

e-Solarkonzept – So kann die Energiewende gelingen!

Es besteht wissenschaftliche Evidenz, dass sich der vom Menschen verursachte Klimawandel beschleunigt. Das hat die NASA auf ihrer Website sehr anschaulich dargestellt¹. Wieviel Zeit wir noch haben gegenzusteuern, ist hingegen umstritten. Klar ist jedoch: Je früher wir unsere Energie emissionsfrei gewinnen, desto größer werden unsere Chancen, die Folgen des Klimawandels beherrschen zu können. Daher ist das rasche Gelingen der Energiewende völlig zu Recht eine der zentralen Forderungen der „Fridays for Future“²- und der „Scientists for Future“³- Bewegung. Die Energiewende wird viele Bereiche unseres Lebens verändern: Unsere Energieversorgung, unsere Mobilität und große Teile der industriellen Produktion. 2018 hatten wir bei der Stromerzeugung einen Anteil von gut 40%⁴ an erneuerbaren Energien, Ende 2019 mögen es knapp 50% sein. Wenn wir vollständig bei der Stromerzeugung auf erneuerbare Energien setzen wollen, müssen wir also den regenerativen Anteil in etwa verdoppeln. Gleichzeitig sollte das geschehen, ohne unsere Stromnetze und uns finanziell zu überfordern.

Nun ist aber die Stromerzeugung in Deutschland⁵ mit 284 Mio.t nur zu gut einem Drittel an den deutschen CO₂-Gesamtemissionen beteiligt. Wenn wir also auf 100% erneuerbare Energien umsteigen wollen und das nicht nur bei der Stromerzeugung, sondern auch in Bereichen wie Verkehr und Industrie, müssen wir also nicht nur doppelt so viel Strom aus erneuerbaren Energien erzeugen, um lediglich die Stromerzeugung CO₂-frei zu machen, sondern ca. sechs mal so viel, um alle Bereiche, also auch Verkehr und Industrie, emissionsfrei zu bekommen!

Am elegantesten kann dies gelingen, wenn wir bei dem Umbau vor allem auf Strom als Ressource setzen. Sehr interessant und hilfreich ist es daher, dass sich bei der Speicherung von Strom und bei der Stromerzeugung aus Photovoltaik sehr viel getan hat, vor allem in letzter Zeit. Diese jüngsten Entwicklungen werden unseren Energiemix grundlegend verändern, und wir sollten mit diesem Umbau schnell sein, um maximal von dieser Entwicklung zu profitieren. Damit ein Umbau der Stromerzeugung - hin zu regenerativen Quellen - gelingen kann, ist der rasche Ausbau der Elektromobilität ein ganz wesentlicher Baustein: Können Fahrzeuge an Elektrotankstellen (zu hause oder an der Arbeitsstelle) nicht nur aufgeladen werden, sondern können sie mit dem Energie-Inhalt ihrer Batterie auch Netzleistung durch Stromeinspeisung zur Verfügung stellen, ergeben sich völlig neue Möglichkeiten. Daher ist gerade der schnelle Ausbau der Elektromobilität parallel zum ökologischen Umbau der Energieerzeugung einer der wichtigsten Schlüssel zum Gelingen der Energiewende. Im Folgenden werden daher die Photovoltaik, die Elektromobilität und letztlich das intelligente Stromnetz als wichtige Stützen der Energiewende genauer diskutiert.

Photovoltaik (PV)

Wenn man nun an den Ausbau der erneuerbaren Energien denkt, insbesondere, wenn man sich eine Versechsfachung der Anzahl der Anlagen vorstellt, wird das nur allein mit einem Zubau der Windkraft nicht gelingen. Der gesellschaftliche Rückhalt für die Windenergie und die dazugehörigen Windräder ist zwar im Großen und Ganzen vorhanden, aber bei einer

¹ <https://climate.nasa.gov/>

² <https://fridaysforfuture.de/>

³ <https://www.scientists4future.org/>

⁴ https://www.energy-charts.de/ren_share_de.htm?year=all&source=ren-share&period=annual

⁵ Die Zahl aus: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromerzeugung-erneuerbar-konventionell#textpart-1> multipliziert mit der Zahl aus: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>

Versechsfachung der Anzahl an Windrädern würde die Akzeptanz stark leiden oder gar schwinden. Die Photovoltaik stellt im aktuellen Strom-Mix in Deutschland nur gut 7% der Energie bereit⁶. Diese Form der Energiegewinnung genießt eine große Akzeptanz in der Bevölkerung, allerdings hat diese Technologie noch immer mit vielen Vorurteilen zu kämpfen:

Das häufigste Vorurteil ist: Die Herstellung der Solarmodule würde mehr Energie verbrauchen als die Module während ihrer gesamten Lebensdauer wieder einspielen. Das hat in den 60er Jahren sogar gestimmt, da für die Herstellung der ersten Solarzellen auf Verfahren und Materialien aus der damals noch sehr teuren Mikroelektronik zurückgegriffen wurde und die Photovoltaik als eigenständiger Industriezweig sich erst in den darauffolgenden vier Jahrzehnten entwickelt hat. Heute haben Solarmodule einen Wirkungsgrad von über 20% und spielen die Energie für deren Herstellung, aufgestellt an einem durchschnittlichen Standort in Deutschland, in ca. 2,5 Jahren wieder ein⁷. Die meisten Hersteller geben heute eine Modul-Garantie von 20-25 Jahren. Wenn man diesen Zeitraum annimmt, spielt also ein Solarmodul ca. 10mal so viel Energie wieder ein, wie es für dessen Herstellung benötigte!

Ein weiteres Vorurteil sind die scheinbar hohen Kosten der Photovoltaik. Auch das stimmte tatsächlich bis vor kurzem! Die Kosten für PV Module⁸ sind seit 1990 um ca. 97%, also auf ca. 3% gesunken⁹. So kostet heute (2019) jedes Watt an Leistung eines PV-Moduls (Watt-peak oder W_p) noch ca. 30 Cent, 1990 waren es noch ca. 10 Euro. Es gibt kaum einen anderen Industriezweig, der durch Massenproduktion und Innovation solch eine Preisreduktion in einem Zeitraum von knapp 30 Jahren erreicht hat. Die Bedeutung eines W_p -Preises von 30 Cent wird erst klar, wenn man das umrechnet in einen Preis je kWh erzeugten Stroms. Eine Großanlage mit einer PV-Leistung von 500 Megawatt_p erzeugt in Deutschland im Jahr ca. 500 Mio. kWh. Die Module dazu kosten 30 Cent je W_p , also 150 Mio. Euro. Die Wechselrichter, die den erzeugten Strom in das Netz einspeisen, kosten für eine solche Anlage nochmals ca. 50 Mio. Euro. Für die Aufstellung und Montage kann man nochmals je nach örtlicher Gegebenheit ca. 100 Mio. Euro annehmen. Diese Anlage wird über 20 Jahre lang jährlich 500 Mio. kWh, also 10 Mrd. kWh einspielen. Wenn man nun die Kosten von 300 Mio. durch die 10 Mrd. kWh teilt, kommen Kosten je kWh von ca. 3 Cent heraus. Es überrascht also nicht, dass schon heute in Deutschland große Solaranlagen gebaut werden und ihren Strom ohne jegliche Subventionen am Markt erfolgreich verkaufen können¹⁰. So wurde z.B. ein Zuschlag für ausgeschriebenen Strom im März 2019 für eine PV Anlage erteilt, die den Strom dem Netz für 3,9 Cent je kWh andient¹⁰. Keine andere skalierbare Stromerzeugungstechnik kann zu diesem Preis Strom erzeugen, weder die Windkraft, noch Kohle oder Kernkraft. Neben den niedrigsten Energiepreisen der PV im Vergleich mit allen anderen Techniken kommt als weiterer Vorteil hinzu, dass dieser Strom in der Regel nicht über weite Strecken transportiert werden muss, sondern regional im Wesentlichen überall dort erzeugt werden kann, wo er verbraucht wird oder in Autos geladen werden kann.

In Deutschland wurden 2018 gut 500 Terrawattstunden (eine Terrawattstunde sind eine Milliarde Kilowattstunden) an Strom verbraucht¹¹. Die Hälfte davon, also 250 TWh, werden in etwa 2019 mit erneuerbaren Energien erzeugt werden. Damit man eine Vorstellung von der Fläche bekommt,

⁶ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250915/umfrage/anteil-der-photovoltaik-an-der-stromerzeugung-in-deutschland/>

⁷ Seite 39 <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>

⁸ Gemeint sind hier die normierten Preise je Watt Modulleistung (Euro je Watt-Peak)

⁹ Seite 9 <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>

¹⁰ https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Solaranlagen/BeendeteAusschreibungen/BeendeteAusschreibungen_node.html

¹¹ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164149/umfrage/netto-stromverbrauch-in-deutschland-seit-1999/>

die notwendig wäre, um in Deutschland nicht nur doppelt so viel Ökostrom zu erzeugen wie bisher, sondern 6 mal so viel (also 1.500 TWh), um auch die anderen Sektoren wie Industrie und Verkehr mit der notwendigen Energie zu versorgen, käme folgende Rechnung zustande: Ein modernes Solarpanel hat einen Wirkungsgrad von ca. 20% und erzeugt bei voller Sonneneinstrahlung ca. 200 Watt je Quadratmeter. Mit der durchschnittlichen Strahlungsleistung im Bundesgebiet ergibt sich so eine Jahreserzeugung von 200 Kilowattstunden je Quadratmeter. Für die 1.500 Terrawattstunden benötigte man demnach 7,5 Milliarden Quadratmeter an Fläche. Deutschland hat ca. 360 Mrd. m² Fläche¹², davon entfallen ca. 50%, (also ca. 180 Mrd. m²) auf landwirtschaftlich genutzte Flächen. Deshalb würden uns rein rechnerisch 4% der heute landwirtschaftlich genutzten Flächen genügen, um die dreifache Menge des heute in Deutschland verbrauchten Stroms erzeugen zu können, bzw. in etwa die sechsfache Menge des heute in Deutschland erzeugten Ökostroms.



Abbildung 1: Auf einer Fläche von nur 2% des Bundesgebietes, kann die gesamte in Deutschland verbrauchte Energie-Jahresmenge mit der Photovoltaik erzeugt werden.

Das bedeutet aber keineswegs, dass diese Flächen für die Landwirtschaft verloren gehen müssen. Es gibt heute schon einige Beispiele der so genannten „Agro-Photovoltaik“¹³, bei der oberhalb der landwirtschaftlichen Nutzflächen die Solarmodule angebracht sind und unterhalb, teilweise verschattet, Landwirtschaft betrieben wird. Dabei kann diese Art von Landwirtschaft mit weniger Wasser auskommen, weil unter der Verschattung weniger verdunstet. Dadurch kann es sogar bei einigen Pflanzenarten zu höheren Ernteerträgen kommen, als es ohne Agro-Photovoltaik der Fall

¹² <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechennutzung#textpart-1>

¹³ <http://www.agrophotovoltaik.de/>

wäre. Das Wichtigste daran aber ist, dass es mit dieser Strategie zu keinem Konflikt zwischen der Energieerzeugung und der Lebensmittelproduktion kommt.

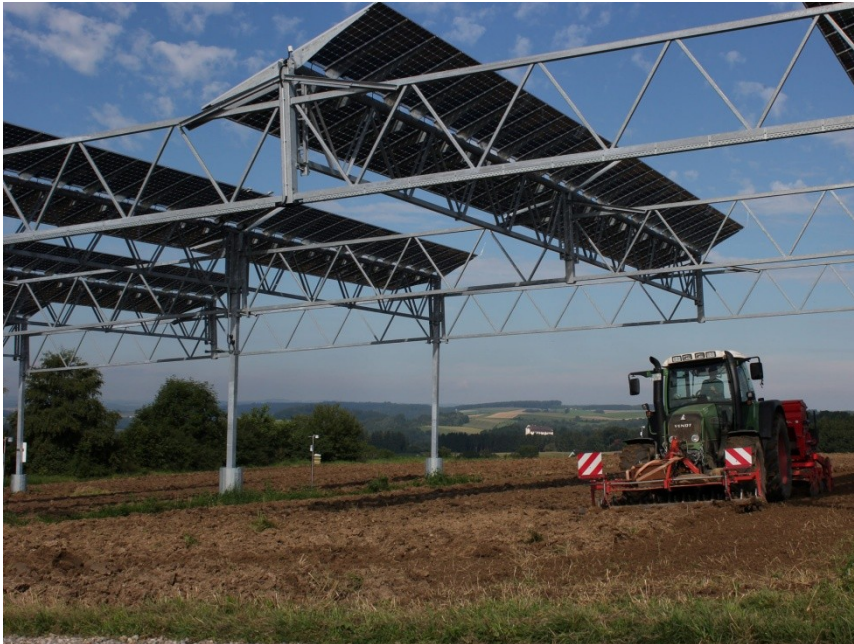


Abbildung 2: Agro-Photovoltaik Anlage der Hofgemeinschaft Heggelbach¹⁴. Landwirtschaftliche Produktion und Energieerzeugung am gleichen Ort schließen sich nicht gegenseitig aus.

Selbst die Artenvielfalt würde einen positiven Impuls bekommen, da die nicht landwirtschaftlich nutzbare Fläche im Bereich der Fundamente und Stützen der Solarinstallationen, die mit den Traktoren umfahren werden müssen, Insekten und Vögeln zur Verfügung stünden. Nachdem also einfach zu erschließende Flächen wie geeignete Dachflächen und ohnehin verbrauchte Areale, wie etwa entlang von Autobahnen, mit Photovoltaikanlagen ausgebaut wären, könnte man mit der Agro-Photovoltaik konfliktfrei die notwendigen Flächen erschließen.

Ein massiver Ausbau der Photovoltaik als eine der Hauptstützen unserer Energieversorgung bringt die Problematik mit sich, dass Solarpaneele im Sommer deutlich mehr Strom erzeugen als an kurzen Wintertagen. Nun ist es so, dass in Deutschland durch die Beheizung der Gebäude im Winter relativ viel Energie verbraucht wird, während der Verbrauch durch Klimaanlage im Sommer im Vergleich zu den südlichen Ländern relativ gering ist. In Spanien und Südfrankreich ist es genau anders herum. Hier benötigt man in Sommer sehr große Mengen an Energie zur Klimatisierung, im Winter hingegen wenig für die Beheizung. Ein Stromhandel mit den südlichen Ländern Europas mit den jeweiligen jahreszeitlichen Überschüssen wäre daher eine sehr effiziente und hilfreiche Variante, mit den Energieüberschüssen und -defiziten umzugehen. Auch ist es denkbar, den sommerlichen Stromüberschuss in Wasserstoff oder e-Gas¹⁵ zu verwandeln, um ihn in stationären Brennstoffzellen oder Gaskraftwerken im Winter zur Stromerzeugung nutzen zu können.

¹⁴ <https://hofgemeinschaft-heggelbach.de/energie>

¹⁵ <https://www.audi-technology-portal.de/de/mobilitaet-der-zukunft/audi-future-lab-mobility/audi-future-energies/audi-e-gas>

Elektromobilität

Es sind in Deutschland gegenwärtig ca. 65 Mio. Fahrzeuge angemeldet. Wenn man sich in einem fiktiven Szenario vorstellt, dass mittelfristig 40 Mio. Fahrzeuge davon mit elektrischem Antrieb ausgestattet sind und diese, wie es schon heute bei größeren Elektrofahrzeugen von Audi, Tesla etc. erreicht wird, eine Reichweite von ca. 500 km erzielen, so hat die Batterie eine Kapazität von ca. 100 kWh. In diesem Beispiel haben wir also 40 Mio. Fahrzeuge mit je 100 kWh Kapazität. Es sind in diesem Szenario in den Fahrzeugbatterien insgesamt 4 Mrd. Kilowattstunden an Energie gespeichert, wenn sie voll sind. Wenn man sich nun zum Vergleich einmal ansieht, wie viel Speicherkapazität alle deutschen Pumpspeicherkraftwerke haben, so ist diese Zahl mit rund 40 Mio. kWh¹⁶, also nur etwa einem Prozent, ziemlich klein gegenüber der in dem beschriebenen Fahrzeugszenario gespeicherten Energie.

Das Stromangebot eines künftigen Strom-Mix aus erneuerbaren Energien wird starken Schwankungen unterliegen. Mal weht starker Wind und es ist wolkenlos, dann produzieren die PV Anlagen auf Nennleistung. Es gibt aber auch Tage, da weht der Wind schwach und es ist wolkig. Da werden dann die netzdienlichen Speicher sehr wichtig. Ein massiver Zubau an Pumpspeicherkraftwerken mit dem damit verbundenen Landschaftsverbrauch wäre schwer umzusetzen und selbst bei einer Verzehnfachung der Anzahl an Pumpspeicherkraftwerken wären es dennoch nur 10% der Energie, die in den Fahrzeugen aus dem obigen Beispiel gespeichert ist. Nun ist es so, dass nicht jeder Autofahrer täglich die volle Reichweite seines Fahrzeugs benötigt. Die allermeisten fahren täglich weniger als 100 km und benötigen dafür weniger als 20% ihrer Batteriekapazität. Wenn also die Autobesitzer einen Teil ihrer Batteriekapazität für die Stabilität der Energieversorgung zur Verfügung stellen würden, nehmen wir nur 25% der Batteriekapazität an, so ist das schon 25 mal so viel wie die gesamte Speicherkapazität aller deutschen Pumpspeicherkraftwerke zusammen. In einem künftigen erneuerbaren Energiemix wird die Elektromobilität aufgrund dieser Betrachtungen eine entscheidende Rolle bei der Energiewende spielen, da man die notwendige Speicherung des Stroms ohne die Elektrofahrzeuge nur schwer (oder eben nur teuer) bereitstellen kann. Ein weiteres Beispiel hilft vielleicht, das besser zu veranschaulichen. Wenn Sie in Ihrem Haushalt 3.600 kWh an Strom im Jahr verbrauchen, was ein recht typischer Wert ist, so brauchen Sie pro Tag im Schnitt 10 kWh. Wenn Ihr Auto in diesem Beispiel 100 kWh Kapazität hat, so brauchen Sie also nur ca. 10% dieser Kapazität pro Tag im Haus. Die Elektroautos wären also in diesem Beispiel in der Lage, die Stromversorgung für die Haushalte ihrer Besitzer für einige Tage sicherzustellen und das völlig dezentral, selbst bei einem vollständigen Ausfall der Erzeugungsleistung. Voraussetzung für die Rückspeisung der Energie aus der Fahrzeugbatterie wären Gleichstromladestationen mit integriertem Wechselrichter. Solche Systeme sind bislang in Feldversuchen im Einsatz¹⁷. Diese Technik wird auch als Vehicle-to-Grid (V2G) oder als Vehicle-to-Home (V2H)¹⁸ bezeichnet und stünde bei entsprechendem politischen Willen und bei einem raschen Ausbau der PV und der Elektromobilität im Grunde sofort zur Verfügung. Bidirektionale Ladestationen für zu Hause oder fürs Büro sind Ende 2018 vorgestellt worden und werden in Kürze auf dem Markt erhältlich sein¹⁹.

Aber so wie bei der PV gibt es auch bei der Elektromobilität große oder vielleicht noch größere *Vorurteile*, das größte vielleicht gleich zuerst:

¹⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraftwerk>

¹⁷ https://www.mobilityhouse.com/de_de/magazin/pressemeldungen/v2g-hagen-elektroauto-stabilisiert-stromnetz.html

¹⁸ https://www.mobilityhouse.com/de_de/vehicle-to-grid

¹⁹ <https://vision-mobility.de/news/emoove360deg-wallbox-bringt-v2g-laden-und-google-assist-ins-spiel-1920.html>

„Die Elektroautos verursachen bei der Herstellung der Batterien mehr CO₂-Emissionen, als sie in ihrem Autoleben wieder einsparen können.“

An dieser Stelle wird ja immer wieder eine Studie aus Schweden zitiert²⁰, die im Grunde gar keine Studie ist, sondern eine Metastudie. Das heißt: Die schwedischen Autoren haben im Jahre 2017 gar nichts selber untersucht, sondern lediglich Ergebnisse anderer (noch älterer) Studien zusammengetragen. Offenbar gab es aber viele, die diese Studie trotz ihrer Mängel weiterverbreitet haben, wie zum Beispiel der „Focus“²¹. Sie wurde auch in vielen weiteren Blättern und auch von Politikern zitiert, man könnte fast sagen, sie hat sich „viral“ ausgebreitet. Bevor jedoch politische Entscheidungen aufgrund einer mangelhaften, mittlerweile völlig überholten Studie getroffen werden, sollte man sich damit genauer beschäftigen. Mittlerweile sind einige kritische Artikel erschienen, die die Mängel der Studie aufzeigen; z. B. im „Handelsblatt“: „Elektroauto-Akkus: So entstand der Mythos von 17 Tonnen CO₂“²².

Für die Herstellung von Lithium-Batterien braucht man viel Energie, aber es wird, analog zu dem Beispiel mit der Photovoltaik, mit zunehmendem Produktionsvolumen immer weniger je Akkuzelle. Die Energie, die man benötigt, ist vor allem Energie in Form von Strom. Wenn man sich nun eine Batteriefabrik vorstellt, die mit einem Solarkraftwerk oder mit einem Wasserkraftwerk CO₂neutral betrieben wird, so ist die CO₂-Emission bei der Herstellung von Lithium-Batterien sehr gering. Genau das macht zum Beispiel Tesla in seiner finalen Ausbaustufe der derzeit schon im Betrieb befindlichen so genannten „Gigafactory“ in Nevada²³. Der Strom für die Produktion der Lithiumbatterien in dieser Fabrik wird von direkt auf den (und um das Werk) angesiedelten Solar- und Windkraftwerken fast CO₂frei produziert. Alles andere wäre ja auch ökonomisch unsinnig, da die Kosten für Solarstrom in der Wüste von Nevada ja nochmals deutlich niedriger liegen als in dem oben genannten Beispiel in Deutschland - keine andere Form der Energie wäre günstiger. Das zweite große Vorurteil ist die angeblich mangelnde Verfügbarkeit der Rohstoffe. Nun braucht man für Lithiumbatterien neben Lithiumcarbonat auch Kobalt. Beides sind keine unproblematischen Rohstoffe. Die Lithium-Vorkommen der Welt werden auf gut 50 Mio. Tonnen geschätzt. Darin ist das im Meer gelöste Lithium mit ca. 240 Mrd. Tonnen²⁴ nicht enthalten. Im Jahre 2017 wurden zweiundvierzig tausend Tonnen Lithium gefördert. Würde dieser Verbrauch stagnieren, würden die Vorkommen gut 1000 Jahre ausreichen. Für die Herstellung einer Batterie für ein Auto mit 100 kWh Kapazität werden ca. 10 kg Lithium^{25 26} benötigt. Man könnte also mit den Vorkommen an Lithium ca. 5 Mrd. Fahrzeuge bauen. Lithium ist also in Bezug auf die Förderung reichlich vorhanden. Auch das Recycling von Lithium (und der anderen in den Batterien enthaltenen Rohstoffe) aus Fahrzeugbatterien ist fast vollständig und umweltfreundlich möglich²⁷. Ein weiterer Aspekt ist die Gewinnung von Lithium aus dem Meerwasser, insbesondere aus der Salzlake, die bei der Meerwasserentsalzung anfällt. Über kurz oder lang wird diese Quelle sicherlich eine Ergänzung der Lithiumgewinnung werden und ist heute Gegenstand von vielen

²⁰ <http://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede95a9/1496136143435/C243.pdf>

²¹ https://www.focus.de/auto/elektroauto/e-auto-batterie-viel-mehr-co2-als-gedacht_id_7246501.html

²² <https://edison.handelsblatt.com/erklaeren/elektroauto-akkus-so-entstand-der-mythos-von-17-tonnen-co2/23828936.html>

²³ https://www.tesla.com/de_DE/gigafactory

²⁴ <http://scienceblogs.de/wasgeht/2015/08/20/wenn-geht-uns-das-lithium-fuer-elektroautos-aus/>

²⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator>

²⁶ <https://images.homedepot-static.com/catalog/pdfImages/22/2266fab5-0182-44f1-9a71-c8ca2d81398c.pdf> (aus dem Anteil an lithiumhaltigen Komponenten in der Batterie lässt sich über die Atomgewichte der Lithiumgehalt je kWh Speicherkapazität ableiten; Der Batterietyp, auf den sich die Veröffentlichung bezieht, wird z.B. im Tesla Model S und X verbaut)

²⁷ <https://www.duesenfeld.com/effizienz.html>

Forschungsarbeiten²⁸. Die Menge an Lithium aus dem Meerwasser ist so groß, dass diese für menschliche Maßstäbe als unerschöpflich angesehen werden kann.

Der zweite oft ins Gespräch gebrachte Werkstoff ist Kobalt. Kobalt wird zurzeit noch in geringen Mengen in den Antriebsbatterien (NCO-Zellen) für Elektrofahrzeuge benötigt. VW baut in seinen e-Golf zum Beispiel Batterien ein, die etwa 10% an Kobalt enthalten²⁹. Tesla verbaut in seinem „Model 3“ Batterien mit einem Kobaltgehalt von weniger als 3 %, also einem Bruchteil davon. Es ist aber keineswegs so, dass Kobalt für den Betrieb einer Batterie zwingend notwendig wäre³⁰. Es gibt schon heute viele Lithiumionen-Akkus, die völlig ohne Kobalt auskommen, wie zum Beispiel die Lithium-Eisen-Phosphat Batterie, deren höheres Gewicht für Fahrzeuge allerdings ein Nachteil ist und die deshalb vor allem für stationäre Speicher verwendet werden. Daher wird intensiv an der Entwicklung von kobaltfreien Antriebsbatterien gearbeitet. Die Universität Maryland hat in Zusammenarbeit mit dem US-Militär kürzlich eine kobaltfreie Lithium-Ionen Batterie vorgestellt, die nicht nur sicherer ist, sondern sogar - bei gleichem Gewicht wie bei bisherigen Batterien - , mehr als das Zweifache an Kapazität haben soll³¹. Wenn man sich die Anzahl an Publikationen in diesem Bereich ansieht, scheint das Innovationsfeuerwerk gerade erst gezündet worden zu sein.

Alternative Fahrzeugantriebe

Welche technischen Optionen haben wir jenseits der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge (BEV)? Elektrofahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzellen wären eine solche Option. Es lohnt sich aber auch hier ein etwas genauerer Blick:

Wasserstoff wird durch Elektrolyse aus Wasser mithilfe von Strom hergestellt, dann enorm verdichtet, transportiert, gelagert und schließlich in einer Brennstoffzelle wieder zu Wasser unter Abgabe von Strom umgewandelt. Dieser Strom kann dann z.B. ein Elektrofahrzeug antreiben. Dieser Prozess beinhaltet also viele Umwandlungsprozesse, die den Gesamtwirkungsgrad mindern. Die höchsten zurzeit erreichten Wirkungsgrade von Brennstoffzellen liegen bei ca. 60%³². Bei der Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse kann man von einem Wirkungsgrad um ca. 70% ausgehen³³. Das Problem ist:

Bei der Berechnung des Gesamtwirkungsgrades muss man die einzelnen Wirkungsgrade multiplizieren, also bei den obigen Zahlen sind das 0,6 mal 0,7 also 0,42 oder eben ein Gesamtwirkungsgrad von 42%. Für eine Kilowattstunde Strom aus einer wasserstoffbetriebenen Brennstoffzelle muss man daher ursprünglich fast 2,5 kWh an elektrischer Energie aufwenden. Die Verdichtung, der Transport und die Lagerung verschlechtern den Wirkungsgrad nochmals. Würden wir also den Verkehr nicht auf batteriebetriebene Fahrzeuge, sondern auf mit Wasserstoff-Brennstoffzellen betriebene Elektrofahrzeuge umstellen, bräuchten wir für den Verkehrssektor mehr als die zweieinhalbfache Strommenge. Auch die Netzstabilisierung durch Rückladung aus den Fahrzeugen in das Stromnetz, die für ein Gelingen der Energiewende fundamental wichtig ist, wäre nicht so ohne weiteres möglich. Ein weiterer erheblicher Nachteil dieser Fahrzeuge ist die

²⁸ https://www.jstage.jst.go.jp/article/apcche/2004/0/2004_0_995/_pdf

²⁹ <https://ecomento.de/2019/03/29/vw-elektroauto-batterien-deutlich-mehr-kobalt-als-tesla-akkus/>

³⁰ <https://www.hs->

[karlsruhe.de/fileadmin/hska/EIT/Aktuelles/seminar_erneuerbare_energien/Sommer_2018/Folien/180418Batteriespeicher_Vetter.pdf](https://www.hs-karlsruhe.de/fileadmin/hska/EIT/Aktuelles/seminar_erneuerbare_energien/Sommer_2018/Folien/180418Batteriespeicher_Vetter.pdf) Seite 14 - alternative Kathodenmaterialien wie bei der LFP-Zelle.

³¹ <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1175-6>

³² <https://www.sonnenseite.com/de/wissenschaft/reversible-brennstoffzelle-bricht-wirkungsgrad-rekord.html>

³³ Alexander Stubinitzky: *Ökoeffizienzanalyse technischer Pfade für die regenerative Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff*. In: *Fortschritt-Berichte VDI. 6: Energietechnik*, Nr. 588. VDI Verlag, 2009, ISBN 978-3-18-358806-0, ISSN 0178-9414.

fehlende Möglichkeit der Rekuperation, also der Rückspeisung der Bewegungsenergie in den Akku. Gerade diese Eigenschaft macht die Elektrofahrzeuge in den Städten so effizient, da das Beschleunigen und wieder Abbremsen an der nächsten Ampel selbst große und schwere Fahrzeuge, umgerechnet in Dieselmotoren, nur gut einen Liter verbrauchen lässt. Um diesen Nachteil zumindest etwas auszugleichen, gibt es Entwicklungen, neben der Brennstoffzelle noch eine Batterie einzubauen, wie es zum Beispiel beim Toyota Mirai³⁴ implementiert wurde. Das führt dann aber zu noch mehr Technik an Bord und treibt die Kosten empfindlich in die Höhe. Der Sicherheitsaspekt, auf einem Wasserstoff - Drucktank mit 700 Bar zu sitzen, der mit dem umgebenden Sauerstoff ein extrem explosives Knallgasgemisch bilden kann, ist ein weiterer Punkt, den man in der Diskussion berücksichtigen sollte.

Brennstoffzellen, wie sie heute in Fahrzeuge eingebaut werden, enthalten als wichtigen Werkstoff Platin. Für eine Brennstoffzelle mit 100 KW Leistung braucht man heute ca. 43g Platin³⁵. Das Problem ist: Platin ist extrem selten. Es werden global nur etwa 200 Tonnen davon pro Jahr³⁶ gefördert und die Produktion von Platin ist alles andere als eine umweltfreundliche und saubere Sache. Allein für die 65 Mio. deutschen Fahrzeuge würde man bei 43g je Fahrzeug 2.795 Tonnen benötigen. Wenn man global auf Fahrzeuge mit Brennstoffzellen umsteigen würde, mit global geschätzten 1,2 Mrd. Fahrzeugen³⁷, brauchte man mit gut 50.000 Tonnen schlicht das 250fache der derzeitigen jährlichen Weltförderung an Platin³⁸. Selbst wenn es gelingt, den Platinanteil in den Brennstoffzellen auf nur noch 25% des heutigen Wertes zu reduzieren, wäre es immer noch mehr als 60mal so viel, wie wir heute fördern können.

Alternative Kraftstoffe

Heute werden in der Regel zum Benzin 10% sogenanntes Bioethanol beigemischt, um die CO₂ Emissionen der deutschen Kraftfahrzeugflotte zu reduzieren. Wäre eine Ausweitung eine sinnvolle Option? Die Betrachtung der Wirkungsgrade gibt hier einen etwas besseren Einblick in die Situation: Pflanzen, die durch Photosynthese Biomasse erzeugen, tun dies mit einem Wirkungsgrad zwischen ein bis zwei Prozent der einfallenden Sonnenenergie³⁹. Darüber hinaus ist aber noch Dünger für die Pflanzen und Diesel für die Agrar-Fahrzeuge notwendig. Die Umwandlung von Biomasse in Bioethanol mindert den Wirkungsgrad weiter. Letztlich ist die Nutzung von Bioethanol in einem Verbrennungsmotor mit einem Wirkungsgrad von ebenfalls unterhalb 30% sehr gering. Da man Wirkungsgrade multiplizieren muss, kommen wir so auf einen Gesamtwirkungsgrad von unter 0.5%⁴⁰. Wenn wir das mit der PV und einem batteriebetriebenen Elektroauto vergleichen, brauchen wir für jeden Kilometer, den wir fahren wollen, mehr als die 30fache Fläche zur Energieerzeugung. Diese Fläche steht Deutschland aber nicht zur Verfügung! Und hier gibt es zwischen der Lebensmittelproduktion und der Erzeugung der Energiepflanzen einen erheblichen ethischen Konflikt.

Eine weitere technische Option ist die Umwandlung von Strom in einen synthetischen Brennstoff, mit dem herkömmliche Verbrennungsmotoren betrieben werden können. An den Fahrzeugen

³⁴ <https://www.toyota.de/automobile/mirai/index.json>

³⁵ https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf Seite 25

³⁶ <https://www.goldsilber.org/artikel/2-peak-platin-produktion-hochpunkt-hubbert.php>

³⁷ <https://www.live-counter.com/autos/>

³⁸ <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs-2019-plati.pdf>

³⁹ Barber, J. (2009): *Photosynthetic energy conversion: natural and artificial*. In: *Chem Soc Rev.* **38**(1); 185–196

⁴⁰ <http://www.energieinfo.de/eglossar/biomasse.html>

müsste man für diese „e-Fuels“⁴¹ nicht einmal große Änderungen vornehmen; die könnten im Grunde direkt mit solchen Kraftstoffen betrieben werden. Hier ist das Problem vor allem der geringe Wirkungsgrad. Wenn wir unsere Mobilität komplett auf e-Fuels verlagern würden, benötigten wir im Vergleich zu batteriebetriebenen Fahrzeugen allein für den Verkehrssektor ca. 5mal so viel Strom aus erneuerbaren Quellen.

Intelligentes Netz

Die Erzeugung und Nachfrage in einem Stromnetz mit einem zunehmenden Anteil an erneuerbaren Energien wird ohne große Speicher und Reservekapazitäten kaum in Einklang zu bringen sein. Die Möglichkeit, die Flotte an Elektrofahrzeugen sowohl als Stromsenke in Zeiten von Überproduktion zu nutzen, als auch zu Zeiten einer zu geringen Produktion Energie aus den Fahrzeugen wieder zur Netzstabilisierung zu entnehmen, wurde ja schon angesprochen. Die Frage ist allerdings: Was sollte die Fahrzeugbesitzer dazu bewegen, ihren Akku für die Gemeinschaft netzdienlich zu verschleißen, auch wenn dieser Verschleiß sehr gering wäre⁴²? Um Angebot und Nachfrage zu regeln, bedient man sich in einer Marktwirtschaft üblicherweise des Preises. Erstaunlicherweise zahlt der Verbraucher dem Stromanbieter immer das gleiche, egal, ob er gerade Strom bezieht, wenn er knapp ist, oder wenn massive Überschüsse vorhanden sind. Man kann diese Schwankungen des Angebots und der Nachfrage sehr schön an den Spotpreisen der Strombörse ablesen⁴³, die täglich aktuell über jede Stunde des Tages Auskunft über die vorhandene Strommenge und damit des damit verbundenen Preises liefern. Mit einem relativ einfachen Trick könnte man ein bundesweites Energiemanagement implementieren: Man legt auf die Stromleitung ein Signal, dass dem Gerät am Ende der Leitung (z.B. einer Waschmaschine oder einem Elektroauto-Ladegerät) den aktuellen Strompreis mitteilt. Wenn man dann als Konsument seiner Waschmaschine einen Höchststrompreis vorgibt wie z.B. 10 Cent je kWh, so „wartet“ die Waschmaschine mit dem Start, bis die Stromüberproduktion ein Niveau erreicht hat, das den Preis auf unter 10 Cent fallen lässt. Mit zunehmender Stromüberproduktion wird der Strompreis naturgemäß immer niedriger und immer mehr Geräte werden auf diese Art zugeschaltet, bis sich, ähnlich wie an der Börse, ein bestimmtes Preisniveau eingependelt hat. Autos mit einem großen Speicher werden also aus ökonomischen Gesichtspunkten zu Zeiten der Überproduktion geladen werden. Wenn allerdings der Strombedarf größer wird als die Stromproduktion, werden die Autobesitzer ihren Fahrzeugen ab einem bestimmten Preis je kWh „erlauben“, wieder einen Teil der Energiemenge ihres Akkus in das Netz abzugeben. Sie tun dies aus rein wirtschaftlichen Betrachtungen. Ein moderner Akku in einem Elektrofahrzeug kann innerhalb von ca. 8-10 Jahren mehr als 2000 Mal geladen werden. Bei einer Reichweite von ca. 500 km dieser Autos ergibt dies eine mögliche Fahrleistung von 500 km mal 2000, also theoretisch ca. eine Million km. Die Hälfte davon, also eine halbe Million km, hat ein Tesla Model X in den USA bereits zurückgelegt und die Batterie hat noch mehr als 90% ihrer initialen Kapazität⁴⁴. Da kaum ein Autobesitzer innerhalb der Lebensdauer seines Fahrzeug-Akkus solch große Strecken zurücklegen wird, kann er sich also netzdienlich verhalten, ohne dafür mit vorzeitigem Verschleiß seines Akkus rechnen zu müssen, und er kann gleichzeitig noch etwas durch den Stromverkauf in stromknappen Zeiten verdienen. Das geht natürlich nicht, wenn man auf dem Weg in den Urlaub ist. Ist man tagsüber bei der Arbeit

⁴¹ <https://ineratec.de/prozesse/>

⁴² Lithium Ionen Akkus verschleißen in einem SOC Bereich zwischen 50-75% sehr wenig, und das ist der Hub, der für die Netzstabilisierung bevorzugt genutzt werden würde

⁴³ <https://www.eex.com/de/marktdaten/strom/spotmarkt/auktion#!/>

⁴⁴ <https://ecomento.de/2018/07/24/643-738-kilometer-in-teslas-elektroauto-limousine-model-s/>

und das Fahrzeug ist am Firmenparkplatz, oder nachts in der Garage, oder auf dem Parkplatz an ein bidirektionales Ladegerät angeschlossen, wäre das problemlos möglich, da ein durchschnittliches Auto zu mehr als 90% seiner Zeit ungenutzt still steht.

Fazit:

Die Energiewende wird gelingen, wenn der Umstieg auf Elektromobilität parallel zum Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen erfolgt. Ein sehr wichtiger Aspekt ist es, die Möglichkeit zu schaffen und zu fördern, dass die Fahrzeuge sowohl als Stromsenke als auch als Stromquelle für das Stromnetz zur Verfügung stehen. So würde ein gigantischer kollektiver Stromspeicher entstehen, ohne den unsere Versorgungssicherheit nicht gewährleistet wäre! Und das, da die Akkus für die Autos ohnehin notwendig sind, ohne zusätzliche Kosten. Die Photovoltaik ist von einer der teuersten zu der billigsten Energiequelle geworden, die mittlerweile mit weniger als 4 Cent je Kilowattstunde (Tendenz jährlich fallend) zur Verfügung steht. Gerade der Ausbau in Form von Agrophotovoltaik würde unseren Energiehunger stillen und zugleich noch Lebensmittelproduktion ermöglichen - ohne zusätzlichen Flächenverbrauch.

Ein intelligentes Netz, das den angeschlossenen Geräten mitteilt, wie der aktuelle Strompreis ist, würde eine simple Möglichkeit schaffen, das schwankende Angebot in einer künftigen Energieversorgung sinnvoll zu nutzen und gleichzeitig das Netz zu stützen, wenn es notwendig wird - und das alles mit marktwirtschaftlichen Spielregeln. Alle diese beschriebenen Techniken und Bausteine für das Gelingen der Energiewende gibt es bereits. Wir müssen sie daher einfach nur fördern, ausbauen und nutzen!

Diesen Artikel können Sie unter <https://www.e-solarconcept.de> kostenlos als pdf herunterladen

Über den Autor: Dr.-Ing. Titus J. Rinke studierte Elektrotechnik an der Universität Ulm, promovierte dann am Institut für Physikalische Elektronik mit dem Thema „Monokristalline Transfersolarzellen“. Er gründete danach zwei Technologiefirmen, deren Geschäftsführer und Gesellschafter er ist. Das Firmengebäude ist auf dem Niveau des Passivhaus-Standards. Es verbraucht kein Öl und kein Gas. Die mächtige Solaranlage erzeugt Strom und Wärme. Der Saisonspeicher fängt im Sommer Wärme auf und gibt sie im Winter zu Heizzwecken wieder frei. Das weitgehend selbst entwickelte Energiemanagement und die intelligente Haustechnik sorgen für ein hohes Maß an Autarkie. Die Elektrotankstellen auf dem Firmenparkplatz, stehen den Mitarbeitern kostenlos zur Verfügung um Teile des Überschussstroms aufzunehmen. Diese Firma ist eine der wenigen mit negativen Energiekosten! Auch das Privathaus des Autors hat weder Öltank noch Gasanschluss. Das Konzept ist hier ähnlich wie beim oben beschriebenen Firmengebäude.