

Analysen und Schlussfolgerungen zum Technikwechsel in der deutschen Energieversorgung

F. Wagner, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching/Greifswald
fritz.wagner@ipp.mpg.de

18.1.2020

(Beitrag zur VDI-Energietagung „Wettbewerb der Systeme“ am 5.2.2020 in Rostock)



Es ist das primäre Interesse aller Menschen, dass die Emissionen in die Atmosphäre, die den Strahlungshaushalt der Erde verändern, verringert werden. Dennoch sind in 2018 die CO₂-Emissionen weltweit um 1.7% auf 33.1 Milliarden Tonnen gestiegen. Der Anstieg in einem Jahr entspricht etwa 2/3 der jährlichen deutschen Treibhausgas-Emissionen. Diese Zahlen zeigen, dass Deutschland alleine nicht das „Klima retten“ kann, wie oft insinuiert wird. Wiewohl es seine diesbezüglichen Zusagen einhalten müsste, werden die nationalen Zielwerte für 2020 aber offensichtlich trotz großer Anstrengungen beim Aufbau Erneuerbarer Energien nicht erreicht.

Was wurde aber erreicht? Wenn man die Gesamtbilanz ausgehend vom Jahr 2002 betrachtet – also ein Jahr nach dem Beschluss des Erneuerbaren Energien-Gesetzes – dann hat sich bis 2018 der fossile Anteil am Strommix nur um 44 TWh verringert. 44 TWh sind etwa 7% der jährlichen Stromproduktion in Deutschland und knapp 2% des Endenergieverbrauchs. In dem betrachteten Zeitraum wurde die Kapazität Erneuerbarer Energien um 100 GW erweitert, die in 2018 zu einem zusätzlichen Energiebeitrag von 180 TWh führte. Diese Diskrepanz der Zahlen – 180 TWh im Vergleich zu 44 TWh - erklärt sich zum großen Teil durch den politischen Ausstiegsbeschluss aus der Kernenergie, mit der Folge, dass auch Strom aus der Kernenergie zu ersetzen war. In Deutschland

wurden die Gefahren für das Klima relativiert durch die Abwägung gegen die Gefährdungen bei der Nutzung der Kernenergie. So dienten die Erneuerbaren Energien nicht ausschließlich dem Ersatz fossiler Versorgung, sondern mussten vornehmlich eine andere, ebenfalls CO₂-freie Technik, ersetzen, mit der Konsequenz, dass in der betrachteten Zeitspanne der Energiewende der Bedarf vermehrt mit Kohle bedient werden musste. So sind die deutschen Kohleimporte aus den USA angestiegen, während die USA durch den Wechsel von Kohle auf Gas die CO₂ Emissionen mehr als jedes andere Industrieland in den letzten Jahren verringern konnten.

Es gibt nur wenige technische Möglichkeiten für eine CO₂-freie Strom- und Energieversorgung. Diese sind:

(1) CCS/CCU Techniken:

Mit CCS (Carbon Capture and Storage) wird bei Nutzung fossiler Brennstoffe die Abtrennung von CO₂ aus dem Abgas und dessen unterirdischer Speicherung bezeichnet. Dieser so gespeicherte Vorrat würde, wie auch im Rahmen von CCU-Technologien (Carbon Capture and Use), als CO₂-Quelle für die chemische Erzeugung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen (z.B. synthetische Kraftstoffe) dienen. CCS ist in Deutschland zurzeit nicht vermittelbar und in einigen Bundesländern bereits verboten. Pilotprojekte wurden eingestellt. Auch wenn Deutschland CCS Techniken im eigenen Land nicht nutzen will, wären Forschung und Entwicklung weiterhin sinnvoll, wobei die Ergebnisse denjenigen Ländern zur Verfügung gestellt werden sollten, die z.B. Kohle nicht einfach ersetzen können. In China, einem Land, das für die Entwicklung des Weltklimas viel entscheidender ist als Deutschland, hat in 2018 41 GW fossile, 11 GW nukleare, 21 GW Wind und 45 GW solare Energieerzeugung in Betrieb genommen. Weitere 121 GW Kohlekraft ist im Aufbau. Es ist zu befürchten,

dass diese Anlagen – in der Summe derzeit etwa 1.000 GW Kohlekraftwerke – lange Laufzeiten haben werden. Es wäre auch in unserem Interesse, wenn China, unterstützt durch deutsche Forschung und Entwicklung, CCS/CCU Techniken nutzen könnte.

(2) Kernspaltung:

Weltweit werden etwa 450 Reaktoren in 30 Ländern betrieben. Fünf der neun Nachbarländer Deutschlands nutzen diese Technik. Etwa 71% der europäischen Bevölkerung versorgt sich auch mit Strom aus der Kernspaltung. Weltweit sind etwa 50 Reaktoren im Bau darunter zwei russische VVER-1200 Reaktoren in Weißrussland und vier von diesem Typ in der Türkei. Wie in Deutschland wird Kernenergie in vielen Ländern nicht akzeptiert. Dennoch sollte Forschung an neuen Konzepten der sog. Generation IV Reaktoren oder an kleinen modularen Reaktoren betrieben werden, weil diese eine höhere Betriebssicherheit, geringere Proliferationsprobleme und reduzierten radioaktiven Abfall versprechen. Deutschland finanziert solche Forschungsprogramme nicht. Wie jedoch der Vergleich mit Frankreich zeigt, hat die Nutzung von Kernenergie große klimatische Bedeutung. Die spezifische CO₂ Emission unseres Nachbarlandes beträgt 76 gCO₂/kWh und 486 gCO₂/kWh – also mehr als das 6-fache - bei uns. Als Konsequenz emittiert Deutschland 240 Mill Tonnen CO₂ mehr pro Jahr als Frankreich. Frankreich produziert Strom seit 30 Jahren klimafreundlich auf einem Niveau, das Deutschland in 30 Jahren erreichen will.

(3) Fusion:

Fusion ist noch für viele Jahre ein Forschungsfeld, in dem Deutschland eine führende Stellung einnimmt. Allerdings wird in Frankreich der erste Fusionsreaktor, ITER, von sieben Partnerländern gebaut. ITER wird aber keinen Strom liefern, sondern soll wichtige physikalische Fragen beantworten und – eingeschränkt – die technische Machbarkeit der Fusion nachweisen. ITER wird 2025 in Betrieb gehen und etwa 10 Jahre später die relevanten Betriebsdaten liefern und nachweisen, ob es sein Projektziel erreicht hat. Wiewohl Partner von ITER, plant China auch den Bau eines eigenen Fusionsreaktors, allerdings unter ambitionierteren Zeitskalen. In Greifswald wird

Wendelstein 7-X betrieben, ein alternatives Konzept zu dem von ITER mit prinzipiellen Vorteilen, die im IPP in Greifswald verifiziert werden.

(4) Regenerative Produktionsformen:

Von Wichtigkeit sind Biomasse, Wind und Photovoltaik; Geothermie ist in Deutschland nur lokal von Bedeutung; Wasserkraft lässt sich kaum noch ausbauen. Die Hoffnungen auf den Ausbau der Biomasse haben sich nicht erfüllt. Pflanzenöl wurde nicht „zum Gold des Landwirts“ und dieser mutierte nicht zum „Energiewirt“. Die Gründe sind die Folgen aus der intensiven Landwirtschaft – Verlust an Biodiversität, Eutrophierung von Gewässern, starke Verluste an Insekten- und Vogelpopulationen. Was den Wald angeht, so verringert sich durch die Nutzung der Kohlenstoffgehalt der Böden. Das Primärenergiepotenzial der heimischen Biomasse beläuft sich auf etwa 350 TWh mit etwa 240 TWh als Endenergie. Diese Beiträge stagnieren seit Jahren. Obendrein hat Deutschland, bezogen auf seine Agrar- und Waldflächen, die höchste Bioenergienutzung in Europa. Ob die Herstellung von Biodiesel (primär aus Raps) oder Biogas (aus Mais und Gülle) zukünftig im derzeitigen Umfang noch möglich sein wird, ist fraglich. Deutschland importiert etwa die Hälfte seines Tierfutters aus dem Ausland. Der Anstieg der Weltbevölkerung mag dies in Zukunft verbieten und Deutschland wird die Versorgung mit Lebens- und Futtermittel in einem höheren Maße selbst sicherstellen müssen.

Somit bleiben für die nationale Versorgung nur Windkraft (On- und Offshore) und Photovoltaik (PV) als skalierbare regenerative Techniken. Ihre Nutzung hat keine negativen Auswirkungen auf das Klima. Die Konsequenzen des hohen Materialverbrauchs dieser Techniken und der Umgang mit ihren Hinterlassenschaften – Rotorblätter und PV Panels - sind noch nicht im Einzelnen bekannt. Bekannt sind jedoch die Folgen von zwei intrinsischen Problemen von Windkraft und Solartechniken – die geringe Energiedichte und die zeitliche Variation der Stromproduktion. Das eine Problem verlangt große Flächen, um ausreichend Energie zu erzeugen und kommt in einem Land mit hoher Bevölkerungsdichte in Kollision mit anderen Flächenbedürfnissen. Daneben stellt sich die grund-

sätzliche Frage nach dem verfügbaren nationalen Flächenpotential. Die zeitliche Variation ist bei Windkraft chaotisch und bei PV Strom periodisch. Beide Techniken liefern keine gesicherte Leistung. Solare Anlagen erzeugen in den Nachtstunden nichts. Der nächtliche Strombedarf in Deutschland beläuft sich jedoch etwa auf 42% des Gesamtbedarfs. Daneben variiert PV Produktion stark über das Jahr hinweg. In den Wintermonaten, wenn maximaler Bedarf vorliegt, fällt die Erzeugung auf etwa 10% von der in den Sommermonaten. Im Vergleich zur Photovoltaik produziert Onshore Windkraft bei gleicher Nennleistung etwa die doppelte, Offshore Windkraft die 3- bis 4-fache Strommenge. Die Produktion schwankt jedoch und ist gekennzeichnet durch längere Flauteperioden mit geringer Produktion. So wurden in 2018 127 TWh benötigt zu Zeiten, in denen Onshore und Offshore Windkraft zusammen nur mit 10% ihrer Nennleistung beitragen. Neben den Flaute- und nächtlichen Dunkelflauteperioden ist eine andere Eigenschaft von Windkraft hervorzuheben – nämlich die hohe Korrelation der Stromproduktion mit der in den Nachbarländern. In Mangelperioden ist aus diesem Grund Hilfe vom nahen Ausland nicht zu erwarten.

Wind- und Solartechniken brauchen somit ein Backup System bis es ausreichende Speicher geben wird. Sollte der derzeitige Strombedarf von etwa 520 TWh unter den Witterungsbedingungen von 2018 einmal durch Wasser-, Wind-, und Solarkraft erbracht werden, dann muss ein Backup System 110 TWh, also gut 20%, beitragen. Es müssen somit zwei technisch stark unterschiedliche Versorgungssysteme an einem Netz betrieben werden. Als Folge müssen die Stromnetze auf allen Versorgungsebenen verstärkt und erweitert werden. Die damit verbundenen sozialen und finanziellen Probleme sind bekannt. Die Backup Technik wird in einem hohen Maße durch die Photovoltaik-Einspeisung gefordert, die sich in den Morgenstunden mit zukünftig mehr als 100 GW zuschaltet aber wenige Stunden später wieder auf „Null“ fällt.

Die eigentliche Zielmarke für den Ausbau von Wind- und Solarkraft ist jedoch nicht nur der reine „klassische“ Strombedarf, sondern auch eine weitgehende Abdeckung der anderen energieverbrauchenden Sektoren.

– Wärme und Mobilität. Das Ausbaupotential für Deutschland ist nicht genau zu beziffern und hängt

z.B. bezüglich der Onshore Windkraft von den politischen Vorgaben von Mindestabständen zu Wohn- gebieten ab. Das nationale Produktionspotential beträgt etwa 800 -1000 TWh Energie durch Wind und Photovoltaik – mit einer Schwankung von bis zu $\pm 15\%$ von Jahr zu Jahr. Dazu kommen noch etwa 250 TWh aus Biomasse. Damit bleibt man in der Summe weit hinter dem derzeitigen Endenergieverbrauch von 2500 TWh zurück. Bei einer mittleren Produktion von 920 TWh durch Wasser, Wind und Sonne und einer elektrischen Last von 520 TWh bedarf es aufgrund der Produktionsschwankungen, wie etwa solchen von 2018, zusätzlich etwa 50 TWh flexibel einsetzbaren Biostroms (oder regelbaren Importstrom oder Strom aus Wasserstoff), um alleine die elektrische Last auszugleichen. Neben der Biomasse bleiben somit etwa 450 TWh für andere energieverbrauchende Sektoren übrig. Für treibhausgas-neutrale Produktion hat der Verband der Chemischen Industrie kürzlich jedoch mehr als 600 TWh pro Jahr für sich reklamiert. Der zusätzliche Strombedarf beträgt bei unveränderter Mobilität etwa 200 TWh. Deutschland bleibt somit auch nach Abschluss der Energiewende ein Energieeinfuhrland und der Erfolg der Energiewende hängt auch von der Art der Energieproduktion im Ausland ab.

Welche Schlussfolgerungen kann man aus den grundsätzlichen Eigenschaften einer witterungsabhängigen Versorgung ziehen?

Photovoltaik ist für den Eigenverbrauch sinnvoll. Da das Profil des Verbrauchs von Haushalten nicht dem des Angebots entspricht, sind lokale Speicher zu empfehlen. Freiflächen-PV in unseren Breiten scheint mir nicht sonderlich geeignet aufgrund der Tag-Nacht Variation und dem praktischen Ausfall im Winter. Es scheint mir auch fraglich, ob es sich für diese Technik mit etwa 12% Kapazitätsnutzung lohnt, die spezifischen Netzbelastungen in Kauf zu nehmen oder Saisonspeicher aufzubauen. Der lokale Widerstand gegen Windanlagen ist nachvollziehbar, denn der Eingriff in das heimische Landschaftsbild ist gravierend. Der Schwerpunkt sollte deshalb auf den Ausbau von Offshore Wind als europäisches Projekt gelegt werden. Offshore Wind sollte meines

Erachtens ein wichtiges Standbein der zukünftigen Stromversorgung sein. Wer Strom von Wind und Sonne erzeugen will, muss allerdings eine Speicherlösung für die Produktionsspitzen anbieten. Für die Speicherung muss man den Energieträger wechseln. Die Speicherung in Batterien ist teuer, weil sie in elektrischer Form erfolgt. Bei der Speicherung in der Form von Wasserstoff müssen zwar größere Transformationsverluste in Kauf genommen werden, die Stoffspeicherung selbst ist jedoch vergleichsweise billig. Deshalb war die Entscheidung für Wind und Sonne zwangsläufig auch die für den Einstieg in die Wasserstoff-Technologie. Die separate Erzeugung von Wasserstoff über Offshore Wind ist zu überlegen – z.B. um überdimensionierte Netze zu vermeiden. Eine weitere chemische Umwandlung des Wasserstoffs in energiedichtere Produkte wäre etwa im Rahmen von CCU-Techniken möglich.

Auch was die Importenergie angeht, so wird der Löwenanteil nicht in der Form von Strom ankommen. Aufgrund der Korrelation von Wind- und PV-Erzeugung wird es nicht möglich sein, den Bedarf in dem notwendigen Ausmaß durch die Nachbarländer abzudecken. Mit den Erfahrungen des Baus von Stromleitungen von Thüringen nach Bayern ist es nicht vorstellbar, dass andere Länder Strom etwa aus dem Maghreb nach Deutschland durchleiten. Die Energieerzeugung für den Import wird besser aus wind- und sonnenreichen Ländern kommen und zwar vornehmlich in der Form von Wasserstoff oder höherwertiger Kohlenwasserstoffe.

Welche Schlussfolgerungen kann man aus der bisherigen Entwicklung der Energiewende ziehen?

Da nur Deutschland betreffende Beschlüsse für die Entwicklung der globalen Erwärmung weitgehend unerheblich sind, dieses Land also das „Klima nicht retten kann“, muss es den Menschen hier in ihrem ureigenen Interesse für ihre Zukunft sein, dass Techniken entwickelt werden, die in den entscheidenden Ländern der Dritten Welt die fossilen Versorgungsformen vom Markt verdrängen oder akzeptabel machen. Das ist nicht der Fall, wie oben am Beispiel der CCS/CCU Technik oder neuartiger Spaltungsreaktoren geschildert wurde. Stattdessen subventioniert Deutschland

Erneuerbare Energien, die entweder, wie die Bioenergie, drastische Nebenwirkungen zur Folge haben oder als „Grünes Paradoxon“ die Reduktionsbemühungen der Europäischen Union unterlaufen. Auch in Hinblick auf den zukünftigen Import „grüner Energie“ tut Forschung not, um potentiellen Anbietern die erforderlichen Techniken an die Hand zu geben. Grüne Energie fließt nicht wie Öl und Gas aus dem Boden.

Beim Ausbau der Erneuerbaren Energien wird die Dimension dieses Unterfangens nicht ausreichend diskutiert. Ende 2018 trugen installierte Leistungen von 53 GW Onshore-, 6,4 GW Offshore-Wind und 46 GW Photovoltaik zur Stromversorgung bei. Diese müssten bis zur Potentialgrenze ausgebaut werden, welche ich für die drei genannten Techniken mit 200 GW, 85 GW und 300 GW nur grob beziffern kann. Dabei erhöht sich z.B. der Onshore Windbeitrag etwa um den Faktor 4. Bei unterstellter linearer Entwicklung würde sich die Zahl der Windkraftanlagen auf 120.000 erhöhen. Ob höhere Anlagenleistungen diese Zahl merklich verringern, ist fraglich, da zunehmend weniger windträchtige Standorte einbezogen werden müssen. Sind solche Zahlen der Öffentlichkeit bekannt? Was die PV betrifft, so wurde willkürlich ein Deckel von zunächst 52 GW festgelegt. Wie kommt diese Zahl zustande und was lässt sich mit dieser Investition anfangen? Die damit erzeugte Strommenge entspricht gerade derjenigen, die exportiert wird. Als Folge des Parallelbetriebs von zwei technisch stark unterschiedlichen Versorgungssystemen hat Deutschland in den letzten Jahren Frankreich als größten Stromexporteur verdrängt.

Mit dem Ausbau Erneuerbarer Energien hat der Leitungsbau nicht Schritt gehalten. Nachbarländer waren gezwungen, durch Phasenschieber-Transformatoren unerwünschte Stromzufuhr zu unterbinden. Die neuen Hochspannungsleitungen werden nicht fertig sein, wenn in wenigen Jahren nach dem Ausstieg aus der Kernenergie und den ersten Maßnahmen gemäß der Kohlekommission etwa 20 GW gesicherte Leistung abgeschaltet wird. Zur Mitte der nächsten Legislaturperiode wird es also spannend. Die vollständige Nutzung des nationalen Potentials bis 2050 verlangt einen jährlichen Zubau von 5 GW Onshore-, 2,5 GW Offshore-Wind und 8,5 GW PV. Solche Spitzenwerte wurden bislang nur jeweils an einem Jahr

erreicht - 5 GW Onshore Wind in 2017, 2.3 GW Offshore Wind in 2015 und 8 GW PV in 2012. Wenn man den Aufbau über die letzten 10 Jahre betrachtet (bzw. fünf Jahre für Offshore Wind), dann ergeben sich als gemittelte Aufbauwerte 3.2 GW (Onshore), 1.2 GW (Offshore) und 3.9 GW (PV) pro Jahr. Deutschland müsste also über 30 Jahre hinweg den Aufbau dieser Anlagen mit der jeweils nur in einem Jahr erreichten Spitzenrate durchhalten. Dazu kämen dann noch die Ersatzinvestitionen.

Was die Mobilität angeht, so soll dem batteriegetriebenen Elektroauto die Zukunft gehören. Es scheint mir widersinnig, für individuelle Mobilität zukünftig einige 100 kg zusätzlich zu bewegen. Ähnlich wie bei den elektrischen Netzen ist der Aufbau der Ladestationen nicht ausreichend geplant. Wo laden die Laternenparker, die nächtens ausnahmslos die Straßenränder in den Städten säumen? Wäre es zweckmäßiger, am Tag am Arbeitsplatz zu laden, wenn PV-Strom zur Verfügung steht, oder in der Nacht am Straßenrand, wenn der allgemeine Strombedarf geringer ist? Angesichts der – fast würde ich sagen, Alternativlosigkeit der Wasserstoffproduktion bei intermittierender Versorgung – ist die fehlende Technologieoffenheit bei der Mobilität beklagenswert. Das Umwelt Bundesamt erwartet eine Abnahme des eigentlichen Stromverbrauchs. Die kommende Digitalisierung, der Einzug der Künstlichen Intelligenz, die Verbreitung von Wärmepumpen, die Entwicklung hin zur Industrie 4.0, die Erwartungen an smart homes, smart grids, smart cities – und wie die Schlagworte alle heißen - lassen erwarten,

Nachbemerkungen:

- (1) Die Politik sollte im Auge behalten, dass Deutschland etwa 1.000 Mrd € jährlich bereitstellen muss, um seine Sozialprogramme bedienen zu können. Ohne gut funktionierende Volkswirtschaft ist diese Leistung in der Zukunft nicht mehr zu erbringen.
- (2) Angesichts der relativen Bedeutungslosigkeit der deutschen Beiträge zur unmittelbaren Eindämmung der globalen Erwärmung ist es an der Zeit, neben der lokalen Vermeidung von CO₂ Emissionen zusätzlich die lokalen Folgen der globalen Entwicklung durch entsprechende Anpassungsmaßnahmen abzumildern. Die heißen und trockenen Sommer der letzten Jahre in Deutschland und die Perioden mit Starkregen haben gezeigt, wo anzusetzen wäre.

Zum Autor:

Dr. rer.nat., Emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik. Professor em. für Experimentalphysik an der Universität Greifswald. Forschungsgebiet: Hochtemperatur Plasmaphysik. Forschung an der TU-München; Ohio-State University, USA; IPP Garching und Greifswald; Princeton University, USA; Polytechnische Peter-der-Große-Universität St. Petersburg, Russland. Lehre an den Universitäten in Heidelberg, Greifswald, St. Petersburg und an der TU-München. 2007-08 Präsident der Europäischen Physikalischen Gesellschaft.

dass der Strombedarf für seine Grundanwendungen steigen wird. Die technischen Maßnahmen zur Einsparung von Energie werden i.A. Strom benötigen. Sofern derartige Entwicklungen und ihre Verbreitung zumindest zum Teil vom Markt getrieben werden sollten, muss der Strompreis ausreichend niedrig sein. Mehr als 50% des derzeitigen Strompreises sind jedoch Steuern und Abgaben (in alphabetischer Reihenfolge: EEG-Umlage, Kompensation von Lastabwürfen, Konzessionsabgabe, KWKG-Umlage, NEV-Umlage, Offshore-Haftungsumlage, Stromsteuer). Eine Entlastung müsste hier dringend erfolgen. Auch würde der Markt für Wärmepumpen schneller wachsen, wäre der Strompreis niedriger.

In den drei wichtigen Qualitäten einer Stromversorgung - Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit - haben die Maßnahmen der Energiewende die Situation verschlechtert oder entsprechende Erwartungen nicht erfüllt. Umfang und Kosten der Netzeingriffe im Rahmen des sog. Netzengpassmanagements und der Lastabwürfe von industriellen Verbrauchern haben in den letzten Jahren stark zugenommen. Der Strompreis ist in der Entwicklungsphase der Erneuerbaren Energien stark angestiegen und Deutschland liefert sich mit Dänemark ein Kopf-an-Kopf Rennen um den höchsten Strompreis für Haushalte in Europa. Ferner sind die Erzeuger in zunehmendem Maße gezwungen, negative Strompreise zu akzeptieren.