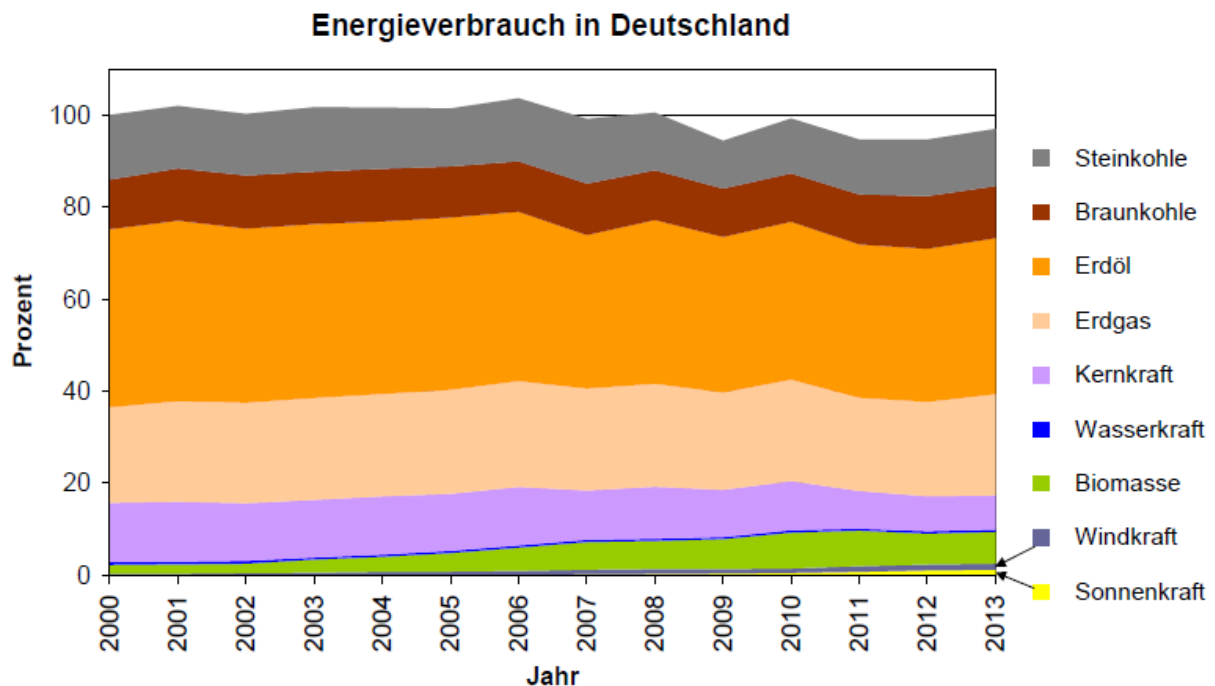


## Findet eine Energiewende statt?

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 zum größten Teil in Raum- und Industriewärme (50%) und in mechanische Energie (30%), letztere hauptsächlich in den Straßenverkehr<sup>1</sup>. 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. Windkraft und Photovoltaik zusammen (s. Pfeile) deckten 2013 zwei Prozent des Energiebedarfs (Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie<sup>2</sup>).*

Unsere Abbildung 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 90% 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 auszubauen<sup>3</sup>. Die Biomasse in grün hat mit heute 7% Anteil stark zugenommen, gilt aber wegen ihrer Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion als weitgehend ausgereizt<sup>4</sup>. Die Windkraft in graublau trägt 1,2% bei. Photovoltaik und Naturwärme (Wärmepumpen, Solarthermie, Geothermie), in gelb am unteren Rand der Abbildung, decken 0,8% und 0,4% des Energieverbrauchs ab. Zusammen ergeben die Erneuerbaren etwas mehr als 10%, wobei die Biomasse (Holz, Klärgas, Biodiesel) stark dominiert.

Die Bilanz der neuen Energieträger verbessert sich etwas, wenn wir nicht die (z.B. in die Kraftwerke eingespeiste) Primärenergie betrachten, sondern die Energie, die tatsächlich beim Verbraucher ankommt. Bei dieser Endenergie haben z.B. Wind und Photovoltaik zusammen statt der genannten 2,1% einen etwas höheren Anteil von 2,6%, da ihre Umwandlungsverluste geringer ausfallen als bei den herkömmlichen Energieträgern<sup>5</sup>.

Die 1,2% für die Windenergie lassen uns stutzen. Beliefert nicht eine einzige neue Windkraftanlage mehr als tausend Haushalte mit Strom, wie man landauf landab hört? Bei den heute gut zwanzigtausend installierten Windrädern<sup>6</sup> sollten demnach bald mehr als 20 Millionen Haushalte in Deutschland versorgt sein<sup>7</sup>. Ist damit die Energiewende nicht schon fast geschafft, und widerlegt dies nicht den in der Abbildung gezeigten Befund? Nein, denn selbst wenn alle Haushalte in Deutschland ihren Strom aus erneuerbaren Quellen bezögen, so wären erst 3,6% der Energiewende geschafft.

Kurze Rechnung hierzu: der Stromverbrauch der privaten Haushalte macht 26% des gesamten Stromverbrauchs aus, und dieser wiederum 14% des gesamten Energieverbrauchs<sup>8</sup>, und 26% von 14% sind eben nur 3,6%. Der Beitrag der Windkraft zur Energiewende sieht hier nur so groß aus, da er in Einheiten der kleinen "Münze" Haushaltsstrom angegeben wird. Auch die Meldung, dass bereits ein Viertel unseres Stromes aus erneuerbaren Quellen stammt, widerspricht nicht unserer Abbildung. Die Windenergie trägt 8,6% zur Stromerzeugung bei<sup>9</sup>, und 14% davon ergibt wieder den genannten 1,2% Anteil der Windenergie an der Gesamtenergie.

Zudem wird häufig statt der tatsächlich produzierten Leistung die installierte oder Nennleistung von Sonnen- und Windkraftanlagen angegeben. Dies ist die maximale Leistung, bei der z.B. die Windräder sich bei Sturm automatisch abschalten. Die installierte Leistung mag den verantwortlichen Ingenieur interessieren, für die Energiebilanz ist sie nicht die entscheidende Größe. Die tatsächlich im ganzjährigen Betrieb im Mittel produzierte Leistung einer Windkraftanlage ist nur ein Sechstel, die einer Photovoltaikanlage ein Neuntel der installierten Leistung<sup>10</sup>, Insgesamt lassen sich mit etwas Geschick statt der tatsächlichen 1,2% beliebige Erfolgszahlen zur Windenergie generieren.

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 8% weniger Kraftstoff verbraucht, so spart dies mehr Energie ein, als alle bestehenden Windkraftanlagen insgesamt produzieren<sup>11</sup>.

Einige weitere Zahlen: Im Jahresmittel beträgt gegenwärtig die tatsächliche Leistung einer durchschnittlichen Windkraftanlage 250 Kilowatt<sup>12</sup>. Zum Vergleich: Ein mittlerer in Deutschland zugelassener PKW hat eine Motorleistung von 101 Kilowatt<sup>13</sup>. Bei wohlwollend angesetzten 40% Wirkungsgrad<sup>14</sup> hat er unter Volllast einen Energieverbrauch von 252 Kilowatt. Eine typische Photovoltaikanlage hingegen liefert über das Jahr gemittelt 15 Watt je Quadratmeter Solarzellen<sup>15</sup>. Zum Vergleich: Das Heidelberger Solarschiff verbraucht bei voller Fahrt 54 Kilowatt<sup>16</sup>. Energetisch genutzte Biomasse schließlich liefert 1,5 Watt je Quadratmeter Ackerfläche<sup>17</sup>.

Wenn wir Wind- und Sonnenenergie miteinander vergleichen, so ist, anders als oft geäußert, das weltweite Potenzial der Sonnenenergie mehr als hundertmal größer als das Potential der Windkraft<sup>18</sup>. 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<sup>19</sup> als bei uns, und es stehen große Flächen zu Verfügung. Auch wenn Projekte zum Strom aus der Wüste momentan nur schwer durchsetzbar sind<sup>20</sup>, so stellen sie auf lange Sicht eine interessante Energiequelle dar. Auch die im Folgenden genannten Untersuchungen können Anlass zu Optimismus geben.

Eine Studie aus jüngerer Zeit (Fraunhofer) kommt zu dem Schluss, dass man bis 2050 mit einem optimierten Energiemix den klimaschädlichen Kohlendioxid-Ausstoß um 80%, d.h. auf ein Fünftel verringern kann. Diese Planungen sind recht ehrgeizig, da hierzu im Mittel über Stadt und Land alle zwei bis drei Kilometer ein Windrad erstellt werden muss, sowie um die tausend Quadratkilometer Solarzellen<sup>21</sup>. Das Problem des mit Tageszeit und Wetter schwankenden Angebots an Wind- und Sonnenenergie<sup>22</sup> soll durch Wärmespeicher und zeitliche Anpassung des Energieangebots gelöst werden, nach einer anderen Studie (Agora<sup>23</sup>) durch Anpassung der Nachfrage. In der Wissenschaft gibt es gelegentlich Vorbehalte zur Umsetzbarkeit dieser Vorschläge<sup>24</sup>, allerdings ist bis 2050 noch geraume Zeit, und man sollte den Erfindungsgeist des Menschen und die soziale Toleranz für Einschränkungen nicht unterschätzen.

Deutschland hat einen ersten Schritt zu einer Umstellung seiner Energieversorgung auf erneuerbare Energiequellen getan. Der bisherige Ausbau der Wind- und Solarenergie ist augenfällig, das bisher 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 die 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

- 
- <sup>1</sup> BMWi Tabelle 7, den Stromanteil haben wir herausgerechnet  
BMW = Bundesministerium für Wirtschaft und Energie "Zahlen und Fakten, Energiedaten"  
<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/energie-daten-gesamt.property=blob.bereich=bmwi2012.sprache=de.rwb=true.xls>, Letzte Aktualisierung: 21.10.2014.
- <sup>2</sup> BMWi Tabelle 4: 1,7% "Sonstige" wurde zu "Mineralöl" (33,6%) hinzugezählt, -0,9% "Außenhandelsaldo Strom" wurde weggelassen.  
Die erneuerbaren Energien sind weiter aufgeschlüsselt in BMWi Tabelle 20, siehe auch Kapitel 4 in <http://de.wikipedia.org/wiki/Energieverbrauch>.
- <sup>3</sup> [http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien/energie\\_2010.pdf](http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien/energie_2010.pdf), Kap. 7 Wasserkraft
- <sup>4</sup> <https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/ake-tagungsband/tagungsband-ake-2013.pdf> Seite 102
- <sup>5</sup> [http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=9](http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=9), sowie BMWi Tabellen 5 bis 7a und 20 bis 23
- <sup>6</sup> BMWi Tabelle 8a Anzahl der Windkraftanlagen  
Da nicht alle WKAs neu sind, gelten die genannten Zahlen erst nach "Repowering" alter Anlagen
- <sup>7</sup> BMWi Tabelle 1 Anzahl der Haushalte
- <sup>8</sup> BMWi Tabelle 21 Inlandsverbrauch Haushalte + Tabelle 8 Primärenergieverbrauch
- <sup>9</sup> BMWi Tabelle 20 Anteil der Windkraft am gesamten Stromverbrauch
- <sup>10</sup> BMWi Tabelle 22 Bruttostromerzeugungskapazität, Bruttostromerzeugung
- <sup>11</sup> BMWi Tabelle 6a Endenergie, Verkehr Kraftstoff + Tabelle 20 Primärenergie  
BMWi Tabelle 22 Bruttostromerzeugung + Tabelle 22a Nettostromerzeugung
- <sup>12</sup> BMWi Tabelle 22 Bruttostromerzeugung + Tabelle 8a Anzahl der Windkraftanlagen
- <sup>13</sup> <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/12937/umfrage/entwicklung-der-motorleistung-von-neuwagen/>
- <sup>14</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad> Kap. 5 Beispiele
- <sup>15</sup> Mittelwert errechnet aus drei verschiedenen 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](http://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaik_in_Deutschland) Kap. 1 Flächenabschätzungen,  
<http://www.photovoltaiksolarstrom.de/photovoltaiklexikon/solarertrag-staedte>.
- <sup>16</sup> <http://www.hdsolarschiff.com>  
<http://www.binnenschifferforum.de/forum/showthread.php?36432-Neckarsonne-FGS-04803000>
- <sup>17</sup> <https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/ake-tagungsband/tagungsband-ake-2014.pdf>, p. 20, Kap. 1.2
- <sup>18</sup> 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.pprev.2010.10.002 darin 5.1 „Solar radiation“, p. 444, und Tafel 3.
- <sup>19</sup> [http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/vortraege-tag-der-offenen-tuer/ise-platzer-110710-solarthermische-kraftwerke.pdf/at\\_download/file](http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/vortraege-tag-der-offenen-tuer/ise-platzer-110710-solarthermische-kraftwerke.pdf/at_download/file), vierte Folie
- <sup>20</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Desertec>
- <sup>21</sup> <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.
- <sup>22</sup> [http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/physik\\_konkret/el\\_pk18.html](http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/physik_konkret/el_pk18.html)  
[http://ftf.fjfi.cvut.cz/CFS-OSE/docs/Report\\_Wagner.pdf](http://ftf.fjfi.cvut.cz/CFS-OSE/docs/Report_Wagner.pdf), Seite 2, Zusammenfassung
- <sup>23</sup> [http://www.agora-energiewende.de/fileadmin/downloads/publikationen/Studien/Speicher\\_in\\_der\\_Energiewende/Agora\\_Speicherstudie\\_Web.pdf](http://www.agora-energiewende.de/fileadmin/downloads/publikationen/Studien/Speicher_in_der_Energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf)
- <sup>24</sup> 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>