



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

Muskelphysiologe, Lehrer und Vorbild - Hans Christoph Lüttgau (1926 - 2017) zur Erinnerung

Rundschau

Linsenwirkung 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

Juni 2018 71. Jahrgang € 22,00

E 9981

Buchbesprechungen

Personalia

Service

Tipps und Hinweise

Veranstaltungen

Stichwort: Homo demens

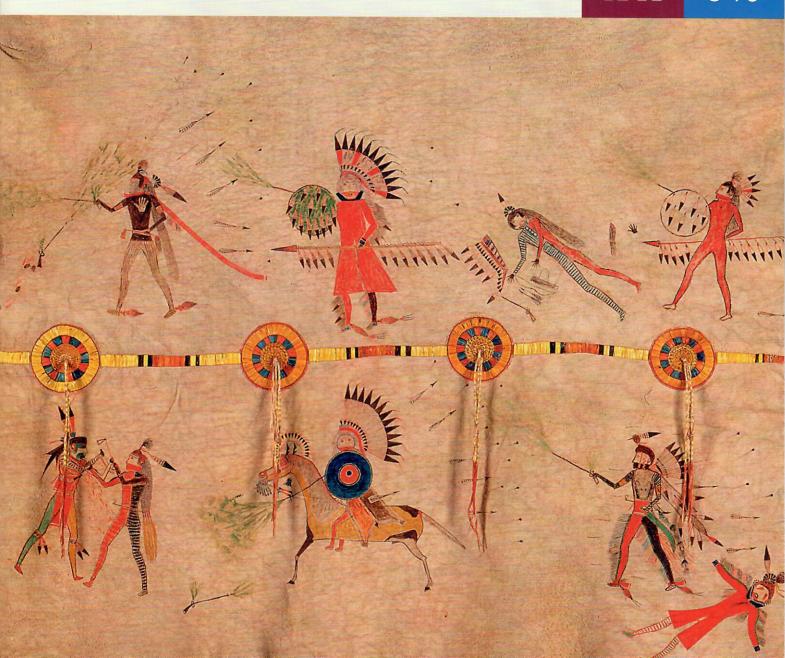
GEOMAX 23

Furiose Feuerberge - warum Klimaforscher mit Vulkanen rechnen

Naturwissenschaftliche Rundschau Organ der

Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte

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.

ie 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 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 Pumpspeicherwerken 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 Landschaftbildes und ihrer Lebensraums 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 Medien 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 Naturgesetzlichkeiten 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

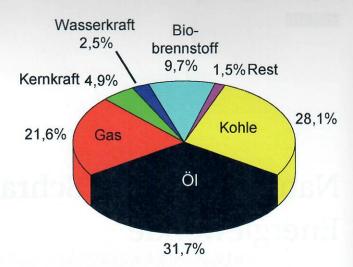


Abb. 1. Weltenergieverbrauch in Methoden-Anteilen im Jahre 2015 nach den Daten der IEA [11]. Holz- und Holzkohle (hier unter Biobrennstoffe) stellen mit dem 3,75fachen der Windenergie zumindest in der EU den größten Anteil an den "Erneuerbaren" [8]. Da insbesondere die erhältlichen globalen Werte in 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 verdeutlich.

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) Leistungsdichte = Leistung / Fläche oder

> (2) Leistung = Leistungsdichte · 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/m²]	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 Segelschiffs. 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 Höhle leicht ansteigende Windgeschwindigkeit nutzen kann). Nicht umsonst haben unsere Vorfahren Segelschiffe zugunsten des Dampfund 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 "Energiemais" 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 Solarpanele 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.

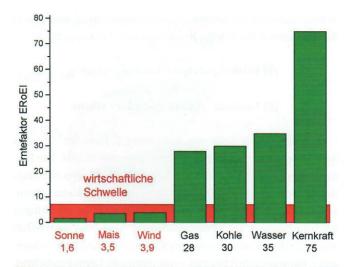


Abb. 2. Erntefaktoren für Methoden der Stromerzeugung. Bei Sonne und Wind ist der Fluktuationsausgleich berücksichtigt (Pufferung) [25]. Sonne, Energiemais (Biomasse) und Wind liegen unter der nach Kriterien der OECD berechneten ökonomischen Schwelle.

Erntefaktor - ein Maß für Energieeffizienz

Der Erntefaktor, englisch ERoEI (Energy Returned on Energy Invested), ist eine Größe, die es erlaubt, die Energieeffizenz 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 benötigen 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 Katpitel 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 W/ $\rm m^2$. 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 W/ $\rm m^2 \cdot 8760~h = 1752~Wh/m^2$. Der Inlandsstromverbrauch Deutschlands im Jahr 2016 betrug 593 TWh = 593 \cdot 10¹² Wh. Daher wären (593 \cdot 10¹² Wh)/(1752 Wh/ $\rm m^2$) = 3,1 \cdot 10¹¹ $\rm m^2$ oder 310 000 km² 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 W/m2. 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 W/m² 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 km² Bodenfläche in Anspruch. Damit ergibt sich die erzeugte Jahresenergie zu 27 000 · 0,3 · 106 $m^2 \cdot 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot 8760 \text{ h} = 78 \text{ TWh. Das passt zu der erzeugten}$ 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 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. Unvorhersebar 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

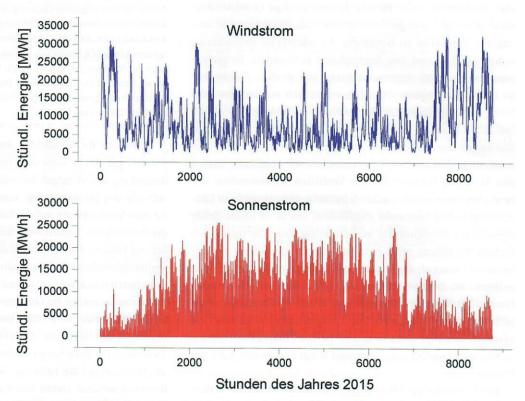


Abb. 3. Stündliche Einspeisung des gesamten bundesdeutschen Wind- und Sonnenstroms [30] im Jahre 2015.

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 schnellem 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 Anschub-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 nächstens 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.

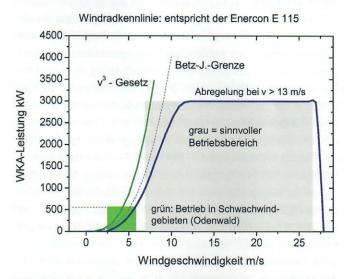


Abb. 4. Beispiel einer Windradkennlinie (blau), Die theoretisch nach dem v³-Gesetz mögliche Leistungsausbeute wird prinzipiell von einem Windrad nicht erreicht, die Leistung liegt sogar noch unter der Betz-Joukowsky-Grenze [32]. Die mittleren Windgeschwindigkeiten an der Nordseeküste [33] liegen bei 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 v3-Gesetz (grüne Kurve in Abb. 4). Eine Verdoppelung der Windgeschwindigkeit führt daher zur Verachtfachung 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 beschlossenem 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/ ycjvlclf). - [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/digbib_ extern/dn048963.pdf). - [13] 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/mails/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/y8vvoj4e) sowie F. Gans, L. M. miller, A. Kleidon, Earth Syst. Dynam. 3, 79 (2012). (https://tinyurl.com/y85ptgl). - [23] D. Wetzel. 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/yamu2pvb). - [25] D. Weißbach et al., Energy 52, 210 (2012) (https://tinyurl.com/ybgtmxz3). - [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/pzpjlgl). - [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%20 Schwungmasse.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