasreinigung braucht. Grüner Ammoniak boomt derzeit, die wohl größte Produktionsanlage steht in Neom in Saudi-Arabien. Methanol dagegen enthält Kohlenstoff, der im Kreislauf geführt werden müsste, gilt ansonsten aber als umweltverträglich und leichter handhabbar. Waterfront Shipping, die Reederei des größten Methanolproduzenten Methanex betreibt seit einigen Jahren sieben Schiffe mit Methanolantrieb. Die größte Reederei der Welt, Maersk aus Dänemark, hat kürzlich acht Containerfrachter mit einer Kapazität von je etwa 16.000 Standardcontainern mit Methanolantrieb geordert. Als erstes Schiff weltweit soll das norwegische Versorgungsschiff Viking Energy mit einem Ammoniak-Antrieb (per Brennstoffzelle) ausgestattet werden. Auch die japanische Reederei Mitsui O.S.K. Lines arbeitet an Ammoniak-getriebenen Seeschiffen. Bei der Anwendung von Ammoniak für Schiffsantriebe ist jedoch noch mehrjährige Entwicklungsarbeit erforderlich.

Bei Fahrzeugen gibt es sehr wohl Alternativen zu E-Fuels, an erster Stelle Elektroautos mit Batterie (BEV). Führende Automobilhersteller haben sich darauf festgelegt, beispielsweise Volkswagen. Außerdem wird die Elektromobilität in vielen Ländern stark subventioniert. Mit Elektroautos entstehen, abgesehen von Feinstaub, keine lokalen Emissionen, was insbesondere in Städten von Vorteil ist. Die Elektromobilität wird sich in Teilen der Welt wohl durchsetzen. Fragen bleiben: Womit sollen Millionen von LKW angetrieben werden, wenn Batterien für Langstrecken zu schwer sind? Woher kommen die großen Mengen an grünem Fahrstrom? Was ist mit der Ladeinfrastruktur und der Aufrüstung des Netzes, um die gewaltigen Strommengen zu transportieren? Wer auf der Welt kann sich Elektroautos leisten, und wer nicht? Nicht zuletzt: Was geschieht mit der Bestandsflotte von über 1,3 Milliarden Verbrennerfahrzeugen auf der Welt, Tendenz steigend?

Die Emissionen der Bestandsflotte haben einen Anteil von 12 Prozent (7 Prozent PKW, 5 Prozent Busse und LKW) an den globalen CO₂-Emissionen und liegen oberhalb von 5 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr. Hinzu kommen Schifffahrt und Flugverkehr mit jeweils 2 Prozent an den CO₂-Emissionen. Also insgesamt 16 Prozent für den Transportsektor. Die Zahlen zeigen insbesondere die große Bedeutung der Fahrzeuge mit

Verbrennungsmotoren in der Klimadiskussion: Ihre Emissionen liegen um den Faktor 3 höher als die von Schiffen und Flugzeugen zusammen.

Ab 2035 sollen in der Europäischen Union nur noch Neuwagen verkauft werden, die keine Treibhausgase ausstoßen. Elektroautos sind damit gesetzt, aber auch der Einsatz von E-Fuels wird geprüft.

Technologieoffenheit ist aber wichtig, gerade für die europäische Automobilindustrie, die sich auch global positioniert. Denn so viel ist klar: Eine vollständige und weltweite Elektrifizierung von PKW und LKW ist unrealistisch. Der Aufbau einer Ladeinfrastruktur und des erforderlichen Stromnetzes ist beispielsweise auf einem Kontinent wie Afrika, wo 600 Millionen Menschen immer noch keinen Zugang zu Strom haben, schlicht undenkbar. Die finanzielle Förderung beim Kauf eines Elektrofahrzeugs, wie das etwa in Deutschland geschieht, ist angesichts der Armut der afrikanischen Staaten keine Option. Die Realität sieht so aus, dass viele Altfahrzeuge aus reichen Ländern nach Afrika verschifft werden, wo sie so lange weiterfahren, bis es nicht mehr geht. Außerdem wird sich in Afrika die Bevölkerung bis 2050 noch einmal verdoppeln, auf dann 2,5 Milliarden Menschen. Gleichzeitig wird in gigantischem Maßstab gebaut. Dafür braucht man Transportkapazitäten, robuste, starke und preiswerte LKW oder Baufahrzeuge. Sollte eine afrikanische Freihandelszone Wirklichkeit werden, erwartet die UN beispielsweise weitere 2,4 Millionen LKW in Afrika bis 2030. Auch Bahnstrecken sind in Schwellen- und Entwicklungsländern vielfach nicht elektrifiziert. In all diesen Fällen können E-Fuels helfen.

Sind E-Fuels klimaneutral?

Es gibt drei Wege zu klimaneutralen E-Fuels. Erstens, wenn das verwendete CO₂ mittels Direct Air Capture (DAC) aus der Luft gewonnen wird (removal). Zweitens, wenn das CO₂ biogenen Ursprungs ist, also zum Beispiel aus einer Holzschnitzel- oder einer Biogasanlage stammt. In diesen beiden Fällen kommt das CO₂ direkt (DAC) oder indirekt (im Fall der Biomasse durch natürliche Photosynthese) aus der Atmosphäre (removal). Es entsteht ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf, weil nur so viel CO₂

wieder freigesetzt wird, wie vorher eingefangen wurde. Drittens, wenn das für die E-Fuels verwendete CO₂ aus Kohlekraftwerken, Stahlwerken, Zementwerken oder anderen fossilen Punktquellen stammt (reduction). In diesem Fall muss der Kohlenstoff für eine vollständige Klimaneutralität über Nature-based Solutions (Aufforstung, Humusbildung in der Landwirtschaft) oder durch Direct Air Capture mit anschließender Einlagerung des CO₂, auch in Form von Mineralisierung, kompensiert werden. Dabei ist eine saubere Buchführung notwendig.

In der Atmosphäre ist CO₂ nur in geringen Mengen (derzeit 420 Parts per Million) enthalten. Während es bei Punktquellen, zum Beispiel am Schornstein eines Kohlekraftwerks, in hoher Konzentration vorliegt, rund 10 Prozent oder darüber, also mehr als 200 Mal höher im Verhältnis zur Atmosphäre. Deshalb ist CO₂ aus Punktquellen als Rohstoff für E-Fuels auch deutlich günstiger. Allerdings kommen die Kosten für Nature-based Solutions oder die finale Einlagerung des CO₂ noch hinzu, um die Klimaneutralität zu sichern.

Die weltweit genutzte Energie stammt (immer noch) zu über 80 Prozent aus fossilen Quellen. Dabei sind die Emissionen von Kohlekraftwerken (rund 10 Milliarden Tonnen pro Jahr) von herausragender Bedeutung. Insgesamt werden die Menschen noch sehr lange fossile Energieträger nutzen. Will man das Klimaproblem lösen und den Entwicklungs- und Schwellenländern die geforderte und zugebilligte Entwicklung ermöglichen, kann man die fossilen CO₂-Quellen nicht außer Acht lassen – sondern muss sie möglichst unschädlich machen (CCS) oder nutzen (CCU). Und die Zeit drängt. Die Nature-based Solutions haben dabei eine besondere Bedeutung.

Es gibt noch eine weitere Option, E-Fuels herzustellen, nämlich mit CO₂ aus fossilen Punktquellen *ohne* Kompensation. In diesem Fall wäre das E-Fuel nicht klimaneutral. Aber die Emissionen würden um etwa 50 Prozent gesenkt, weil das CO₂ zweimal genutzt würde, einmal im Kraftwerk, ein weiteres Mal im Fahrzeug. E-Fuel würde Benzin, Diesel oder Kerosin aus fossilen Quellen ersetzen. Diese Verfahrensweise könnte man als ersten Schritt sehen, der zu einer erheblichen Reduktion der CO₂-Emissionen führt.

Entstehen bei der Verbrennung von E-Fuels Schadstoffe?

Ja, zum Beispiel Stickoxide beim Verbrennen von Ammoniak, die über eine Entstickungsanlage abgefangen werden müssen. E-Fuels auf Methanolbasis erlauben aber eine bessere Verbrennung als fossile Treibstoffe, da ein kurzkettiger Kohlenwasserstoff wie bei Methanol besonders sauber verbrennt. Eine Beimischung von 15 Prozent Methanol zu Benzin (M15) führt zu einer mehr als 30-prozentigen Reduktion der unverbrannten Kohlenwasserstoffe im Abgas. Generell gilt, dass moderne Verbrennungsmotoren deutlich sauberer arbeiten als noch vor 10 oder 20 Jahren. Das gilt für Restgehalte an Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid und Stickstoffoxide. Und laut Zahlen von Robert Bosch ist eine weitere Optimierung möglich. Ein Thema, das Elektroautos ebenso betrifft wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, ist Feinstaub, etwa durch Abrieb von Bremsen. Elektroautos sind besonders betroffen, weil schwerer, aufgrund der Batterie. Man kann die Schadstoffemissionen weiter senken, sollte aber die Kostenfrage und die Begrenztheit finanzieller Mittel gegen die erschließbaren Verbesserungen abwägen.

Wie effizient sind E-Fuels?

Fossile Kraftstoffe werden in einem Auto mit Verbrennungsmotor mit einem technischen Wirkungsgrad von 25 bis 40 Prozent in Bewegungsenergie umgesetzt. Der vom Elektroauto getankte Strom wird dagegen mit einem Wirkungsgrad von 60 bis 80 Prozent genutzt. Diese isolierte Betrachtung (tank to wheel) ist jedoch irreführend. Entscheidend sind die Emissionen und Kosten pro gefahrenem Kilometer oder transportierter Tonne.

Ein ganzheitlicher Systemvergleich muss deshalb beim Elektroauto auch die Stromerzeugung, die Batterieherstellung, den Transport, die Umwandlung, die Speicherung sowie den Bau der Lade- und Tankstelleninfrastruktur in Rechnung stellen.

Bei E-Fuels ist folgendes zu bedenken: Neben der Prozesseffizienz und der Herstellung des Kraftstoffs spielen auch die möglichen Betriebsstunden der Wind- oder Solaranlagen in Sachen Wirtschaftlichkeit eine wichtige Rolle. Generell gilt, dass ein Standort für erneuerbare Stromerzeugung umso geeigneter ist, je höher die erzielten Volllaststunden sind. Häufig sind daher küstennahe Standorte entlang des Sonnengürtels der Erde besonders attraktiv, da sie neben der Sonnen- auch die Windenergie nutzen können. Die Stromausbeute von PV-Anlagen in Sonnenwüsten ist zwei bis drei Mal höher als in Mitteleuropa. Darin liegt eine massive Ineffizienz, die aber in der Diskussion meist ausgeklammert wird. Im Ergebnis und ganzheitlich betrachtet läuft die wirtschaftliche Effizienz von Elektroautos und Verbrennern im internationalen Vergleich auf ähnliche Verhältnisse hinaus.

E-Fuels haben einen Vorteil. In Sachen Klima entfalten sie ihre Wirkung sofort – je höher die Beimischung zu konventionellen Treibstoffen, desto besser. Elektroautos dagegen starten mit einer schweren Hypothek, denn die Produktion der Batterie ist äußerst Energie-intensiv, dabei fallen erhebliche CO₂-Emissionen an. Außerdem spielen die Produktionsbedingungen des Fahrstroms und der damit einhergehenden Emissionen eine wichtige Rolle. Die Elektromobilität benötigt zudem kritische Rohstoffe wie Lithium oder Kobalt. Und perspektivisch wird der Aufbau einer Recyclingkette für die Batterien auf jeden Fall erforderlich. Dagegen erspart man sich beim Einsatz von E-Fuels die gewaltigen Kosten für den Umbau der Infrastruktur und den Ersatz der bestehenden Fahrzeugflotte. Auch das ist Effizienz!

Letztlich entscheidend sind die Vermeidungskosten, also der Geldbetrag, der für Anlagen und deren Betrieb eingesetzt werden muss, um eine Tonne CO₂ zu vermeiden. Daran gemessen sind E-Fuels durchaus wettbewerbsfähig. Es kommt nicht auf den technischen Wirkungsgrad an, sondern auf den ökonomischen: wieviel Treibstoff zu welchen Kosten produziert werden kann.

Wie teuer sind E-Fuels?

Der größte Kostenblock bei der Erzeugung von E-Fuels ist der CO₂-arme Strom, der benötigt wird, um Wasserstoff herzustellen. Dabei hilft der technische Fortschritt. In den vergangenen Jahren sind die Kosten von Photovoltaik-Anlagen deutlich gefallen. Eine Kilowattstunde Strom, die in Sonnenwüsten erzeugt wird, kostet günstigstenfalls etwa 1 bis 2 Cent. Diese niedrigen Preise für CO₂-armen Strom aus Solar- und auch aus Windkraftanlagen sind aber nur an geeigneten Orten auf der Erde zu erzielen – in Mitteleuropa keine Chance.

Ein weiterer Kostenfaktor für die Produktion von Methanol ist CO₂. Eine Tonne, die bei einem Zementwerk abgeschieden wird, kostet etwa 70 Euro. Dagegen ist eine mit Direct Air Capture produzierte Tonne derzeit etwa zehn Mal so teuer. Perspektivisch ist vielleicht eine Halbierung dieser Kosten zu erwarten. Auf absehbare Zeit sollte man deshalb in vielen Fällen auf fossile (Punkt-) Quellen zurückgreifen und diese möglichst umfassend mit Nature-based Solutions kombinieren.

Derzeit kostet E-Fuel etwa doppelt so viel wie eine vergleichbare Energiemenge fossiler Kraftstoff. Doch bei größeren Produktionsmengen, guten Standortbedingungen und sinkenden Strompreisen können so erzeugte Kraftstoffe deutlich günstiger werden, als sie es heute sind. Das erfordert allerdings milliardenschwere Investitionen in die Produktionsanlagen. Optimistische Prognosen gehen davon aus, dass Kosten für E-Fuels von 1 bis 2 Euro pro Liter erreichbar sind, ohne Steuern. Transportkosten haben hieran nur einen Anteil von wenigen Cent.

Wann wird es soweit sein? Als Anhaltspunkt können Studien gelten, die die Preisentwicklung von grünem Wasserstoff analysieren. Danach könnte um das Jahr 2030 herum grüner Wasserstoff (der heute rund 5 US-Dollar pro Kilogramm kostet) konkurrenzfähig mit fossil erzeugtem Wasserstoff (1,5 bis 2 US-Dollar pro Kilogramm; Preise von 2021) sein.

Gibt es genug E-Fuels?

Wer derzeit E-Fuels kaufen möchte, wird in der Regel enttäuscht. Es gibt nur kleinere Pilotanlagen für Forschung und Entwicklung. Gegenüber

konventionellen Kraftstoffen sind die Preise daher noch hoch. Das wohl am weitesten fortgeschrittene E-Fuel-Projekt Haru Oni in Südchile nimmt Ende 2022 seinen (Test-) Betrieb auf. Sollen E-Fuels einen Beitrag zur Lösung der Klimakrise leisten, müssten die Produktionskapazitäten in den kommenden 10 bis 20 Jahren mit großen Investitionen enorm ausgebaut werden.

Der globale Energiebedarf von Schifffahrt und Luftverkehr ist beträchtlich, der des Straßenverkehrs noch einmal wesentlich größer: insgesamt rund 28.000 Terrawattstunden pro Jahr – bisher fast alles Öl-basiert. Wollte man diese Nachfrage mit regenerativer Energie decken, braucht man zuerst CO₂-armen Strom, und dann – meist über Elektrolyse – erzeugten grünen Wasserstoff.

Das Fraunhofer Institut hat in globaler Perspektive die Potentiale für die Erzeugung von Elektrolysewasserstoff untersucht. Im PTX-Atlas errechnet das Institut außerhalb Europas eine mögliche Fördermenge von 109.000 Terrawattstunden. Bedenkt man Fragen der Investitionssicherheit und der Infrastruktur, verringert sich das Gesteuerungspotential auf etwa 69.000 Terrawattstunden Wasserstoff.

Eine Beispielrechnung von GES zeigt, dass dies in Zukunft völlig ausreichen könnte. Wir gehen für das Jahr 2040 von einem Bedarf von 32.000 Terawattstunden CO₂-armem Strom aus, um hinreichende Mengen E-Fuels zu produzieren. Mit einer Elektrolyseurkapazität von 8000 Gigawattstunden, die zur Hälfte (4000 Stunden pro Jahr) ausgelastet wird, lassen sich (zusammen mit dem Einsatz von 4,7 Milliarden Tonnen CO₂) 3,4 Milliarden Tonnen Methanol produzieren – und daraus wiederum 1,7 Milliarden Tonnen (Methanol-) Benzin. Das wäre mehr als ausreichend für 1,3 Milliarden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (bei einem Bedarf von etwa 1 Tonne Kraftstoff pro Fahrzeug und Jahr).

Aber bis dahin ist es noch ein weiter Weg. Die erforderlichen Anlagen müssen erst noch gebaut werden, insbesondere auch Elektrolyseure zur Erzeugung von Wasserstoff aus Strom. Dabei haben konkurrierende Elektrolysetechniken verschiedene Vor- und Nachteile. Ein möglicher Engpass für den Ausbau der PEM-Elektrolyse ist beispielsweise Rohstoffknappheit bei Iridium und Platin. Beide Edelmetalle sind

weitgehend korrosionsbeständig und deshalb hervorragend für die Technologie geeignet. Darüber hinaus gibt es zahlreiche Skalierungshemmnisse bei der Produktion von Wasserstoff: hohe Strompreise oder die EU-Vorgaben, 100 Prozent grünen Strom einsetzen zu müssen. Aber auch die Verfügbarkeit von Rohstoffen für Produktionsanlagen, eine möglicherweise geringe Auslastung der Anlagen, nicht ausreichende Mengen Wasser für die Elektrolyse (insbesondere Kühlwasser), staatliche Regulierungen, Transportkosten sowie die grenzüberschreitende Entwicklung und Finanzierung von komplexen neuartigen Businessmodellen. Nur wenn es gelingt, diese Probleme gleichzeitig anzupacken, kann der Hochlauf gelingen.

Der Hochlauf der Elektromobilität birgt aber ebenfalls erhebliche Probleme. Bisher sind Elektrofahrzeuge im Wesentlichen Nischenprodukte. Will man den Anteil an der Fahrzeugflotte signifikant erhöhen, muss eine neue Infrastruktur geschaffen werden: zum Beispiel mehr Ladepunkte, dazu leistungsfähige und „smarte“ Stromnetze. Denn die wenigsten Kunden haben eine PV-Anlage auf dem Dach und eine Batterie im Keller. Gerade die neuen Erneuerbaren, Wind- und Sonnenstrom, sind sehr volatil. Und Strom lässt sich nur sehr begrenzt speichern. Wenn der Wind nicht weht und die Sonne nicht scheint, müssen Ersatzkraftwerke einspringen: je mehr Elektroautos, desto mehr Backup. Da kommt man zum Beispiel in Deutschland schnell auf notwendige Reserveleistungen, die der gesamten heutigen Kraftwerksleistung entsprechen. Flächendeckende Elektromobilität, selbst in reichen Ländern wie Deutschland, ist also nicht nur teuer, sondern stößt auch schnell an technische und logistische Grenzen.

Bei E-Fuels ist die Lage anders. Ihrem Wesen nach sind sie chemische Stromspeicher (flüssiger Strom), zudem einfach in der Handhabung. Ein Kanister mit Benzin oder E-Fuel in der Garage kann schon hilfreich sein. Kurz, die Speicherfunktion von E-Fuels bringt Versorgungssicherheit und Stabilität für das Energiesystem der Zukunft. Nicht anders als Heizöl, Benzin und Diesel das heute tun.

Wie kann man CO₂ aus E-Fuels kompensieren?

Der natürliche Kohlenstoffkreislauf beinhaltet nicht nur CO₂-Senken in den Ozeanen, sondern auch an Land. Wälder, Moore, Mangroven und die Humusschicht des Bodens gehören dazu. Nach diesem Vorbild der Natur arbeiten die Nature-based Solutions. Bei der Aufforstung von degradierten Flächen in den Tropen – davon allein gibt es 1 Milliarde Hektar – wird Kohlenstoff in der Biomasse des wieder entstehenden Waldes gespeichert. Wird ein Baum gefällt und verbrannt, entweicht das im Holz (zwischen-) gespeicherte CO₂ wieder in die Atmosphäre. Bei der Humusbildung in der Landwirtschaft wird der Kohlenstoff über deutlich längere Zeiträume gespeichert. Diese Zusammenhänge und Ansätze sind gut erforscht. Wissenschaftler gehen davon aus, dass es auf dem Planeten ein Speicherpotenzial mit Nature-based Solutions von etwa 10 Milliarden Tonnen CO₂ gibt. Kurz, der Ansatz funktioniert – wenn man es seriös macht. Polemik wie „Greenwashing“ und „Ablasshandel“ ist in diesem Zusammenhang nicht nur irreführend, sondern falsch.

Nature-based Solutions funktionieren auch praktisch. Das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) hat im Jahr 2018 die Allianz für Entwicklung und Klima gegründet, heute eine unabhängige Stiftung. Der Allianz gehören inzwischen mehr als 800 Unterstützer an: Kommunen, Bundesländer, Sportvereine und nicht zuletzt große Unternehmen wie die Deutsche Bank, Munich Re und SAP, aber auch Bosch, das als Industrieunternehmen seit 2020 klimaneutral ist, und der weltgrößte Logistikdienstleister im Bereich der Seefracht, Kühne + Nagel. Sie alle setzen unter anderem auf Wiederaufforstung und Walderhalt. In einem auf Freiwilligkeit beruhenden Markt mit Zertifikaten.

Zur Wahrheit gehört aber auch, dass die globalen Waldflächen insgesamt derzeit keine Kohlenstoffsenken sind, sondern -quellen! Das liegt im Wesentlichen an der großflächigen Vernichtung von (Regen-) Wald. Der Grund für die Zerstörung der Natur ist fast immer wirtschaftlicher Natur. Dagegen helfen nur ökonomische Mittel, kurzum: Geld.

Und hier kommen E-Fuels ins Spiel. In der oben genannten Beispielrechnung ist von 4,7 Milliarden CO₂ die Rede, die gebraucht

werden, um die globale Bestandsflotte von PKW und LKW mit E-Fuels zu versorgen. Wollte man diese Kohlenstoffmenge kompensieren und unterstellt einen CO₂-Preis von 50 Euro pro Tonne, kommt man auf einen Betrag von 235 Milliarden Euro pro Jahr. Ein Liter E-Fuel verteuert sich dadurch um weniger als 15 Cent. Teilweise würden sogar Klimaabgaben für den Treibstoff entfallen, zum Beispiel in Europa.

Würde man alle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren auf diese Weise mit E-Fuels versorgen, könnte man jedes zweite Kohlekraftwerk auf der Welt mittels CCU klimaneutral stellen. Das funktioniert am besten, wenn sich die Methanolproduktion in räumlicher Nähe zum Kohlekraftwerk befinden würde, Transportkosten würden so verringert. Die genannten 235 Milliarden Euro, die die reichen Länder überwiegend aufbringen müssten, würden den Schwellen- und Entwicklungsländern enorm helfen, nicht nur bei der Rettung des Regenwaldes, sondern auch bei vielen anderen SDG-Zielen, etwa bei der Bildung oder der Gleichstellung von Frauen. Und das alles für 15 Cent pro Liter. Diese 15 Cent wären auch der Benchmark für den alternativen Lösungsweg über Direct Air Capture und Einlagerung des CO₂, etwa in unterirdischen Gasspeichern oder durch Mineralisierung.

Fazit

Mobilität ist ein Grundbedürfnis des Menschen und eine wichtige Voraussetzung für Wertschöpfung. Insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern besteht über die kommenden Jahrzehnte ein großer Nachholbedarf. Die Mobilität von Menschen und Gütern wird also zunehmen, schon allein wegen der wachsenden Anzahl von Menschen. Absehbar wird sich der heutige Bestand von 1,3 Milliarden PKW und Nutzfahrzeugen deshalb weiter erhöhen. Das Gleiche gilt für die Nutzung von Flugzeugen und Schiffen.

Um globale Klimaneutralität zu erreichen, muss man die durch das Transportbedürfnis des Menschen entstehenden Emissionen möglichst klimaneutral stellen. Flugzeuge und Schiffe scheinen aus heutiger Sicht für E-Fuels prädestiniert zu sein. Auf absehbare Zeit sind alternative Lösungen,

die wirtschaftlich tragfähig sind, für sie nicht erkennbar. Das mag in Zukunft anders sein, der technische Fortschritt geht ja weiter.

Die entscheidende Frage aber lautet: Was wird aus PKW und LKW, und was wird aus der riesigen Bestandsflotte? Heute sind die CO₂-Emissionen aus diesem Bereich etwa drei Mal so hoch wie die aus Schiffs- und Flugverkehr zusammen. Deshalb sind Lösungen für diese Sektoren so wichtig, nur so lässt sich eine Lösung für das globale Klimaproblem überhaupt erreichen.

Elektroautos sind bereits weit entwickelt, das gilt für Technik und Geschäftsmodelle. E-Fuels dagegen beginnen gerade erst mit dem Hochlauf. Beide Ansätze haben ihre Stärken, die Elektromobilität punktet zum Beispiel im innerstädtischen Verkehr.

Die flächendeckende Einführung der Elektromobilität ist schon in reichen Ländern eine Herausforderung. Für Entwicklungsländer ist ein signifikanter Anteil von Elektroautos kaum vorstellbar. Das mag bei E-Scootern, wie man sie häufig in Indien und China sieht, anders sein. Grundsätzlich gilt: Eine Elektrifizierung der globalen PKW- und LKW-Flotte ist unmöglich, das scheitert schon an der Rohstoffverfügbarkeit für die Batterien.

Und hier kommen E-Fuels ins Spiel. Die Menschheit braucht alle sinnvollen Ansätze, um das Klimaproblem zu lösen, auch in der Mobilität. Die Vorteile liegen auf der Hand: Verwendung der bisherigen Infrastruktur, einfache Handhabung und Speicherung von Energie und damit eine Stabilisierung des zukünftigen Energiesystems. Deshalb plädiert GES für eine größtmögliche Technologieoffenheit.

Dass E-Fuels im großen Maßstab hergestellt werden können, dass genug erneuerbare Energie, ausreichend Flächen und Ressourcen vorhanden sind, ist wissenschaftlich erwiesen. Die Schwierigkeiten des Hochlaufs von E-Fuels liegen woanders: im Ausbau der Produktionskapazitäten, zum Beispiel von Elektrolyseuren, in der Bereitstellung des Kapitals, in der Gestaltung der globalen Lieferketten, insbesondere mit den Schwellen- und Entwicklungsländern, in einer Regulierung, die die Klimaneutralität von E-Fuels anerkennt und sie von Klimaabgaben freistellt, und nicht zuletzt in der

Finanzierung von Vermeidung und Kompensation von CO₂, sprich: CCUS und Nature-based Solutions.

Ein Liter E-Fuel würde sich durch konsequente Anwendung von Nature-based Solutions um etwa 15 Cent verteuern. Und selbst wenn der reiche Norden einen Großteil der Kosten übernehme, wären die Aufwendungen bemerkenswert gering – gemessen an der Jahrhundertaufgabe, das Klima zu retten. Wir brauchen eine effektive und rasche Senkung von CO₂ (und anderen Treibhausgasen) in der Atmosphäre. Das Ziel heißt Net Zero.

Letzten Endes geht es um eine Energiewende im globalen Maßstab und E-Fuels sind dabei ein wichtiger Baustein. Der Übergang wird mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen. GES ist davon überzeugt, dass er machbar ist. Dafür muss man heute allerdings die richtigen Schritte setzen. Bei E-Fuels heißt das:

- Denkhürden überwinden. In Deutschland betrifft das vor allem die CO₂-Abscheidung, also CCS und CCU.
- Technik und Geschäftsmodelle von E-Fuels unterstützen. Wir brauchen nicht nur eine Wasserstoff-, sondern auch eine E-Fuel-Strategie.
- E-Fuels als klimaneutral anerkennen – und damit von der Klimaabgabe befreien.
- Eine substanzielle Beimischungsquote von E-Fuels auch für PKW und LKW einführen – um den Hochlauf zu forcieren.