

UMWELTMEDIZIN

Baustellen der Energiewende: Die Integration von Photovoltaik und Windenergie ins Stromnetz

Hans-Jürgen Leist, Hannover

Vorwort von Thomas Lob-Corzilius, Osnabrück: Was hat die pädiatrische Umweltmedizin mit den „Baustellen der Energiewende“ zu tun, wird sich mancher Kinder- und Jugendarzt fragen. Reicht es nicht, Folgendes zu wissen? Die erneuerbaren Energien werden durch das EEG – das Erneuerbare-Energien-Gesetz – gefördert, weil sie mit dem Ziel angetreten sind, die CO₂-Emissionen zu reduzieren, damit die Klimakatastrophe zu verhindern und auch die beim Verbrennen fossiler Energien entstehenden Luftschadstoffe wie Feinstaub und Stickoxide zu vermindern. Dies wiederum wird sich ja auf die Lungengesundheit aller Menschen, insbesondere aber unserer Kinder, nur positiv auswirken. Und nicht zuletzt ist es auch die Absicht, die Hochrisikotechnik der Atomenergie – siehe Tschernobyl und Fukushima – in einem so dicht besiedelten Land ein für alle Mal zu beenden.

Um diese Ziele zu erlangen, reichen jedoch gute Absichten nicht aus, denn nicht selten verkehren sie sich in ihr Gegenteil oder lassen neue Probleme entstehen. Also ist zugleich ein grundlegendes Verständnis der Zusammenhänge erforderlich.

Hans-Jürgen Leist hat als langjähriger Sachverständiger den Versuch unternommen, die Komplexität des Energieumbaus in Deutschland so zu erklären, dass ihn auch „Energie-Laien“ nachvollziehen können. Er wird das Thema in zwei größeren Abschnitten darstellen: Der erste Teil befasst sich mit dem aktuellen Status quo, der zweite Teil in einem der nächsten Hefte mit den zukünftigen Problemzonen der Stromwende. In ihm werden neben problematischen ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen der erneuerbaren Energien auch direkte und indirekte gesundheitliche Effekte dargestellt.

Vorbemerkung

Die Energiewende ist ein Mammutprojekt und zugleich noch für Jahrzehnte eine Großbaustelle. Ein Grundproblem der Energiewende im Strombereich besteht dabei darin, dass ein mehr als 100 Jahre gewachsenes und optimiertes Energiesystem nun durch ein zweites Energiesystem ergänzt wird, welches das alte System irgendwann und irgendwie ablösen soll.¹ Als wäre es nicht schwer genug, wurde diese Herkulesaufgabe noch durch problematische Ausgestaltungen erschwert, wie beispielsweise:

- I einem in vielen Bereichen ungeplanten Aufbau des erneuerbaren Energiesystems – es wird weitgehend der Privatinitiative von Bürgern, Landwirten und Investorengruppen überlassen, wo,

wann, welche und in welchem Umfang neue Anlagen errichtet werden, I der Einführung eher planwirtschaftlich gebildeter Energiepreiselemente in ein marktwirtschaftliches System der Preisbildung am Strommarkt, ohne ausreichend auf Inkompatibilitäten und mögliche negative Auswirkungen zu achten, I einer fehlenden Abstimmung zwischen dem Ausbau der erneuerbaren Energien und dem CO₂-Emissionshandelsystem der Europäischen Union.

Im Mittelpunkt des Aufsatzes stehen Photovoltaik und Windenergie, da bei diesen in Zukunft die wesentlichen Zuwächse erfolgen sollen. Ein weiterer Ausbau der Wasserkraft ist kaum möglich, eine Aus-

weitung der teuren Biomassenutzung ist nur noch in einem geringen Umfang vorgesehen und wäre zudem aus einer Vielzahl von Gründen („Tank oder Teller“) sehr problematisch.

Der Autor bemüht sich um einen faktenorientierten Blick auf ein sozusagen „vermintes“ Gelände, prallen hier doch zahlreiche Interessen, emotionale Einstellungen und Lobbygruppen aufeinander.

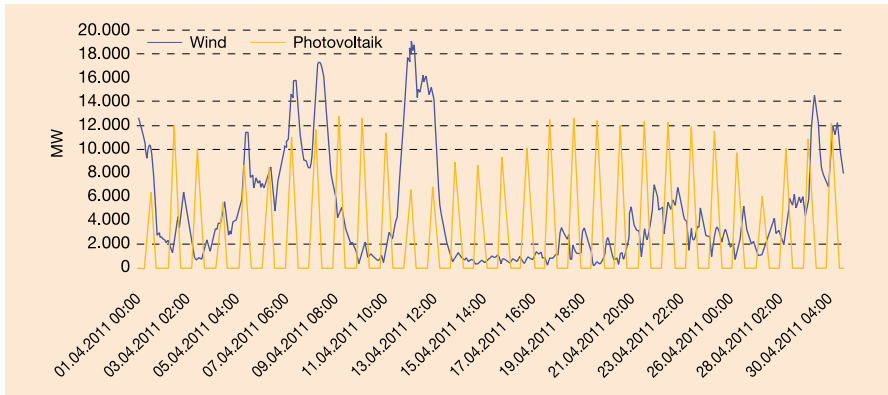
¹ Diese Formulierung ist bewusst so gewählt, da umfangreiche Gutachten zur Entwicklung des Stromsystems bis 2050 oft schon nach wenigen Jahren als überholt gelten müssen. Vgl. hierzu beispielsweise: Sachverständigenrat für Umweltfragen (2011): Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung. Berlin, S. 33 – dort sind viel zu hohe Ausbauraten für Wind Offshore unterstellt worden.

Ein solches Projekt wie die Energiewende kann jedoch nur gelingen, wenn problematische Entwicklungen frühzeitig angesprochen und diskutiert werden.

Die Volatilität der Erneuerbaren Energien

Windenergie und Photovoltaik zeichnen sich durch eine variierende und von mehreren Einflüssen abhängige Stromproduktion aus. So können bezüglich der **Windenergie** windschwache und windstarke Jahre auftreten. Ausgeprägte Volatilitäten sind das ganze Jahr über vorhanden. Schon 2011 konnte sich die Produktion innerhalb einer Stunde um rund 1.000 Megawatt (MW) verändern (Abb. 1). Zum Vergleich: Ein großes fossiles Kraftwerk hat eine Leistung von rund 800 MW. Abbildung 1 zeigt auch, dass trotz des großen Gebiets kein Ausgleich der Schwankungen („irgendwo weht immer Wind“) erfolgt. Im Winterhalbjahr ist die Stromproduktion aus Windenergie in etwa doppelt so hoch wie im Sommer. Dies ist positiv zu werten, da der Strombedarf im Winter auch höher ist. An der Küste ist die mittlere Windge-

Abbildung 1. Schwankungen bei der Einspeiseleistung von Wind- und Sonnenenergie in Megawatt (MW) im April 2011 innerhalb der deutschen Regelzone (reicht von der Nordsee bis nach Südbayern) des Übertragungsnetzbetreibers TenneT



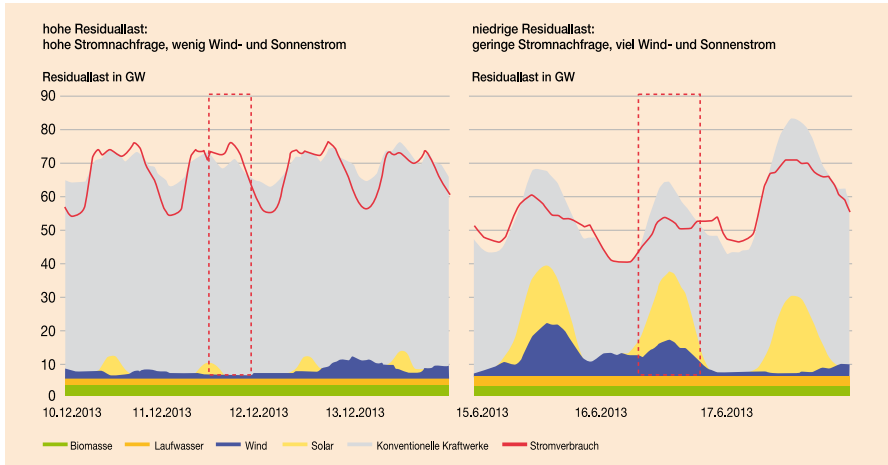
Quelle: Weltenergieat 2012 [14]

windigkeit meist doppelt so hoch wie im Binnenland, generell steigt sie mit der Höhe an. Da die Leistung einer Windkraftanlage bei einer Verdopplung der Windgeschwindigkeit um das 8-Fache steigt, ist eine genaue Standortanalyse wichtig.

Bei **Solarstrom** sind die Volatilitäten vor- hersehbarer. Der Mittelwert der jährlichen

Bestrahlung in Deutschland (Potsdam) beträgt rund 1.000 kWh/(m²-a). Im Normalfall betragen die Abweichungen zwischen den Jahren plus/minus 60 kWh/(m²-a) (vgl. auch Abb. 3) (vgl. hierzu und im Folgenden: <http://www.volker-quaschnig.de/klima2000/Kapitel4.html> [10.1.2015]). Erhebliche Unterschiede bestehen zwischen den Jahreszeiten. Während im Dezember in Potsdam eine mittlere Monatssumme der Bestrahlung von ca. 14 kWh/(m²-a) zu erwarten ist, beträgt dieser Wert im Juli mit 157 kWh/(m²-a) immerhin mehr als das 11-Fache. Darüber hinaus sind regionale Unterschiede festzustellen: Die mittlere Einstrahlung ist im Süden Deutschlands rund 10–20 % höher als im Norden.

Abbildung 2. Strombedarf und Stromproduktion in Deutschland zu unterschiedlichen Zeiten im Jahr 2013. Einige Unterschiede zwischen Produktion und Verbrauch (s. die roten Kästchen) müssen durch Stromimporte oder -exporte ausgeglichen werden.



Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – BMWi (2014): Ein Strommarkt für die Energiewende. Berlin, S. 15 [2]

Auswirkungen der Volatilität auf die Stromversorgung

Den Einfluss der beiden erneuerbaren Energien auf die Stromversorgung verdeutlicht Abbildung 2. Die Residuallast oder Restlast bezeichnet die in einem Stromnetz nachgefragte Leistung (Last) abzüglich des Anteils volatiler Einspeisung der Erneuerbaren. Die Residuallast stellt also den Strombedarf dar, der von regelbaren Kraftwerken gedeckt werden

muss. Die Angabe erfolgt hier in Gigawatt (GW); ein GW entspricht dabei 1.000 MW. Die für die sichere Stromversorgung in Deutschland jederzeit benötigte Leistung liegt dabei zwischen minimal rund 40 GW (Sonntag im Sommer) und maximal 80 GW (Winterabend).

Die **konventionellen Kraftwerke** sind nun von zwei Seiten mit Schwankungen konfrontiert, deren Dynamik immer extremer wird. Im Jahr 2020 kann sich die erforderliche Residuallast wahrscheinlich innerhalb von 15 Minuten schon um plus/minus 5.000 MW ändern [5]. Um derartige Lastwechsel zu managen, müssen etwa 10–15 Großkraftwerke mit rund 800 MW Leistung am Netz sein. Das spezielle Problem der Stromversorgung besteht ja darin, dass Stromangebot und Stromnachfrage sekundengenau ausgeglichen werden müssen – daher ist nicht nur die Jahresproduktion an Strom wichtig, sondern mehr noch die jederzeit verfügbare und

regelbare Leistung. Ist „zu wenig“ oder „zu viel“ Strom im Netz, gibt es Probleme mit der Spannung, der Frequenz oder anderen Größen (z. B. Blindleistung), die zu einem Zusammenbruch des Systems, einem „Blackout“, führen können. Im Allgemeinen wird die Komplexität des Stromsystems unterschätzt.

Jahresvolllaststunden und Verfügbarkeit der unterschiedlichen Anlagen

Die Jahresvolllaststundenzahl ist ein errechneter Wert – die Jahresproduktion an Strom, z. B. in Megawattstunden (MWh), wird dabei durch die maximale Leistung (MW) der Anlagen geteilt. Das Jahr hat 8.760 Stunden, und konventionelle Kraftwerke können in der Regel (bis auf bestimmte Wartungsarbeiten) das ganze Jahr rund um die Uhr und mit maximaler Leistung Strom produzieren – dies wird an der hohen Jahresvolllaststundenzahl von Kern- und Braunkohlekraftwerken

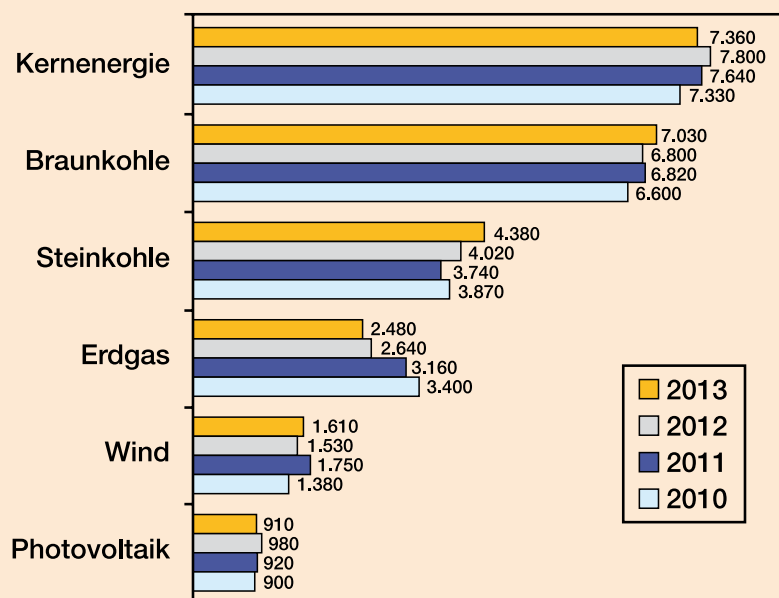
deutlich. Gas- und Steinkohlekraftwerke werden hingegen meist nur zu Spitzenbedarfszeiten eingesetzt, daher ist der Wert bei ihnen geringer. Bei den Erneuerbaren Energien entspricht die Jahresvolllaststundenzahl hingegen ihrer maximalen Produktion, da ihr Strom aufgrund des Vorrangs bei der Einspeisung ins Netz immer genutzt werden muss. Abbildung 3 verdeutlicht nicht nur die geringe Jahresvolllaststundenzahl der Erneuerbaren Energien, sondern auch deren witterungsbedingten Schwankungen zwischen den Jahren.

Um die Bedeutung der niedrigen Jahresvolllaststundenzahl von Wind und Photovoltaik (PV) zu konkretisieren, seien folgende Daten genannt: Ende 2013 betrug die installierte Leistung der Windenergieanlagen 34,4 GW, die der PV-Anlagen 34,7 GW; zusammen also gut 69 GW. Würde diese Leistung rund um die Uhr zur Verfügung stehen, so würden in Deutschland kaum noch andere Kraftwerke benötigt. Doch die installierte Gesamtleistung dieser Anlagen von 69 GW konnte zu keiner Zeit erzielt werden, die höchste Stromspeisung von Wind und PV betrug 35 GW und war im Jahr 2013 für 3 Stunden verfügbar. Ansonsten waren folgende Leistungen zu verzeichnen (vgl. hierzu und im Folgenden [9]):

- > 20 GW in 755 h von 8760 h – also rund 9 % des Jahres,
- > 10 GW etwa 35 % des Jahres,
- > 5 GW rund 60 % des Jahres,
- < 5 GW rund 40 % des Jahres.

Die geringste Leistung, die im ganzen Jahr zur Verfügung stand, waren 0,1 GW. Dies zeigt die Problematik auf: Windenergie und PV können aufs Jahr bezogen zwar beachtliche Strommengen zur Verfügung stellen (s. unten), jedoch kaum eine gesicherte Leistung. Diese Problematik würde sich auch bei einer Verdopplung der Anlagen und deren Leistung auf 138 GW nicht

Abbildung 3. Jahresvolllaststundenzahl unterschiedlicher Kraftwerke – bezogen auf alle aktiven Anlagen im deutschen Netz



groß verändern – die oben genannten Werte würden sich lediglich verdoppeln. Inwieweit die Nutzung von Offshore-Windenergie hier eine Verbesserung bringt, bleibt abzuwarten – die Anlagen müssen ihre „Wellentaufe“ erst noch bestehen. Prognosen gehen davon aus, dass selbst im Jahr 2050, wenn rund 80 % des Stroms von Erneuerbaren Energien produziert werden soll, noch eine hohe Kapazität an fossilen Kraftwerken notwendig ist, nämlich rund 60 GW [8] – dies entspricht etwa 75 Großkraftwerken in Deutschland. Auf welche Weise dann aber die auftretenden hohen Stromüberschüsse bewältigt werden sollen, ist noch weitgehend offen.

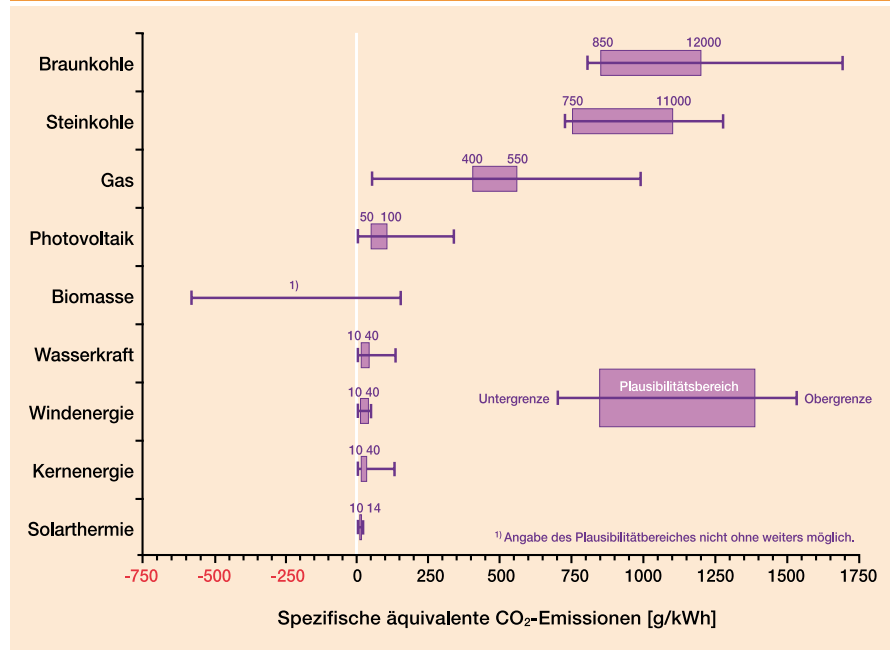
Beitrag von Photovoltaik und Windenergie zum Klimaschutz und zur Umweltentlastung

Die Stromproduktion in Deutschland ist derzeit für rund 40% der CO₂-Emissionen verantwortlich. Im Jahr 2000 betragen die CO₂-Emissionen aus der Stromproduktion 319 Mio. t, im Jahr 2013 waren es etwa 317 Mio. t. Im gleichen Zeitraum stieg die Bruttostromerzeugung von 577 Terawattstunden (TWh) auf 633 TWh an; davon wurden – abzüglich Exporte, Verluste sowie Eigenverbrauch der Kraftwerke – rund 528 TWh im Inland genutzt. Die Haushalte hatten daran einen Anteil von rund 26 % [4].

Im Jahr 2000 betrug die Stromproduktion aus Kernkraft etwa 170 TWh. 2013 produzierten die nun 9 Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 12 GW noch rund 97 TWh, also 73 TWh weniger. 2013 konnten Wind und PV ca. 83 TWh erzeugen, dies entspricht einem Wert von rund 13% der Bruttostromerzeugung in Deutschland. Die Produktion von Wind- und Solarstrom muss also nochmals verdoppelt werden, um den Ausstieg aus der Kernenergie (Ende 2022) zu kompensieren.

Allerdings ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass Strom aus Windkraft und

Abbildung 4. Vergleich der CO₂-Emissionsfaktoren unterschiedlicher Kraftwerke



Quelle: Wagner et al. 2007 [13]

PV keineswegs CO₂-frei ist, wie oft zu lesen ist. Vor allem Photovoltaikanlagen benötigen bei der Herstellung beträchtliche Energiemengen, die umgelegt auf die Kilowattstunde produzierten Stroms durchaus nennenswert sind (Abb. 4).

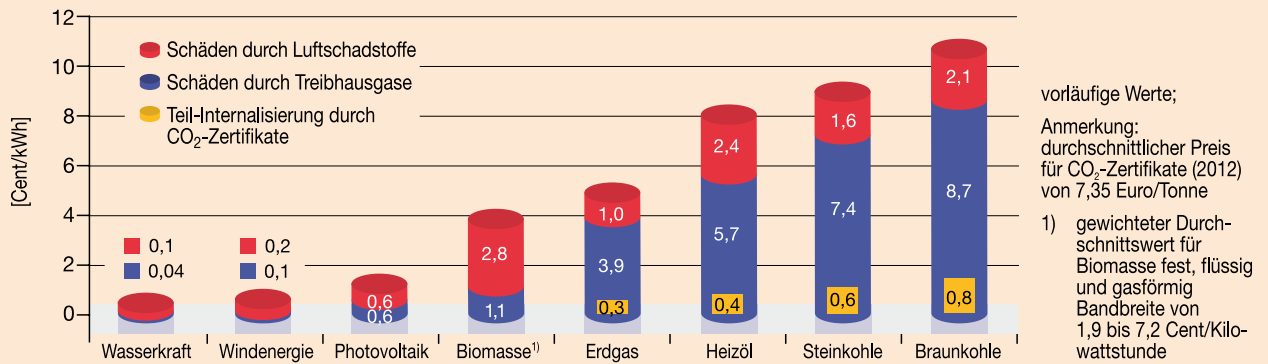
Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass der zunehmende Teillastbetrieb bei fossilen Kraftwerken zu Wirkungsgradverlusten in Höhe von 5–10% führen kann [15]. Zugleich erhöht die variierende Betriebsweise den Verschleiß der Kraftwerke, v. a. aufgrund der enormen Temperatur- und Druckschwankungen (bis 200 bar) in den Bauteilen. Dies ist wie bei einem Auto, welches nicht mehr mit konstanter Geschwindigkeit über die Landstraße fährt, sondern nun auf Kurzstrecken in der Stadt eingesetzt wird – Energieverbrauch und CO₂-Emissionen je Kilometer nehmen zu. In Folge der Wirkungsgradabnahme bei den fossilen Kraftwerken wird beispielsweise jede Kilowattstunde Windenergie mit zusätzlich rund 50 g CO₂ belastet [12].

Für die Photovoltaik dürfte eine ähnliche Größenordnung gelten. Unabhängig davon sind die Umweltauswirkungen von Windenergie und PV aber geringer als die der fossilen Kraftwerke – nicht nur aufgrund der niedrigeren CO₂-Emissionen, sondern auch im Hinblick auf Schäden durch Luftschadstoffe (vgl. hierzu [3]) (Abb. 5).

Kleine Ökonomie des Strommarkts und der Stromerzeugung

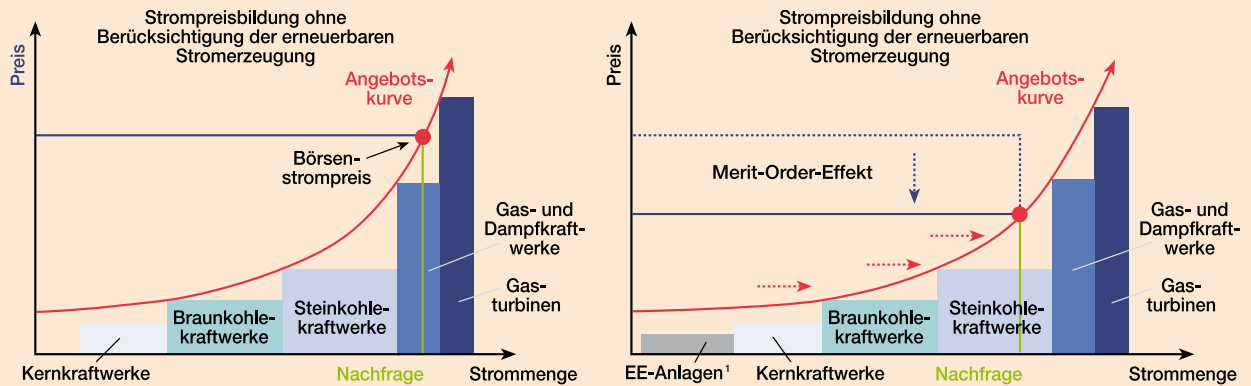
Die Preisbildung am Strommarkt funktioniert bisher so, dass die Kraftwerksbetreiber einen Tag im Voraus auf der Angebotseite melden, zu welchem Preis sie prognosegemäß welche Strommenge anbieten können. An der Strombörse in Leipzig (EEX) wird dann am Day-Ahead-Markt für jede Stunde des Folgetages ein einheitlicher Strompreis ermittelt. Die Preishöhe ergibt sich daraus, dass die teuerste Kraftwerksart, die noch nötig ist, um die Nachfrage in der jeweiligen Stunde zu decken, dann auch den Preis der günstigeren Kraftwerke bestimmt. Entschei-

Abbildung 5. Spezifische Schäden durch Luftschadstoffe und Treibhausgase in Cent pro Kilowattstunde Strom nach Energieträgern. Bei den Treibhausgasen wurden CO₂-Schadenskosten von 70 € je t CO₂ unterstellt – bei einem Mittelklassewagen würden umgerechnet etwa 120 € im Jahr anfallen



Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Erneuerbare Energien in Zahlen. Berlin 2013, S. 49 [1]. Werte wurden auf Basis der Auswertung von mehreren Studien gewonnen.

Abbildung 6. Schematische Darstellung der Preisbildung am Strommarkt und des Merit-Order-Effektes – ohne und mit Einbeziehung von Anlagen der Erneuerbaren Energien



Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Erneuerbare Energien in Zahlen. Berlin 2014, S. 33 [3]

dend für die Preisgebote der Kraftwerksbetreiber sind dabei die Grenzkosten eines Kraftwerks – bestimmt bei fossilen Kraftwerken v.a. durch die variablen Kosten und insbesondere die Brennstoffkosten. Je niedriger diese Kosten sind, desto eher erfolgt ein Markteintritt – die Merit Order kann somit als Reihenfolge der Grenzkosten angesehen werden. Nur wenn zumindest diese Grenzkosten durch den Preis gedeckt sind, lohnt sich ein Stromverkauf. Abbildung 6 stellt

diese Zusammenhänge auf der linken Seite dar.

Das Auftreten der Erneuerbaren auf den Markt führt nun zu folgender Entwicklung (s. rechte Seite der Abb. 6): Die Erneuerbaren verdrängen die Kraftwerke auf der linken Seite und schieben die ganze Abstufung nach rechts – letztlich aus zweierlei Gründen. Erstens muss die Stromproduktion der Erneuerbaren aufgrund des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

vergütet und auf jeden Fall abgenommen werden – und erscheint dann auch auf dem Markt. Zweitens haben Photovoltaik und Windstrom nur sehr geringe variable Kosten (Betriebskosten), also Grenzkosten von nahezu Null. Sie können daher alle anderen Kraftwerke verdrängen. Daraus resultieren wiederum zwei Effekte: Zum einen sinkt der Börsenstrompreis – so ist in den vergangenen 5 Jahren der Börsenpreis für Grundlaststrom von rund 6 Cent/kWh auf 4 Cent/kWh gefallen. Diese

Reduktion des Preises wird auch als Merit-Order-Effekt bezeichnet. Zum anderen werden dadurch Kraftwerke mit hohen variablen Kosten, wie z. B. Gas- und Dampfkraftwerke (GuD), aufgrund der relativ hohen Gaspreise aus dem Markt gedrängt. Hinzu kommt, dass die Spitzenlast in den Mittagsstunden der lichtreichen Jahreszeiten nun von der Photovoltaik bereit gestellt wird. Auch aus diesem Grund geht die Jahresvolllaststundenzahl bei den Gaskraftwerken beständig zurück (vgl. Abb. 3) – einige Gaskraftwerke wurden sogar komplett vom Netz genommen oder legen nun eine „Sommerpause“ ein.

Diese Effekte haben auch Auswirkungen auf die Nachbarländer. So werden in Österreich und in den Niederlanden ebenfalls Gaskraftwerke aus dem Markt gedrängt². Die Verdrängung der Gaskraftwerke durch die Erneuerbaren ist strukturell angelegt und war absehbar [10]. Wenn dies nicht erwünscht ist, müssten die Gaskraftwerke subventioniert werden oder der CO₂-Preis müsste enorm steigen. Beides würde den Strompreis nochmals erhöhen. Ein weiterer wirtschaftlicher Aspekt wird in Zukunft Probleme bereiten. Prinzipiell sind heutzutage alle konventionellen Kraftwerke zu einem variierenden Lastbetrieb in der Lage [11]. Moderne oder modernisierte

Braun- und Steinkohlekraftwerke können bis auf eine Mindestlast von rund 20–30% heruntergefahren werden und sind fast ebenso schnell wie Gaskraftwerke in der Lage, ihre Leistung zu senken oder zu steigern. Ein Problem besteht nun darin, dass die Kraftwerke lediglich auf Basis ihrer produzierten Kilowattstunden bezahlt werden – dies wird auch als „Energy-only-Markt“ bezeichnet. Dadurch geraten die konventionellen Kraftwerke aber in eine Kostenklemme: Die fixen Kosten (Personal, Abschreibungen etc.), die grob gerechnet rund 50% der Gesamtkosten betragen, müssen in Zukunft (bei Gaskraftwerken schon aktuell) auf immer weniger Jahresvolllaststunden bzw. Kilowattstunden verteilt werden. Auf Dauer ist dieses System nicht aufrecht zu erhalten.

In Zukunft muss auch die Vorhaltung der Kapazität der Leistung in irgendeiner Weise vergütet werden. Diese Problematik wird auch mit dem Begriff neues Strommarktdesign (z. B. Kapazitätsmärkte) umschrieben.

Fazit

Erneuerbare Energien weisen gegenüber konventionellen Energieträgern Umweltvorteile auf und produzieren schon beachtliche Strommengen. Die Integration

der volatilen Stromerzeugung dieser Energien in das bestehende konventionelle System dürfte aber immer schwieriger und kostspieliger werden. Derzeit ist noch nicht abzusehen, wann auf die Leistungsbereitstellung der fossilen Kraftwerke in einem nennenswerten Umfang verzichtet werden kann.

2 Anzengruber W. Interview mit ihm „Wir brauchen Kostenwahrheit“. LUX 05/2013: 8 f. (8–9) sowie Energie & Management 20.03.2014 „Im Schatten der deutschen Wende“. Zu Niederlanden: „Die Welt“ vom 7.1.2014 „Höchste Braunkohle-Stromproduktion seit 1990“ – online: <http://www.welt.de/123617102> (29.01.2015)

Weitere Informationen unter

- | <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/energiewende.html>
- | <http://www.agora-energiewende.de>

Dr. Hans-Jürgen Leist

Am Leineweher 29 | 30519 Hannover
mail@hans-juergen-leist.de

Dr. med. Thomas Lob-Corzilius

Kinderpneumologie, Allergologie, Umweltmedizin
Christliches Kinderhospital
Johannisfreiheit 1 | 49074 Osnabrück
thlob@uminform.de

Literatur

- 1 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013): Erneuerbare Energien in Zahlen. Berlin, 2013: 49
- 2 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – BMWi. Ein Strommarkt für die Energiewende. Berlin, 2014: 15
- 3 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – BMWi. Erneuerbare Energien in Zahlen. Berlin, 2014 (S. 33, S. 49)
- 4 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – BMWi. Gesamtausgabe der Energiedaten. Berlin, 2014
- 5 Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft – BDEW. Bewertung der Flexibilität von Stromerzeugungs- und KWK-Anlagen. Berlin, 2011: 17
- 6 Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft – BDEW. Kraftwerksplanungen und aktuelle ökonomische Rahmenbedingungen. Berlin, 2013: 21
- 7 Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft – BDEW: https://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Energiedaten (30.1.2015)
- 8 Deutsche Energie-Agentur – dena. Integration der erneuerbaren Energien in den deutschen/europäischen Strommarkt. Berlin, 2012: 4
- 9 Dyllong Y, Maaßen U. Beitrag von Wind- und Photovoltaik-Anlagen zu einer gesicherten Stromversorgung. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 11/2014: 43 (42–45)
- 10 Klobasa M, Sensfuß F, Ragwitz M. CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Jahr 2006 und 2007. Karlsruhe, 2009: 18
- 11 Lambertz J et al. Flexibilität von Kohle- und Gaskraftwerken zum Ausgleich von Nachfrage- und Einspeiseschwankungen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 7/2012: 19 f. (16–20)
- 12 Roth H et al. Windenergiebedingte CO₂-Emissionen konventioneller Kraftwerke. München, 2005: 69 f
- 13 Wagner H-J et al. CO₂-Emissionen der Stromerzeugung. BWK 10/2007: 50 (44–52)
- 14 Weltenergiemat. Energie für Deutschland 2012. Berlin 2012: 91
- 15 Wiese F. Auswirkungen der Offshore-Windenergie auf den Betrieb von Kohlekraftwerken in Brunsbüttel. Flensburg 2008: 64