

Gutachterliche Stellungnahme zum „Windenergieausbau": Anhörung A18 vom 04.09.2019

Inhalt

Windräder: Umweltschädigung, fehlende Effizienz	1
Das Gebot der Verhältnismäßigkeit	3
Fazit	4
Zum Autor und Unbefangenheitserklärung	5
<u>Anhang A</u> : Energiewende: Fakten, Missverständnisse, Lösungen – ein Kommentar aus der Physik vom 15.07.2019, verfasst von drei Physik-Ordinarien der Universität Heidelberg	
<u>Anhang B</u> : Naturgesetzliche Schranken der Energiewende	

Windräder: Umweltschädigung, fehlende Effizienz

Die Anhörung des NRW-Landtags am 4. September 2019 ist Reaktion auf einen Antrag der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN mit dem Titel „*Landesregierung muss Windenergieausbau durch echte Akzeptanzoffensive ermöglichen*". Sieht man von wenigen Profiteuren ab, wie Hersteller von Windkraftanlagen oder Landverpächter von Windradflächen, darf der Begriff „Akzeptanzoffensive" als Euphemismus gelten. Ob bundesweit über 1000 Bürgerinitiativen gegen Landschaftsentstellungen, Vogel/Fledermaus-Schreddern, Fluginsekten-Vernichtung, Wertverluste ihrer Häuser nahe Windrädern und gesundheitliche Schädigungen durch Infraschall¹ von ihrer nachvollziehbaren Gegenpositi-

¹ H.-J. Lüdecke, Fakten und Quellen zu Windrädern, EIKE, 22.Sept. 2015, <https://www.eike-klima-energie.eu/2015/09/22/fakten-und-quellen-zu-windraedern>

on mit einer „Akzeptanzoffensive“ abgebracht werden können, darf bezweifelt werden. Die Energiewende und insbesondere Windräder spalten die Gesellschaft.

Über den technischen Abersinn, aus Wind und Sonne in einem modernen Industrieland Strom zu erzeugen, ist schon hinreichend viel geschrieben worden. Energiegewinnung aus Wind ist eine mittelalterliche Methode. Erst jüngst wieder erschien von drei renommierten Physik-Ordinarien der Universität Heidelberg eine unmissverständliche Fachkritik an der deutschen Energiewende, die hier im **Anhang A** als Original beigelegt ist. Die Anmerkung des bekannten Ökonomen Prof. Hans-Werner Sinn geht in die gleiche Richtung, als er im Handelsblatt vom 29.3.2011 aussagte

„Wer meint, mit alternativen Energien eine moderne Industriegesellschaft betreiben zu können, verweigert sich der Realität“

Die nüchternen Zahlen sprechen für sich. Windenergie macht heute erst 3% der deutschen Primärenergie aus, obwohl inzwischen insgesamt mehr als 30.000 Windkraftanlagen in Deutschland installiert sind (s. Bild 1). Die alternative Stromerzeugung aus Wind, Sonne und Energiemais ist aus naturgesetzlichen, d.h. aus unabdingbaren, prinzipiellen Gründen für die Erfordernisse einer modernen Industrienation und für stabile Stromnetze ungeeignet. Die Gründe dafür sind im Anhang B (Naturgesetzliche Schranken der Energiewende, Naturwissenschaftliche Rundschau, Juni 2018) detailliert dargestellt.

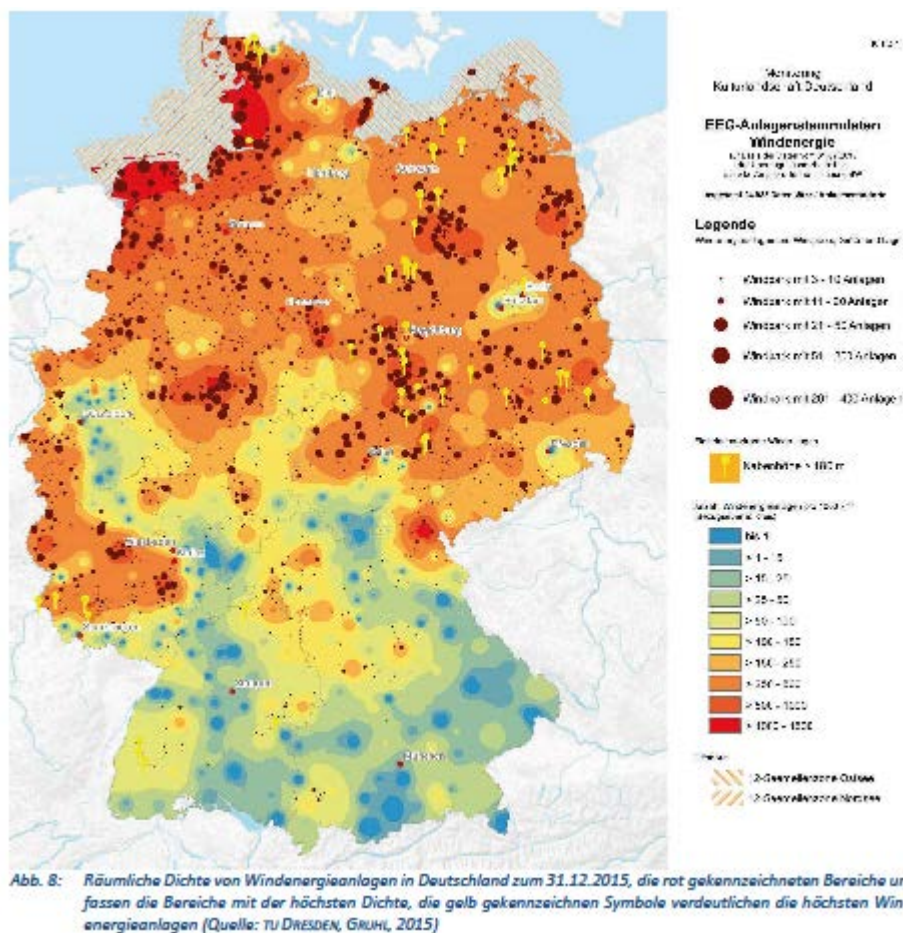


Bild 1: Windraddichte in Deutschland

Das Gebot der Verhältnismäßigkeit

In **Art. 1 Abs. 3 GG** sowie **Art. 20 Abs. 3 GG** des Grundgesetzes ist das **Gebot der Verhältnismäßigkeit** für die gesetzgebende Gewalt, öffentliche Verwaltung sowie die Justiz zu finden. Sämtliche gerichtlichen Entscheidungen, Verwaltungsakte und Gesetze müssen dem Verhältnismäßigkeitsgrundsatz entsprechen. Das Gebot der Verhältnismäßigkeit ist ein Gesetz von **Verfassungsrang**.

Die Energiewende im Allgemeinen und Windräder im Besonderen verletzen in höchstem Maße das Prinzip der Verhältnismäßigkeit von Aufwand zu Nutzen. Zum Aufwand zählen insbesondere bei Windrädern: Kosten, billigend in Kauf genommene Naturschädigungen, Tötung von Flugsäugern und Fluginsekten, Gesundheitsschädigung durch Infraschall. Zum vorgeblichen Nutzen zählen: CO₂-Einsparungen und infolgedessen Verringerung der mittleren Globaltemperatur.

Freilich sind CO₂-Einsparungen von Windrädern vernachlässigbar. Das erzeugte CO₂ beim Bau, Betrieb und der Installation dieser Anlagen wird, wenn überhaupt, erst nach vielen Betriebsjahren wieder eingeholt. Die Kosten sind auf der anderen Seite aber extrem. Allein das EEG kostet die deutsche Volkswirtschaft 28 Milliarden Euro jährlich - Tendenz steigend². Deutschland hat heute die höchsten Strompreise Europas. Und nun fordert die Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN die Landesregierung von NRW auf, die Anzahl der völlig ungeeigneten Windkraftanlagen (s. Anhang A) durch eine Akzeptanzoffensive auch noch zu steigern. Als einziger Grund dafür wird eine vom IPCC **lediglich vermutete**³ Schädigung des Klimas durch anthropogene CO₂-Emissionen genannt. Die folgende Übersichtsrechnung zeigt im rechnerischen Detail die Unverhältnismäßigkeit der „Klimaschutzpolitik“ Deutschlands an Hand des Nutzens „Verringerung der Globaltemperatur“ bis zum Jahre 2050:

Dazu wird nachfolgend mit vereinfachten Annahmen gezeigt, wie sich deutsche CO₂-Vermeidung auf die zukünftige Temperaturentwicklung der Erde auswirkt. Es wird mit 4,5 °C der ungünstigste IPCC-Schätzwert der Klimasensitivität angenommen (gemäß IPCC ist 4,5 °C die maximal eingeschätzte globale Erwärmung bei hypothetischer Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentration, d.h. von heute 400 ppm um weitere 400 ppm). Ferner wird der aktuelle (Jahr 2018) Plan der Bundesregierung als real vorausgesetzt, die derzeitigen deutschen CO₂-Emissionen um 80% bis zum Jahre 2050 zu verringern. Der deutsche Anteil an den globalen anthropogenen CO₂-Emissionen beträgt aktuell grob 2% - mit sinkender Tendenz infolge der stärker zunehmenden CO₂-Emissionen von China, Indien, USA usw. Die derzeitige CO₂-Konzentrationserhöhung der Luft beträgt schließlich etwa 2 ppm/Jahr. Aus diesen Daten ergibt sich: In den 32 Jahren bis 2050 werden aus 2 ppm jährlich insgesamt $32 \times 2 = 64$ ppm mehr. 80% deutsche Einsparungen davon sind $80\% \times 2\% \times 64 \text{ ppm} = 0,8 \times 0,02 \times 64 = 1 \text{ ppm}$ weniger. Deutschland verringert demnach im Zeitraum von 32 Jahren das atmosphärische CO₂ um **nur 1 ppm**. Mit dem ungünstigsten angenommenen Wert der Klimasensitivität von 4,5 °C beträgt die entsprechende Temperaturverringerung folglich $4,5 \text{ °C} \times 1 \text{ ppm} / 400 \text{ ppm} = 0,01 \text{ °C}$ - in Worten, ein Hundertstel Grad Celsius, im Klartext ein **Nichts**.

² Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, EEG in Zahlen (Oktober 2018)

³ So schreibt das IPCC, dass die Klimasensitivität (Einfluss des anthropogenen CO₂ auf die Erdtemperatur) **unbekannt** ist, im Originaltext „No best estimate for equilibrium climate sensitivity can now be given because of a lack of agreement on values across assessed lines of evidence and studies“, IPCC, Summary for Policymakers, 2013, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf

Dieses „Nichts“ kostet Deutschland aber, wie bereits erwähnt, viele Milliarden Euro jedes Jahr, die sich, stetig gesteigert, bis 2050 auf Billionen aufaddieren werden. 80% CO₂-Einsparung wären das **Ende Deutschlands als Industrie- und Sozialstaat**. Zumindest Politiker mit Realitätssinn sind sich einig, dass die großen CO₂-Erzeuger dieser Welt⁴, insbesondere China, Indien, USA und inzwischen auch Afrika von ihrer zunehmenden Nutzung der Kohle nicht abgehen werden. In diesen Ländern werden Scheinprobleme, wie Klimaschädigung durch anthropogenes CO₂, nicht einmal thematisiert, niemand interessiert sich dort dafür. Nur viele EU-Länder sehen dies anders, mit Deutschland an der Spitze einer ideologischen und angesichts der infantilen „Greta-Hysterie“ inzwischen sogar quasireligiösen Klima-Bewegung.

Der Antrag der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN bedeutet, Maßnahmen von der NRW-Landesregierung zu verlangen, welche das gesetzliche Prinzip der Verhältnismäßigkeit verletzen. Die Absurdität grün-linker Politik ist allein schon daran erkennbar, dass Aktivisten, die im Hambacher Forst Bäume besetzen, stillschweigend begrüßt werden, gleichzeitig aber der Reinhardswald (Märchenwald der Gebrüder Grimm) Monsterwindrädern geopfert wird. Das BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN ist von einer ehemaligen Naturschutzpartei inzwischen zu einer ideologischen Sekte mutiert, welche die größten Umweltschäden befürwortet, die Deutschland jemals gesehen hat. Im **Anhang B** (hier insbesondere Bild 4, grünes Betriebsfeld) ist dargelegt, dass in deutschen Wäldern Windräder wegen der hier zu geringen Windgeschwindigkeiten technisch schwachsinnig und komplett nutzlos sind.

Eine Industrienation, welche die Naturgesetze ignoriert, ruiniert auch die Biodiversität. Deutschland gibt mit seiner Energiepolitik der Welt ein Beispiel, wie man scheitern muss – und auch noch extrem teuer. Keine andere Nation folgt uns bei dem wirtschaftlich selbstmörderischen Prozess „Energiewende“, der, unter dem Ersetzen aller Fachleute weltweit, auf der alleinigen Basis ideologischen Glaubens durchgesetzt wird. Dieser Glaube speist sich aus Illusionen anstelle realistischer Planung und aus technologischem Wunderglauben von Politikern, denen die technisch/naturwissenschaftliche Allgemeinbildung fehlt.

Fazit

Windräder sind für die Stromerzeugung einer modernen Industrienation ungeeignet. Sie sind naturschädigend, töten Tiere, stellen eine erhebliche Gesundheitsgefährdung der Anrainer dar und verursachen exorbitante volkswirtschaftliche Kosten, die wenigen Profiteuren zugute kommen. CO₂ wird durch sie praktisch nicht eingespart. Infolgedessen wird der NRW-Landesregierung empfohlen,

1. die Minimalabstände von Windrädern zur nächsten menschlichen Siedlung auf 10 H (zehnfache Windrad-Höhe) festzusetzen. Dies ist die einfachste Lösung, um dem nutzlosen und naturschädlichen Windradspuk-Spuk ein Ende zu bereiten.
2. zur Sicherung der Stromversorgung in NRW die vorhandenen Kohlekraftwerke - falls technisch noch sinnvoll - zu ertüchtigen, gegebenenfalls neue Kohlekraftwerke zu planen und zu

⁴ https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Länder_nach_CO2-Emission

bauen. Das unsinnige Aufgeben der Kohleverbrennung bevor ausreichend Kernkraftwerke zur Verfügung stehen, ist zu beenden. Mit wetterabhängigen Stromerzeugungsmethoden ist eine zuverlässige Stromversorgung von modernen, industrialisierten Ländern nicht möglich. Konsequenterweise durchgeföhrt, ist wetterabhängige Stromerzeugung mit dem Ruin des betreffenden Landes gleichzusetzen.

3. Der CO₂-Gehalt der Atmosphäre kennt keine Landesgrenzen. Allein der jährliche Zubau an neuen chinesischen Kohlekraftwerken übersteigt die jährlichen CO₂-Emissionen Deutschlands. Da unsere Volksvertreter in den Parlamenten gewählt sind, um deutsche Interessen zu vertreten und Schaden vom deutschen Volk abzuwenden und nicht dazu, um unser Land mit Vorbild-Bekundungen (Klimaschutz, Energiewende) zu ruinieren, wird der NRW-Landesregierung empfohlen, sich den USA anzuschließen und das Pariser Abkommen aufzukündigen.
4. Eine nachhaltige und umweltgerechte Energieerzeugung wird in Zukunft nur noch mit inhärent sicheren und weitgehend von CO₂- sowie von Abfall-freien Kernkraftwerken der Generation IV (schnelle Brüter) möglich sein - s. hierzu G. Ruprecht und H.-J. Lüdecke, Kernkraftwerke, der Weg in die Zukunft, TvR-Verlag, 2018. Durch die deutsche Aufgabe der Kernenergie ist inzwischen unschätzbare technisches Know-How in Deutschland verloren gegangen. Unzählige Milliarden deutschen Volksvermögens sind durch das Wegwerfen deutscher Kernkraftwerke, den sichersten Anlagen weltweit, vernichtet worden. Der global unaufhaltsame Siegeszug der Kernenergie belegt, dass der deutsche Weg ein schnellsten zu beendender Irrweg ist. Es wird der Landesregierung NRW empfohlen, durch geeignete Öffentlichkeitsarbeit ihres TV-Landesprogramms über die Kernenergie sachlich-neutral aufzuklären und damit ein Gegengewicht zu den öffentlich-rechtlichen Des- und NichtInformationskanälen ARD/ZDF anzubieten. Ferner sollte die Landesregierung von NRW beginnen, wieder Lehrstühle für Reaktortechnik an ihren Universitäten einzurichten. Mittel dazu könnten den sinnvollerweise aufgelösten Genderlehrstühlen entnommen werden.

Zum Autor und Unbefangenheitserklärung

Jahrgang 1943, Studium und Promotion in Physik, kernphysikalische Forschung, Tätigkeit in der chemischen Industrie, Professor an der HTW des Saarlandes (Informatik, Operations Research, Physik). Seit 10 Jahren im Altersruhestand mit Klima-Forschungstätigkeit und populären, aber auch mit begutachteten wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu Energie-, Klima- und Kernkraftwerks-Themen befasst (s. hierzu die persönliche Webseite des Autors <https://www.horstjoachimluedecke.de/>).

Der Autor erklärt als einzige Motive seiner Stellungnahme die wissenschaftliche Wahrheit und die freiheitlichen demokratischen Grundsätze, zu der insbesondere auch die freie Meinungsäußerung gehört. Seine gutachterliche Stellungnahme nimmt auf politische Befindlichkeiten keine Rücksicht, denn sie ist ausschließlich sachorientiert und orientiert sich an Lösungen, die in der politisch und wirtschaftlich unabhängigen Fachwelt unter der zusätzlichen Prämisse uneingeschränkten Umweltschutzes als optimal anerkannt sind. Beeinflussung seitens politischer Parteien, kommerzieller Unternehmen oder anderen Interessengruppen, wie NGO's etc. ist ausgeschlossen.

Anhang A

**Energiewende: Fakten, Missverständnisse, Lösungen –ein Kommentar aus der Physik vom
15.07.2019**

Energiewende: Fakten, Missverständnisse, Lösungen – ein Kommentar aus der Physik

Die Energiewende soll den fortschreitenden Klimawandel aufhalten. Zu diesem Zweck hat sich Deutschland im Klimapakt der Europäischen Union verpflichtet, den Ausstoß klimaschädlicher Gase bis 2050 um 80% bis 95% zu verringern. Als Zwischenziel soll bis 2030, das heißt in etwa zehn Jahren, deren Ausstoß gegenüber heute um gut 40% gesenkt werden.

N.B.: Quellen zu allen Angaben in diesem Text finden sich in einer separaten Excel-Datei unter: https://www.physi.uni-heidelberg.de/energiewende/Quellenangaben_Web_2019.xls

Fakten

Um abschätzen zu können, wie realistisch dieses 40%-Zwischenziel ist, muss man als erstes einen Blick zurückwerfen: Was wurde in der gleichen Zeitspanne, d.h. in den vergangenen zehn Jahren, beim Klimaschutz in Deutschland erreicht, nachdem erheblich in den Ausbau von Wind und Sonnenkraftanlagen investiert wurde? Die Antwort fällt ernüchternd aus – der Ausstoß klimaschädlicher Gase ist seither unverändert, abgesehen von zufälligen Schwankungen.

Abbildung 1 zeigt die Daten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) zum CO₂-Ausstoß. (Kohlendioxid hat mit 88% den größten Anteil an den klimaschädlichen Gasen, gerechnet in CO₂-Äquivalenten.)

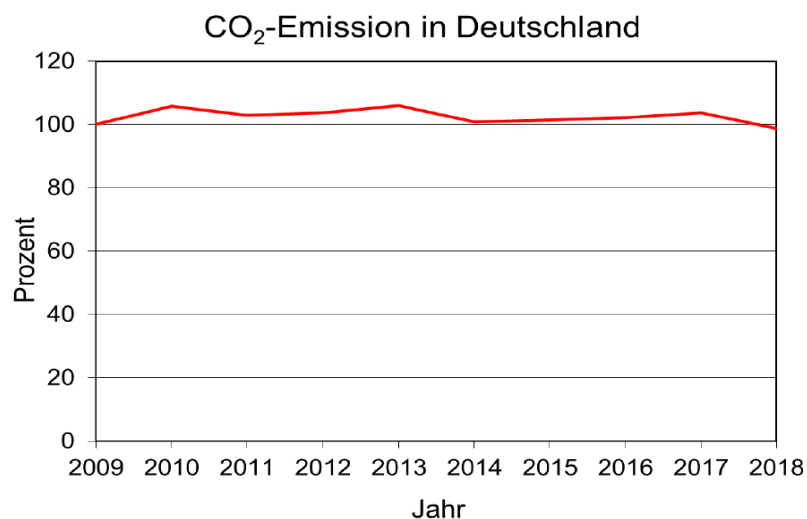


Abb. 1. Der CO₂-Ausstoß in den letzten 10 Jahren. Der Ausstoß im Jahr 2009 wurde auf 100% gesetzt. Quelle: BMWi.

Zwar ist der CO₂-Ausstoß in den Jahren nach der Wiedervereinigung leicht zurückgegangen (um 25%), weshalb 1990 gern als Referenzdatum genommen wird. Dieser Rückgang lag jedoch vor allem an der Deindustrialisierung der neuen Bundesländer. Die in der Abbildung sichtbare geringfügige Abnahme im Jahr 2018, ausgelöst durch den vorangegangenen milden Winter, wurde in den Medien gebührend gefeiert.

Um zu verstehen, warum sich der CO₂-Ausstoß trotz großer Anstrengungen nicht verringert, ist es wichtig, die Entwicklung der gesamten Energieversorgung zu betrachten. Es verzerrt das Bild, wenn man, wie es sich eingebürgert hat, nur den Stromsektor betrachtet, da dieser nur 18% des gesamten Energiesektors ausmacht. Außerdem sind große Verschiebungen zwischen den einzelnen Sektoren vorgesehen, und wenn man beurteilen will, ob eine solche Verschiebung möglich ist (etwa beim Wechsel vom Benzin- zum Elektroauto), muss man das Gesamtsystem betrachten.

Abbildung 2 zeigt den Anteil der verschiedenen Energieträger an der Energieversorgung, ebenfalls für die letzten zehn Jahre. Die oberen vier breiten Streifen der Abbildung zeigen die fossilen Brennstoffe Kohle, Erdöl und Erdgas. Sie tragen den Großteil der Energieversorgung und sind die wesentliche Quelle des CO₂-Ausstoßes.

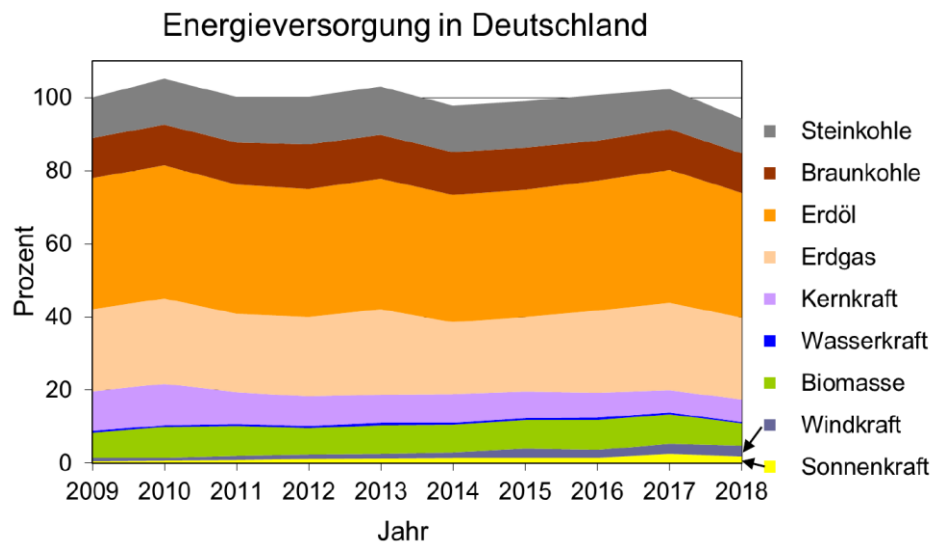


Abb. 2. Die Anteile der verschiedenen Energieträger an der gesamten Energieversorgung. Die Gesamtenergie im Jahr 2009 wurde auf 100% gesetzt. Quelle: BMWi.

Die unteren fünf schmalen Streifen in Abbildung 2 zeigen die nicht-fossilen Energieträger, von Kernkraft bis Sonnenkraft, deren Einsatz die CO₂-Bilanz nicht belastet. Der Anteil dieser nicht-fossilen Energieträger an der Gesamtenergie des betreffenden Jahres (20%) hat sich seither praktisch nicht verändert, obwohl sich Deutschland im Klimapakt bis 2030 auf einen Anstieg dieses Anteils auf mindestens 30% verpflichtet hat (neben dem oben genannten 40% CO₂-Rückgang). Absolut ist diese CO₂-arme Energie seit 2009 sogar leicht zurückgegangen (um 1%). (Der Energie- und Ressourceneinsatz bei der Erstellung der Kraftanlagen fällt für alle Energieträger ebenfalls ins Gewicht, ist aber nicht Gegenstand unserer kurzen Abhandlung.)

Die nicht-fossilen Energieträger im Einzelnen: Die Kernenergie, 2018 bei 6,5%, soll bis 2022 auf null zurückgefahren werden, was die CO₂-Bilanz weiter belasten wird. Die Wasserkraft, im Diagramm kaum sichtbar, ist mit 0,5% seit Jahrzehnten unverändert und hierzulande kaum noch auszubauen. Die Biomasse (Holz, Klärgas, Biodiesel u.a.) hat mit 9% Anteil in letzter Zeit wieder leicht abgenommen. Die Windkraft, am unteren Rand der Abbildung, trägt 3% bei, Photovoltaik und Naturwärme 2% (1,3% plus 0,7%). Zur Naturwärme gehören Wärmepumpen, Solar- und Geothermie.

In Abbildung 2 ist die "Primärenergie" gezeigt, die in den eingesetzten Energieträgern steckt. Die Abbildung zeigt sozusagen den jährlichen *Verbrauch* der Energievorräte. Die "Endenergie" hingegen ist der Anteil der Primärenergie, die beim Verbraucher ankommt (2018 sind das 69%). Sie zeigt den *Nutzen* der Energie. Die Endenergie wird eingesetzt als Wärmeenergie für Heizung/Kühlung und Warmwasser (32%) und Prozesswärme in der Industrie (24%), und als mechanische Energie (38%), das meiste davon im Straßenverkehr. Die restlichen 5% gehen zu etwa gleichen Teilen in Beleuchtung und Datenverkehr.

Zur Endenergie tragen Wind und Sonne in gleichem Maße bei wie zur Primärenergie, während der Anteil der fossilen Energieträger um ca. 20% reduziert ist, die Kernenergie sogar um ca. 60% (was unerheblich ist, da sie bald abgeschaltet wird). Der Anteil der Erneuerbaren ist daher bei der Endenergie etwas höher (16%) als bei der Primärenergie (12%, für 2017).

Missverständnisse

Die in Abbildung 2 gezeigten 3% für die Windenergie lassen uns stutzen. Beliefert nicht eine einzige Windkraftanlage mehr als tausend Haushalte mit Strom, wie man landauf landab hört? Wenn jedes der 30 000 installierten Windrädern mehr als 1000 Haushalte versorgt, dann erfasst die Energiewende bereits mehr als 30 Millionen der insgesamt 41 Millionen Haushalte. Ist die Energiewende damit nicht schon fast geschafft, und widerspricht dies nicht dem in Abbildung 2 gezeigten Befund?

Nein, denn hier trifft man auf das erste Missverständnis: selbst wenn alle Haushalte in Deutschland ihren Strom aus erneuerbaren Quellen bezögen, so wären erst 6% des 80%-Ziels zur Klimagasvermeidung bis 2050 geschafft. Der Beitrag der Windkraft zur Energiewende sieht nur riesig aus, da er in Einheiten der kleinen "Münze" Haushaltsstrom angegeben wird. (Kleine Nebenrechnung: Der Stromverbrauch der privaten Haushalte beträgt 25% des gesamten Stromverbrauchs, dieser wiederum beträgt 18% des gesamten Energieeinsatzes, und 25% von 18%, bezogen auf das 80%-Ziel, ergibt 6%).

Das nächste Missverständnis: meist wird in den Medien, zum Vergleich mit konventionellen Kraftwerken, die installierte Leistung von Sonnen- und Windkraftanlagen angegeben statt der tatsächlich produzierten nutzbaren Leistung. Die tatsächlich im ganzjährigen Betrieb im Mittel gelieferte nutzbare Leistung einer Windkraftanlage ist nur ein Viertel, die einer Photovoltaikanlage ein Achtel der installierten Leistung. (Ihre installierte Leistung erreichen Solarzellen bei senkrechtem ungetrübtem Einfall des Sonnenlichts, Windräder werden bei Windstärke zehn – schwerer Sturm – zur Vermeidung von Überlastung die Flügel aus dem Wind gedreht. Die installierte Leistung eines Windrades mag den verantwortlichen Sicherheitsingenieur interessieren, für die Energiebilanz ist sie nicht die entscheidende Größe.)

Wie man sieht, lassen sich mancherlei Erfolgszahlen zu Wind- und Sonnenkraft in die Welt setzen. Setzt man zum Beispiel die *installierte* Leistung aller Windkraftanlagen in Beziehung zum Stromverbrauch aller Haushalte, so gewinnt man sofort einen Wert, der $4/6\% = 70$ mal größer ist als die eigentlich interessierende *nutzbaren* Leistung der Windkraft am gesamten Energieeinsatz. – Diese Beispiele lassen ahnen, warum die Bilanz der bisherigen Energiewende so ernüchternd ausfällt.

Hierbei ist noch nicht berücksichtigt, dass Wind- und Sonnenenergie heute und in absehbarer Zukunft nicht voll nutzbar sind. Grund hierfür sind insbesondere die starken jahreszeitlichen und Tag-Nacht Schwankungen von Wind und Sonne, selbst wenn diese durch internationale Vernetzung etwas ausgemittelt werden können. Wegen der unvermeidlichen Dunkelflauten, in denen es weder Sonne noch Wind gibt, muss für alle Wind- und Sonnenkraftanlagen eine entsprechende Anzahl fossiler Kraftwerke vorgehalten werden. Dies gilt, solange ausreichende Stromspeicher noch in weiter Ferne liegen.

Lösungen

Ein Weiter so mit mehr vom Gleichen wird nur wenig am CO₂-Verlauf ändern. Im Folgenden sind einige Alternativen zur gegenwärtigen Strategie gegen den Klimawandel aufgeführt.

Vorbemerkungen

- Um im demokratischen Prozess die richtigen Entscheidungen zu treffen ist es wichtig, der Öffentlichkeit die korrekten Zahlen vorzulegen. Ein auf selektiven Zahlen beruhender Zweckoptimismus führt zu Fehlinvestitionen und Enttäuschungen.
- Ein vernünftiger Lösungsansatz muss ergebnisoffen sein, statt festen Vorgaben zu folgen. Man sollte insbesondere nicht allein den Wünschen der Industrie folgen: Die Industrie bevorzugt teure Lösungen, solange diese von der Allgemeinheit bezahlt werden.

– Die wichtigen Fragen zur CO₂ Bepreisung überlassen wir den Fachleuten aus den Wirtschaftswissenschaften.

Energieeinsparungen

- Mit Energieeinsparungen wird Geld eingespart, statt es wenig effizient auszugeben: Würde beispielsweise im Verkehr 12% weniger Kraftstoff verbraucht, so sparte dies mehr Energie ein, als alle Windkraftanlagen liefern. Zum Vergleich: Die Leistung der neu zugelassenen PKW hat sich in den vergangenen 10 Jahren im Mittel um 18% erhöht, ihre Anzahl um 11%.
- Das eingesparte Geld kann z.B. für den Bau energieeffizienter Wohnungen eingesetzt werden, oder um die Schäden des Klimawandels zu mildern.

Zukünftige Energieversorgung

- Das weltweite Potenzial der Sonnenenergie ist sehr groß und sollte besser genutzt werden, insbesondere in Kombination mit Elektrolyse zur Erzeugung speicherbaren und transportablen Wasserstoffs. In den äquatornahen Wüsten der Erde stehen große Flächen für den Einsatz von Solarkraftwerken zur Verfügung, und auch für die Windenergie gibt es deutlich günstigere Standorte als das relativ windstille deutsche Binnenland. Weitere Forschung tut not.
- Die Gefahren der Kernkraft (Kernspaltung oder Kernfusion) sollten im Vergleich zu den Gefahren des Klimawandels bewertet werden. Die in mehreren Industrienationen entwickelten Brutreaktoren erzeugen übrigens nicht nur CO₂-freien, sondern auch nachhaltigen Strom.

Schlussbemerkungen

Die Studien verschiedener Behörden und Agenturen kommen zu dem Schluss, dass man bis 2050 mit Wind- und Sonnenenergie, verbunden mit dem Einsatz von Elektroautos, den klimaschädlichen CO₂-Ausstoß um 95% verringern kann, selbst bei unverminderter Verkehrsleistung. Ob diese Planungen realistisch sind, muss jeder für sich selbst entscheiden: Im gängigen Szenario erfordert allein die "onshore" angesetzte Windenergie im Mittel, über Stadt und Land verteilt, alle 2.5 Kilometer ein Windrad. Für die Sonnenenergie sind zusätzlich Solarzellen mit einer Zellenfläche von mehr als tausend Quadratkilometern erforderlich. Dies obwohl alle Vorteile der "Sektorkopplung" (Kraft-Wärmekopplung, Wärmepumpen und -speicher usw.) einbezogen sind.

Es ist auf jeden Fall schwer vorstellbar, dass der heutige Energiebedarf ganz aus erneuerbaren Energien gedeckt werden kann. Energieeinsparung in allen Bereichen muss deshalb das oberste Ziel sein. Hier muss Deutschland als Hochtechnologieland vorangehen.

Zu beachten: Die benötigte Energie ist das Produkt aus Prokopfverbrauch und Bevölkerungszahl. Während klar ist, dass der deutsche Prokopfverbrauch erheblich sinken muss, wird ein Bevölkerungsrückgang hierzulande als Unglück angesehen. Die Frage des Wachstums der Weltbevölkerung insgesamt sollte unbefangen diskutiert werden – andernfalls wird sich die Natur zu wehren wissen. Unser Energieverbrauch ist allerdings weder auf zehn noch auf fünf Milliarden Menschen ausweitbar.



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

(siehe auch den Anhang nächste Seite)

Anhang

Für den interessierten Laien folgen einige weitere Zahlen zur Energiewende.

Zur *Bioenergie*: Biomasse wird seit Urzeiten energetisch genutzt und liefert in Deutschland im Mittel 1,5 Watt je Quadratmeter Anbaufläche.

Zur *Sonnenenergie*: Eine Photovoltaikanlage kann bei senkrechtem Lichteinfall zur Mittagszeit im Hochsommer eine Leistung von 140 Watt je Quadratmeter erreichen, über das Jahr gemittelt sind es in Deutschland aber nur 17 Watt/m².

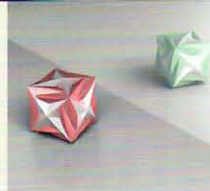
Zur Einordnung: Ein Haarfön oder ein Tauchsieder haben typisch 2000 Watt (2 kW) Leistungsaufnahme. Das Heidelberger "Solar"schiff Neckarsonne benötigt bei voller Fahrt 54 kW, hat aber nur ca. 20 Quadratmeter Solarzellen mit schrägem Lichteinfall, die bestenfalls 1 kW beisteuern, das reicht kaum für die Bordküche. Das Solarschiff bezieht daher praktisch alle Energie aus dem öffentlichen Stromnetz.

Zur *Windenergie*: Im Jahresmittel beträgt die installierte Leistung einer durchschnittlichen Windkraftanlage 1900 kW, die tatsächliche Leistung beträgt 440 kW. Davon kommen 350 kW beim Verbraucher an.

Um ein Gefühl für die Größe dieser Zahlen zu bekommen: Die Leistung eines neu zugelassenen PKW liegt heute laut Kraftfahrt-Bundesamt im Mittel bei 111 kW. Bei typisch 30% Wirkungsgrad benötigt ein PKW unter Volllast daher $111 \text{ kW} / 30\% = 370 \text{ kW}$ Eingangsleistung. Natürlich ist nicht jeder PKW ständig mit Höchstgeschwindigkeit unterwegs, sondern im Mittel teilen sich dreihundert Elektroautos ein Windrad (die Autos in der Garage mitgezählt). Aber angesichts eines Bestands von heute 46 Millionen PKW würden hierfür weit mehr als hunderttausend weitere Windräder gebraucht (der Gesamtverkehr bräuchte elektrifiziert rund das Doppelte). Der grüne Strom kann aber nur einmal genutzt werden, und muss bereits für den Ersatz der Kernkraft herhalten. Elektroautos werden daher ihren Strom auch auf lange Sicht im Wesentlichen ganz aus konventionellen fossilen Kraftwerken beziehen. (Der oft zitierte, etwa dreifache Effizienzgewinn des Elektromotors gegenüber dem Benzinmotor geht durch die geringe Effizienz der fossilen Stromerzeugung größtenteils wieder verloren.) Elektroautos, so attraktiv sie sein mögen, tragen daher praktisch nichts zur Energiewende bei.

Anhang B

Horst-Joachim Lüdecke: Naturgesetzliche Schranken der Energiewende (mit freundlicher Genehmigung der Naturwissenschaftlichen Rundschau)



Naturgesetzliche Schranken der Energiewende

Aufwachsen ohne Windeln – Was ein Vergleich zwischen Menschenaffen und Menschen zeigt

Was vom Reisen bleibt – Maximilian Prinz zu Wieds amerikanische Sammlungen

Muskelphysiologie, Lehrer und Vorbild – Hans Christoph Lüttgau (1926 – 2017) zur Erinnerung

Rundschau

Linienwirkung eines Plasmas bei einem Doppelsternsystem mit Pulsar
Hydratisiertes Mantelgestein auf dem Mars · Neue Generation elektronischer und optoelektronischer Bauteile · Globaler Artenverlust und

Schutzmaßnahmen · Durchlasszellen: Die Tore zur Wurzel · Langzeitversuch zeigt unerwartete Reaktion von Pflanzen auf erhöhte CO₂-Gehalte · Der giftige Schnürsenkelwurm · Wie der Malaria-Erreger *Plasmodium falciparum* die Immunabwehr seines Wirtes manipuliert

Buchbesprechungen

Personalia

Service

Tipps und Hinweise

Veranstaltungen

Stichwort: Homo demens

GEOMAX 23

Furiöse Feuerberge – warum Klimaforscher mit Vulkanen rechnen

6

Juni 2018

71. Jahrgang

€ 22,00

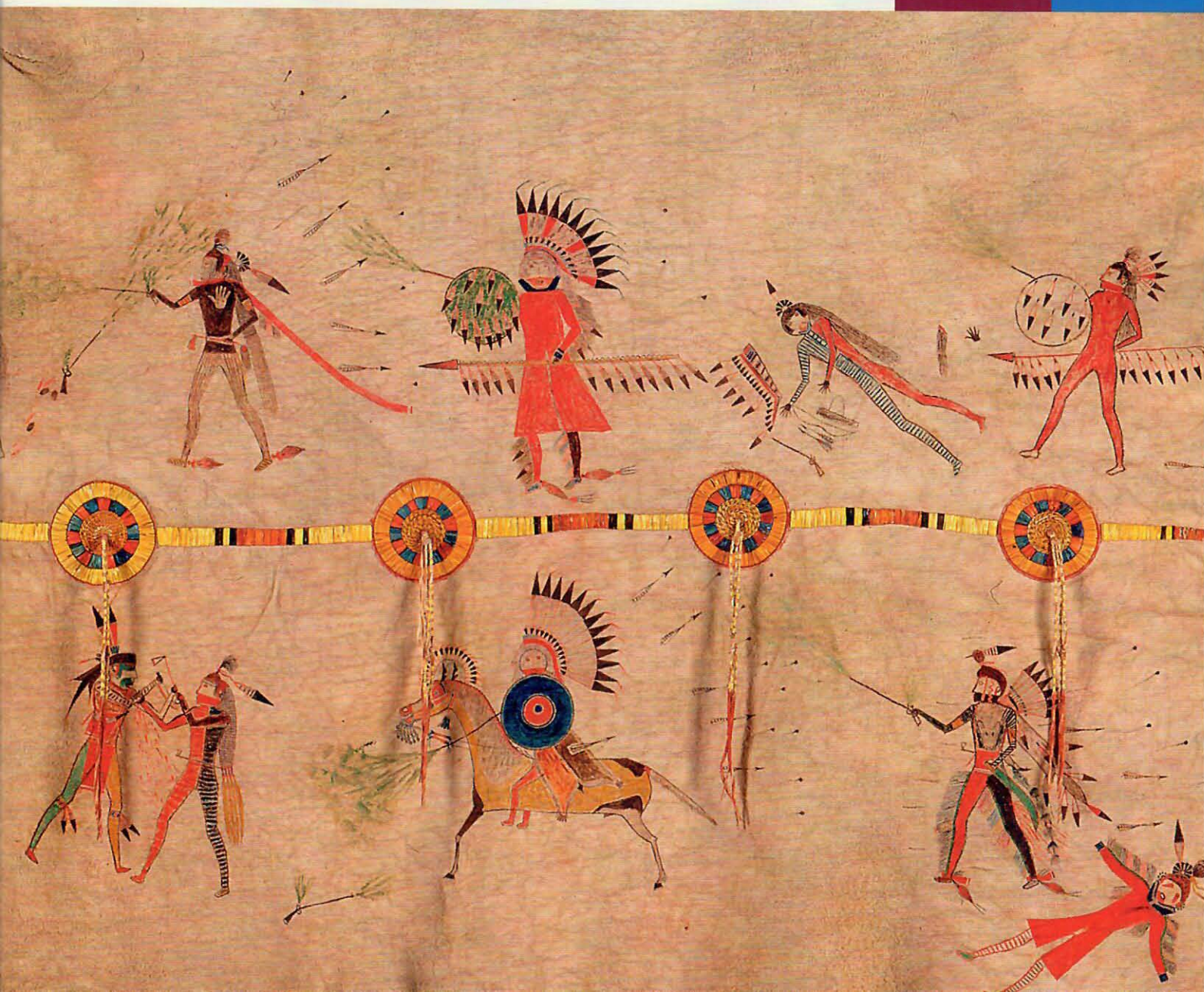
E 9981

Naturwissenschaftliche Rundschau

Organ der
Gesellschaft Deutscher
Naturforscher und Ärzte

NR

840



Naturgesetzliche Schranken der Energiewende

Die Energiewende gehört in Deutschland zu den großen Zukunftsprojekten. Nach dem Ausstieg aus der Kernenergie und der Nutzung von Stein- und Braunkohle wird nach derzeitigen Plänen ein weiterer forcierter Ausbau der sogenannten Erneuerbaren – insbesondere Sonnen- und Windenergie sowie Bioenergie – angestrebt. Doch wie realistisch sind die Aussichten hierfür? Während die Speicherproblematik bei volatilen Energiequellen zunehmend diskutiert wird, sind inhärente Probleme der Nutzung von Wind- und Sonnenenergie wenig bekannt: Ihre geringe Leistungs- und Energiedichte lassen sich nicht durch technische Mittel aus der Welt schaffen. Auch die notwendige Pufferung des fluktuierenden Zufallsstroms ist ein gravierendes Problem, weshalb sich der Beitrag vor allem diesen beiden Fundamentalmängeln widmet.

Die Bundesregierung plante ursprünglich, bis zum Jahr 2050 gegenüber 2008 den Stromverbrauch um 25% zu senken, den Anteil an erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch auf 80% zu erhöhen, die Treibhausgasemissionen um 80 bis 95% zu verringern und die Zahl der Elektroautos auf 6 Millionen zu steigern. Aktuell sind diese Zielstellungen verändert und unverbindlicher im Koalitionsvertrag festgehalten [1]. Das Vorhaben, als „Energiewende“ bezeichnet, soll mit Strom aus Wind, Sonne und Biomasse realisiert werden, im Folgenden kurz „Erneuerbare“ genannt. Die Energiewende betrifft praktisch nur elektrischen Strom. Elektrische Energie macht aktuell (2017) etwa $\frac{1}{6}$ des Primärenergiebedarfs in Deutschland aus [2]. Sie ist die wichtigste, weil unverzichtbare Energieform für jede moderne Industriegesellschaft. Strom ist nur ein Medium, um Energie zu transportieren. Er wird aus einer anderen Energieform erzeugt und beim Verbraucher in die jeweils benötigte Energieform umgewandelt. Elektrische Energie kann man in größerem Umfang nur über verlustreiche und kostspielige Umwege speichern, etwa mit Pumpspeicherkraftwerken oder Batterien. Das Stromnetz selbst ist kein Speichermedium. Ohne Speicherung muss Strom zum Zeitpunkt seiner Erzeugung sofort verbraucht werden.

Die Energiewende hat mit erheblichen Problemen zu kämpfen. Trotz der im Jahre 2017 über 28 000 installierten Windturbinen, deren Nennleistung bereits alle ehemaligen deutschen Kernkraftwerke übertrifft [3], trägt Windstrom nur etwa 3% zum deutschen Primärenergieverbrauch bei, Sonnenstrom und Strom aus Biomasse liefern jeweils etwa 1%. Mehr als 1000 Bürgeri-

nitiativen wenden sich gegen die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes und ihrer Lebensräume durch Windturbinen sowie gegen mögliche gesundheitsschädliche Folgen des Windrad-Infraschalls. Ein weiterer Windrad-Ausbau lässt daher zunehmenden gesellschaftlichen Widerstand erwarten. Deutschland hat heute die höchsten Strompreise Europas [4]. Behörden ergreifen inzwischen Maßnahmen gegen großräumige Stromausfälle, weil die Wahrscheinlichkeit gefährlicher Blackout-Ereignisse [5] infolge des zunehmenden Fluktuationsstroms aus Wind und Sonne ansteigt. Dem Fluktuationsproblem von Wind- und Sonnenstrom wird mit aufwendigem Zu- und Abschalten von schnell reagierenden Gaskraftwerken als Dampfturbinen-Kraftwerke (GuD Backup-Kraftwerke) begegnet. Das für die Netzstabilität notwendige Vorhalten von fossilen Backup-Kraftwerken, deren Leistung der Gesamtleistung der fluktuierenden Erneuerbaren entspricht, ist zu einem maßgebenden Kostenfaktor der Energiewende geworden.

Liegen die Gründe für die Probleme bei der Umsetzung der Energiewende in einem falschen Management, in unzureichender Planung oder in technischen Unzulänglichkeiten? Zu diesen Fragen gibt es bereits reichhaltige Literatur. Der renommierte Ökonom Hans-Werner Sinn (ehem. Professor an der LMU München und Präsident des Instituts für Wirtschaftsforschung) hat erst jüngst wieder eine kritische Studie zur Energiewende vorgelegt [6].

Grundsätzlich unterliegen die „Erneuerbaren“ und damit die Energiewende zwei naturgesetzlich bedingten Fundamentalmängeln. Der wichtigste wird dabei oft unterschätzt, den Medi-

en ist er so gut wie unbekannt. Mit ihm wird sich der vorliegende Beitrag vorwiegend befassen. Ein naturgesetzlich bedingter Mangel ist durch keine technische Maßnahme zu beseitigen. Der Versuch, dies dennoch zu erzwingen, führt zu extremen Kosten und oft auch hohen Umweltbelastungen.

Energie ist der maßgebende Kostenfaktor industrieller Produktion, und alle Industrienationen befinden sich im globalen Wettbewerb. Nicht einmal ein momentan auf den vordersten Plätzen dieses Wettbewerbs stehendes Land hat die Garantie, nach fundamentalen, weit in die Zukunft wirkenden Fehlentscheidungen in seiner Energiepolitik auch dort zu bleiben. Im Folgenden wird dargelegt, warum die beiden Fundamentalmängel der „Erneuerbaren“ eine unvermeidbare Konsequenz elementarer Naturgesetzmäßigkeiten sind. Die beiden Fundamentalmängel und ihre naturgesetzlichen Gründe sind zwar den Fachleuten geläufig, nicht aber in erkennbarer Weise den politischen Verantwortlichen.

Energiebedarf im Verlauf der Menschheitsgeschichte

Der tägliche Energiebedarf eines Erwachsenen hat sich im Laufe der Menschheitsgeschichte laufend erhöht. Er betrug um die 8 kWh bei Jägern und Sammlern der Steinzeit, etwa 30 kWh im Mittelalter und ist auf über 200 kWh in modernen Industriegesellschaften angestiegen [7]. Jäger und Sammler deckten ihn noch mit Feuerholz, im Mittelalter kamen Zugtiere sowie Wasserräder und Windmühlen zum Betreiben einer Landwirtschaft hinzu. Heute (2015) wird der Energiebedarf der Menschheit zu insgesamt 81,4% durch Kohle, Erdöl und Gas gedeckt (Abb. 1). Der Rest kommt aus Uran (4,9%), Wasserkraft (2,5%), Biobrennstoffen (9,7%) und den „Erneuerbaren“ (Wind, Sonne, Geothermie, Gezeitenenergie etc. (1,5%). An dieser Zusammensetzung wird sich auch in den nächsten Jahren kaum Wesentliches ändern [8]. Wind- und Sonnen-Energie spielen weltweit nur eine verschwindend geringe Rolle. In Deutschland würden sie bei freien Marktverhältnissen wegen ihrer zu hohen Kosten, verglichen mit Kohle oder Uran, nicht vorkommen (vgl. Abb. 2, S. 284). Allein die Umlagen zur Förderung der Erneuerbaren gemäß dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) belasten die deutsche Volkswirtschaft und Verbraucher heute mit 30 Milliarden Euro pro Jahr [9]. Bei der Nutzung der „Erneuerbaren“ Wind, Sonne und Biomasse kommt zumindest in Windturbinen und Photovoltaik modernste Technik zum Einsatz. Diese Modernität verstellt freilich den Blick auf die naturgesetzlichen Schwächen dieser Stromerzeugungsmethoden. Die Energieversorgung im Mittelalter liefert für diese Schwächen ein Anschauungsbeispiel.

Die ab etwa 700 n. Chr. einsetzende Klimaerwärmung mit ihrem Höhepunkt um das Jahr 1000 ließ Ernteerträge und Bevölkerungszahlen ansteigen. Es wurden riesige Waldflächen für den benötigten Ackerboden gerodet, bis 1400 verschwanden dadurch zwei Drittel des deutschen Waldes. Die erforderliche Ackerfläche zur Ernährung einer Person war um ein Vielfaches größer als heute. 90% der gesamten Bevölkerung waren Bauern oder anderweitig in der Landwirtschaft beschäftigte Menschen [10]. Der Einsatz an menschlicher Arbeit, Zugtieren und Ackerflächen für die Landwirtschaft war kaum noch zu steigern. Daher war es in Folge der im Spätmittelalter einsetzenden Klima-Abkühlung und

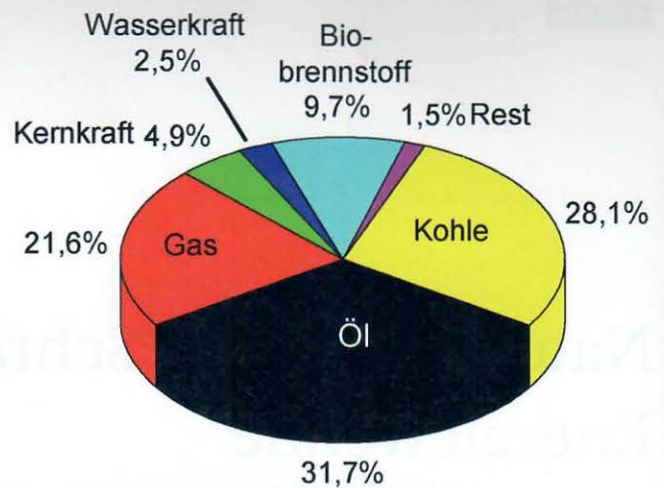


Abb. 1. Weltenergieverbrauch in Methoden-Anteilen im Jahre 2015 nach den Daten der IEA [11]. Holz- und Holzkohle (hier unter Biobrennstoffe) stellen mit dem 3,75fachen der Windenergie zumindest in der EU den größten Anteil an den „Erneuerbaren“ [8]. Da insbesondere die erhältlichen globalen Werte in der Regel nur Schätzungen sind, können unterschiedliche Quellen voneinander abweichende Werte in den Methoden-Anteilen angeben.

schlechterer Ernten nicht mehr möglich, die stark angewachsene Bevölkerung ausreichend zu ernähren. Es begann die Zeit der Hungersnöte, verstärkt durch Seuchen wie die Pest. Zwischen dem Jahr 1000 und dem Ende des 19. Jahrhunderts wurden in Westeuropa 400 Hungersnöte registriert.

Erst der dank neuzeitlicher Chemie mögliche Einsatz von Düngern und Schädlingsbekämpfungsmitteln und die Mechanisierung der Agrarwirtschaft durch Verbrennungsmaschinen konnte die Nahrungsversorgung der Bevölkerung auf eine sichere Basis stellen. Heute ernährt ein Landwirt in Deutschland etwa 130 Mitbürger. Der Anteil der Landwirtschaft am Energieverbrauch der deutschen Gesamtwirtschaft beträgt heute nur noch 1,3% [12].

Um die mittelalterliche Energieerzeugung mit Hilfe riesiger Ackerflächen und einem extrem hohen menschlichen Arbeitsaufwand zu verstehen, sind die physikalischen Größen Leistungsdichte und Energiedichte geeignet. Die zentrale Bedeutung dieser beiden Größen auch für die heutigen Verhältnisse wird im folgenden Abschnitt an Hand von Beispielen verdeutlicht.

Das Problem der Leistungsdichte

Der russische Eisbrecher Arktika wird von zwei kleinen Kernreaktoren an Bord mit einer Gesamtleistung von 55 MW angetrieben [13]. Wollte man die Arktika mit Photovoltaik anstatt mit Uran betreiben, wären rechnerisch 5,5 Quadratkilometer Photovoltaik-Fläche erforderlich, die etwa 10 W Leistung pro m² Solarpanelenfläche liefert. Mit Windstrom an Stelle von Uran wären 42 Windturbinen des Typs Enercon E 126 erforderlich, jede 198 m hoch und mit einer realen Leistung von 1,3 MW (den fiktiven Antrieben der Arktika liegen die deutschen Jahresmittelwerte von Wind- und Sonnenstromanlagen zugrunde). Eine wind- oder sonnenbetriebene Arktika wäre zudem bei Flaute oder Wolkenbedeckung nicht fahrtüchtig, aber dies soll hier keine Rolle spielen. Die Frage nach den Gründen für den extrem

hohen Aufwand der beiden „Erneuerbaren“ Wind und Sonne für den Antrieb der Arktika beantwortet die Leistungsdichte:

$$(1) \text{ Leistungsdichte} = \text{Leistung} / \text{Fläche}$$

oder

$$(2) \text{ Leistung} = \text{Leistungsdichte} \cdot \text{Fläche}$$

Auf der linken Seite von Gleichung 2 steht für alle drei Antriebsarten der Arktika der gleiche Wert von 55 MW. Die Faktoren der rechten Seite der Gleichung zeigen dagegen entscheidende Unterschiede zwischen Uran, Wind und Sonne. Kernreaktoren haben eine sehr hohe Leistungsdichte, sie bringen höchste Leistung auf minimaler Fläche. Man baut sie deshalb seit Jahrzehnten in U-Boote ein. Sonne und Wind haben dagegen – naturgesetzlich bedingt – nur minimale Leistungsdichten. Entsprechend muss die Photovoltaik-Fläche beim Solarantrieb oder die von den Windradpropellern überstrichene Fläche beim Windradantrieb extrem groß sein, damit das Produkt in Gleichung 2 noch die hier benötigten 55 MW ergibt. Die folgende Tabelle zeigt Grobwerte von Leistungsdichten.

Tab. Leistungsdichten unterschiedlicher Methoden zur Erzeugung von elektrischem Strom, angegeben in W/m² des Endprodukts „elektrische Energie“ unter Einbeziehung der jeweiligen Methoden-Wirkungsgrade.

Methode der Stromerzeugung	Leistungsdichte [W/m ²]	Wirkfläche
Erdwärme	0,03	Erdboden
Photovoltaik *)	10	Solarzellenfläche
Wind Hessen *)	~45	überstrichene Propellerfläche
Wind Nordsee *)	~200	überstrichene Propellerfläche
Wasser von 6 m/s	100 000	Turbinenquerschnitt
Kohle	250 000	Brennkesselwand
Kernkraft	300 000	Hüllrohrfläche des Urans

*) bundesdeutsches Mittel über Ort und Jahreszeiten

Die darin erkennbaren eklatanten Unterschiede der Leistungsdichten von Wind, strömendem Wasser und Kohle sind unschwer verständlich: So kann man sich noch gegen einen Sturm von 20 m/s (72 km/h) Windgeschwindigkeit stemmen, dagegen in einen reißenden Wildfluss von weit weniger als 20 m/s Fließgeschwindigkeit zu geraten endet oft tödlich. Auch der Unterschied zwischen der in unsere Haut eindringenden Leistung beim Sonnenbad und der in ein Steak eindringenden Leistung auf einem glühenden Holzkohlengrill ist anschaulich. Letztere ist tausendfach höher als die auf der Schwimmbadwiese. Der Schwachpunkt der mittelalterlichen Energieversorgung wird nun deutlich. Es handelt sich um Methoden kleinster Leistungsdichten, die mit riesigen, ertragsschwachen Ackerflächen und hohem Aufwand an menschlicher Arbeitskraft und Zugtieren einen bei günstigem Klima gerade noch ausreichenden Ertrag lieferten. Eine Windturbine, obwohl ausgestattet mit modernster Technik, ist wegen der minimalen Leistungsdichte des Windes dennoch nichts anderes als ein Rückschritt zu den mittelalterlichen Methoden der Windmühle und des Segel-

schiffs. Um strömender Luft ausreichend Energie zu entnehmen, benötigen Windräder riesige Propeller. Die zu geringe Leistungsdichte des Windes ist der entscheidende Grund für die Mammut-Ausmaße dieser Anlagen (einziger positiver Nebeneffekt ist, dass man dann auch die mit zunehmender Höhe leicht ansteigende Windgeschwindigkeit nutzen kann). Nicht umsonst haben unsere Vorfahren Segelschiffe zugunsten des Dampf- und späteren Dieselantriebs freudig aufgegeben.

Das hier betonte „naturgesetzlich“ bedeutet, dass wir auf die Leitungsdichten von Wind und Sonneneinstrahlung keinen Einfluss haben. Lediglich die Ernteerträge von „Energienmais“ lassen sich mit moderner Genetik und Düngung geringfügig erhöhen. Die Natur selbst setzt die Grenzen, auch beste Technik ist gegen zu geringe Leitungsdichten machtlos. Aus einer Pferdekutsche wird auch mit heutiger Computersteuerung und modernster Mechanik kein leistungsstarkes Motorfahrzeug. Erstaunlich erscheinen in der Tabelle die grob 10 W/m² gemittelte Leistungsdichte aus Photovoltaik in Deutschland. Am oberen Rand der Erdatmosphäre kommen schließlich 1367 W/m² an. Verantwortlich für den kleinen Wert am Boden ist vor allem der durch Wolken unterbrochene und bei Nacht völlig fehlende Strahlungsfluss. Hinzu kommt, dass die Wirkungsgrade von heute üblicher Photovoltaik auf deutschen Dächern etwa 20% betragen, die realen Werte aber darunter liegen [14], weil die Oberflächen der meist fest installierten Solarpaneele nicht dauernd optimal auf die Sonne ausgerichtet sind und der Wirkungsgrad von Photovoltaikzellen mit steigender Temperatur abnimmt [15].

Neben der Leistungsdichte ist auch die Energiedichte als Energie pro Volumen oder pro Gewicht eine maßgebende Größe. Das Reichweiteproblem von Elektroautos wird mit ihr verständlich. Benzin hat nach Abzug der motor- und antriebsbedingten Wirkungsgradverluste eine Energiedichte von rund 4 kWh/kg, ein Lithium-Ionen-Akku (pur betrachtet) dagegen von 0,18 kWh/kg [16]. Ein Elektroauto muss daher grob das 4/0,18 = 22fache Treibstoffgewicht eines Benzinautos mit sich führen. Da heute etwa 71% der Güter in Deutschland (oft über weite Strecken und mit engen Zeitvorgaben) auf der Straße transportiert werden [17], ist zumindest eine Umrüstung von Lkw-Antrieben auf Strom unrealistisch. Hier sind nicht nur das zusätzlich zu transportierende Treibstoffgewicht in Form von Akkus, sondern auch die langen Ladezeiten der Batterien die maßgeblichen Hinderungsgründe. Elektroautos sind nur für die Stadt eine sinnvolle Option.

Leistungsdichte und Wirkfläche

Bei zu kleiner Leistungsdichte sind sehr große Wirkflächen zur Nutzung der betreffenden Energie erforderlich. Dementsprechend steigt der Aufwand an Energie, Material und Kosten für Bau und Betrieb. Die folgenden Daten der auf dem neuesten Stand der Technik stehenden Großwindanlage Enercon E 126 liefern ein Beispiel: 198 m Gesamthöhe, überstrichene Propellerfläche 12 470 m² = 1,247 ha, Gewicht 3460 t plus 3500 t Stahlbetonfundament [18]. Drei E 126 haben somit das Gesamtgewicht aller 300 Leopard 2-Panzer von je 68 t der deutschen Bundeswehr [19]. Trotz 7,5 MW Nennleistung liefert die E 126

im bundesdeutschen Orts- und Jahres-Mittel nur 1,3 MW elektrische Leistung. Dies entspricht, grob gerechnet, der Leistung von 7 Automotoren von je 200 kW. Neben der geringen Leistungsdichte des Windes gibt es weitere methodenspezifische Gründe für die erstaunlich geringe Leistungsausbeute aus Wind, auf die noch eingegangen werden wird. Man müsste schon über mehr als 100 km Windturbinen in den strömungstechnisch erforderlichen Mindestabständen hintereinander stellen, um die gleiche jahresgemittelte Leistung wie ein einziges großes Kohle- oder Kernkraftwerk zu erzielen. Zudem fluktuiert die aus Wind gewonnene Leistung, die von fossilen Kraftwerken ist dagegen konstant. Windturbinen, inzwischen höher als der Kölner Dom, erweisen sich wegen ihrer zu geringen Leistungsdichte und der sich daraus ergebenden gigantischen Abmessungen als schädlich für die Umwelt. Landschaftsentstellungen, mögliche gesundheitliche Schädigung von Windrad-Anrainern durch Infraschall [20] und das jährlich hunderttausendfache Töten von Vögeln und Fledermäusen sind zu nennen [21]. Fledermäuse können zwar durch ihre Ultraschallortung den hohen Tangentialgeschwindigkeiten der Rotorblätter entkommen, die Luft-Druckstöße zerreißen ihnen aber die Lungen. Nicht thematisiert und daher der Öffentlichkeit völlig unbekannt sind die bei intensivem Einsatz von Windturbinen erzeugten schädlichen Klimaveränderungen der tiefen Atmosphäre [22].

Die oft auf Hausdächern installierte Photovoltaik ist dagegen umweltneutral, sieht man von Umweltproblemen durch giftige Metalle (Cadmium) bei der Entsorgung von Solarzellen ab [23]. Beim Energiemais und anderen Energiepflanzen gibt es das Problem der zerstörten Artenvielfalt durch die intensiv betriebenen Monokulturen [24]. Zusammengefasst gilt die Regel:

Je kleiner die Leistungsdichte einer zur Stromerzeugung genutzten Energieform ist, desto größer müssen die Wirkflächen für die betreffende Methode sein, und desto aufwendiger und kostspieliger ist die Methode.

Die Stromerzeugung mit Hilfe von Windturbinen und Energiepflanzen ist wegen deren extrem großen Wirkflächen zudem mit hohen Umweltschäden verbunden.

Physikalische Überlegungen zeigen, dass technischer Fortschritt bei gleichzeitigem Umweltschutz nur mit immer größeren Leistungsdichten in Stromerzeugung, Produktion, Verkehr etc. zu erreichen ist, was sich an den technikgeschichtlichen Entwicklungen belegen lässt. Die benötigte Energie für eine wachsende Bevölkerung bei gleichzeitig zunehmendem Lebensstandard kann wirtschaftlich und umweltschonend nur mit den jeweils verfügbaren Methoden höchster Leistungsdichte bereitgestellt werden. „Erneuerbare“ sind für moderne Industrienationen ungeeignet, können aber vorübergehend in Ländern der Dritten Welt durchaus sinnvoll sein. Die größten Umweltschäden sind heute in Entwicklungsländern zu finden, die den Weg zu höheren Leistungsdichten noch nicht beschreiten können. Das oft in den Medien betonte „sanft“, mit dem „Erneuerbare“ als vorteilhaft und umweltschonend dargestellt werden sollen, stellt die Fakten komplett auf den Kopf. Es verhält sich genau umgekehrt: Je „sanfter“ eine Methode zur Erzeugung von elektrischer Energie ist, umso kostspieliger und oft umweltschädlicher ist ihre Anwendung.

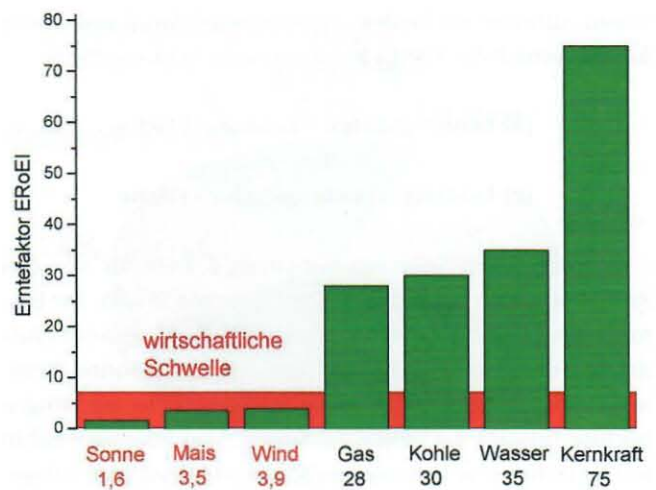


Abb. 2. Erntefaktoren für Methoden der Stromerzeugung. Bei Sonne und Wind ist der Fluktuationsausgleich berücksichtigt (Pufferung) [25]. Sonne, Energiemais (Biomasse) und Wind liegen unter der nach Kriterien der OECD berechneten ökonomischen Schwelle.

Erntefaktor – ein Maß für Energieeffizienz

Der Erntefaktor, englisch EROEI (Energy Returned on Energy Invested), ist eine Größe, die es erlaubt, die Energieeffizienz unterschiedlicher Methoden der Stromerzeugung zu quantifizieren. Vereinfacht ausgedrückt ist er das Verhältnis der gesamten, während der Lebenszeit einer Methode zur Stromerzeugung erzeugten elektrischen Energie zu derjenigen Energie, die für ihren Betrieb selbst aufgewendet werden musste, inklusive des erforderlichen Energieaufwands, um die benötigten Brennstoffe zu fördern und bereitzustellen und die nötigen Anlagen zu errichten. Der EROEI ist ein Energiemultiplikator. Man investiert eine Kilowattstunde und erhält ein Vielfaches zurück, natürlich nur bei $EROEI > 1$, sonst wäre es ein Verlustgeschäft. Im Jahre 2012 wurde über den EROEI eine grundlegende Studie publiziert, auf die sich die Aussagen des vorliegenden Beitrags stützen [25]. Neben der Bedingung $EROEI > 1$ gibt es noch die Forderung $EROEI > 7$, denn unterhalb von 7 ist eine Methode volkswirtschaftlich nicht mehr sinnvoll. Zur Begründung des Faktors 7 sei auf die Originalarbeit verwiesen. Das Bruttosozialprodukt sowie die entsprechend Bewertung einer Energieverbrauchs-Technologie nach Kriterien der OECD gehen dort in die wissenschaftliche Herleitung ein.

Bei der Berechnung des EROEI für Wind- und Sonnenstrom wird auch der Energieaufwand zur Pufferung des fluktuierend anfallenden Stroms berücksichtigt, weil dieser zur direkten Einspeisung in ein Stromnetz ungeeignet ist. Auf diesen zweiten Fundamentalmangel der „Erneuerbaren“ Wind und Sonne wird im übernächsten Kapitel eingegangen. Abbildung 2 zeigt den EROEI für die wichtigsten Methoden zur Erzeugung von elektrischem Strom.

Leistungsdichte bezogen auf Landschaftsfläche

Zur Angabe einer Leistungsdichte gehört die Spezifizierung der Fläche. An Stelle der in der Tabelle für Leistungsdichten angegebenen Wirkflächen sind Landschaftsflächen oft aussagekräftiger. Wählt man die Landschaftsfläche als Bewertungsgröße, so ändert sich bei der Photovoltaik nur wenig. Wenn sich

Photovoltaik auf Hausdächern befindet, verbraucht sie sogar überhaupt keine Landschaftsfläche. Für Energiemais beträgt die Leistungsdichte, bezogen auf die Anbaufläche [26], grob $0,2 \text{ W/m}^2$. Dieser kleine Wert lässt fragen, wie viel Anbaufläche rechnerisch benötigt würde, um den gesamten Inlandsstrom Deutschlands (in 2016) ausschließlich mit Energiemais zu erzeugen: Pro Quadratmeter beträgt die Jahresenergiedichte von Energiemais $0,2 \text{ W/m}^2 \cdot 8760 \text{ h} = 1752 \text{ Wh/m}^2$. Der Inlandsstromverbrauch Deutschlands im Jahr 2016 betrug $593 \text{ TWh} = 593 \cdot 10^{12} \text{ Wh}$. Daher wären $(593 \cdot 10^{12} \text{ Wh}) / (1752 \text{ Wh/m}^2) = 3,1 \cdot 10^{11} \text{ m}^2$ oder $310\,000 \text{ km}^2$ Anbaufläche für die Vollversorgung nötig. Das ist fast die Gesamtfläche Deutschlands.

Für Windturbinen im deutschen Jahres- und Ortsschnitt und ihre Installation in „Windparks“ beträgt die Leistungsdichte bezogen auf Landschaftsfläche, wie gleich gezeigt wird, grob $1,1 \text{ W/m}^2$. Sie ist daher sehr viel kleiner als bezogen auf die Propellerfläche (vgl. Tab.), denn Windturbinen werden in der Regel nicht einzeln, sondern in Ansammlungen aufgestellt. Hierbei müssen Mindestabstände eingehalten werden, um Leistungsminderungen durch gegenseitige strömungstechnische Beeinflussung zu vermeiden. Der Wert von $1,1 \text{ W/m}^2$ wurde in einer internationalen Fachpublikation für ein Gebiet der USA ermittelt, dessen Windverhältnisse mit Deutschland vergleichbar sind [27]. Eine Abschätzung mit den verfügbaren deutschen Windstromdaten bestätigt ihn: 2016 waren in Deutschland 27 000 Windräder installiert, meist in Windparks mit Mindestabständen. Eine moderne Windturbine nimmt in Windparks etwa $0,3 \text{ km}^2$ Bodenfläche in Anspruch. Damit ergibt sich die erzeugte Jahresenergie zu $27\,000 \cdot 0,3 \cdot 106 \text{ m}^2 \cdot 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot 8760 \text{ h} = 78 \text{ TWh}$. Das passt zu der erzeugten Inlandsstromenergie von 80 TWh [2]. Für eine Stromvollversorgung Deutschlands nur mit Windrädern ergeben sich $0,2/1,1$ der Fläche von Energiemais. Dies entspricht ungefähr der Fläche von Bayern.

In diesem Zusammenhang ist von Interesse, wie weit ein zukünftiger Windradausbau überhaupt noch gesetzlich zulässig ist. Die entscheidende Größe ist hier der minimale zulässige Abstand eines Windrads zur nächsten Wohnsiedlung. Windräder erzeugen Infraschall, der nachgewiesenermaßen physiologische Folgen hat und dessen mögliche gesundheitsschädigenden Wirkungen dringend zu untersuchen sind. Die heute gründlichste Studie über nachweisliche Auswirkungen von Infraschall auf die Hirnaktivitäten von Menschen wurde in Zusammenarbeit der Charité Berlin und der

Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) Braunschweig sowie zwei Hamburger Universitätskliniken erstellt [20]. Die Quellenangaben dieser Studie liefern überdies einen guten Überblick zum heutigen wissenschaftlichen Kenntnisstand. Um Beeinträchtigungen durch Infraschall zu minimieren ist inzwischen in Bayern ein Mindestabstand von 10 H zur Wohnsiedlungen vorgeschrieben, das bedeutet ein Abstand vom Zehnfachen der Gesamthöhe des betreffenden Windrads. Aus einer Studie des Bundesumweltamts [28] geht hervor, dass bei 2000 m Mindestabstand (dies entspricht 10 H bei 200 m hohen Windrädern) nur noch maximal 0,4% der bundesdeutschen Fläche für den weiteren Windradausbau nutzbar ist. Ausgeschlossene Sondergebiete sind dabei nicht berücksichtigt, so dass der reale Wert noch etwas geringer ist. Der Ausbauplan der Bundesregierung für Windenergie erscheint daher unrealistisch.

Das Problem der Fluktuation bei Wind- und Sonnenstrom

Der zweite Fundamentalmangel von Wind- und Sonnenstrom, seine Wetterabhängigkeit, ist besser bekannt und wird bereits von den Medien thematisiert. Unvorhersehbar anfallender Strom kann ohne weitere Maßnahmen nicht in das Stromnetz eingespeist werden. Die gelegentlich geäußerte Annahme, dass ein europaweiter Windradverbund für Glättung sorgen würde, hat eine ausführliche Studie des VGB Powertech (kurz VGB, ein internationaler Interessenverband von Unternehmen der Elektrizitäts- und Wärmeversorgungsbranche) widerlegt [29]. Das gemessene Minimum an geliefertem Windstrom beträgt laut dieser Studie nur 4% der europaweit installierten Windrad-Nennleistung. Wörtlich heißt es in der VGB-Studie: „Windenergie trägt damit praktisch nicht zur

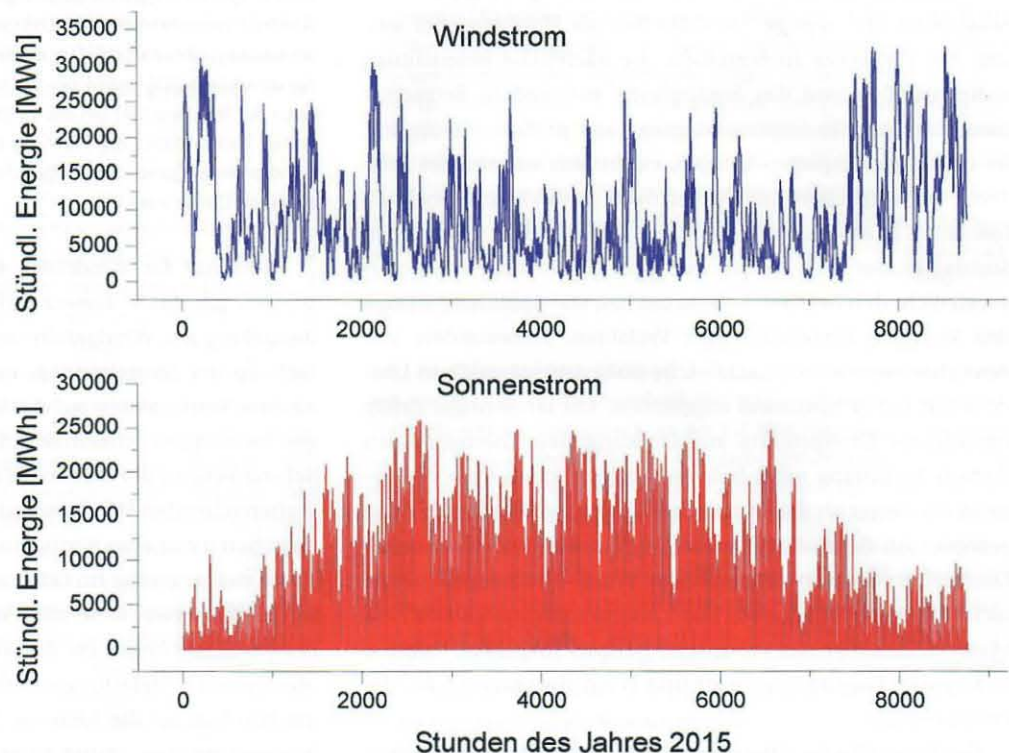


Abb. 3. Stündliche Einspeisung des gesamten bundesdeutschen Wind- und Sonnenstroms [30] im Jahre 2015.

Versorgungssicherheit bei und erfordert 100% planbare Backup-Systeme nach heutigem Stand der Technik.“

Diese Backup-Systeme sind heute schnell reagierende Gaskraftwerke (GuD), die auf Abruf in Betrieb genommen werden können. Diskussionswürdige Stromspeicherlösungen sind nicht in Sicht. Man muss daher für Wind- und Sonnenstrom ein gleichstarkes fossiles Backup-System installieren, was die Gesamtkosten dieser „Erneuerbaren“ zumindest verdoppelt. Abbildung 3 zeigt die stündliche Einspeisung von Wind- und Sonnenstrom über das Jahr 2015.

Das Einspeiseproblem von Zufallsstrom wird von den Medien inzwischen als eines der dringendsten Probleme der Energiewende wahrgenommen. Die Soll-Netzfrequenz von 50 Hertz ist in engen Grenzen stabil zu halten; bereits bei Abweichungen von 0,2 Hertz besteht die Gefahr eines großflächigen Netz-Blackouts. So etwas war von den früheren Kohle-, Gas- und Kernkraftwerken mit ihrem stetigen Grundlaststrom unbekannt. Wetterabhängiger Zufallsstrom ist bis heute ohne Ersatzkraftwerke nicht in der Lage, den Strombedarf jederzeit zu decken. Ersatzkraftwerke sind aber infolge Teilbetriebs und hoher Lastwechselfrequenz schnell dem Verschleiß unterworfen und wirtschaftlich unrentabel. Auf Profit angewiesene Unternehmen haben daher kein Interesse sie zu bauen. Pumpspeicherwerke als bislang einzige Alternative zu Backup-Kraftwerken, wie sie zum Beispiel in Norwegen eingesetzt werden, sind hierzulande aus topographischen Gründen nicht möglich, von Einzelanlagen abgesehen.

Photovoltaik in Ländern starker Insolation

Für Entwicklungsländer mit hoher Sonneneinstrahlung und fehlender Strom-Infrastruktur sind kleinste Photovoltaik-Anlagen eine interessante und offenbar auch vielgenutzte Option. Hier reichen für eine Familie bereits wenige Quadratmeter Solarzellen und wenige Autobatterien als Stromspeicher aus, um den Fernseher zu betreiben, die nächtliche Beleuchtung sicherzustellen und das Smartphone aufzuladen. Betrachtet man dagegen die Stromgewinnung aus großen Photovoltaik- oder Sonnenspiegel-Anlagen, ergibt sich ein anderes Bild. Trotz der verglichen mit Deutschland etwa doppelt so hoch Insolation in afrikanischen Ländern, in Australien oder in den Südstaaten der USA konnte sich dort die Nutzung von Solarstrom nicht durchsetzen. Solarstrom hat, wie Abbildung 2 zeigt, den kleinsten Erntefaktor aller Verfahren. Insbesondere von deutscher Seite wurden zahlreiche Solarstromprojekte in Ländern mit hoher Insolation angestoßen. Ein langfristiger Erfolg irgendeines Großprojekts zur Deckung des überregionalen Bedarfs ist bislang nicht bekannt. Es gibt kaum eine Weltgegend, die besser als die Kanarischen Inseln mit Wind und Sonne gesegnet ist, dennoch haben sich selbst hier und trotz hoher finanzieller Anschlag-Unterstützung Wind- und Sonnenenergie nicht durchsetzen können. Die Energienutzungs-Statistik von Marokko bestätigt das kanarische Beispiel [31]. 2012 lieferten in Marokko Geothermie, Solar und Wind zusammen 0,3% der Primärenergie.

Der Grund für die Misserfolge liegt auf der Hand: Sieht man von den eingangs beschriebenen Vorteilen einer Nutzung in

sehr kleinen Einheiten ab, verbessert sich in Großanlagen sonnenstarker Länder als einziges Kriterium nur die Insolation. Dieser Vorteil reicht aber bei weitem nicht aus, um die bereits geschilderten Nachteile der Photovoltaik wieder wettzumachen.

Leistung von Windrädern und Photovoltaik

Die geringe Leistungsausbeute von Photovoltaik ist mit den Schwankungen sowie höchstens völligem Fehlen des solaren Strahlungsflusses und den sehr kleinen Wirkungsgraden von Photozellen von ca. 10% im Wesentlichen erklärt. Für Windräder muss dagegen neben der Windfluktuation auch noch die typische Kennlinie einer Windturbine beachtet werden (Abb. 4). Erst damit ist die verglichen mit Sonnenstrom noch heftigere Schwankung der Stromleistung (Abb. 3a) und die extrem ungünstige Leistungsernte von Windturbinen zu verstehen.

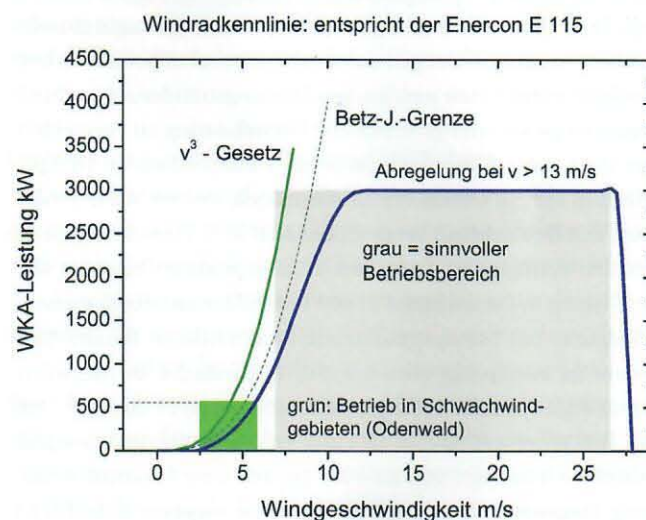


Abb. 4. Beispiel einer Windradkennlinie (blau). Die theoretisch nach dem v^3 -Gesetz mögliche Leistungsausbeute wird prinzipiell von einem Windrad nicht erreicht, die Leistung liegt sogar noch unter der Betz-Joukowski-Grenze [32]. Die mittleren Windgeschwindigkeiten an der Nordseeküste [33] liegen bei 5,8 bis 5,9 m/s und für den Offshore-Bereich der Nordsee [34] um die 9 m/s. Selbst Offshore-Windgeschwindigkeiten lassen daher die Nutzung des sinnvollen Betriebsbereichs von Windturbinen (grau) nur eingeschränkt in dessen linken Randbereich zu. Nach Daten aus [18].

Nicht nur für Windräder, sondern für alle Strömungsmaschinen gilt das v^3 -Gesetz (grüne Kurve in Abb. 4). Eine Verdoppelung der Windgeschwindigkeit führt daher zur Veracht-fachung der Stromleistung, eine Halbierung aber umgekehrt zu ihrer Verringerung auf ein Achtel. Schwankungen der Windgeschwindigkeit wirken sich daher mit dritter Potenz auf die Schwankungen der Windrad-Leistung aus. Die in Deutschland vorherrschenden Windgeschwindigkeiten, im Binnenland grob zwischen 0 und etwa 6 m/s, sind für eine vernünftige Stromausbeute viel zu gering. Im Offshore-Bereich und an Meeresküsten ist der Wind zwar wesentlich stärker, man muss aber schon ab etwa $v = 8$ m/s beginnen, die Windrad-Leistung wegen zu hoher mechanischer Belastung zu drosseln. Ab etwa $v = 13$ m/s muss ein Windrad auf die zulässige Maximalleistung (Nennleistung) begrenzt werden. Damit ist es gerade im Bereich sehr hoher Windgeschwindigkeiten nur stark gedrosselt nutzbar.

Sicherheitsgrenze für wetterabhängigen Fluktuationsstrom

Die bisher geschilderten technischen und wirtschaftlichen Begrenzungen für die „Erneuerbaren“ Wind und Sonne sind zwar prinzipiell keine unüberwindbaren Hürden für ihren weiteren Ausbau, falls man auf Kosten, Naturschutz, Landschaftsschutz und den Gesundheitsschutz von Windrad-Anrainern keine Rücksichten nimmt. Es gibt allerdings eine Grenze seitens der Netzsicherheit. Grund dafür sind schnelle Netzstörungen im Bereich von Sekundenbruchteilen bis zu wenigen Sekunden, etwa Netz-Abtrennungen durch den plötzlichen Ausfall eines großen Umspanntransformators o. ä., die zum Zusammenbruch des gesamten Netzes führen können. Um die Auswirkungen dieser kurzfristigen Störungen auf die Stabilität des Netzes im zulässigen Bereich der Frequenzstabilität zu halten, muss ein ausreichend hoher Prozentsatz der elektrischen Gesamtleistung von Synchrongeneratoren mit großen Schwungmassen geliefert werden [35], also von den klassischen Dampfkraftwerken mit Kohle oder Gas (Gas ist allerdings verglichen mit Kohle zu teuer) oder – wie in anderen europäischen Ländern – Uran. Leistungsungleichgewichte in Folge von Störungen werden hier durch Abbremsen (Ausspeicherung kinetischer Energie) bzw. Beschleunigen (Einspeicherung kinetischer Energie) der Schwungmassen verzögerungsfrei ausgeglichen. Der erforderliche Anteil von Grundlastkraftwerken hängt von der aktuellen Netzstruktur und ferner davon ab, welches Blackout-Risiko man noch toleriert. Eine Untersuchung der vier großen Netzbetreiber 50Hertz, Amprion, Tennet und TransnetBW geht auf diese Zusammenhänge ein und kommt zu dem Ergebnis, dass für Deutschland die Grundkraftwerks-Mindestleistung von 20 GW nicht unterschritten werden darf [36]. Mit den momentan noch vorhandenen Grundlastkraftwerken wäre damit die erforderliche Sicherheit gegeben. Dies wird sich aber mit zunehmendem Windradausbau, dem beschlossenen Abschalten weiterer Kernkraftwerke sowie durch die aktuell diskutierte Abschaltung von Kohlekraftwerken in Richtung größerer Instabilität ändern.

Literatur

[1] Kurzinfo Energieeffizienz des BMU (<https://tinyurl.com/yaltzc9x>). – Koalitionsvertrag 7. Februar 2018, S. 71: Energie (<https://tinyurl.com/ycjvclcf>). – [2] BDEW: Energiewirtschaftliche Entwicklung in Deutschland. 4. Quartal und Jahr 2017 (<https://tinyurl.com/y7k6fs3k>), ferner Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (<https://www.ag-energiebilanzen.de/>). – [3] DAtF Deutsches Atomforum: Kernenergie in Zahlen, 2016 (<https://tinyurl.com/y76odf2x>). – [4] BMWI, Energiedaten: Gesamtausgabe, Stand Januar 2018, 41: Internationaler Energievergleich (private Haushalte) 2017. 42: Vergleich der Elektrizitätspreise für private Haushalte 2017. (<https://tinyurl.com/y8vld8nr>). – [5] Drucksache 17/5672 des deutschen Bundestags, 27.4.2011. TA-Projekt: Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung. (<http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/056/1705672.pdf>). – [6] <http://www.hanswernersinn.de/de/themen/Energiewende>. – [7] <http://www.oekosystem-erde.de/html/energiegeschichte.html> sowie World History and Energy (<https://tinyurl.com/yan5z4pe>). – [8] Eurostat: Wood as a source of energy (<https://tinyurl.com/yd7gqs36>) sowie Statista: Verteilung der weltweiten Energieerzeugung nach Energieträger im Jahr 2015 (<https://tinyurl.com/y9mqvk8f>). – [9]

BMWi: EEG in Zahlen: Vergütungen, Differenzkosten und EEG-Umlage 2000 bis 2018 (Stand 16. Okt. 2017) (<https://tinyurl.com/yddl5339>). – [10] Wald- und Forst.de: Der Wald im Mittelalter (<http://www.wald-und-forst.de/wald-mittelalter.php>), sowie Leben im Mittelalter.net: Die Gesellschaft im Mittelalter (<https://tinyurl.com/y7qazrpz>). – [11] IEA: Key world energy statistics 2017 (<https://tinyurl.com/y7a23q3s>). – [12] Thünen-Institut: Energie in der Nahrungsmittelkette (https://literatur.thuenen.de/digibib_extern/dn048963.pdf). – [13] [https://de.wikipedia.org/wiki/Arktika_\(Schiff\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Arktika_(Schiff)). – [14] (https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell_efficiency). – [15] Solarenergie Förderverein: Wenn es Solarzellen zu heiß wird, liefern sie weniger Energie (https://www.sfv.de/lokal/maills/wvf/wenn_es_.htm). – [16] <http://www.chemie.de/lexikon/Energiedichte.html>. – [17] A. Hütter: Güterverkehr in Deutschland. Statistisches Bundesamt, WISTA 1, 47 (2016) (<https://tinyurl.com/y86dz6mq>). – [18] <https://www.wind-turbine-models.com/turbines/920-enercon-e-126-6.000> sowie Bürgerinitiative für Berken: Berken <http://bi-berken.de/Informationsmaterial.html> – [19] https://de.wikipedia.org/wiki/Leopard_2. – [20] M. Weichenberger et al., PLoS ONE 12(4): e0174420. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174420>. – [21] Deutsche Wildtierstiftung: Windenergie und Artenschutz. (<https://www.deutschewildtierstiftung.de/naturschutz/windenergie-und-artenschutz>). – [22] L. M. Miller et al., Earth Syst. Dynam. 2, 1 (2011). (<https://tinyurl.com/y8vvo4e>) sowie F. Gans, L. M. Miller, A. Kleidon, Earth Syst. Dynam. 3, 79 (2012). (<https://tinyurl.com/y85ptgl>). – [23] D. Wetzl. Streit um giftiges Cadmium spaltet Solarindustrie. (Welt, 15.5.2010. <https://tinyurl.com/y8bzed7s>). – [24] K. Viering: Auf dem Weg in die Maiswüste? Spektrum. de 13.9. 2016 (<https://tinyurl.com/yamu2pvy>). – [25] D. Weißbach et al., Energy 52, 210 (2012) (<https://tinyurl.com/ybgmtmx3>). – [26] A. Hartmann, Statistisches Monatsheft Baden Württemberg 7/2008, S. 40 (<https://tinyurl.com/y7j3z9te>). – [27] L. M. Miller et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 112, 11169 (2015). (www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1408251112). – [28] I. Lütkehus, H. Salecker, K. Adlunger: Potenzial der Windenergie an Land. Abb. 12. S. 38. Bundesumweltamt. Dessau-Roßlau 2013. (<https://tinyurl.com/pzpjlg>). – [29] VGB Studie: Windenergie in Deutschland und Europa (<https://tinyurl.com/ycz6x5n3>). – [30] R. Schuster, aus den Daten von EEX (European Energy Exchange, Leipzig), Amprion, TenneT, 50Hertz, TransnetBW. Vgl. H.-J. Lüdecke: Stellungnahme zur Windenergieausbau-Anhörung Landtag Nordrhein-Westfalen Stellungnahme 17/166 (<https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST17-166.pdf>). – [31] https://energypedia.info/wiki/Morocco_Energy_Situation. – [32] https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law. – [33] DWD, Helmholtz-Zentrum Geesthacht: Norddeutscher Klimamonitor. Mittlere Windgeschwindigkeiten Nordseeküste (<https://tinyurl.com/y6ucd5t4>). – [34] Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE. Windmonitor. Mittlere Windgeschwindigkeiten Offshore Nordsee (<https://tinyurl.com/y92napcz>). – [35] Der Stromverbraucherschutz e.V. NEAB (<http://www.naeb.info/>) gibt als Faustformel permanente 45% an. – [36] 50Hertz, Amprion, Tennet, Transnet BW: Auswirkungen reduzierter Schwungmasse auf einen stabilen Netzbetrieb (<https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/media/documents/Minimale%20Schwungmasse.pdf>).

Prof. Dr. Horst-Joachim Lüdecke (Jahrgang 1943) ist Diplom-Physiker und war im Bereich der kernphysikalischen Forschung am Max-Planck-Institut Heidelberg und danach an der TU München tätig. Später entwickelte er Rechnermodelle für die chemische Industrie (BASF), und war schließlich von 1975 bis 2008 Professor für Informatik, Operations Research und Physik an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) des Saarlandes. Lüdecke ist wiederholt als Fach- und Sachbuchautor hervorgetreten: *Strömungsberechnungen für Rohrsysteme* (zus. mit H. B. Horlacher, expert-Verlag), *CO₂ und Klimaschutz* (Bouvier Verlag, 2010 3. Aufl. vergr.) und *Energie und Klima: Chancen, Risiken, Mythen* (expert Verlag, 2. Aufl. 2015). Seit 2008 Mitverfasser von 9 Klimafachpublikationen in Fachjournalen wie *Climate of the Past* der Europäische Geophysikalischen Union und *Polarforschung* des Alfred-Wegener-Instituts.
E-Mail: moluedecke@t-online.de