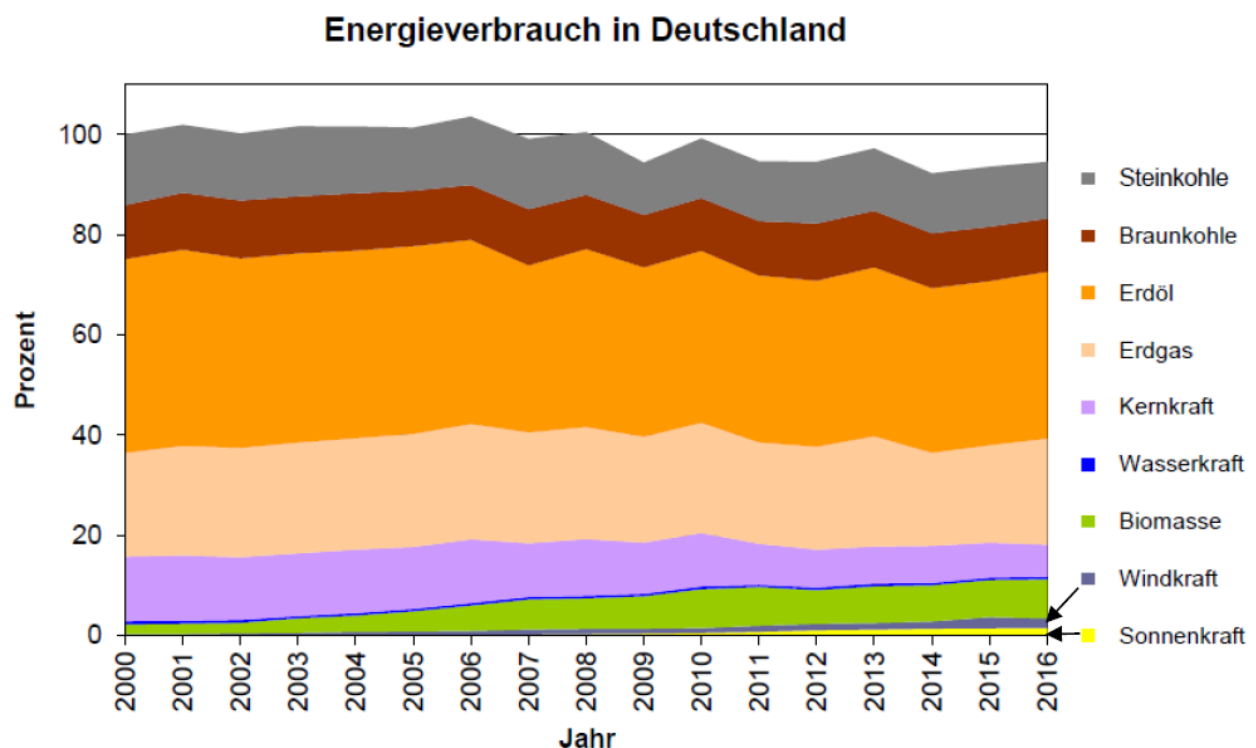


Findet eine Energiewende statt?

Die Vorräte an Kohle, Öl und Erdgas sind begrenzt und ihre Nutzung als Energieträger wird irgendwann ein Ende haben. Auch sind diese fossilen Wertstoffe zu schade, um einfach verfeuert zu werden, abgesehen davon, dass dies dem Klima auf der Erde nachhaltig schadet. Eine Wende hin zu erneuerbaren Energiequellen ist daher unausweichlich. Dies erfordert große Anstrengungen, und wir sollten alles tun, um diesen Prozess zu unterstützen. Aber wie weit sind wir über all die Jahre tatsächlich vorangekommen? Hierzu wollen wir den bisherigen Verlauf der Energiewende in Deutschland aus Sicht der Physik betrachten.

Wichtig ist dabei, die Entwicklung der Gesamtenergie anzuschauen. Diese fließt als Wärmeenergie in Heizung und Warmwasser vor allem der privaten Haushalte (33 Prozent), und in Prozesswärme z.B. der Stahl- und Chemiewerke (23 Prozent). Ein weiterer Teil fließt als mechanische Energie vor allem in den Straßenverkehr (39 Prozent).¹ Die restlichen 5% gehen zu fast gleichen Teilen in Beleuchtung und Rechenanlagen. – Es verzerrt das Bild, wenn man nur einen Teilsektor wie den Verbrauch an elektrischer Energie betrachtet, da ja große Verschiebungen zwischen den einzelnen Sektoren vorgesehen sind, etwa beim Wechsel vom Benzin- zum Elektroauto.



Anteil der verschiedenen Energieträger am Energieverbrauch. Der Verbrauch im Jahr 2000 wurde auf 100% gesetzt. (Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie²).

Will man die Zukunft planen, so lohnt es immer, zuerst einen Blick in die Vergangenheit zu werfen. Dies haben wir in obiger Abbildung getan. Diese zeigt den Anteil der verschiedenen Energieträger an der Energieversorgung unseres Landes in den letzten Jahren. Die oberen vier Streifen von grau bis beige zeigen die fossilen Brennstoffe, von denen wir wegkommen

wollen, bei denen sich jedoch bisher nur wenig geändert hat. Es folgt die Kernenergie in lila, die innerhalb der kommenden Jahre ganz zurückgefahren werden soll. Diese nicht erneuerbaren Energieträger machen heute 87% des Gesamtenergieverbrauchs aus.

Die unteren vier Streifen zeigen den Beitrag der erneuerbaren Energieträger in Deutschland. Die Wasserkraft, sehr schmal in blau, trägt mit 0,5% bei, sie ist seit Jahrzehnten praktisch unverändert und ist in Deutschland nur schwerlich auszubauen³. Die Biomasse in grün hat mit gegenwärtig 8% Anteil stark zugenommen, gilt aber wegen ihrer Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion als weitgehend ausgereizt⁴. Die Windkraft in graublau trägt 2,4% bei. Photovoltaik und Naturwärme (Wärmepumpen, Solarthermie, Geothermie), in gelb am unteren Rand der Abbildung, decken 1,0% und 0,5% des Energieverbrauchs ab. Zusammen ergeben die Erneuerbaren knapp 13%, wobei die Biomasse (Holz, Klärgas, Biodiesel) stark dominiert.

Blicken wir auf die Windkraft, die den Löwenanteil der zukünftigen Energiewende beisteuern soll. In den letzten fünf Jahren ist es mit großem Aufwand gelungen, die Windenergie mit einem Zuwachs von 0,3 Prozentpunkten pro Jahr auszubauen. Macht man im gleichen Maße weiter (wonach es zurzeit wegen verschiedener Probleme nicht aussieht), so wird die Windkraft um die Mitte des Jahrhunderts zehn Prozent des heutigen Verbrauchs abdecken. Das ersetzt gerade einmal die dann abgeschaffte Kernkraft, keine Rede von den 80% fossiler Energien für Wärme, Verkehr und Strom.

Die Bilanz der neuen Energieträger verbessert sich nur geringfügig, wenn wir nicht die (z.B. in die Kraftwerke eingespeiste) Primärenergie betrachten, sondern die Energie, die tatsächlich beim Verbraucher ankommt. In dieser Endenergie hat die Windenergie statt der genannten 2,4% einen etwas höheren Anteil von 3,0%, da ihre Umwandlungsverluste geringer ausfallen als bei den herkömmlichen Energieträgern.⁵

Die in Tabelle 1 gezeigten 2,4% für die Windenergie lassen uns stutzen. Beliefert nicht eine einzige Windkraftanlage mehr als tausend Haushalte mit Strom, wie man landauf landab hört? Bei den heute circa. 27 000 installierten Windrädern⁶ sollten demnach mehr als 27 Millionen Haushalte in Deutschland versorgt sein⁷. Ist damit die Energiewende nicht schon fast geschafft, und widerspricht dies nicht dem in der Abbildung gezeigten Befund? Nein, denn selbst wenn alle Haushalte in Deutschland ihren Strom aus erneuerbaren Quellen bezögen, so wären erst 4% der Energiewende geschafft. Denn der Stromverbrauch der privaten Haushalte beträgt 22% des gesamten Stromverbrauchs⁸, und dieser wiederum beträgt 17,5% des gesamten Energieverbrauchs, und 22% von 17,5% sind eben nur die genannten 4%. Der Beitrag der Windkraft zur Energiewende sieht hier nur deshalb so groß aus, da er in Einheiten der kleinen „Münze“ Haushaltsstrom angegeben wird.

Zudem wird meist die installierte oder Nennleistung von Sonnen- und Windkraftanlagen statt der tatsächlich produzierten Leistung angegeben. Dies ist die Leistung, die zum Beispiel Windräder bei der selten auftretenden Windstärke sechs erreichen. Die installierte Leistung mag den verantwortlichen Ingenieur interessieren, für die Energiebilanz ist sie nicht die entscheidende Größe. Die tatsächlich im ganzjährigen Betrieb im Mittel gelieferte Leistung einer Windkraftanlage ist nur ein Fünftel, die einer Photovoltaikanlage ein Neuntel der installierten Leistung⁹. – Wie man sieht, lassen sich mit etwas Geschick beliebige Erfolgszahlen zu Wind-

und Sonnekraft (Pfeile in der Abbildung) in die Welt setzen. Gibt man zum Beispiel die installierte Leistung der Photovoltaik an und setzt sie in Beziehung zum Stromverbrauch der Haushalte, so hat man sofort einen hundertfachen Mogelfaktor zur Verfügung.

In Tabelle 1 ist nicht berücksichtigt, dass Wind- und Sonnenenergie heute und auch in absehbarer Zukunft nicht voll nutzbar sind. Grund hierfür sind die starken jahreszeitlichen und Tag-Nacht Schwankungen von Wind und Sonne. Überschüssigen Strom kann man heute nur in Pumpspeicherwerken zwischenspeichern, aber deren Kapazität reicht in Deutschland bei weitem nicht aus, um diese Schwankungen aufzufangen. Die Speicherkapazität der Batterien zukünftiger Elektroautos ist ebenfalls zu vernachlässigen. Andere Speicherverfahren wie die elektrische Wasserstoffherstellung haben eine geringe Effizienz und sind in hohem Maße unwirtschaftlich.

Betrachtet man die erheblichen bisherigen Anstrengungen, so ist es bedauerlich, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien nicht von höheren Energieeinsparungen begleitet wurde. Wird im Verkehrssektor beispielsweise 12% weniger Kraftstoff verbraucht, so spart dies mehr Energie ein, als alle bestehenden Windkraftanlagen insgesamt produzieren¹⁰

Einige weitere Zahlen: Im Jahresmittel beträgt gegenwärtig die tatsächliche Leistung einer durchschnittlichen Windkraftanlage 327 Kilowatt¹¹. Zum Vergleich: Die in Deutschland zugelassenen PKW haben im Mittel eine Motorleistung von 108 Kilowatt¹². Bei 30 Prozent Wirkungsgrad¹³ des typischen Automotors hat ein PKW unter Volllast also einen Energieverbrauch von 360 Kilowatt, der vergleichbar ist mit der mittleren Leistung einer einzigen Windkraftanlage. Das heißt, dass ein einzelnes Windrad im Mittel gerade einmal einen PKW im Straßenverkehr fahren lassen kann (unter Volllast), vom LKW ganz zu schweigen. Daraus folgt, dass Elektroautos ihren Strom auf lange Sicht praktisch ganz aus konventionellen Kraftwerken mit fossilen Brennstoffen beziehen müssen. Der grüne Strom kann eben nur einmal genutzt werden, und muss bereits für den Ersatz der Kernkraft herhalten. Der oft zitierte (etwa dreifache) Effizienzgewinn des Elektromotors gegenüber dem Benzinmotor wird deshalb wieder verloren durch die geringe Effizienz (etwa 30%) der fossilen Stromerzeugung. Daher werden Elektroautos praktisch nichts zur Energiewende beitragen.

Noch einige weitere nützliche Zahlen zur Sonnen- und Bioenergie: Eine typische Photovoltaikanlage liefert über das Jahr gemittelt 15 Watt je Quadratmeter Solarzellen¹⁴, bei starkem Sonnenschein gelegentlich auch mal 100 Watt. Dazu zwei Vergleiche: Ein Haarfön hat typisch 2000 Watt. Und das Heidelberger Solarschiff „Neckarsonne“ verbraucht bei voller Fahrt 54000 Watt (54 Kilowatt)¹⁵, hat aber nur 20 Quadratmeter Solarzellen. Daher bezieht das Solarschiff fast alle Energie aus dem öffentlichen Stromnetz. Energetisch genutzte Biomasse schließlich liefert 1,5 Watt je Quadratmeter Ackerfläche¹⁶.

Wenn wir Wind- und Sonnenenergie miteinander vergleichen, so ist, anders als oft behauptet, das weltweite Potenzial der Sonnenenergie mehr als hundertmal größer als das Potential der Windkraft¹⁷. Dies liegt daran, dass auch der Wind auf der Erde durch die Sonneneinstrahlung getrieben wird. Der Anteil der Sonnenenergie, die in Wind umgesetzt wird, ist aber klein – Wind entsteht lediglich durch Temperaturunterschiede. In den südlichen Wüsten der Erde ist die Sonneneinstrahlung dreimal größer als bei uns, und es stehen große Flächen zu

Verfügung. Auch wenn Projekte zum Strom aus der Wüste momentan wegen politischer Unsicherheiten und anderer Investitionsrisiken nur schwer durchsetzbar sind¹⁸, so stellen sie auf lange Sicht eine interessante Energiequelle dar.

Eine Studie aus jüngerer Zeit (Fraunhofer) kommt zu dem Schluss, dass man bis 2050 mit einem optimierten Energiemix den klimaschädlichen Kohlendioxid-Ausstoß um 95%, d.h. auf ein Zwanzigstel verringern kann, bei unverminderter Verkehrsleistung. Diese Planungen sind wenig realistisch, da zur Stromerzeugung im Mittel über Stadt und Land alle anderthalb Kilometer ein Windrad erstellt werden müsste (alle zwei Kilometer nach vollständigem "Repowering" mit 3-Megawatt-Anlagen), und zusätzlich Solarzellen über eine Fläche von mehr als tausend Quadratkilometern¹⁹.

Das Problem des mit Tageszeit und Wetter schwankenden Angebots an Wind- und Sonnenenergie²⁰ soll nach dieser Studie durch Energiespeicher (Speicherung als Wärme und als chemische Energie) und zeitliche Anpassung des Energieangebots gelöst werden. Nach einer anderen Studie (Agora²¹) soll dies stattdessen durch Anpassung der Nachfrage geschehen. In der Wissenschaft gibt es starke Vorbehalte zur Umsetzbarkeit dieser Vorschläge²², insbesondere fällt auf, dass Fraunhofer anscheinend zu beliebigen politischen Vorgaben passende Szenarien produzieren kann. Allerdings ist bis 2050 noch geraume Zeit, und man sollte den Erfindungsgeist des Menschen und die soziale Toleranz für Einschränkungen nicht unterschätzen.

Als Fazit lässt sich festhalten: Deutschland hat einen ersten Schritt zu einer Umstellung seiner Energieversorgung auf erneuerbare Energiequellen getan. Das Erreichte fällt aber sehr bescheiden aus, gemessen am Gesamtziel einer weitgehend von fossilen Energieträgern unabhängigen Energieversorgung unseres Landes. Es sind weitaus größere Anstrengungen über einen langen Zeitraum nötig, um eine Energiewende zu schaffen. Wir wollen aus unseren Daten keine Handlungsanweisung herleiten, aber um im demokratischen Prozess die richtigen Entscheidungen zu treffen ist es wichtig, die korrekten Zahlen zu kennen und nicht in kurzatmige Hektik zu verfallen. Ein Zweckoptimismus, der längerfristig zu Enttäuschungen und in deren Folge zu einem Nachlassen unserer Anstrengungen führt, ist kontraproduktiv, gemessen an den großen Herausforderungen der Zukunft.

Prof. Dr. Dr. h.c. Dirk Dubbers, Prof. Dr. Johanna Stachel, Prof. Dr. Ulrich Uwer,
Physikalisches Institut der Universität Heidelberg

-
- ¹ BMWi Tabelle 7, den Stromanteil haben wir herausgerechnet
BMW = Bundesministerium für Wirtschaft und Energie "Zahlen und Fakten, Energiedaten"
<http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>
Letzte Aktualisierung: 05.05.2017.
- ² BMWi Tabelle 4: 1,8% "Sonstige" wurde zu "Mineralöl" (34,0%) hinzugezählt,
-1,4% "Außenhandelsaldo Strom" wurde weggelassen.
Die erneuerbaren Energien sind weiter aufgeschlüsselt in BMWi Tabelle 20
- ³ http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien/energie_2010.pdf
Kapitel 7 Wasserkraft
- ⁴ <https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/ake-tagungsband/tagungsband-ake-2013.pdf> Seite 102
- ⁵ http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=9, sowie
BMW Tabellen 5 bis 7a und 20 bis 23
- ⁶ BMWi Tabelle 8a Anzahl der Windkraftanlagen
Da nicht alle WKAs neu sind, gelten die genannten Zahlen erst nach "Repowering" alter Anlagen
- ⁷ BMWi Tabelle 1 Anzahl der Haushalte
- ⁸ BMWi Tabelle 8 Primärenergieverbrauch
- ⁹ BMWi Tabelle 22 Bruttostromerzeugungskapazität, Bruttostromerzeugung
- ¹⁰ BMWi Tabelle 6a Endenergie, Verkehr Kraftstoff, Tabelle 20 Primärenergie
BMWi Tabelle 22 Bruttostromerzeugung, Tabelle 22a Nettostromerzeugung
- ¹¹ BMWi Tabelle 22 Bruttostromerzeugung, Tabelle 8a Anzahl der Windkraftanlagen
- ¹² <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/12937/umfrage/entwicklung-der-motorleistung-von-neuwagen/>
- ¹³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad> Kap. 5 Beispiele:
- ¹⁴ Mittelwert ist errechnet aus drei verschiedenen unabhängigen Quellen:
<http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf> Seite 41,
http://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaik_in_Deutschland Kap. 1 Flächenabschätzungen,
<http://www.photovoltaiksolarstrom.de/photovoltaiklexikon/solarertrag-staedte>.
- ¹⁵ <http://www.hdsolarschiff.com>
<http://www.binnenschifferforum.de/forum/showthread.php?36432-Neckarsonne-FGS-04803000>
- ¹⁶ <https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/ake-tagungsband/tagungsband-ake-2014.pdf>, p. 20,
Kap. 1.2
- ¹⁷ A. Kleidon, "Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth",
Physics of Life Reviews Vol. 7, Issue 4, p. 424 (2010), doi:10.1016/j.plrev.2010.10.002
darin 5.1 „Solar radiation“, p. 444, und Tafel 3.
- ¹⁸ <http://de.wikipedia.org/wiki/Desertec>
- ¹⁹ <http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-energiesystem-deutschland-2050.pdf>
für 2050: Abb. 11, für 2013: BMWi Tabelle 22 Bruttostromerzeugung.
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-was-kostet-die-energiegewende.pdf>
- ²⁰ http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/physik_konkret/el_pk18.html
http://ftf.fjfi.cvut.cz/CFS-OSE/docs/Report_Wagner.pdf, Seite 2, Zusammenfassung
- ²¹ http://www.agora-energieun.de.de/fileadmin/downloads/publikationen/Studien/Speicher_in_der_Energiegewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf
- ²² Carl Christian von Weizsäcker: Entscheidungszwänge in der Weltenergieversorgung, S. 179 in:
<https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/ake-tagungsband/tagungsband-ake-2012.pdf>
Hermann Pütter: Die Zukunft der Stromspeicherung, Ausblick S. 85 in:
<https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/ake-tagungsband/tagungsband-ake-2013.pdf>