



ROBERT-WICHARD-POHL-PREIS

Das Ende der Autobahn

Energie und Mobilität aus Sicht eines Physikers

Michael Düren

Der Klimawandel verlangt grundsätzliche und schnelle Veränderungen unserer Gesellschaft. Die Energie- und Verkehrsinfrastruktur spielen dabei eine Schlüsselrolle. Eine Umwidmung der Autobahnen für eine sogenannte Schnellstraßenbahn könnte eine völlig neue Ära der Mobilität einläuten.

Mit dem anthropogenen Klimawandel habe ich mich erstmals in den 1980er-Jahren beschäftigt, als mein Aachener Professor mich zum Arbeitskreis Energie der DPG einlud. Als Kern- und Teilchenphysiker habe ich natürlich zunächst über neuartige Kernreaktoren nachgedacht. Abstand davon nahm ich letztlich aufgrund folgender Überlegung: Der globale Primärenergiebedarf beträgt in jeder Sekunde im Mittel etwa 18 000 GW [1], was einer Leistung von etwa 18 000 Kernkraftwerken entspricht. Wenn also Kernenergie einen signifikanten Anteil der Primärenergie liefern soll, so sind tausende Reaktoren

auf allen Kontinenten nötig. Aufgrund der damit einhergehenden Risiken erzeugt die Kernenergie mehr Probleme, als sie löst – insbesondere bei Terrorismus und Proliferation. Damit war für mich das Kapitel Kernenergie abgeschlossen, auch wenn viele meiner Kollegen entgegengesetzter Ansicht sind [2, 3]. Doch wie lässt sich der immense Energiehunger unserer modernen Gesellschaften stattdessen stillen?

Planetarisches Denken

Als junger Student am CERN in Genf habe ich gelernt, wie wissenschaftliche Ziele Menschen zu ungeheurem Einsatz motivieren können und Hierarchien und kulturelle Unterschiede an Bedeutung verlieren, wenn alle am gleichen Strang ziehen. Bereits zu der Zeit, als man noch sein Magnetband mit den neuesten Daten seines CERN-Experiments über die Grenze nach Deutschland schmuggeln musste, um die Wartezeit beim Zoll zu sparen und es

noch kein World Wide Web gab, wurden die Fragen der Teilchenphysik global gelöst.

In der Energietechnik jedoch halten Firmen jede neue Entwicklung tendenziell geheim, um sie später zu vermarkten. Dies hat den internationalen Fortschritt ausgebremst und Synergien zwischen Konkurrenten verhindert. Stattdessen wurden neue Patente aufgekauft und in der Schublade versteckt, um das eigene Kerngeschäft zu schützen.

DESERTEC

Der DESY-Physiker Gerhard Knies wendete das globale Denken der Teilchenphysik auf die Lösung der Energieprobleme an. 2009 hatten wir zusammen mit Kollegen aus Nordafrika die DESERTEC-Stiftung gegründet, um das damalige Know-how in der Solarenergie von Industrieländern wie Deutschland in die sonnenreichen Länder Nordafrikas zu bringen. Im Gegenzug sollte günstiger Solarstrom über Hochspannungsgleichstromleitungen (HGÜ) nach Europa gelangen. Bei diesem Win-win-Konzept ging es auch darum, den afrikanischen Staaten Arbeitsplätze und Perspektiven zu geben, um den Migrationsdruck und das Wohlstandsgefälle zu verringern [2, 4].

Heute haben wir das DESERTEC-Konzept um Strom- und Wasserstoffspeicher erweitert. Solarkraftwerke boomen in den Wüsten der Erde, und einige Länder, z. B. auf der arabischen Halbinsel, bereiten sich auf den Export von „grünem“ Wasserstoff aus Sonnen- und Windstrom in großem Stil vor. Wie realistisch die Pläne Saudi-Arabiens sind, bis 2030 einen Solarpark von 200 GW aufzubauen [5], kann ich nicht abschätzen, aber China hat dieses Ziel 2020 erreicht. Wasserstoff und andere chemische Energieträger lassen sich nach marktpolitischen Prinzip an den Meistbietenden weltweit verkaufen, während HGÜ-Kabel zunächst von Punkt zu Punkt laufen und den Kundenkreis einschränken. Allerdings machen die Energieverluste bei Wasserstoffherzeugung, -transport und -rückwandlung mehr als einen Faktor 2 aus. Somit sind für die gleiche Strommenge doppelt so viele Solarkraftwerke nötig wie beim Energietransport über die fast verlustfreien Hochspannungsgleichstromleitungen [6]. Bei der Energiespeicherung dagegen sind chemische Energieträger als preiswerte Langzeitspeicher unumgänglich (Abb. 1) [2, 7].

Wir schließen unsere Augen

Auch wenn die Konzepte stehen und die Forschung große Fortschritte gemacht hat, haben wir das Energieproblem längst nicht im Griff. Mehr als 80 Prozent des Primärenergiebedarfs decken nach wie vor fossile Kraftstoffe, die in den nächsten 15 bis 30 Jahren wegfallen müssen, um die Klimaziele zu erreichen. Nach Jahrzehnten von Forschung und Förderung erneuerbarer Energien liegt der Anteil der Solar- und Windenergie immer noch unter zwei Prozent des globalen Energiebedarfs [8]. Dazu kommen teils historische Anteile von Wasserkraft und Biomasse, die aber aus Gründen des Schutzes von Natur und Biodiversität kaum zu erhöhen sind. Vor uns liegen also gigantische Investitionen im Solar- und Windbereich sowie in Hochspannungsgleich-

stromleitungen und Speichern. Der Energiemarkt braucht Rohstoffe, Energie, qualifizierte Manpower und Zeit. Und wir täten gut daran, das Energiesystem umzustellen, bevor uns Klimawandel und eine zukünftige Energieknappheit durch die Reduktion fossiler Energieträger ausbremsen. Als Physiker steht für mich fest, dass sich aus einem Aufwuchs von zwei Prozent in 40 Jahren kein Aufwuchs von 80 Prozent in 20 Jahren generieren lässt – jedenfalls nicht ohne international abgestimmten Rollout-Plan und ein Wirtschaftssystem, das solche Zukunftsprojekte finanziert. Aber wo ist solch ein Plan?

Vielleicht kann die Wissenschaft der Politik helfen? Großforschungszentren und Universitäten mit internationalen Kooperationsabkommen wie das CERN könnten sich zusammenschließen und als ersten Schritt ein Seekabel z. B. von Tunesien nach Rom initiieren, um genügend kostengünstigen Solarstrom aus Nordafrika im europäischen Verbundnetz für die eigenen Forschungsanlagen zu haben. Die Stromgestehungskosten in Nordafrika und auf der arabischen Halbinsel liegen heute bei 1,2 Cent/kWh mit sinkender Tendenz und sind damit mehr als einen Faktor 5 günstiger als solare Kleinanlagen in Deutschland [9]. Solarthermische Kraftwerke sind in der Lage, durch Wärmespeicher Strom auch nachts günstig bereitzustellen, sodass sich eine Hochspannungsgleichstromleitung im Dauerbetrieb schnell amortisieren wird.

Mobilität

Im Verkehr wird sich die Energiewende besonders stark auswirken. Die heutige Mobilität ist durch Kraftfahrzeuge und Flugzeuge dominiert bzw. im Güterverkehr durch Lastwagen und Schiffe. All das basiert fast ausschließlich auf Erdöl. Während Politik und Industrie noch überlegen, ob Fahrzeuge batteriebetrieben sein sollen oder über Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff oder synthetischen Brennstoffen verfügen sollen, sehe ich eine andere Zukunft. Solange es keinen überzeugenden Plan gibt, der überall auf der Welt für genügend

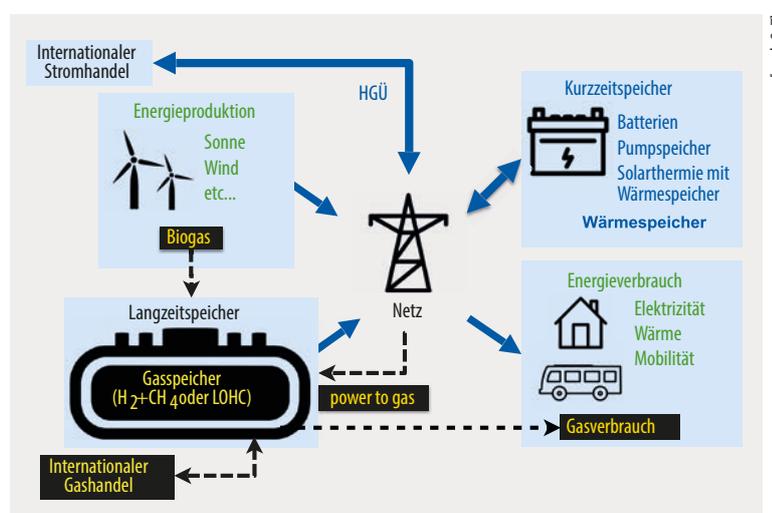


Abb. 1 Ein System, das zu 100 Prozent auf erneuerbaren Energien basiert, erfordert neben einem internationalen Stromhandel auch Hochspannungsgleichstromleitungen (HGÜ) und Speicher.

erneuerbare Energien sorgt, sollten wir davon ausgehen, dass Energie künftig ein kostbares Gut sein wird. Daher brauchen wir eine Technologie, die minimale Energie pro Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer benötigt. Aus rein physikalischen Überlegungen ist klar, dass der Individualverkehr dazu durch gemeinschaftlichen, elektrischen Transport auf der Schiene zu ersetzen ist. Bereits heute liegt die Energieeinsparung von Güterzügen im Vergleich zu LKWs bei einem Faktor 5 pro Tonnenkilometer [10], was durch vollständige Elektrifizierung und Rekuperierung weiter zu steigern ist.

Auto-Bahnen: eine Utopie

Gegen die Schiene in der heutigen Ausprägung sprechen viele Argumente: schlechte Erreichbarkeit vieler Orte, lästiges Umsteigen, Wartezeiten, lange Reisezeiten, überfüllte Züge, und am Zielbahnhof ist häufig doch wieder ein Auto nötig. Der Ausbau eines großangelegten Schienennetzes scheitert in Europa vor allem am Platz. Ein Neudenken der Bahn könnte jedoch die meisten Nachteile gegenüber dem Autoverkehr abbauen!

Bereits die Planung einer Trasse für eine einzige Hochspannungsgleichstromleitung von Norddeutschland bis Bayern braucht Jahre oder Jahrzehnte, wie z. B. SuedLink gezeigt hat [11]. Wie ist da ein dichtes Schienennetz in und zwischen Städten denkbar, das täglich eine Größenordnung von zwei Milliarden Personenkilometern und einer Milliarde Tonnenkilometern Güterverkehr [12] allein in Deutschland erbringen müsste? Aus meiner Sicht gilt es dazu, Autobahnen in Auto-Bahnen umzuwidmen.

Infrastruktur

Dazu werden die linken Fahrspuren der Autobahnen und anderer vierspuriger Straßen mit Schienen versehen und für die „Schnellstraßenbahn“ (SSB) reserviert (Abb. 2). Diese fährt mit einer Sollgeschwindigkeit von beispielsweise 130 km/h über die Auto-Bahnen, kann aber auch in Städten und auf oder neben Landstraßen auf Straßenbahnschienen verkehren. Die elektrische Wind- und Solarenergie erhalten die Bahnen über Oberleitungen. Kurzstrecken kann die SSB im Batteriebetrieb überwinden, z. B. bei niedrigen Unterführungen, Tunneln oder in Innenstädten, in denen Oberleitungen nicht gewünscht sind. Elektromotoren treiben alle Achsen der SSB an, um das Steigungs- und Beschleunigungsverhalten zu verbessern und beim Bremsen

Energie fast vollständig zurück ins Stromnetz rekuperieren zu können. Für eine hohe Taktung sind die Bahnen ähnlich wie moderne Elektroautos mit Abstandsradar ausgestattet. Abstände, Sollgeschwindigkeiten und Weichenstellungen werden zentral über GPS und Mobilfunk koordiniert.

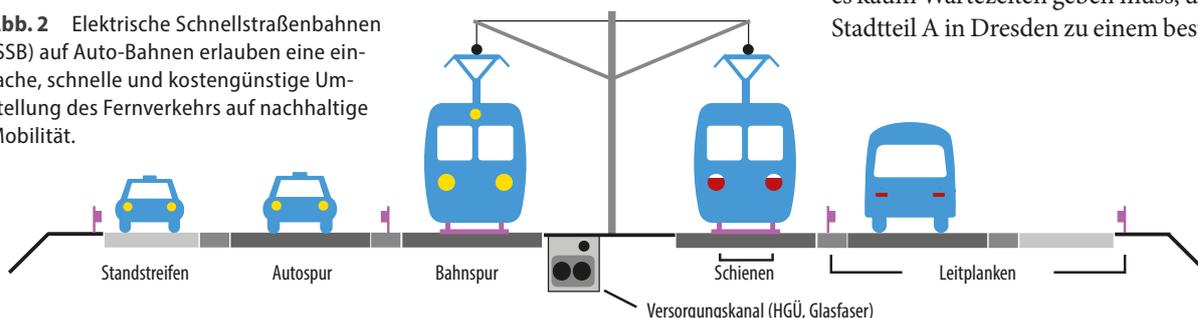
Der individuelle Auto- und Lastwagenverkehr verliert seinen Spaßfaktor, da es auf Auto-Bahnen weitgehend nur noch einspurigen Kolonnenverkehr gibt. Zentral regulierte wetterabhängige Sollgeschwindigkeiten vermeiden Staus. Unfälle durch Überholen und Rasen fallen grundsätzlich weg, insbesondere auch weil die Autos in Zukunft auf den Auto-Bahnen weitgehend automatisiert ihre Spuren, Geschwindigkeiten und Abstände einhalten, wie es bei modernen Fahrzeugen schon heute möglich ist.

Während die Auf- und Abfahrten für den Auto- und Lastwagenverkehr normal weiter zur Verfügung stehen, müssen die SSBs sicher von der linken Schienenspur über die rechte Autospur auf die Abfahrt kommen. Die einfachste Lösung besteht darin, über interaktive Ampelanlagen den Autokolonnen- und Bahnverkehr so zu synchronisieren, dass es möglichst keine Wartezeiten an den Auf- und Abfahrten gibt. „Freie Bahn auf Auto-Bahnen“ gilt also für die Züge, aber nur beschränkt für die Autofahrer, die vor jeder Straßenbahnabfahrt mit roten Ampeln rechnen müssen. Daher wären separate Auf- und Abfahrten für den Schienenverkehr durch zusätzliche Über- oder Unterführungen die bessere Lösung. Das alles ist insgesamt aber immer noch günstiger als der Neubau von Bahntrassen.

Fahrzeiten und Fahrkomfort

Die Fahrtzeit von beispielsweise Dresden nach Freiburg dauert mit der Deutschen Bahn heute rund acht Stunden und erfordert zweimaliges Umsteigen. Mit der SSB wäre die Strecke von 680 km bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 120 km/h in etwa fünfeinhalb Stunden zu bewältigen. Das ist konkurrenzfähig mit dem Flug- und Autoverkehr. Der zeitliche Gewinn der SSBs gegenüber dem derzeitigen Zugverkehr entsteht durch den Wegfall von Zwischenhalten. Die SSBs bringen die Reisenden vom Ausgangsort zum Zielort möglichst ohne Umstiege und Zwischenhalte auf Langstrecken. Den Zubringerverkehr am Ausgangs- und Zielort leistet entweder der öffentliche Nahverkehr oder im Idealfall die gleiche SSB, die gegen Aufpreis die Reisenden am Ausgangs- und Zielort „on demand“ von ihren jeweiligen Stadtteilen oder Vororten abholt bzw. bringt. Wenn ein Großteil der Bevölkerung vom Auto auf die SSB wechselt, ist die Taktung der Züge so hoch, dass es kaum Wartezeiten geben muss, um von Stadtteil A in Dresden zu einem bestimm-

Abb. 2 Elektrische Schnellstraßenbahnen (SSB) auf Auto-Bahnen erlauben eine einfache, schnelle und kostengünstige Umstellung des Fernverkehrs auf nachhaltige Mobilität.



ten Vorort B bei Freiburg zu kommen. Die Züge werden nicht mehr wie der heutige ICE4 bis zu 1000 Reisende mitnehmen, sondern eher 50 bis 200, um häufiger Orte abseits der Hauptverkehrsadern anfahren zu können. Ein einfaches Rechenbeispiel zeigt: Wenn auf einer typischen Autobahn 100 000 Fahrzeuge pro Tag fahren, ergibt das in Zukunft bei gleicher Mobilität eine Größenordnung von einer SSB alle ein bis zwei Minuten.

Wenn die SSB sich als Transportmittel durchsetzt, können auch Komfort und Exklusivität der Fernreise wieder Einzug halten: Sonderwaggons zum Schlafen und Speisen oder mit Fitness- und Massagesstudio wären genauso denkbar wie die Salonwagen aus früheren Spielfilmen. Sind Pandemien langfristig ein Thema, sollte es verstärkt Einzelabteile mit guter Außenbelüftung statt Großraumwagen geben. Darüber hinaus enthält dieses Zukunftskonzept Güter-SSBs, die nicht nur Logistikcenter anfahren, sondern über die Straßenbahnschienen auch direkt in die Städte hineinfahren, sodass ein Schienenanschluss bald wieder Normalität für jede größere Firma sein wird (Abb. 3).

Steuerung

Fortschritte im Computing erlauben dieses neue Bahnkonzept. Autonomes Fahren ist bei SSBs viel einfacher zu realisieren als bei Autos, ergänzt durch zentrale Überwachung und Koordination der Zugabfolge und Weichenstellungen. Bei Unfällen, Baustellen oder in Innenstädten könnten Lotsen über Funk per Kamera die Steuerung der SSB ergänzen. Das Batteriemangement der Schnellstraßenbahnen könnte zudem dazu beitragen, das Stromnetz zu stabilisieren, und die Auto-Bahn-Trassen gleichzeitig als Energie-Trassen für ein umfassendes HGÜ-Netz mit verschiedenen Spannungsebenen dienen. Spezielle Hochgeschwindigkeits-SSBs könnten später die existierenden Hochgeschwindigkeits-trassen der ICEs nutzen, um Fahrzeiten weiter zu reduzieren.

Dieses Mobilitätskonzept hat das Potenzial, Energie von bis zu einem Faktor 10 einzusparen. Ähnlich wie der Übergang von der Glühbirne zur LED passiert so ein „Phasenübergang“ jedoch nicht von selbst. Er muss durch staatliche Maßnahmen geplant und eingeleitet werden. Die Abkehr vom Individualverkehr und die Umnutzung der Automobilitätsinfrastruktur erscheint mir unumgänglich für ein nachhaltiges Verkehrswesen. Ich kenne kein anderes vollständiges Mobilitätskonzept, das diesen Faktor 10 auch nur annähernd erreicht.

Die junge Generation braucht Perspektiven

Der Klimawandel fordert grundlegende Veränderungen unserer Gesellschaft. Wichtiger denn je ist es, der jungen Generation die Möglichkeit zu geben, eine Infrastruktur aufzubauen, die Zukunftsperspektive hat, statt alte Industriebereiche aus wirtschaftlich-politischen Gründen am Leben zu erhalten. Covid-19 hat uns gelehrt, dass die moderne Gesellschaft wandlungsfähig ist. Lasst uns also nicht warten, bis die Klimakatastrophe vor der Tür steht.



Abb. 3 Bei der Aufteilung einer Straßentrasse in eine zentrale Bahntrasse mit Autospuren an den Rändern dienen in Dresden während der 2000er-Jahre Güterstraßenbahnen zur Belieferung eines VW-Werkes.

Literatur

- [1] Our World in Data, Primary Energy Consumption (2021), bit.ly/3qBvniTm
- [2] M. Düren, Understanding the Bigger Energy Picture – DESERTEC and Beyond, SpringerBriefs in Energy (2017), bit.ly/2UjEN9W
- [3] M. Düren, EnergyTransition-04 Nuclear Energy: The Solution? (2020), <https://youtu.be/oGyUXJ7io9A>
- [4] M. Düren, Green 1, 263 (2011), DOI:10.1515/green.2011.025
- [5] Saudi-Arabien plant größtes Solarkraftwerk der Welt, [ingenieur.de, bit.ly/3ycX2g0](https://ingenieur.de/bit.ly/3ycX2g0)
- [6] E. Bellini, Hydrogen shipping vs submarine cables, PV Magazin (2021), bit.ly/3wfw6es
- [7] Energiewende: alternativ- und grenzenlos, Physik konkret 48 (2020), bit.ly/3jypK7c
- [8] IEA World energy balances, Total primary energy supply by fuel, 2018, bit.ly/2UXmyaX
- [9] Abu Dhabi To Have Cheapest Solar Power Ever – 1.35 Cents Per Kilowatt-Hour Clean Technica (2020), bit.ly/3AhHTvS
- [10] Umweltbundesamt 2021, Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs, bit.ly/3dtk3U4
- [11] Netzausbau im Rahmen der Energiewende, Physik konkret 18 (2013), bit.ly/3dQ5Elh
- [12] Umweltbundesamt 2021, Fahrleistungen, Verkehrsleistungen und „Modal Split“, bit.ly/3dxlwsM

Der Autor



Michael Düren habilitierte sich an der Uni Erlangen-Nürnberg, war Interimsprofessor an der Uni Bayreuth und ist seit 2001 Professor für Experimentalphysik an der JLU Gießen. 2006 war er Mitbegründer der SEPA-Arbeitsgruppe (Solar Energy Partnership Africa-Europe) an der Uni Gießen und 2008 Mitbegründer der DESERTEC-Stiftung.

Im Juli 2011 wurde er zum Koordinator des DESERTEC Academic Network ernannt.

Prof. Dr. Michael Düren, Zentrum für internationale Entwicklungs- und Umweltforschung, Justus-Liebig-Universität Gießen, Ludwigstraße 23, 35390 Gießen