ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Buchal, Christoph

Article

Die Energiewende verstehen

ifo Schnelldienst

Provided in Cooperation with:
Ifo Institute – Leibniz Institute for Economic Research at the University of Munich

Suggested Citation: Buchal, Christoph (2014) : Die Energiewende verstehen, ifo Schnelldienst, ISSN 0018-974X, ifo Institut - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München, München, Vol. 67, Iss. 13, pp. 6-13

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/165443

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Christoph Buchal*

Energiewende – wo steckt die wahre Wahrheit?

Die schnelle Umstellung der deutschen Stromerzeugung, weg von Kernenergie und Kohle, hin zu Sonne und Wind, ist ein kompliziertes und sehr kostspieliges Experiment – mit einigen, zum Teil unerwarteten Erfolgen, aber auch mit vielen intrinsischen Widersprüchen. Dabei herrscht ein Durcheinander verschiedenster Argumentationsebenen, weil wünschenswerte, jedoch unrealistische Ziele, wie eine spürbare globale Emissionsminderung (vulgo: »Klimaschutz«), die heimischen Diskussionen dominieren, während das Verständnis für effiziente und pragmatische Maßnahmen weitgehend fehlt. Als Konsequenz kommt es bei der Stromproduktion zu kostspieligen Übertreibungen, während andere, sehr wesentliche Entwicklungsbereiche völlig vernachlässigt werden. Leistungsfähige Strukturen im Energiebereich werden zerschlagen und bluten aus, während sich private Anlagen zu Renditeobjekte entwickeln sollen, wobei aber jede Verantwortung für die komplexe Netzführung entfällt. Eine sachfremde, kontraproduktive und ideologisch überfrachtete Argumentation (»Bürgerstrom statt Konzerngewinne«) dient dabei zur Verschleierung der technischen und ökonomischen Defizite.

Ökologische Wahrheiten

Die wissenschaftliche Community, insbesondere die Klimatologie, warnt schon lange vor den möglichen Folgen der hohen CO_2-Emissionen aus der Verbrennung der fossilen Energieträger Kohle, Öl und Gas. Diese Situation ist klar und unstrittig (vgl. Buchal und Schönwiese 2012). Gegenwärtig werden durch menschliche Aktivitäten jährlich über 33 Gt CO_2 in die Atmosphäre entlassen, zusätzlich zu dem natürlichen Kohlenstoffkreislauf auf der Erde. Die anthropogenen Emissionen müssten das totale CO_2-Budget der Atmosphäre (ca. 3 100 Gt) jährlich sogar um ein volles Prozent erhöhen, wenn nicht die Ozeane zumindest rund die Hälfte des anthropogenen CO_2 aufnehmen würden. Dank der CO_2-Löslichkeit in den Weltmeeren steigt der atmosphärische CO_2-Gehalt jährlich (nur) um 16 Gt und liegt jetzt bei 400 ppm (Anteil von CO_2 in der Luft). Der vorindustrielle Wert betrug 280 ppm. Der gegenwärtige zusätzliche anthropogene Treibhauseffekt ist messbar und beträgt inzwischen ca. 1,5°C (bezogen auf das Jahr 1860 als Referenz), wobei der genaue Wert von der Art der statistischen Analyse abhängt, denn anthropogene und natürliche Temperaturvariationen können nur mit Hilfe einer theoretischen Modellierung unterschieden werden (vgl. Buchal und Schönwiese 2012). Soweit die Faktenlage. Auch die Konsequenzen können nur theoretisch modelliert und abgeschätzt werden – wobei allerdings ein Wandel zu einem angenehmeren Klima nicht erwartet werden sollte. Allerdings weiß niemand, wie schlimm es wirklich kommen wird.

Zahlreiche Gruppen, insbesondere Umweltorganisationen und weite Kreise der Politik, stellen die möglichen Folgen dieser Temperaturerhöhung eindringlich als universelle große Bedrohung dar. Auf diese Weise ist in der Bevölkerung eine weitgehende Akzeptanz für »Klimaschutzmaßnahmen« erzeugt worden. In deutschen Diskussionen begegnet man dabei überwiegend der Auffassung, dass zur Abwehr großer Gefahren auch schmerzhafte Opfer zu bringen seien. Darin wird eine sinnvolle Vorreiterrolle in einer emissionsarme Energietechnik gesehen, selbst wenn der Rest der Welt diesem Vorreiter nicht folgen will. Die ernüchternde Tatsache, dass die deutschen Gesamtemissionen nur 2,5% der globalen Emissionen betragen und dass die deutschen Emissionen obendrein wegen der Stilllegung von Kernkraftwerken gegenwärtig nicht einmal sinken, wird kaum zur Kenntnis genommen. Die global ansteigenden Emissionen werden ignoriert, obwohl die Zusammensetzung der Atmosphäre nur als globales Problem betrachtet werden kann. Die von Hans-Werner Sinn sorgfältig dargestellten Argumente zur Erfolglosigkeit nationaler Alleingänge innerhalb des Europäischen Emissionshandels werden inzwischen sogar vom IPCC (»Weltklimarat«) akzeptiert und sollen hier nicht wiederholt werden (vgl. Sinn 2008).

Es ist aus Sicht eines wirtschaftlich denkenden Naturwissenschaftlers höchst erstaunlich, dass ökologisch vollständig unwirksame Maßnahmen dennoch erfolgreich mit Ökologie begründet werden können – vermutlich, weil im Vorfeld ein ausreichendes Potenzial an Angst, Opferbereitschaft und Sendungsbewusstsein aufgebaut worden ist. Strom aus Wind und Sonne wird in der Bevölkerung inzwischen überwiegend als »intrinsisch gut« bewertet. Entsprechend bemühen sich die PR-Verantwortlichen großer Unternehmen wie Bahn und Post um Werbung mit »Öko-

* Prof. Dr. Christoph Buchal arbeitet am Peter Grünberg Institut im Forschungszentrum Jülich und lehrt Physik an der Universität zu Köln. Er ist Vorstandsmitglied im Arbeitskreis Energie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und WE-Heraeus-Seniorprofessor. Er hat unter anderem Sachbücher zu den Themen Energieversorgung, Klima und Strom verfasst.

strom-Bahncard« oder »Grüner Zustellung«, vertrauen dabei auf die Unkenntnis über die Realitäten der Energieversorgung und vergrößern die allgemeine Irreführung.

Wenn technische Maßnahmen wie die »Energiewende« für den Schutz der Atmosphäre wirksam werden sollen, dann ergibt sich als wichtigste Wahrheit:

Die Energiewende muss ***wirtschaftlich und technisch attraktive Alternativen und Vorbilder*** *für möglichst viele Nationen weltweit entwickeln, damit sie überhaupt für die Atmosphäre und für das Weltklima wirksam werden kann.*

Auch wenn die Versorgung mit elektrischer Energie derzeit weniger als ein Drittel der Weltenergieversorgung ausmacht, so nimmt Strom dennoch die bedeutendste Position unter allen Energieträgern ein, denn eine moderne Industriegesellschaft ohne zuverlässige Stromversorgung ist unvorstellbar. Wenn die Generation unser Enkel im Lauf ihres Lebens entscheidend auf unerschöpfliche EE angewiesen sein wird, dann wird vermutlich die Stromproduktion durch Wasserkraft, Photovoltaik (PV) und Windenergieanlagen (WEA) die dominierende Rolle spielen. Insbesondere bei den WEA und der PV liegt noch ein gewaltiges Ausbaupotenzial. Noch beträgt der Jahresstromverbrauch in Indien nur 0,85 MWh pro Person, während in China bereits 3,9 MWh, in Deutschland 7,5 MWh und in den USA 14 MWh pro Person benötigt werden. Vor allem in den Schwellenländern liegen deshalb große Chancen für Energie-effiziente Neu-Installationen mit dem größten »Einsparpotenzial pro Euro«. Wer »Klimaschutz« will, muss global denken und darf sich nicht nur um eine »Luxus-Energiewende« für besonders reiche Nationen kümmern.

Ökonomische Verwerfungen

Die ökonomischen Konsequenzen von Einspeisevorrang und zwanzigjähriger Preisgarantie für Strom sind bekannt (vgl. Sinn 2008)). Deshalb soll nur auf einige weniger bekannte Fakten aufmerksam gemacht werden. Bisher wurde die elektrische Energie in Deutschland mit Hilfe von regelbaren Kraftwerken möglichst bedarfsgerecht und nahe an den Verbrauchszentren produziert. Das Agrarland Bayern hatte sich aus diesem Grund seinerzeit für den Bau von Kernkraftwerken eingesetzt und damit eine außerordentlich erfolgreiche Industrialisierung ermöglicht. Nunmehr soll Strom in großen Mengen nicht bedarfsgerecht und nicht mehr kundennah erzeugt werden. Beispielsweise soll norddeutscher Windstrom die bayrischen Werke beliefern. Dessen zeitlichen Schwankungen führen bekanntlich zu den schwankenden Börsenpreisen. Lokal variable Strompreise sind in unserem System (noch?) nicht vorgesehen. Mit anderen Worten: Der Strompreis in Überschussregionen und der in Strommangelregionen ist identisch, obwohl wir keineswegs ausreichend Leitungskapazitäten zur Verfügung haben, um auch zukünftig Produktion und Bedarf zusammen zu bringen. Noch schlimmer: Die staatlich bestimmten unterschiedlichen Vergütungstarife für elektrische Energie unterbinden sogar jeglichen marktwirtschaftlichen Wettbewerb zwischen EE-Produzenten an verschiedenen Standorten, denn alle sollen Renditen erzielen können, unabhängig von jeweiliger Effizienz und von dem lokalen Bedarf.

Die Eckpunkte für die geplante Reform des EEG (Januar 2014) zielen zwar auf eine Verminderung der Förderbeträge und auf eine Konzentration der Förderung auf kostengünstige Produktionstechniken, doch wird der wichtigen Tatsache nicht Rechnung getragen, dass jede neu installierte ungeregelte Anlage zunehmend wertlosere, weil ungeregelte Energie ins Netz liefert und damit auch die Wertigkeit der bereits bestehenden Anlagen mindert. Mit anderen Worten: Die ersten ungeregelten Produzenten lieferten relativ wertvollen Strom in ein stabiles Netz, weil ihre Schwankungen ausgeregelt werden konnten und ihr Strom problemlos an die Kunden geliefert werden konnte. Zukünftige Neu-Installationen von weiteren ungeregelten Produzenten erhöhen die Labilität in einem bereits destabilisierten Netz und entwerten damit schrittweise auch alle bereits aufgebauten Anlagen, so dass sich eine Abwärtsspirale ergibt.

Die öffentlichen Diskussionen drehen sich zumeist um Strompreis, EE-Umlage und Einspeisevergütung. Diese bereits spürbaren ökonomischen Konsequenzen sind wichtig, doch bilden sie nur die »Spitze eines Eisbergs« von ungelösten Problemen, die sich mit einem zunehmenden Anteil an EE-Strom immer unangenehmer zeigen werden. Je weiter Wind- und Sonnenstrom ausgebaut werden, desto mehr flankierende technische Installationen werden erforderlich. In der traurigen Konsequenz wird das zu progressiv ansteigenden Kosten führen, und nicht etwa zu sinkenden Strompreisen.

Wie weitgehend unterliegt Strom soziologischen Kriterien?

Es ist erstaunlich, welche Emotionen und gesellschaftlichen Debatten durch die Strukturreform der Stromerzeugung und der Stromnetze ausgelöst wurden. Es ist völlig unstrittig, dass Stromnetze genau wie Gasnetze, Straßen und Bahnkörper die Struktur eines natürlichen Monopols besitzen, denn es ist unwirtschaftlich und unsinnig, neben einer Stromleitung eine zweite »Konkurrenzleitung« zu installieren. Insofern stehen die Stromnetzbetreiber trotz ihres Monopolcharakters nicht besonders heftig in der gesellschaftlichen Kritik. Allerdings werden sie als Monopolisten von der Bundesnetzagentur kontrolliert und überwacht – doch werden sie von ihr zumindest nicht in den Konkurs gezwungen. Nicht so die im Wettbewerb stehenden »klassischen Kraft-

werksbetreiber« und Stromproduzenten. Ihre wirtschaftliche Schwächung bis hin zur Stilllegung von Anlagen wird als großer Erfolg der Energiewende dargestellt.

Für Jahrzehnte kamen die deutschen Stromkunden in den Genuss einer zuverlässigen und relativ preisgünstigen Stromversorgung. Die damit verbundene technische Leistung wird inzwischen allgemein als Selbstverständlichkeit empfunden. Obwohl die Wirtschaftsmacht der großen Versorger durch das Gesetz zum »Unbundling« gebrochen und ihre Rentabilität nachhaltig geschädigt wurde, werden diese Gesellschaften noch immer und zu Unrecht als Monopolisten geächtet. Zugleich wird es in einem naiven Umkehrschluss als gesellschaftlich erstrebenswert proklamiert, den Strom in Bürgergenossenschaften, Kirchengemeinden oder privat zu produzieren und nicht mehr von »Konzernen« zu beziehen – wobei diese Konzerne, deutsche Firmen, nun die Dividenden an ihre Aktionäre, darunter viele Kommunen, kürzen müssen. Aus technischer Sicht ist das absurd, denn die professionell betriebenen Großanlagen können wesentlich besser geregelt und obendrein sauberer und wirtschaftlicher gefahren werden.

Ganz offensichtlich beanspruchen politische Parteien, Verbände, Lobbygruppen und Kirchen für sich jeweils ökonomische, technische, moralische und ethische Kompetenzen, auch für die Technik der Stromerzeugung, die Energieversorgung und natürlich für das Weltklima.

Die technische Perspektive

Das Leitkonzept einer klassischen Stromwirtschaft lautet:

Bedarfsgerechte, regelbare Produktion möglichst nahe am Verbraucher und zusätzlich ein Verbundnetz zur Aushilfe bei Störungen oder bei planmäßigen Betriebsunterbrechungen.

Der nun eingeläutete Paradigmenwechsel zu einer Energiewende mit einem dominierenden Einsatz von fluktuierendem EE-Strom wird am einfachsten veranschaulicht durch das Bild einer Plattform, die auf vier Säulen ruht (vgl. Buchal, Wittenberg und Oesterwind 2013).

- Die erste Säule ist die **Stromproduktion**. Diese Säule ist gegenwärtig bereits umfangreich ausgebaut, doch ist sie naturgemäß sehr unzuverlässig schwankend.
- Die zweite Säule ist der **Transport**. Weil nunmehr Erzeugung und Bedarf räumlich weit getrennt sind, gibt es auf dem Transportsektor große Engpässe. Die zweite Säule ist noch viel zu kurz geraten.
- Die dritte Säule wird durch die **Speicher** gebildet. Mit ihrer Hilfe müssen die Ausfälle der Produktion überbrückt werden, doch kann dafür gegenwärtig nur ein nahezu vollständiges Defizit konstatiert werden. Die dritte Säule ist noch total verkümmert und wird für viele Jahrzehnte vermutlich durch konventionelle Kraftwerke ersetzt werden müssen.
- Die vierte Säule bildet die **Flexibilisierung des Bedarfs.** Hierzu gibt es Pläne und Versuche mit häuslichen Wärmespeichern, Vorschläge für eine großangelegte Wasserstoffproduktion für zukünftige Brennstoffzellenfahrzeuge oder die Wünsche, das Aufladen der Batterien zukünftiger Elektrofahrzeuge entsprechend steuern zu können. Gegenwärtig ist mit dem Aufbau dieser vierten Säule nicht begonnen worden.

Für einen zukünftigen Erfolg der Energiewende muss noch eine Fülle wissenschaftlich-technischer Herausforderungen bewältigt werden: Elektromobilität, Wasserstoffwirtschaft, Versorgungssicherheit und Stabilität des europäischen Netzes, flexible Reservekraftwerke, weitreichende Hochspannungs-Gleichstromverbindungen, Stromspeicherung für kurze und lange Zeiträume, Smart Homes, intelligente Detailsteuerung der Nutzer und der vielfältigen Erzeuger, Stromumwandlung zu Wärme, Strom zu Treibstoff. Noch ist offen, ob mit diesem komplizierten Zusammenspiel tatsächlich alle Anforderungen erfüllt werden können, die mit einem zukünftigen Verzicht auf Kohle und Kernenergie verbunden sind.

Wer die Problematik der Energiewende verstehen will, darf die zahlreichen Facetten nicht isoliert und einzeln betrachten, sondern muss sich um ein quantitatives Verständnis des Gesamtkomplexes und um die Stärkung der möglichen positiven Synergien bemühen.

Die technische Gegenwart

Als Vorreiter der Energiewende scheint sich die Stromerzeugung, und nicht etwa der Verkehr oder die Wohnraumbeheizung, zu etablieren – sachlich begründet durch die Tatsache, dass man inzwischen elektrische Energie massenhaft mit Hilfe von Wind, Wasser und Sonne produzieren kann. Für die Kraftstoffe sind wir in dieser Hinsicht noch längst nicht so weit.

Der mittlere deutsche Stromgesamtbedarf beträgt ca. 70 GW, der Maximalbedarf ca. 80 GW, der Minimalbedarf 40 GW. Ein Block in einem Großkraftwerk liefert ca. 1 GW (= 1 000 MW). Eine gut platzierte deutsche PV-Dachanlage von 10 kWpeak liefert im Jahr insgesamt eine Energie von typisch 10 000 kWh (= 10 MWh). Das entspricht 1 000 Volllast-Stunden. Ein Jahr hat 8 760 Stunden. Weil die Produktion mit der Strahlungsintensität schwankt, wird insgesamt während rund 4 000 Stunden produziert, doch oft nur mit geringer Leistung. Natürlich ist der Sommer mit vielen sonnigen Tagesstunden am ergiebigsten.

Inzwischen ist in Deutschland bereits eine erstaunliche PV-Gesamtleistung von 36 GWpeak installiert. Die deutschen WEA repräsentieren eine installierte Leistung von 34 GWpeak. Die Summe (70 GW) ist damit bereits viel höher, als in bedarfsschwachen Zeiten benötigt würde – was niemand so geplant oder erwartet hatte. Allerdings wurden bisher nur maximal 70% der deutschen Gesamt-PV-Nennleistung eingespeist, weil offensichtlich nicht alle Anlagen gleichzeitig optimal laufen. Bei deren Einspeisung kann selbst ein weit ausgedehntes Netz keinerlei Puffer- und Speicherfunktion bieten.

So bleibt zu klären, wie es zukünftig gelingen könnte, mit Hilfe neuer großer Speichereinrichtungen und steuerbarer Stromabnehmer die zu erwartenden, sehr großen Überschussmengen an EE-Strom sinnvoll zu nutzen. Wie könnte man die aufstrebende Elektromobilität effizient in diesen Prozess einbinden? Und wie kann ein »konventioneller Kraftwerkspark, insbesondere die Gaskraftwerke, am Strommarkt wirtschaftlich erhalten bleiben, um die besonders im Winter auftretenden wochenlangen Produktionslücken bei PV und WEA zu überbrücken?

Strom bildet die Speerspitze der Energiewende

Eine zuverlässige Stromversorgung ist von überragender Wichtigkeit. In ferner Zukunft soll EE-Strom auch andere Energieträger schrittweise ersetzen. Im Wärmesektor kann preiswerter Strom die klassischen Brennstoffe leicht verdrängen. Dabei sind elektrisch betriebene Wärmepumpen thermodynamisch effektiver als einfache Heizelemente, wie sie in Nachtspeicheröfen oder in Tauchsiedern eingesetzt werden.

Im Straßenverkehr bahnt sich derzeit eine rapide Zunahme von batteriebetriebenen Elektroautos an, die mit einer rein elektrischen Reichweite von bis zu 150 km im Nahverkehr viele Vorteile bieten. Nur als Treibstoff für große Flugzeuge und schwere Lkw kann Strom keine Alternative bieten. Hier wird man vermutlich immer flüssige Kohlenwasserstoffe als Energieträger einsetzen, weil diese ein unübertreffliches Verhältnis von Energieinhalt zu Masse oder Volumen aufweisen.

Für die Einhaltung aller Bedingungen für ein stabiles Netz sind die vier großen deutschen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) in ihren jeweiligen Bereichen verantwortlich. Das sind die Unternehmen Amprion, Tennet, 50 Hertz und TransnetBW. Dazu stehen sie in engem Kontakt mit den Stromproduzenten. Allerdings sind alle Netzbetreiber, auch die zahlreichen Verteilungsnetzbetreiber, organisatorisch streng getrennt von Unternehmen, die als Stromproduzenten tätig sind. Die Aufteilung („Unbundling“) der zuvor auf allen Sektoren der Stromversorgung tätigen Konzerne wurde gesetzlich erzwungen, um den europäischen Wettbewerb zu stärken.

Es ist die zentrale Aufgabe aller Netzbetreiber, dafür zu sorgen, dass ständig ausreichend Leistung zur Deckung des Bedarfs zur Verfügung steht. Heute haben sie zusätzlich auch die Verpflichtung, allen dargebotenen EE-Strom in das Netz aufzunehmen. Dabei ist der Vorrang für EE-Strom durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gesichert. Wir werden sehen, dass diese »Vorfahrtsregelung für EE-Strom« zu einer weit größeren technischen und wirtschaftlichen Herausforderung führt als etwa ein weiterer linearer Ausbau von Solar- und Windanlagen oder der Ausbau der Netze.

Wir haben im Netz drei charakteristische Situationen:

- Meistens wird ein Mix aus EE-Strom und konventionell erzeugtem Strom ins Netz eingespeist.
- Bisweilen, insbesondere an sonnigen Feiertagen, kann bereits so viel EE-Strom produziert werden, dass die konventionellen Kraftwerke kaum mehr benötigt würden – zumindest, wenn man nur die eingespeiste Gesamtleistung betrachtet. Allerdings verlangen die Stabilisierung der Frequenz sowie die Blindstromversorgung und die schnell abrufbare Regelleistung, dass weiterhin ausreichend viele konventionelle Kraftwerke mit rotierenden Generatoren am Netz verbleiben. Ihre großen Schwungmassen wirken obendrein als instantane Energiespeicher, die insbesondere auch für die Kurzschlussleistung unerlässlich sind. Eine stets ausreichende Kurzschlussleistung ist ein unverzichtbarer Sicherheitsfaktor im Netz.
- Drittens, zu vielen Zeitpunkten bei Dunkelheit und Windstille, muss nach wie vor fast der gesamte Strom konventionell erzeugt werden.

Die durch das EEG garantierte Vorrangeinspeisung der fluktuierenden EE-Leistung beeinflusst den auf Stundenbasis gehandelten Energiepreis an der Energiebörse drastisch. Bei Leistungsüberschuss kann der Strompreis tendenziell bis auf null oder sogar auf negative Werte sinken, denn es gibt keinerlei einfache Möglichkeit, elektrische Energie zu vernichten. Man kann nur die Produktion abschalten, doch viele der konventionellen Kraftwerke müssen vernünftigerweise mit ihrer Minimalleistung weiterlaufen, anstatt sie für eine nur sehr kurze Zeitspanne verschleißintensiv und unwirtschaftlich abzuschalten. Der überschüssige Strom wird dann für sehr geringe Preise oder gar mit einer »Entsorgungsgebühr«, also einer Zuzahlung, an die Nachbarländer abgegeben.

So bleibt ein konventioneller Kraftwerkspark auf absehbare Zeit unverzichtbar, doch leidet seine Wirtschaftlichkeit mit schwindender Auslastung und gleichzeitig fallenden Preisen. Davon besonders betroffen sind die deutschen Gaskraftwerke. Wegen ihrer relativ hohen Brennstoffkosten sind

sie kostenmäßig in der Rangfolge der Produzenten am Energiemarkt weit abgeschlagen und können kaum noch liefern. Weil der Energiemarkt europaweit offen ist, werden auch die Gaskraftwerke im benachbarten Ausland bedrängt. Darin liegt eine wahrhaft erschreckende Paradoxie der Energiewende, denn viele Gaskraftwerke wurden insbesondere auch zum Ausgleich der EE-Fluktuationen geplant und erbaut. Obendrein ermöglichen Gaskraftwerke eine besonders emissionsarme und effektive Stromproduktion (vgl. Buchal, Wittenberg und Oesterwind 2013), doch im Gegensatz zur ineffektiven Biogasverstromung, einem in vieler Hinsicht besonders beschämenden Irrweg, erhalten sie keinerlei Einspeisevergütung.

Der weitere Ausbau der EE-Stromerzeugung

Nunmehr wollen wir ein weiteres ernstes technisches Problem beim Ausbau der EE-Stromerzeugung betrachten (vgl. Buchal, Wittenberg und Oesterwind 2013; Bachem und Buchal 2013). Wie erwähnt, beträgt die installierte Maximalleistung der fluktuierenden WEA und PV-Anlagen bereits 70 GW, ein sehr hoher Wert. Dennoch bleibt die Energieproduktion von Sonne und Wind eher bescheiden. Zur gesamten Stromproduktion trugen der Wind im Jahr 2013 mit 8,4%, die PV mit 4,7% bei (Daten: BDEW 2014).

Weil der Anteil der EE-Stromproduktion auf 35% bis 2020 und 80–95% bis 2050 ansteigen soll (vgl. Bundesumweltministerium), muss der weitere Ausbau überwiegend auf zahlreichen neuen PV-Anlagen sowie auf neuen WEA an Land und offshore beruhen. Auf zusätzliche Wasserkraftwerke kann in Deutschland nicht zurückgegriffen werden, denn hier scheint das Potenzial praktisch erschöpft. Auch eine nennenswerte Nutzung von Nahrungs- und Futterpflanzen (Mais, Raps) für die Stromerzeugung scheidet aus vielerlei Gründen aus. So müssen die für die Tierzucht benötigten Energieäquivalente dieser Futtermittel aus Drittländern importiert werden, was die damit verbundene Treibhausgas-Gesamtbilanz vollständig ruiniert. Obendrein sind die Maismonokulturen eher unerwünscht, und die Energiebilanz einer Biogasverstromung ist im Vergleich zu PV oder gar zu einer WEA beklagenswert schlecht (vgl. Buchal, Wittenberg und Oesterwind 2013). Letztendlich wäre es auch unethisch, wenn immer mehr Nahrungsmittel als technische Energieträger eingesetzt würden, denn die Nahrungsmittel werden dadurch weltweit knapper und teurer.

Preisgünstige PV-Anlagen werden zum kulturellen Segen für viele Länder

Aufgrund industrieller Entwicklungen sind die Preise für PV-Anlagen in den letzten Jahren so drastisch gesunken, dass eine Kilowattstunde PV-Strom jetzt sogar im sonnenarmen Deutschland für ca. 10 Cent/kWh produziert werden kann (vgl. Buchal, Wittenberg und Oesterwind 2013). Eine Dachanlage mit einer Peakleistung von 10 kW hat im Jahr 2005 noch über 50 000 Euro gekostet, heute wird sie komplett montiert und angeschlossen für ca. 20 000 Euro angeboten. Seriöse Fachleute prognostizieren sogar noch weiter fallende Kosten bei realistischen Anlagenlebensdauern von 30 Jahren und erwarten bereits innerhalb des nächsten Jahrzehnts Werte von bis zu 5 Cent/kWh. Insbesondere für die Eigenversorgung rentieren sich die Anlagen auch ohne jede Einspeisevergütung.

Es soll an dieser Stelle nachdrücklich hervorgehoben werden, dass die technische Entwicklung der PV-Anlagen vor allem aus globaler Perspektive als großer Erfolg bewertet werden muss. Noch leben über eine Milliarde Menschen in den Entwicklungs- und Schwellenländern ohne Anschluss an ein Stromnetz. Mit preisgünstigen PV-Anlagen eröffnet sich ihnen eine realistische Chance für eine kostengünstige Elektrifizierung auf individueller Skala – nicht für die Energietechnik und den Strombedarf der Industrie, wie im Falle der deutschen Energiewende, sondern vor allem für den Betrieb von individuellen Kommunikationsgeräten mit einem relativ geringem Strombedarf. Eine kleine preisgünstige PV-Paneele zusammen mit einem kleinen Akku reicht aus für den Betrieb von Handy, TV, PC und sogar für Beleuchtung mit Hilfe der LED-Technik. Die damit gewonnenen neuen Chancen für Bildung und Ausbildung sind offensichtlich.

Deutsches Planziel: 80–95% Strom aus erneuerbaren Energien

Derzeit werden 25% des Stroms mit Hilfe von EE erzeugt. Falls die Finanzierung und das Landschaftsbild es zulassen, wäre ein umfangreicher weiterer Ausbau rein technisch kein Problem, denn potenzielle Flächen für Solaranlagen und WEA, insbesondere auf See, sind noch reichlich vorhanden. Darauf basiert auch die Studie des UBA (vgl. Bundesumweltministeriums; Umweltbundesamt). Ein weiterer Ausbau muss allerdings dazu führen, dass bei starker Sonneneinstrahlung und kräftigem Wind häufig mehr Strom als benötigt produziert wird.

Wenn dadurch die Stabilität der Netze gefährdet wird, werden die Netzbetreiber zukünftig auch die EE-Überschussproduzenten abschalten müssen, obwohl deren EE-Strom prioritär eingespeist werden muss. Als eine Konsequenz der gegenwärtig durch das EEG garantierten Einspeisevergütung, die sogar eine Entschädigung bei Nicht-Abnahme umfasst, würde der EE-Strom noch weiter verteuert. Natürlich ist es technisch und ökonomisch sehr unbefriedigend, wenn bei einem weiteren Ausbau von PV- und WEA-Parks deren Überproduktion immer häufiger nicht mehr abge-

nommen werden könnte. Die damit verknüpfte ökonomische Abwärtsspirale wurde bereits erwähnt. Sie wird in der Literatur bereits als »Selbst-Kannibalisierung« der Energiewende bezeichnet (vgl. Bettzüge (2014).

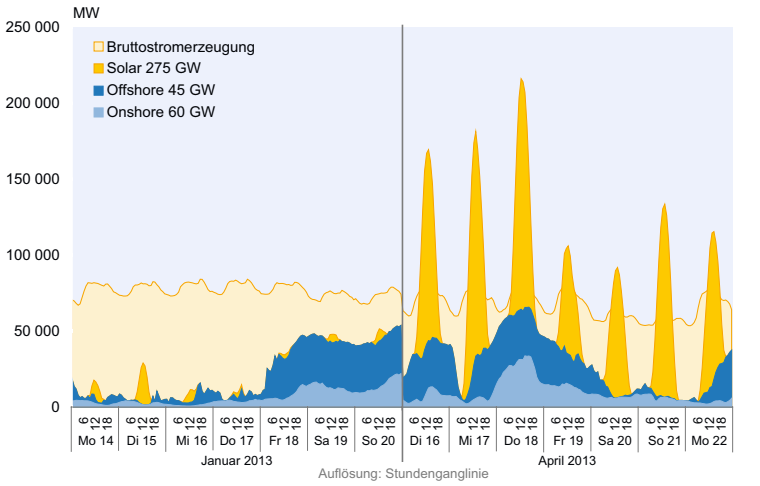
Eine erstaunliche Konsequenz des Szenarios 2050

Wir wollen die zwingenden Konsequenzen eines weiteren, ungezügelten Ausbaus der PV und WEA anhand des Wetterverlaufs vom Frühjahr 2013 exemplarisch veranschaulichen. In der Abbildung wird mit Hilfe einer Modellrechnung für einen voll ausgebauten Produktionspark an Windparks (blau) und Sonnenstromanlagen (gelb) für das Jahr 2050 gezeigt, welche extremen Über- und Unterproduktionen zu erwarten wären. Die Ausbaudaten für PV und WEA entsprechen dabei dem optimistischen Szenario 2050 des Umweltbundesamts und zeigen die Problematik mit großer Schärfe. In dem Szenario des UBA könnten der deutschen Stromversorgung allein an PV-Anlagen insgesamt 275 GW(peak) zur Verfügung stehen, unterstützt durch WEA von 45 GW(offshore) und 60 GW(onshore).

Eine dunkle, windschwache Wetterlage, wie sie vom 14. bis 20. Januar 2013 vorlag, würde dann trotz der enorm ausgebauten Ökostromanlagen zu einer Situation führen, in der noch immer fast der gesamte Bedarf mit konventioneller Stromerzeugung (rote Farbe) gedeckt werden müsste. Während dieser Zeit bleibt also ein leistungsfähiger konventioneller Kraftwerkspark fast in vollem Umfang als Lückenbüßer unverzichtbar, falls es nicht gelingt, die Speichertechniken in sehr weitem Umfang zu ertüchtigen. Das erscheint gegenwärtig noch als unrealistisch.

Abb. 1

Szenario einer im Jahr 2050 weitgehend ausgebauten EE-Stromproduktion



Das Szenario beruht auf den Annahmen des Umweltbundesamts (UBA) und den Daten für die EE-Stromproduktion von Januar und April 2013 (vgl. Bachem und Buchal 2013). Die deutschen Stromdaten werden auf Stundenbasis von den ÜNB und der Strombörse EEX veröffentlicht (www.transparency.eex.com). Die Messwerte von 2013 wurden skaliert auf die Zielwerte des UBA für 2050. Auswertung: R. Schuster, Driedorf.

Natürlich gibt es glücklicherweise auch sehr sonnige Wetterlagen. Bereits das Wetter vom 16. bis 22. April 2013 hätte im Szenario 2050 zeitweilig zu einer Ökostromproduktion von dem Dreifachen des aktuellen Gesamtbedarfs geführt. An klaren Hochsommertagen wäre diese Überproduktion noch wesentlich ausgeprägter.

Die in diesem Szenario zu erwartenden enormen Produktionsschwankungen (Gradienten) führen zu wesentlich gravierenderen technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen als die derzeitige Einspeisung von fluktuierendem Ökostrom in ein relativ stabiles Netz. Derzeit steht noch eine ausreichende Anzahl von regelbaren Kraftwerken zur Verfügung, doch bereitet schon jetzt die Ausregelung von EE-Einspeisegradienten von bis zu 1 GW innerhalb von 15 Minuten erhebliche Probleme für das Lastmanagement der Kraftwerke. Noch weiß niemand, wie die in der Graphik dargestellte hypothetische Netzsituation technisch überhaupt zu führen wäre – vermutlich müsste ein sehr wesentlicher Teil der PV-Spitzen vom Netz getrennt werden, doch sind die technischen Voraussetzungen dafür noch reine Zukunftsmusik. Gegenwärtig speist die Masse der ubiquitären Einzelanlagen unkontrolliert und ungesteuert ins Verteilungsnetz. Die zukünftig benötigte Ausrüstung des weitgefächerten Verteilungsnetzes mit einer zusätzlichen Leit- und Kontrolltechnik wird die progressive Kostenspirale der Energiewende deutlich beschleunigen.

Das größte Drama der Energiewende sind die fehlenden Speicher. Vor allem eine ausreichende Speicherkapazität zur Überbrückung der Produktionsausfälle bei PV und WEA erweist sich immer schmerzhafter als das entscheidende »Missing Link« der deutschen Energiewende. Auf diesem Feld sind intensive Anstrengungen erforderlich, um die eine erweiterte EE-Produktion und verbesserte Netze effektiv nutzen zu können. Die 31 deutschen Pumpspeicherkraftwerke können dabei keine wesentliche Abhilfe bieten. Sie haben eine Gesamtkapazität von 40 GWh. Das entspräche dem Strombedarf von einer halben Stunde. Allerdings können ihre Generatoren zusammen nur 7 GW ans Netz liefern, um damit ca. 10% des Gesamtbedarfs zu decken. Bei voller Turbinenleistung sind die Speicher nach sechs Stunden leer (vgl. Buchal, Wittenberg und Oesterwind 2013). Der Bedarf für weitere Pumpspeicherkraftwerke ist offensichtlich, doch fehlen deutsche Gebirgstäler – und obendrein auch die Akzeptanz seitens der mit einem neuen Stausee konfrontierten Bevölkerung. Die Alpenländer sind in dieser Hinsicht in einer besseren Position.

Es ist äußerst fraglich, ob zukünftig durch Druckluftspeicherung in einigen deutschen

Salzkavernen eine nennenswert verbesserte Gesamtbilanz der mechanischen Zwischenspeicherung von elektrischer Energie zu erzielen wäre.

Batterien sind als Speicher von Kleingeräten und für die erhoffte große Flotte von Elektroautos unverzichtbar, jedoch auf Netzebene um Größenordnungen zu klein und viel zu teuer (vgl. Buchal, Wittenberg und Oesterwind 2013). Andererseits könnte eine zukünftige Flotte von Millionen Elektroautos durchaus als intelligent steuerbare Verbraucher auftreten, um so vor allem in produktionsstarken Zeiten aus dem Netz aufgeladen zu werden, etwa während der Mittagszeit, wenn die PV-Stromproduktion ein Maximum erreicht, oder bei einem hohen Windstromangebot.

Überschussstrom sinnvoll einsetzen

Zukünftig müssen nicht nur die erheblichen Produktionslücken der EE-Anlagen gedeckt werden, sondern wir sehen uns zugleich der höchst erstaunlichen Situation gegenüber, dass die EE-Produzenten bisweilen ein Mehrfaches des Bedarfs liefern könnten. Wenn es nur darum ginge, eine überschießende Produktion der PV-Anlagen und Windparks ohne Betrachtung der Kosten zu nutzen, und wenn der konventionelle Kraftwerkspark irgendwie finanziert und am Leben erhalten werden könnte, dann könnte man sich auch sehr gut vorstellen, mit dem Überschussstrom direkt in den Wärmesektor zu gehen, obwohl Heizwärme thermodynamisch viel geringwertiger ist als elektrische Energie. Das würde dann zu einer Wiederauferstehung der extern gesteuerten Nachtspeicheröfen und zusätzlich zu großen, elektrisch beheizten Wassertanks zur Wärmebevorratung für Heizung und Dusche führen. Als energetisch wesentlich effektiver und »intelligenter« erweist sich natürlich der elektrische Betrieb von Wärmepumpen. Leider fallen dafür erhebliche Investitionskosten an.

Wirksame Hilfe könnte langfristig von der Wasserstofftechnologie kommen

Es gibt Konzepte, eine Strom-Überschussproduktion aus EE-Anlagen zu nutzen, um damit riesige Elektrolyseanlagen zu betreiben. Dort würde Wasserstoff erzeugt. Wasserstoff bildet vor allem einen sehr wertvollen Rohstoff für die chemische Industrie. Zugleich ist er als Energieträger für lange Zeiträume speicherfähig und so vielfältig nutzbar, dass sich ein weites Feld von technischen und wirtschaftlichen Synergien eröffnet.

Besonders intelligent und zukunftsweisend ist der Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen, weil in diesem Fall mit einem Wirkungsgrad von 60% gerechnet werden kann. Das ist etwa doppelt so günstig wie der Wirkungsgrad beim Betrieb von Verbrennungsmotoren. In jedem Fall ist es technisch und planerisch sinnvoll, den Einsatz von Überschussstrom für den Verkehrssektor zu optimieren, denn dort ist derzeit noch eine fast vollständige Abhängigkeit von Mineralölprodukten gegeben.

Ein Gesamtkonzept erfordert einen Masterplan

Ein Problem der gegenwärtigen Energiewende scheint in der enormen Komplexität des Vorhabens zu liegen. Jeder schaut nur auf eine Facette und auf deren mögliche Rendite. Stattdessen sollten die fluktuierende Stromerzeugung, der Transport durch Netze, Speicherung, Abnahmesteuerung (»Demand Side Management«), Wärmemarkt und Verkehrssektor miteinander verknüpft werden. Auch wenn die mathematisch-physikalische Simulation eines solchen nicht-linearen und komplexen Systems eine lösbare Herausforderung darstellt und die technische Machbarkeit eines intelligenten Stromversorgungssystems im Labormaßstab gegeben wäre, so lässt der erforderliche gewaltige Umbau der Versorgungs- und Nutzungssysteme derzeit vor allem große ökonomische Sorgen aufkommen.

Wir plädieren deshalb dringend dafür, bei der ersten Säule der Energiewende, der EE-Stromproduktion, derzeit das Tempo zu drosseln. Man darf sich nicht von den Zahlen für neu installierte Peakpower blenden lassen. Derzeit rollen wir im ganzen Land überwiegend bekannte Technologien in großer Breite aus. Dennoch bleibt der konventionelle Kraftwerkspark noch für viele Jahrzehnte unverzichtbar, bei ständig sinkender Auslastung und Rentabilität.

Die zweite Säule, die Netze, ihre Ertüchtigung und ihre informationstechnische Aufrüstung, ist zeitlich bereits spürbar im Hintertreffen.

Das bezahlbare Vorbild zuerst in kleinem Maßstab erarbeiten

Letztendlich darf man sich bei der Energiewende aber nicht nur auf den Umbau der Stromerzeugung konzentrieren, obwohl hier in den letzten Jahren der am deutlichsten sichtbare Fortschritt erzielt wurde. Der Mineralölbedarf für den Verkehr, der allgemeine Wärmebedarf, vielfältige energetische Effizienzverbesserungen in allen Sektoren und die daraus resultierenden Einsparungen sowie die sich eröffnenden technischen und ökonomischen Synergien sind von vergleichbar hoher Bedeutung.

Um die größten Übertreibungen zu mildern und die schmerzhaftesten Fehler zu korrigieren, sollte die Energiewende zurückverwiesen werden in die Forschungs- und Entwicklungslabore. Die unterschiedlichsten Konzepte und

Modelle sollten zuerst nur in kleinem Maßstab erprobt werden und sich auf begrenzten, aber wohldurchdachten regionalen Testfeldern technisch und ökonomisch bewähren können, bevor ein kostspieliger flächendeckender Umbau mit dem gegenwärtig zu beobachtenden unausgewogenen Wildwuchs an etablierter Technik erlaubt werden kann. Auf diese Weise können wir Wissen und Technikentwicklung vorantreiben, ohne uns finanziell zu überfordern. Es ist zu erwarten, dass die Technik von 2050 nicht dieselbe sein wird wie diejenige, die heute massenhaft installiert wird.

In Wahrheit entpuppt sich nämlich die noch unreife, junge Energiewende immer deutlicher als der Vorläufer und Beginn einer umfassenden industriellen Revolution und damit im wortwörtlichen Sinne als ein langwieriges Jahrhundertprojekt, vergleichbar in vieler Hinsicht mit der Ersten und der Zweiten Industriellen Revolution.

Literatur

Bachem, A. und Ch. Buchal (2013), »Energiewende – quo vadis?«, *Physik Journal* 12(12), 33–39.

Bettzüge, M.O. (2014), »Nationaler Hochmut oder cui bono?«, *Physik Journal* 13(5), 33–38.

Buchal, Ch. und Ch.-D. Schönwiese,(2012), *KLIMA*, MIC-Verlag, Köln.

Buchal, Ch., P. Wittenberg und D. Oesterwind (2013), *STROM – Die Gigawatt-Revolution,* MIC-Verlag, Köln.

Bundesumweltministerium, www.bmu.de/themen/klima-energie.

Sinn, H.-W. (2008), *Das grüne Paradoxon,* Econ-Verlag, Berlin.

Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de/publikationen/energieziel-2050.