



MICHAEL SOHN/AP

Technik von morgen
An der Funkausstellung in Berlin geht es um smarte Vernetzung **54**

Dernier Cri
Der menschliche Schrei ist viel mehr als nur lautes Gebrüll **53**

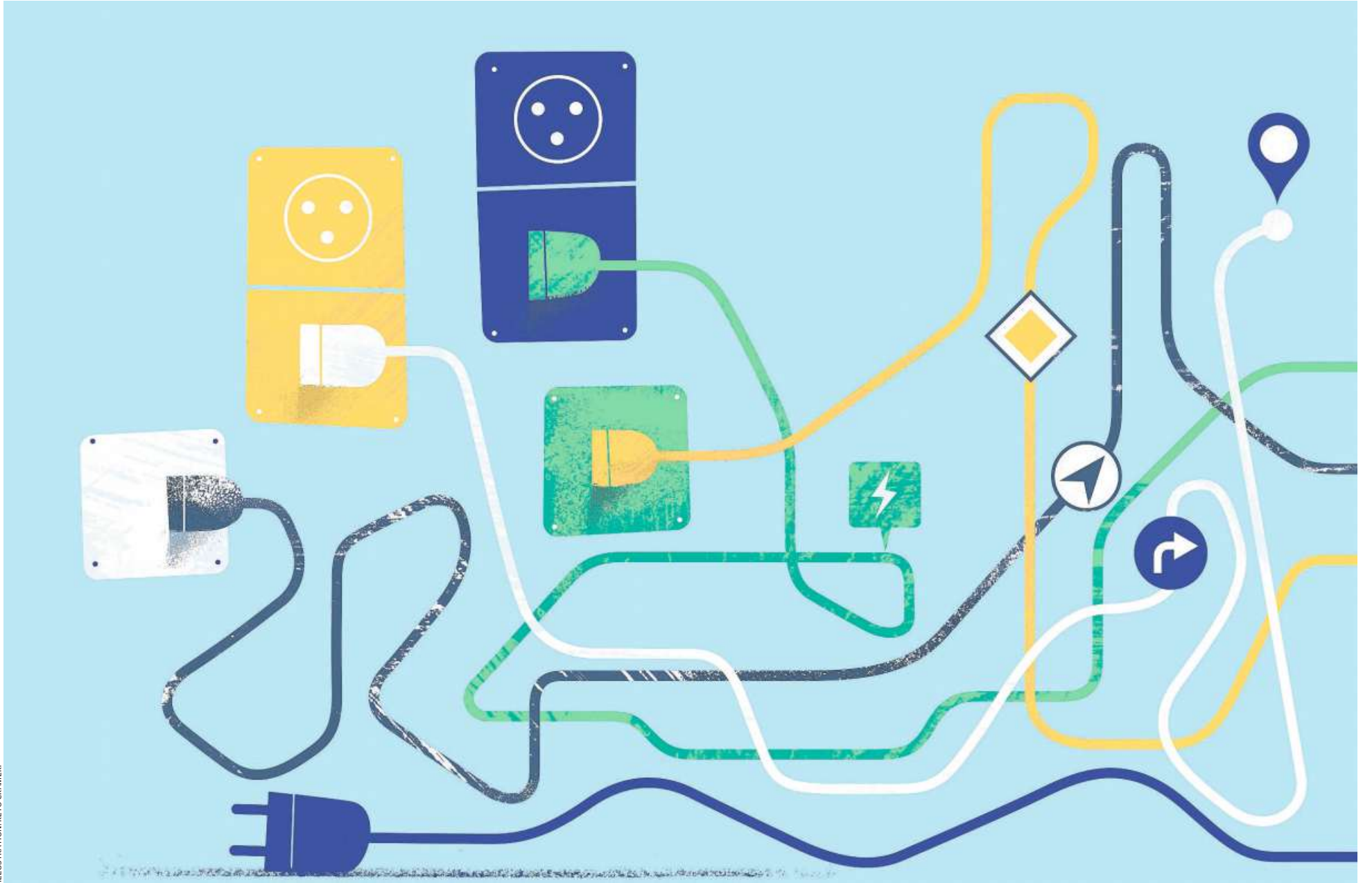


ILLUSTRATION: RETO GRAMERI

Spezial
Mobilität

Überladen

Autos mit Elektromotoren werden das Klimaproblem allein nicht lösen. Für Schiffe, Lastwagen und Flugzeuge braucht es eine andere Technik. **Von Andreas Hirstein**

Der Verbrennungsmotor steht auf der Streichliste der Klimapolitik ganz oben. Wenn die Schweiz ab 2050 keine Treibhausgase mehr ausstossen soll – ein Ziel, das der Bundesrat erst Ende August formuliert hat –, dann müssen alle fossil angetriebenen Fahrzeuge verschwinden.

Für die Schweiz ist der Verzicht auf Benzin und Diesel sogar von besonders grosser Bedeutung, weil der Verkehr hierzulande der grösste Verursacher von Treibhausgasen ist. «Auf Autos, Lastwagen und Flugzeuge entfallen fast 40 Prozent aller Emissionen», sagt Konstantinos Boulouchos, Professor an der ETH Zürich und Leiter des vom Bund geförderten Kompetenzzentrums «SCCER Mobility». Die Elektrizitätswirtschaft produziert dagegen dank Wasser- und Kernenergie den Strom nahezu CO₂-frei. In der EU mit ihren Kohle- und Gaskraftwerken sieht das anders aus. Dort trägt der Verkehr nur 25 Prozent zur Gesamtmenge der Treibhausgase bei.

Der Verzicht auf fossile Energie, die sogenannte Dekarbonisierung, ist eine gigantische Herausforderung. Mit dem Kauf eines Elektroautos ist das Problem jedenfalls nicht gelöst – schon gar nicht mit den 2,5 Tonnen schweren Kolossen, wie sie von den Premiumherstellern angeboten werden. Sie lösen kein Problem, sondern verschärfen es eher noch, weil der Energiehunger dieser Fahrzeuge gross ist und die

Batterien für mehrere hundert Kilometer Reichweite entsprechend schwer.

Steigen wird der Energiebedarf für die Mobilität ohnehin, weil der Verkehr laut Prognosen zunehmen wird: der Personenverkehr bis 2040 um 15 Prozent, der Güterverkehr um 25 bis 30 Prozent. Und auch Letzterer muss bis Mitte des Jahrhunderts CO₂-frei werden, wenn die Klimaziele mehr sein sollen als wohlfeile Absichtserklärungen.

Luftfahrt boomt

Und bei alledem haben wir von zwei Verkehrsmitteln noch gar nicht gesprochen: vom Flugzeug und von Schiffen mit ihren grossen Dieselmotoren. Zwar macht die Luftfahrt weltweit derzeit nur rund 3 Prozent der Treibhausgasemissionen aus. Der Ausstoss wächst aber jedes Jahr um 3 bis 4 Prozent. Im Jahr 2050 werden die Emissionen des Schweizer Luftverkehrs daher ungefähr so hoch sein wie die der heutigen Personewagen. «Das bedeutet: Falls es gelingt, Benzin- und Dieselaautos bis 2050 vollständig durch batteriebetriebene Elektrofahrzeuge zu ersetzen, würde der Flugverkehr diesen Fortschritt praktisch wieder zunichtemachen», sagt Stefan Hirschberg vom Paul-Scherrer-Institut in Villigen. Elektrisch betriebene Grossraumflugzeuge wird es jedenfalls nicht geben, weil die Energiedichte der Batterien zu niedrig ist. Sie sind zu schwer und zu gross.

Doch wie sieht es auf den Strassen aus? Lassen sich wenigstens die Personewagen mit Verbrennungsmotoren klimafreundlich

ersetzen? Immerhin gibt es mit dem batteriebetriebenen Elektroauto eine ausgereifte Fahrzeugtechnik, die man heute schon kaufen kann. Der hohe Wirkungsgrad des Elektromotors und die niedrigen Verluste beim Laden und Entladen der Batterien lassen es als die heute beste Technik erscheinen, um klimafreundlich mobil zu sein.

Doch bevor jetzt alle die S-Bahn zum freundlichen Porsche-Händler nehmen, um den elektrischen Porsche Taycan mit 761 PS zum Grundpreis von rund 240 000 Franken zu bestellen, sollte man sich überlegen, was die vollständige Elektrifizierung der Personewagen eigentlich für die Stromerzeugung bedeutet. Denn nicht nur die Personewagen müssen klimaneutral werden, sondern auch die Nutzfahrzeuge, der Flugverkehr und alle anderen Sektoren der Wirtschaft, wie zum Beispiel die Wärmeerzeugung für Gebäude sowie alle Industrieprozesse. Und zu alledem soll gleichzeitig auch noch der Ausstieg aus der Kernenergie vollzogen werden.

Wie gross der aus dieser Politik resultierende Bedarf an erneuerbarem Strom im Jahr 2050 sein wird, lässt sich nicht genau sagen.

Möglicherweise werden 2050 hierzulande über 10 Millionen Menschen leben. Das Bruttoinlandprodukt könnte um 50 Prozent zulegen.

Wir wissen zum Beispiel nicht, wie schnell die Bevölkerung und das Bruttoinlandprodukt wachsen. Möglicherweise werden hierzulande mehr als 10 Millionen Menschen leben. Das Bruttoinlandprodukt könnte sogar um 50 Prozent zulegen.

Beide Trends dürften den Energiehunger vergrössern. Wie stark, wird auch von möglichen Effizienzgewinnen abhängen. Um wenigstens eine ungefähre Vorstellung von den Grössenordnungen zu bekommen, müssen wir uns – das muss jetzt leider sein – ein paar Zahlen anschauen.

Das Potenzial der Photovoltaik

Nehmen wir an, der Verkehr würde vollständig auf batterieelektrische Antriebe umgestellt, selbst dort, wo es technisch nicht möglich sein wird, wie im Flugverkehr und bei den grossen Nutzfahrzeugen. Auch die Zunahme der immatrikulierten Fahrzeuge und der zurückgelegten Fahrstrecken sowie den exponentiell wachsenden Flugverkehr vernachlässigen wir. Unter diesen Bedingungen schätzt Konstantinos Boulouchos den Bedarf an erneuerbarem Strom wie folgt:

- Für den Ersatz aller Benzin- und Dieselaautos durch Batterieautos werden 14 TWh (Terawattstunden) Strom benötigt,
- für Nutzfahrzeuge 5 TWh,
- für Flugzeuge 8 TWh,
- für Wärmepumpen 10 TWh,
- für Industriewärme 15 bis 20 TWh,
- für den Ersatz der AKW 25 TWh.

Fortsetzung Seite 50



Überladen

Fortsetzung von Seite 49

Insgesamt ergibt sich aus diesen Zahlen ein Strombedarf von zusätzlich rund 80 TWh erneuerbarem Strom. Zum Vergleich: Heute liegt die inländische Stromproduktion ohne die Kernkraft bei rund 40 TWh pro Jahr. Durch Effizienzgewinne könnte die grob geschätzte Zahl von 80 TWh kleiner ausfallen, durch Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum und die Digitalisierung aber auch grösser. In jedem Fall handelt es sich um eine sehr vorsichtige Schätzung, weil sie in allen Sektoren effiziente batterieelektrische Anwendungen annimmt, obwohl dies technisch nicht immer möglich sein wird.

Wie also sollen wir zusätzlich 80 TWh Stunden zusätzlich erzeugen, wenn wir im Inland keine Gaskraftwerke bauen und den Strom nicht aus dem Ausland importieren wollen?

«Das grösste Potenzial hat in der Schweiz die Photovoltaik», sagt Stefan Hirschberg. 2017 haben er und sein Team vom PSI im Auftrag des Bundesamts für Energie (BfE) die 800-seitige Studie «Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen von Stromproduktionsanlagen» veröffentlicht.

Die Wasserkraft wird sich nur noch wenig steigern lassen. Das Ausbaupotenzial liegt laut einer Mitteilung des Bundesamts für Energie von dieser Woche bei 1,6 TWh. Der Windenergie traut Hirschberg einen zusätzlichen Beitrag von 4 TWh zu. Allerdings nur theoretisch. Denn derzeit scheitert ihr Ausbau an Einsparungen der Bevölkerung. Die Industrie habe im Grunde resigniert, sagt Stefan Hirschberg. «Die Schweizer Stromunternehmen investieren stattdessen in Windparks im Ausland.» Die Stromerzeugung aus Erdwärme schliesslich, die sogenannte Geothermie, befindet sich noch immer in einem frühen Entwicklungsstadium. Bis ins Jahr 2050 wird sie keinen grossen Beitrag zur Stromerzeugung leisten.

Bleibt also das Nutzen von Sonnenenergie. Das Bundesamt für Energie beziffert ihr «ausschöpfbares» Ausbaupotenzial auf 67 TWh auf Hausdächern und an Fassaden pro Jahr. Das Bundesamt hat seine Schätzun-

gen damit innerhalb von anderthalb Jahren nahezu verdreifacht. Noch im November 2017 lag die Schätzung der Behörde bei maximal 14 bis 24,6 TWh. Den erstaunlichen Sprung im Ausbaupotenzial begründet das Bundesamt damit, dass im Jahr 2017 noch keine Geodaten für Dachflächen und Fassaden zur Verfügung standen. Entsprechend vorsichtig seien die Schätzungen damals ausgefallen.

Wie gross das Potenzial auch ist - beide Angaben berücksichtigen nicht, ob Hausbesitzer bereit sein werden, Photovoltaikanlagen auf die Dächer und an die Fassaden ihrer Gebäude zu schrauben. Die erwähnten 67 TWh würden bedeuten, dass man 50 Prozent der Dachflächen und 30 Prozent der Fassaden verändern müsste. Ein Akzeptanzproblem sieht das Bundesamt aber nicht, weil es zukünftig noch mehr Solarmodule geben werde, die sich optisch nicht von herkömmlichen Ziegeln und Fassaden unterscheiden würden.

Fehlende Stromspeicher

Die Stromspitzen, die an sommerlichen Tagen um die Mittagszeit anfallen würden, könnte das Stromnetz ohne eine massive Verstärkung dann allerdings nicht aufnehmen. Und Energiespeicher, welche die mit täglichen Stromspitzen speichern, gäbe es auch nicht. Im Winter, wenn besonders viel Strom benötigt wird, würde sich das Problem noch weiter verschärfen.

Christian Bach ist Abteilungsleiter für Fahrzeugtriebssysteme bei der Empa in Dübendorf. Er hält die Fokussierung auf Elektroautos aufgrund der geschilderten Probleme für falsch. «Batterieelektrische Autos sind sinnvoll im Kurzstreckenverkehr. Wenn wir kleine Stadtautos auf diese Weise elektrifizieren, decken wir bereits 70 Prozent aller Fahrten ab», sagt er. In der Tat sind Batterieautos der energetisch effizienteste Weg, um heutige Verbrennungsmotoren klimafreundlich zu ersetzen.

Für die Reduktion der Treibhausgase noch wichtiger sind allerdings die Langstreckenfahrten. Aus statistischen Erhebungen weiss man, dass die 70 Prozent der kurzen Fahrten für nur 30 Prozent der gesamten Emissionen von Personewagen verantwortlich sind. Auf den 30 Prozent der längeren Fahrten

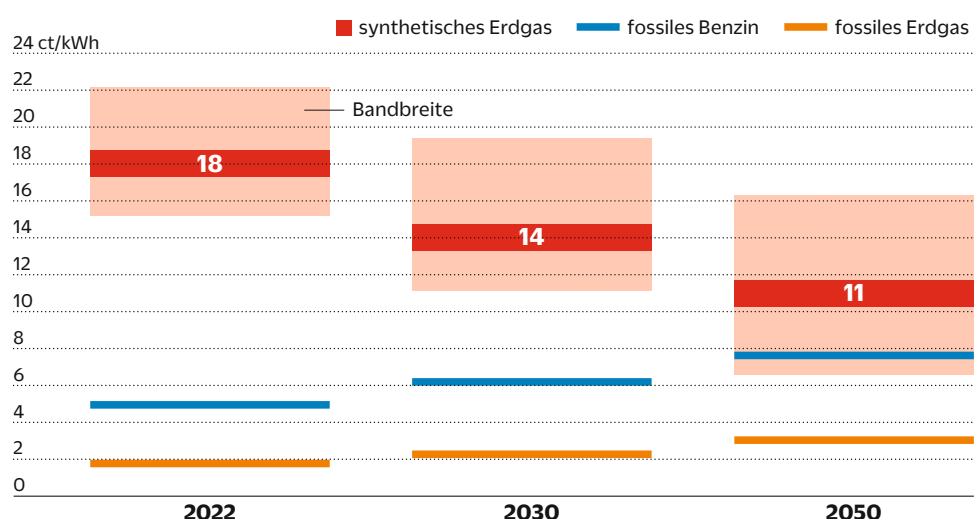
Um das Ausbaupotenzial der Photovoltaik auszuschöpfen, müsste man 50 Prozent der Dächer und 30 Prozent der Fassaden verändern.

dagegen werden die übrigen 70 Prozent emittiert. «Wenn man Personewagen also klimafreundlich machen will, muss man auch und vor allem an die Langstreckenfahrzeuge denken», sagt Bach.

Elektroautos mit grossen Batterien hält er für den falschen Weg, weil im Inland nicht genügend erneuerbarer Photovoltaikstrom produziert werden kann und die Investitionen in das Stromnetz zu hoch würden. Zudem müsste dann eine extrem teure Ladeinfrastruktur für wenige Lastspitzen im Jahr - zum Beispiel in der Ferienzeit - aufgebaut werden. «Das wird niemand bezahlen wollen», sagt Bach.

Sinkende Kosten

Prognostizierte Preisentwicklung für synthetisches, klimaneutrales Erdgas aus Nordafrika und dem Nahen Osten



Quelle: Agora Verkehrswende, 2018

Für die Langstrecke sieht Bach daher Autos im Vorteil, die mit synthetischem, CO₂-frei produziertem Wasserstoff oder Erdgas fahren. Herstellen würde man den Treibstoff durch die Elektrolyse von Wasser mit erneuerbarem Strom, wobei Wasserstoffgas entsteht. Man nennt dieses Verfahren daher Power-to-Gas (PtG).

In einem zweiten Prozessschritt kann man den Wasserstoff unter Hinzugabe von CO₂ zu synthetischem Erdgas, Diesel und Kerosin weiterverarbeiten. Auf diese Weise lassen sich Nutzfahrzeuge, Schiffe und sogar Flugzeuge klimafreundlich betreiben. «In der Tat dürfte dies der einzige Weg sein, um auch den Flugverkehr zu dekarbonisieren», sagt auch Konstantinos Boulouchos von der ETH.

Einfach wird es aber nicht, weil die Wirkungsgrade bei der Umwandlung von elektrischem Strom in Wasserstoff, Erdgas und andere Treibstoffe sehr tief sind. Bei jedem Umwandlungsschritt vom elektrischen Strom bis zum Treibstoff verliert man Energie: Während ein Batterieauto noch bis zu 70 Prozent des Ladestroms in Bewegungsenergie umsetzt, sind es beim mit synthetischem Erdgas angetriebenen Verbrennungsmotor nur noch 20 Prozent. Man braucht für den Power-to-Gas-Weg daher noch viel mehr Strom als die oben geschätzten 80 TWh.

Sonnenreiche Regionen

Trotzdem sagt Christian Bach: «Ich bin der Meinung, dass wir kein Energieproblem haben. Wir haben die Energie nur nicht am richtigen Ort.» Statt die synthetischen Treibstoffe mit erneuerbarem Strom im Inland zu produzieren, sollte man Photovoltaik- und Elektrolyseanlagen in sonnenreichen Regionen der Erde bauen und auch die synthetischen Treibstoffe dort herstellen. «Das sind chemische Energieträger, die man gut nach Europa transportieren kann, so wie wir es heute mit fossilen Energien auch machen», sagt er.

Eine Studie der von Stiftungen finanzierten Initiative «Agora Verkehrswende» zeigt, dass die Produktionskosten von synthetischem Erdgas und synthetischen Flüssigkraftstoffen in sonnenreichen Gegenden Nordafrikas bis im Jahr 2050 auf 11 Eurocent pro kWh fallen. Das ist noch immer teurer als die prognostizierten Kosten für fossiles Erdgas und Benzin. Das Verfahren bleibt also teuer, und es liesse sich nur mit einer hohen CO₂-Abgabe von rund 400 Franken pro Tonne wirtschaftlich realisieren.

Dennoch glaubt auch Konstantinos Boulouchos an die Zukunft der Power-to-Gas-Technik oder im Falle von Flüssigtreibstoffen der Power-to-Liquid-Technik (PtL). «Für viele Anwendungen ist das der einzig mögliche Weg zur Dekarbonisierung», sagt er. «Aber wir können ihn nur gehen, wenn es eine europaweite Strategie gibt. Für ein einzelnes Land kann man die nötige Infrastruktur nicht aufbauen und Signale für Investitionen setzen.»

Der Aufbau einer PtG-Infrastruktur wird in jedem Fall viele Jahrzehnte beanspruchen. Umso wichtiger wird es sein, auch die Effizienz in allen Wirtschaftssektoren und im Verkehr zu steigern. «Mittelfristig müssen zum Beispiel alle Autos Hybridantriebe erhalten», sagt Boulouchos. Das reduziert die Treibhausgasemissionen sofort und ist auch noch wichtig, wenn einmal synthetische Treibstoffe zur Verfügung stehen. «Es wird dann eine Rolle spielen, wie viel erneuerbaren Treibstoff man genau benötigt. Da die Erneuerung der ganzen Fahrzeugflotte mindestens zwanzig Jahre dauert, müssen wir auch an der Verbesserung der heutigen Technik arbeiten», sagt Boulouchos.

Schweizer Strom

55%

So hoch war im vergangenen Jahr der Anteil der Wasserkraft an der inländischen Stromproduktion.

36%

Schweizer Kernkraftwerke lieferten mehr als ein Drittel der Stroms.

20 g CO₂

So viel Kohlendioxid entsteht bei der Produktion von Strom in der Schweiz pro Kilowattstunde. In der EU liegt dieser Wert bei 400 g CO₂/kWh.