Was kostet der Umstieg auf die regenerativen Energien?

G. Ganteför
Fachbereich für Physik, University Konstanz, D–78457 Konstanz, Deutschland

Nach der Katastrophe in Fukujima fordern Bürger und Politiker aus allen Teilen der Gesellschaft einen raschen Umstieg auf regenerative Energien. Bereits heute sind in Süddeutschland viele Hausdächer mit Photovoltaikanlagen bestückt, die Sonnenlicht direkt in Elektrizität umwandeln. In Norddeutschland beherrschen Windräder das Landschaftsbild. Deutschland scheint bereits ein gutes Stück auf dem Weg zur Unabhängigkeit von Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran vorangekommen zu sein und der vollständige Verzicht rückt in greifbare Nähe. Das Abschalten von sieben Kernkraftwerken hatte keine Konsequenzen und auch dies bestätigt die These, dass ein Umstieg auf regenerative Energien rasch umsetzbar ist. Jenseits der Pressemeldungen gibt es jedoch harte Fakten, die zu der Vision eines raschen Umstiegs nicht passen. Windkraft und Sonnenenergie werden als leistungsstarke Energieträger der Zukunft gehandelt und sie erfreuen sich bereits seit Jahren einer starken Förderung. Trotzdem lag im Jahr 2009 ihr Beitrag zur Primärenergieerzeugung bei geringfügigen 1,2 % /1/. Die höheren Prozentzahlen in den Pressemeldungen sind das Resultat einer anderen Rechnung. Es wird nur der Anteil an der Stromerzeugung betrachtet, das heißt, der Energieverbrauch für Verkehr, Heizung und die Industrieproduktion wird nicht berücksichtigt. Zusätzlich werden Torf und Müll ebenfalls zu den "regenerativen Primärenergien" gezählt, was sachlich falsch ist. Torf ist nicht regenerativ und Müll ist keine Primärenergie, sondern das Abfallprodukt einer leistungsstarken Industriegesellschaft, die ihre Energie zu knapp 90% aus fossilen Energieträgern und der Kernenergie bezieht /1/.

Die Befürworter des Umstiegs auf regenerative Energien betonen, dass nur ein Mix aller regenerativen Energien gemeinsam ausreichen wird. Dabei werden die drei Energieformen Wind, Sonne und Biomasse als gleichwertig behandelt. Das ist erstaunlich, denn diese drei Energieformen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Kosten und ihrem Ausbaupotenzial enorm. Ein drastisches Beispiel ist der Flächenbedarf der Biomasse. Eine einfache Rechnung (Anhang 1) zeigt, dass Ackerland von der Größe eines Bundeslands benötigt wird, um die Elektrizitätserzeugung von sieben Großkraftwerken durch Strom aus Biomasse zu ersetzen (Abb. 1). Windenergie und Photovoltaik unterscheiden sich gravierend in den Kosten. So würde die Energie aus Photovoltaik, wenn es die einzige Energiequelle Deutschlands wäre, mehr kosten als das Steueraufkommen des Bundes und der Länder (Anhang 2). Die meisten Länder der Erde sind viel ärmer als Deutschland und können sich die Solarenergie nicht leisten. Daher trägt diese Energieform heute weltweit nur mit verschwindenden 0,01 % zur Energieerzeugung bei /2/.

Abb. 1
Für den Ersatz von sieben 1-Gigawatt-Kraftwerksblöcken durch Strom aus Energiepflanzen werden 24 500 km^2 Ackerfläche benötigt (Anhang 1).

Der teilweise hohe Preis der regenerativen Energien wird von der Bevölkerung nicht wahrgenommen, da die Kosten auf den Preis des günstigen Stroms aus Kohle- und Kernkraftwerken aufgeschlagen werden und bisher aufgrund des geringen Anteils der erneuerbaren Energien nicht ins Gewicht fielen. In diesem Artikel soll versucht werden, den wirklichen Preis der verschiedenen Formen der Energieerzeugung glaubwürdig und überprüfbar zu bestimmen. Es muss auch eine Obergrenze für

den Preis geben, den eine Volkswirtschaft noch bezahlen kann, ohne heftige Einschnitte im sozialen Netz oder bei der Bildung hinnehmen zu müssen. Zum Schluss soll ein Schätzwert für die zusätzlichen Kosten ermittelt werden, die mit dem Umstieg auf jeden Haushalt zukommen. Neben den Kosten ist der Flächenbedarf eine weitere wichtige Größe. Zum Beispiel fehlt die Ackerfläche, die für den Anbau von Energiepflanzen verbraucht wird, bei der Nahrungsmittelerzeugung. Also muss auch der Flächenbedarf der verschiedenen Methoden der Stromerzeugung ermittelt und eine obere Grenze angegeben werden. Da die regenerativen Energien meist für die Stromerzeugung eingesetzt werden, beschränkt sich die vorliegende Analyse auf Methoden der Stromerzeugung. In vielen Pressemeldungen wird auf eine Angabe der heutigen Kosten der regenerativen Energien verzichtet und stattdessen auf die "Lernkurve" verwiesen. Dabei wird ein Preis genannt, der in der Zukunft gelten wird, wenn die technische Entwicklung zu weiteren Kostensenkungen geführt hat. Eine solche erwartete Kostensenkung ist zwar möglich, muss aber nicht eintreten. In der folgenden Analyse werden daher nur die heute belegbaren Kosten betrachtet.

Zusätzliche Kosten für Umweltschäden und Gefahren wie etwa die Klimaerwärmung oder die Tschernobyl-Katastrophe werden in diesem Artikel nicht berücksichtigt. Bisher muss keiner der Nutzer der verschiedenen Energieerzeugungsmethoden solche Kosten für Umweltbelastungen oder Gefahren tragen. Auch ist es schwierig, die Höhe dieser Kosten festzustellen. Die Klimaerwärmung ist eine Folge der Kohlendioxidemissionen seit Beginn der Industrialisierung und deren Kosten können wohl kaum den Betreibern heutiger Kohlekraftwerke in vollem Umfang angelastet werden. Auch ist nicht jede Flutkatastrophe und jeder Sturm die Folge der CO_2-bedingten Klimaerwärmung, da es vor der Klimaveränderung bereits Stürme und Überflutungen gab. Die Kosten für mögliche Katastrophen wie in Tschernobyl oder Fukujima sind ebenfalls schwer zu erfassen. Dabei muss auch berücksichtigt werden, ob es sich um moderne Kernreaktoren mit einem hohen Sicherheitsstandard handelt oder um veraltete Kraftwerke an gefährdeten Standorten wie im Fall von Fukujima. Bei einem Vergleich mit den regenerativen Energien müssten auch dort Kosten für Gefahren und Umweltbelastungen erfasst werden. So wird die Energieproduktion aus Energiepflanzen zur Nahrungsmittelverknappung oder sogar zu Hungersnöten in den armen Ländern führen. Ein anderes Beispiel ist die Entsorgung der zu erwartenden astronomischen Mengen von Solarmodulen, die bei einem großflächigen Umstieg auf diese Energieform nach dem Ablauf ihrer Betriebszeit anfallen. Es wird also schwierig, die Kosten für Risiken und Umweltbelastungen vernünftig zu berücksichtigen und daher werden hier nur die heute tatsächlich anfallenden Kosten berechnet. In einer weiterführenden Studie soll aber versucht werden, auch diese Kosten zu erfassen.

Es gibt eine Vielzahl von Studien zu den Kosten der verschiedenen Arten der Energieerzeugung und je nach Auftraggeber schneiden bestimmte Methoden besonders gut und andere besonders schlecht ab. In dieser Arbeit soll nach einer anderen Methode vorgegangen werden. Die Methode hat den Vorteil, dass sie durchschaubar und überprüfbar ist und eine genauere Beschreibung findet sich in Anhang 3. Ihr Nachteil ist, dass sie nur einen Schätzwert liefert. Aber ein Vergleich mit Ergebnissen anderer, detaillierterer Studien /3, 4/ zeigt, dass der Fehler nicht groß ist. Die hier ermittelten Kosten pro Kilowattstunde in "cts/kWh" heißen „Stromgestehungskosten“ und beinhalten nicht Abgaben, Steuern und Profite. Die im Folgenden berechneten Stromgestehungskosten schwanken zwischen 4 und 40 Cents. In anderen Studien /3-5/ werden sogar noch höhere Preise für bestimmte Energieformen genannt. Seltsamerweise wird aber nicht diskutiert, wie teuer Energie höchstens sein darf. Eine absolute Obergrenze ist das Bruttoinlandsprodukt (BIP), also der Wert aller während eines Jahres produzierten Waren und Dienstleistungen. Tatsächlich dürfen die Energiekosten sogar nur einen kleinen Anteil am BIP ausmachen, denn sonst müssten andere Bereiche des Gemeinwesens zu stark eingeschränkt werden. Zurzeit machen die Energiekosten in Deutschland 5 - 6% des BIPs aus /1/. Das BIP liegt bei 2500 Milliarden Euro und der Endenergieverbrauch beträgt 2500 Milliarden Kilowattstunden (kWh). Würde also die Kilowattstunde einen Euro kosten, verschlängen die Energiekosten das gesamte BIP der Volkswirtschaft, was natürlich unmöglich ist. Eine sinnvolle Obergrenze liegt bei 10% des BIPs, was einem Kilowattstundenpreis von 10 cts entspricht und das wäre immerhin das Doppelte der Ausgaben Deutschlands für die Bildung. Für Indien ergibt die analoge Rechnung eine Obergrenze von 3 cts/kWh. Im Folgenden werden 10 cts/kWh als absolute Höchstgrenze angenommen, ein Preis, den reiche Industriestaaten gerade noch bezahlen können und ärmere Staaten mit Sicherheit nicht. Der Preis, den in Deutschland heute ein Endverbraucher für eine Kilowattstunde an Elektrizität bezahlt, liegt bei 20 Cents und damit anscheinend über diesem Limit. Allerdings besteht der größte Teil dieser Summe aus Steuern, Abgaben und Profiten. Diese Aufschläge stellen eine Umverteilung dar und es sind keine echten Energiekosten der Volkswirtschaft. Der wirkliche Strompreis liegt bei 4-5 Cents und damit weit unter dem Limit von 10 cts/kWh.

Eine ähnliche Rechnung führt auch zu einer Obergrenze für den Flächenbedarf. Die gesamte auf der Erde zur Verfügung stehende Landfläche hat eine Größe von 150 Millionen Quadratkilometern. Der jährliche Primärenergieverbrauch der Welt beträgt rund 150 000 Milliarden kWh. Nimmt man wiederum an, dass maximal 10% der Fläche für die Energieerzeugung eingesetzt werden können, ergibt sich ein Grenzwert von 100 km^2 für die Erzeugung einer Milliarde kWh pro Jahr.

Zunächst werden die Kosten und der Flächenbedarf für die konventionellen Methoden der Stromerzeugung bestimmt. Der größte Teil der in Deutschland erzeugten Elektrizität stammt aus Kohle- und Kernkraftwerken. Ein einzelner Block eines typischen Kohle- oder Kernkraftwerks liefert 1000 Megawatt (1 Gigawatt) an elektrischer Leistung. Abgesehen von Wartungsunterbrechungen läuft ein Kraftwerksblock Tag und Nacht und erzeugt damit pro Jahr die gewaltige Menge von 8 Milliarden kWh an Elektrizität. Als Beispiele konventioneller Kraftwerke werden in Tab. 1 die Eckdaten des Braunkohlekraftwerks Niederaußem, des Steinkohlekraftwerks Mannheim und des Kernkraftwerks Grundremmingen aufgelistet. Unter "Investitionskosten" ist jeweils die Summe aufgeführt, die die Kraftwerke heute als Neubauten kosten würden. Als Laufzeit werden pauschal 40 Jahre angenommen. Auch wenn die Kraftwerke länger in Betrieb sind, sind nach 40 Jahren viele wichtige Komponenten erneuert worden. Die Brennstoffkosten belaufen sich bei Kohle und Uran auf rund 2 cts/kWh. Uran ist eigentlich aufgrund des viel höheren Energiegehalts preiswerter, aber die Kosten für eine vertretbare Endlagerung schlagen zusätzlich mit rund 1 ct/kWh zu Buche. Die Investitionskosten für neue Kernkraftwerke sind aufgrund der hohen Sicherheitsauflagen sehr hoch und die Preisschätzung in Tab. 1 orientiert sich an den Kosten für das neue Kraftwerk in Olkiluoko in Finnland. Der Flächenbedarf für Kern- und Steinkohlekraftwerke liegt erheblich unter einem km^2 pro Milliarde kWh, denn Steinkohle und Uran werden untertage abgebaut. Braunkohle wird dagegen im Tagebau gewonnen. In Deutschland wird auf einer Fläche von 437 km^2 Braunkohle für eine Stromerzeugung von 146 Milliarden kWh pro Jahr abgebaut. Dies entspricht einem Flächenbedarf von rund 3 km^2 pro Milliarde kWh. Für alle drei konventionellen Kraftwerkstypen liegen also Kosten und Flächenbedarf weit unterhalb der oben festgelegten Grenzwerte.

Es gibt zwei Arten von Sonnenenergie: die Photovoltaik und die Solarthermie. Für jede Art werden in Tab. 1 zwei Beispiele aufgeführt. In Deutschland ist Photovoltaik weit verbreitet. Die blauschimmernden Module können rund 15 % der im Sonnenlicht enthaltenen Energie direkt in Elektrizität umwandeln (Modulwirkungsgrad). Tatsächlich liegt aber der "Flächenwirkungsgrad" nur bei 3 - 4 %, da die Module nicht die gesamte Fläche bedecken können, denn es müssen Wege für Wartungs- und Montagefahrzeuge frei gehalten werden. Eines der größten Photovoltaikkraftwerke der Welt steht bei Leipzig. Dort werden auf einer Fläche von 100 Fußballfeldern jährlich 40 Millionen kWh erzeugt. Das ist ein Sechshundertstel der Jahresproduktion des Braunkohlekraftwerks Niederaußem. Die Kostenschätzung (Tab. 1) ergibt 34 cts/kWh für das Werk in der Nähe von Leipzig und 45 cts/kWh für das spanische Werk in Olmedilla und beide Kraftwerke liegen damit weit über dem Limit von 10cts/kWh. Es ist erstaunlich, dass der Kilowattstundenpreis des deutschen Werks trotz erheblich geringerer Sonneneinstrahlung niedriger ist. Ein möglicher Grund dafür ist, dass in Leipzig Cadmium-Telluridzellen zum Einsatz kommen, die zwar einen geringeren Wirkungsgrad haben, aber preisgünstiger sind, während in Spanien die teuren Siliziumsolarzellen verwendet werden. Andere Studien /3, 4/ kommen zu noch höheren Kosten und insbesondere für Kleinstanlagen auf Hausdächern werden Preise von bis zu 60 cts/kWh genannt. Die zweite Art der Sonnenenergiegewinnung ist die Solarthermie. In Parabolrinnen-Kraftwerken oder in Solarturm-Kraftwerken wird mit Sonnenlicht zunächst Hitze erzeugt, die dann über eine konventionelle Dampfturbine in Elektrizität umgewandelt wird. Die Kostenschätzung (Tab. 1) für das Parabolrinnen-Kraftwerk „Nevada Solar One“ in der Wüste Nevadas und das Solarturmkraftwerk „PS 10“ bei Sevilla in Spanien zeigt, dass diese Methode etwa halb so teuer ist wie die Photovoltaik. Bei allen vier hier betrachteten Sonnenkraftwerken liegt der Flächenbedarf unter dem Grenzwert von 100 km^2 pro Milliarde kWh. Am besten schneiden Parabolrinnenkraftwerke ab, die allerdings nur mit direkter Sonnenstrahlung und nicht mit Streulicht arbeiten können. Ihr Einsatz in Ländern mit häufig bewölktem Himmel ist nicht sinnvoll.

Im Vergleich zur Sonnenenergie liefert Windenergie ein Mehrfaches an Strom zu einem erheblich niedrigeren Preis. Ein Beispiel eines preisgünstig produzierenden Windparks ist „Wybelsum“ in Norddeutschland. Die Kostenschätzung ergibt gerade mal den doppelten Preis eines konventionellen Kraftwerks (Tab. 1). Ein großes Ausbaupotenzial wird „Off-Shore“ Windparks zugeschrieben. Das bedeutet, die Windräder stehen auf Fundamenten auf dem Meeresboden. Allerdings stellen die harschen Umweltbedingungen hohe Anforderungen an die Technik und entsprechend hoch sind die Kosten für die Installation und Instandhaltung. Bei der Kostenschätzung wurde dies mit einer kurzen Betriebsdauer von nur vier Jahren berücksichtigt. Bei beiden Arten der Windenergie liegt der

Flächenbedarf noch einmal höher als bei der Photovoltaik, allerdings kann die Fläche zwischen den Windrädern anderweitig genutzt werden. Vergleichbare Studien /3, 4/ errechnen Kosten zwischen 6-14 cts/kWh für Windparks an Land und 9-18 cts/kWh für Off-Shore Windparks. Diese Zahlen stimmen gut mit den Ergebnissen der Kostenschätzung für Wybelsum und Horns Rev in Tab. 1 überein.

Kraftwerk	**Leistung** *Megawatt*	**Stromer-zeugung** *TWh/Jahr*	**Investitions-kosten** *Mio Euro*	**Laufzeit** *Jahre*	**Strompreis** *Cents/kWh*	**Flächen-bedarf** *km²/TWh*
Braunkohle Niederaußem, D	3600	27	4600	40	3,8	3
Steinkohle Mannheim, D	1600	7,1	1700	40	4,4	<1
Kernkraftwerk Grundremmingen, D	2700	21	7500	40	5,2	<1
Photovoltaik Waldpolenz, D	40	0,04	130	25	34	28
Photovoltaik Olmedilla, (Spanien)	60	0,09	384	25	45	12
Parabolrinne Nevada Solar One (USA)	75	0,13	157	15	16	11
Solarturm PS 10 Sevilla (Spanien)	11	0,02	35	15	23	25
Windpark (an Land) Wybelsum (D)	70	0,18	90	10	8	21
Windpark (off-shore) Horns Rev (Dänemark)	160	0,6	270	4	14	33
Staudamm Drei-Schluchten (China)	22 500	100	54 000	40	5	10
Laufwasser Rheinfelden (D)	100	0,6	400	40	6	<1
Geothermie The Geysers (USA)	700	5,8	2000	15	4,5	<1
Geothermie Landau (D)	3	0,026	21	12	12	<1
Biomasse						
Holz (D)					4 - 8	800
Pflanzenreste (D)					12 - 28	1400
Energiepflanzen (D)					14 - 22	500

Tab. 1
Eckdaten der hier ausgewählten konkreten Beispiele der Stromerzeugung. Die Investitionskosten beziehen sich auf das Jahr 2010. Die Laufzeiten berücksichtigen auch erhöhten Verschleiß wie etwa bei den Off-Shore Windkraftwerken. Der Strompreis errechnet sich nach einem festen Schlüssel aus den Investitionskosten, den Laufzeiten und gegebenenfalls den Brennstoff- und Endlagerkosten (Anhang3). Kosten für CO_2 - Zertifikate und Kosten durch Klimaschäden wurden nicht berücksichtigt. (D: Deutschland; kWh: Kilowattstunde, Mio: Million; TWh: Terawattstunde = 1 Milliarde kWh)

Wasserkraft ist eine der ältesten Methoden der Stromerzeugung und in den meisten Industrienationen hat diese Energiequelle ihre maximal mögliche Ausbaustufe erreicht. In den wenig entwickelten Ländern hat die Wasserkraft aber noch ein großes Ausbaupotenzial und sie ist preiswert. Obwohl die Investitionskosten für einen Staudamm hoch sind, sind die Kosten pro Kilowattstunde niedrig, da ein Staudamm viele Jahrzehnte nahezu wartungsfrei arbeitet. Das heute wohl bekannteste Staudammprojekt ist der chinesische Drei-Schluchten-Damm. Mit einer installierten Leistung von 22,5 Gigawatt ersetzt der Damm mehr als 20 konventionelle Kraftwerksblöcke. Trotz der hohen Investitionskosten von 54 Milliarden Euro ergibt die Kostenschätzung nur einen Preis von 5 cts/kWh. Das ist ein Preis, der für ein Land mit einem niedrigen Pro-Kopf Bruttoinlandsprodukt gerade noch bezahlbar ist. Allerdings ist bei Staudammprojekten der Flächenverbrauch relativ hoch und kollidiert in Ländern wie China mit dem Flächenbedarf der Bevölkerung. Ein Laufwasserkraftwerk benötigt keinen ausgedehnten Stausee und hat daher einen geringen Platzbedarf. Das alte Laufwasserkraftwerk in Rheinfelden in Deutschland wird ausgebaut und wird dann Strom für 6 cts/kWh produzieren. Strom aus Wasserkraft ist also ähnlich preisweit wie die Energie aus konventionellen Kraftwerken (Tab. 1). Detaillierte Studien /3, 4/ errechnen für die Wasserkraft je nach Standort, Größe und Alter der Anlage Preise zwischen 2,5 cts/kWh und 13 cts/kWh.

Eine weitere leistungsstarke Energiequelle befindet sich unter unseren Füßen. Alle tausend Meter nimmt die Temperatur in der Tiefe um 30^0 C zu. Bohrungen erreichen heute ohne große Probleme 5000 Meter Tiefe und dort herrscht eine Temperatur von über 200^0 C. Für ein geothermisches Kraftwerk werden im einfachsten Fall nur zwei Bohrungen benötigt. Durch eine Bohrung wird kaltes Wasser in die Tiefe gepumpt und aus der anderen strömt heißer Dampft und treibt eine Turbine an. Das geothermische Kraftwerk "The Geysers" in den USA liefert für nur 4,5 cts/kWh zuverlässig rund um die Uhr so viel Elektrizität wie ein Block eines konventionellen Kraftwerks. In Landau in Deutschland wird aus 3000 Metern Tiefe 160^0 C heißes Wasser gefördert, das eine kleine Turbine mit drei Megawatt elektrischer Leistung versorgt. Obwohl es sich in Landau nur um ein kleines Pilotprojekt handelt, sind die Kosten mit geschätzten 12 cts/kWh relativ niedrig (Tab. 1). Größere Anlagen könnten vielleicht preiswerter produzieren. Andere Studien /5/ errechnen für geothermische Kraftwerke in Deutschland Kosten zwischen 8 - 22 cts/kWh. Allerdings sind dies theoretische Werte, da es keine geothermischen Großanlagen zur Stromerzeugung in Deutschland gibt. Das wirkliche Potenzial der Geothermie in Deutschland ist unbekannt, aber die wenigen Daten, die es gibt, sind viel versprechend.

Ein viel diskutierter Hoffnungsträger der Befürworter eines schnellen Umstiegs auf regenerative Energien ist die Biomasse. Sie ist auch eine Form der Sonnenenergie, denn die Pflanzen wandeln über die Photosynthese die Energie des Sonnenlichts in chemische Energie um. Allerdings ist der Flächenwirkungsgrad für diesen Umwandlungsprozess um vieles geringer als bei den Photovoltaikmodulen. Aus dem jährlichen Zuwachs an Holz pro Hektar Wald und dem durchschnittlichen Energiegehalt des Holzes lässt sich ein Flächenwirkungsgrad von 0,13 % errechnen. 99,87 % der Energie des Sonnenlichts gehen also für die Elektrizitätserzeugung verloren. Um eine Milliarde kWh zu erzeugen, wird eine astronomisch große Waldfläche von 800 km^2 benötigt (Tab.1). Allerdings geht die Fläche ähnlich wie bei der Windenergie nicht verloren, sondern sie ist weiterhin Teil der Biosphäre. Bioabfälle wie Stroh, Gartenabfälle, Pflanzenreste, Gülle und Klärschlamm können in Biogas umgewandelt werden. Biogas ist dem Erdgas ähnlich und besteht zu 50-80% aus Methan. In einer Gasturbine kann die chemische Energie im Biomethan schließlich in Elektrizität umgewandelt werden. Für die Bewirtschaftung der Felder wird allerdings auch fossile Energie eingesetzt und bei einer Berechnung des Flächenwirkungsgrads muss diese Energie abgezogen werden /6/. Nur ein kleiner Anteil der auf die Fläche eingestrahlten Sonnenenergie kann letztendlich bei der Verwertung von Bioabfällen in elektrische Energie umgewandelt werden und der Flächenwirkungsgrad liegt im Mittel bei 0,02%. Die Kosten schwanken stark je nach der Art der Bioabfälle (Tab.1). Im Gegensatz zu der Energiegewinnung aus Bioabfällen ist beim Anbau von Energiepflanzen parallel keine Nahrungsmittelproduktion mehr möglich. Die gesamte Pflanze wird für die Energieerzeugung verwertet. Energiepflanzen wachsen schnell und während der gesamten Vegetationsperiode, um möglichst viel Sonnenenergie in chemische Energie umzuwandeln /6/. Mit ihnen lässt sich ein Flächenwirkungsgrad von 0,2 % erzielen, der aber immer noch um eine Größenordnung unter dem der Solarkraftwerke liegt. Ein Spezialfall ist die Treibstoffgewinnung aus Zuckerrohr in Brasilien. Die günstigen klimatischen Verhältnisse ermöglichen einen Hektarertrag von 8000 Litern Bioethanol bei einem Flächenwirkungsgrad von ~ 0,3 %. Der Flächenbedarf ist damit zwar etwas geringer, aber immer noch astronomisch groß. Trotzdem lohnt sich diese Art der Energiegewinnung in Brasilien, da die Bevölkerungsdichte zehnmal geringer ist als in Deutschland und damit ausreichend viel Ackerland zur Verfügung steht.

Es existiert noch eine bunte Palette weiterer Methoden der Energieerzeugung. Dazu gehören zum Beispiel Fusion, Meeresströmungskraftwerke, Gezeitenkraftwerke, Wellenkraftwerke, Meereswärmekraftwerke, Osmosekraftwerke und Aufwindkraftwerke. Für all diese Methoden gibt es heute keine konkreten Pläne, neue Kraftwerke im Gigawattbereich zu bauen. Wirklich leistungsstark sind dabei lediglich die Gezeitenkraftwerke und die Fusion. Für Gezeitenkraftwerke gibt es weltweit nur wenig Standorte und die wenigen Pläne für den Bau solcher Kraftwerke werden massiv von Umweltschützern bekämpft. Fusionskraftwerke existieren noch nicht und es wird noch viele Jahrzehnte dauern, bis es ein funktionierendes Kraftwerk geben wird. Allerdings ist die Fusion die Energiequelle der Sonne selbst und sie wird, sollte sie einmal von den Menschen gezähmt werden, das Problem einer sauberen Energieversorgung für lange Zeit lösen.

Innerhalb der nächsten 20 Jahre lassen sich also große Mengen an elektrischer Energie nur aus den folgenden acht Quellen gewinnen: Braunkohle, Steinkohle, Uran, Wasserkraft, Sonnenenergie, Windenergie, Geothermie und Biomasse. Erdgas und Erdöl werden heute nur wenig zur Stromerzeugung genutzt und daher hier nicht betrachtet. Beide fossilen Energieformen sind aber ähnlich preisgünstig wie die Kohle. Für alle acht Methoden wurden Kosten und Flächenbedarf nach dem heutigen Stand der Technik an Hand ausgewählter Beispiele abgeschätzt (Tab.1). Unter Berücksichtigung der Ergebnisse anderer, sorgfältiger Studien lassen sich nun für jede Energieform

Bereiche angeben, innerhalb derer die Kosten und der Flächenbedarf liegen. Eine Übersicht der Ergebnisse zeigt Abb.1. In der Abbildung ist der erlaubte Bereich für Preis und Flächenbedarf weiß markiert. Zwei Energieformen liegen weit außerhalb dieses Bereiches: die Photovoltaik ist erheblich zu teuer und die Biomasse hat einen enormen Flächenbedarf. Ein Ausbau dieser beiden Energieformen ist besonders für arme oder dicht besiedelte Länder nicht zu vertreten. Aber auch für reiche Länder wie Deutschland ist die Photovoltaik nach dem heutigen Stand der Technik zu teuer. Die Stromerzeugung aus Biomasse hat für dicht besiedelte Länder einen um den Faktor 50-100 zu hohen Flächenbedarf. Die Erzeugung von Elektrizität oder Treibstoff aus Energiepflanzen, die in direkter Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen, ist angesichts der wachsenden Weltbevölkerung verantwortungslos. Die Energiegewinnung aus Bioabfällen oder Holz ist in dieser Hinsicht unproblematisch, aber der große Flächenbedarf zeigt, dass diese Methoden der Energiegewinnung in Deutschland rasch an ihre Ausbaugrenzen stoßen werden.

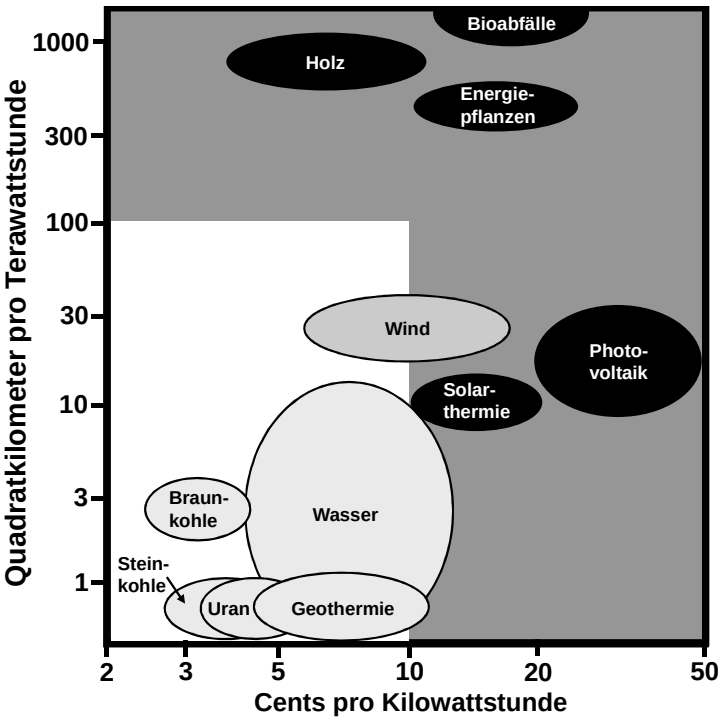

Abb. 1. Flächenbedarf und Kosten der hier betrachteten Methoden der Stromerzeugung. Die Daten ergeben sich aus einer Mittelung der Ergebnisse aus Tab. 1 unter Berücksichtigung der Ungenauigkeit von +/-30 % und den Daten vergleichbarer wissenschaftlicher Studien /3-6/. Der weiß unterlegte Bereich markiert die volkswirtschaftlich gerade noch akzeptablen Kosten für ein reiches Land und den maximalen Flächenbedarf für ein dünn besiedeltes Land. Für die meisten Länder der Erde ist dieser erlaubte Bereich tatsächlich noch erheblich kleiner.

Die Solarthermie hat einen nicht ganz so hohen Preis bei einem moderaten Flächenbedarf. Ein Parabolrinnenkraftwerk in der Sahara würde wie das Kraftwerk „Nevada Solar One“ Strom zum dreifachen Preis der klassischen Energien produzieren. Diese Technik wäre für eine reiche Industrienation vielleicht noch bezahlbar. Allerdings kommen Kosten für den Stromtransport hinzu und ein Teil der Energie sollte kostenlos an die Gastgeberländer in Nordafrika abgegeben werden. Wird beispielsweise die Hälfte des Stroms abgegeben, verdoppelt sich der Strompreis für den deutschen Verbraucher. Damit wird die Solarthermie in der Sahara genauso teuer wie die heimische Photovoltaik. Die Windenergie ist erheblich preisgünstiger und umweltfreundlicher, da die Fläche zwischen den Windanlagen anderweitig genutzt werden kann. Eine Alternative zu einem Solarkraftwerk in der Sahara wäre beispielsweise der Ausbau der Windenergie in den unbewohnten Hochlandregionen Norwegens.

Es stellen zwei Fragen hinsichtlich eines Umstieg Deutschlands auf regenerative Energien:

1. ***Ist ein Umstieg möglich ?***
2. ***Was kostet er?***

Ist nur die Stromproduktion betroffen, ist ein Umstieg auf regenerative Energien technisch möglich. Der Endenergieverbrauch an Elektrizität beträgt rund 500 Milliarden Kilowattstunden. Zurzeit stammen bereits 90 Milliarden kWh aus regenerativen Quellen (Tab. 2). Dieser Verbrauch wird trotz der Einsparbemühungen in der Zukunft nicht sinken, da viele Methoden des Energiesparens mit einer Erhöhung des Stromverbrauchs einhergehen. Beispiele dafür sind die Elektromobilität oder die Wärmepumpe. Daher wird hier der aktuelle Stromverbrauch als Richtwert genommen.

Anteil regenerativer Energien am Primärenergieverbrauch der Elektrizität in Deutschland im Jahr 2010 (Gesamtvolumen: rund 500 Milliarden kWh).		
Wasserkraft	20 Milliarden kWh	kaum ausbaubar
Biomasse, Müll, etc.	20 Milliarden kWh	Ausbau problematisch
Wind	38 Milliarden kWh	stark ausbaufähig
Photovoltaik	12 Milliarden kWh	stark ausbaufähig
Summe	90 Milliarden kWh	

Tab. 2
Anteil regenerativer Energien an der Stromerzeugung. Die Werte wurden gerundet /1/.

Es fehlen also 410 Milliarden kWh, die zurzeit hauptsächlich aus Kohle- und Kernkraftwerken stammen. Das Potenzial der Wasserkraft ist bereits nahezu vollständig ausgeschöpft. Der Anteil der Biomasse kann und darf nicht weiter gesteigert werden, denn die Nahrungsmittel werden dringend in den Ländern mit einem starken Bevölkerungswachstum benötigt. Um also die fehlenden 410 Milliarden kWh zu erzeugen, müssen Windkraft und Photovoltaik auf die achtfache Kapazität ausgebaut werden. Jährliche Kapazitätssteigerungen von 5 bis 10 Milliarden kWh Stromerzeugung sind bei Windkraft und Photovoltaik technisch machbar /1/. Zusammen können pro Jahr also 20 Milliarden kWh hinzukommen, so dass in 20 Jahren tatsächlich 100% des Stroms mit erneubaren Energien erzeugt werden könnten. Die zusätzlichen Kosten dafür lassen sich unter der Annahme, dass Photovoltaik und Windenergie jeweils zur Hälfte beitragen, abschätzen. Von den niedrigsten in der Literatur genannten Stromgestehungskosten (Photovoltaik 30 cts/kWh, Wind on-Shore 8 cts/kWh, Wind off-Shore 14 cts/kWh) werden jeweils 4 cts/kWh für die Stromgestehungskosten des heutigen Strommixes abgezogen. Für die Kostenschätzung wird weiterhin angenommen, dass das Ausbaupotenzial für off-shore Windparks dreimal so groß ist wie für Windparks an Land. In den Wintermonaten wird die Photovoltaik kaum zur Energieversorgung beitragen und auch die Windenergie wird an Tagen der Flaute keinen Strom liefern. Daher müssen Kraftwerkskapazitäten bereitgehalten werden, die dann einspringen. Ein länger andauernder Stromausfall in den Großstädten muss unbedingt vermieden werden, denn sonst würden Menschen ernsthaft zu Schaden kommen, zum Beispiel in Krankenhäusern. Diese Aufgabe können konventionelle Kraftwerke, die entweder mit Kohle oder mit Gas betrieben werden, übernehmen. Diese Bereitstellung kostet etwa soviel wie die Kosten eines Kohlekraftwerkes ohne die Brennstoffkosten, also rund 2 cts/kWh oder 8,2 Milliarden Euro pro Jahr. Hinzu kommen noch Kosten für den Netzausbau, um zum Beispiel die Windenergie aus Norddeutschland nach Süddeutschland zu transportieren. Die Angaben über diese Kosten sind allerdings widersprüchlich und werden hier nicht berücksichtigt. Das Ergebnis dieser Schätzung der Mehrkosten eines Umstiegs zeigt Tab.3.

Anteil an den zusätzliche Kosten für die Erzeugung von 410 Milliarden kWh an Elektrizität			
Energieform	Preisaufschlag in cts/kWh	Beitrag in Milliarden kWh	Kosten in Milliarden Euro
Photovoltaik	26	205	53,3
Wind on-shore	4	50	2
Wind off-shore	10	155	15,5
Kraftwerkskapazität	2	410	8,2
Mehrkosten pro Jahr	**79 Milliarden Euro**		

Tab. 3
Schätzung der Mehrkosten eines vollständigen Umstiegs in der Stromerzeugung auf regenerative Energien. Es handelt sich um Schätzwerte mit einem Fehler von +/- 30%.

Insgesamt ergibt die Schätzung Mehrkosten in der Höhe von 79 Milliarden Euro oder 165 Euro pro Haushalt und pro Monat. Diese Mehrkosten werden teilweise dem Haushalt direkt in Form einer erhöhten Stromrechnung entstehen. Die höheren Stromkosten für die Industrieproduktion wird letztlich auch der Bürger tragen, denn die Produkte werden entsprechend teurer. Die regenerative Energie kann steuerlich begünstig werden und so zunächst preisgünstiger erscheinen. Aber auch hier wird letztlich der Bürger die Rechnung bezahlen, denn die Steuereinnahmen fehlen dann anderswo und der Staat muss für Leistungen, die früher kostenlos waren, Gebühren erheben (zum Beispiel Studiengebühren). Letztendlich werden die Mehrkosten aus Tab. 3 in vollem Umfang dem Bürger angelastet und sein Lebensstandard sinkt. Sollte der Umstieg auf regenerative Energien nicht nur die Stromerzeugung, sondern den gesamten Endenergieverbrauch von 2500 Milliarden kWh betreffen, müssten nochmals 2000 Milliarden kWh, also die fünffache Energiemenge aus Tab. 2, durch regenerative Energien erzeugt werden. Das würde nochmals weitere Kosten in der Höhe von rund 800 Euro pro Haushalt und Monat mit sich bringen. Das ist nicht bezahlbar. Stattdessen wird es zu massiven Energieeinsparungen verbunden mit erheblichen Änderungen im Leben der Bürger kommen. Der Individualverkehr und die Wirtschaftproduktion werden massiv eingeschränkt werden müssen, wie es die Landesregierung von Baden-Württemberg kürzlich bereits angedeutet hat. In Stuttgart soll die Autoproduktion reduziert werden. Die Industrieproduktion wird aber bei so hohen Energiekosten ohnehin nicht mehr konkurrenzfähig gegenüber denjenigen Ländern sein, die weiterhin ihre Energie aus Erdöl, Erdgas, Kohle und Uran beziehen.

Es ist unvorstellbar, wie der gesamte Endenergieverbrauch Deutschlands in der Höhe von 2500 Milliarden kWh aus rein regenerativer Energie heraus erzeugt werden soll und wie das die Volkswirtschaft bezahlen soll, ohne die Industriegesellschaft als Wirtschafts- und Staatsform grundsätzlich in Frage zu stellen. Ein Umstieg allein bei der Stromerzeugung ist möglich, aber nicht billig. Es kommen Mehrkosten in der Größenordnung von 150 Euro pro Monat und pro Haushalt auf die Bürger zu. Je höher dabei der Anteil der Sonnenenergie ist, umso teurer wird es.

Anhänge

Anhang 1
Ein Kraftwerksblock der 1-Gigawattklasse erzeugt pro Stunde eine Million kWh und pro Jahr rund 8 Milliarden kWh. Der Hektarertrag an Biogas liegt in Deutschland bei 4500 m^3 pro Jahr. Bei einem Energiegehalt von 10 kWh pro m^3 lassen sich pro Hektar also 45 000 kWh Wärmeenergie gewinnen. In einer Gasturbine können 50% dieser Energie in Elektrizität umgewandelt werden, also 22 500 kWh. Für den Ersatz eines Großkraftwerks werden also rund 350 000 Hektar oder 3500 km^2 Ackerfläche benötigt.

Anhang 2
Der Endenergieverbrauch Deutschlands beträgt 2500 Milliarden kWh im Jahr. Die Kosten für den Strom aus Photovoltaik liegen zwischen 30 und 60 Cents pro Kilowattstunde. Der hohe Wert gilt für kleine Dachanlagen in Deutschland, während der niedrige Preis für große Solarparks erreicht wird. Selbst mit dem niedrigen Preis von 30 cts/kWh ergeben sich Energiekosten von 750 Milliarden Euro. Das Steueraufkommen im Jahr 2010 betrug dagegen lediglich 490 Milliarden Euro.

Anhang 3
Ausgangspunkt der hier verwendeten Methode für die Abschätzung der Kosten pro Kilowattstunde

sind die Investitionskosten eines Kraftwerks, also die Summe, die aufgebracht werden muss, um das Werk oder die Anlage zu bauen. Die Investitionskosten werden für praktisch jedes Kraftwerk in Pressemeldungen oder Jahresberichten veröffentlicht. Ausgehend von dieser Summe lassen sich nun die Kosten, die pro Jahr für den Betrieb anfallen, wie folgt abschätzen. Die jährlichen Kosten werden pauschal als die Summe der Kapitalkosten (4% Zinsen auf den Kaufpreis pro Jahr), der Betriebskosten (1,5 % des Kaufpreises pro Jahr), der Instandhaltungskosten (1 % des Kaufpreises pro Jahr) und der Amortisation (Kaufpreis dividiert durch die erwartete Betriebsdauer in Jahren) berechnet. Hinzu kommen noch zusätzliche Kosten wie etwa für Brennstoff, die sich aus dem Marktpreis des Brennmaterials ergeben, oder für die Endlagerung von Atommüll. Der Preis pro Kilowattstunde errechnet sich dann aus dem Quotienten der jährlichen Kosten und der jährlich erzeugten Energiemenge. Eine solche pauschale Abschätzung birgt zweifellos große Fehler in sich. Die Betriebsdauer kann nur sehr grob abgeschätzt werden, denn es ist meist unbekannt, nach wie vielen Jahren ein Kraftwerk stillgelegt werden muss. Ebenso wird die pauschale Behandlung der Betriebs- und Instandhaltungskosten wohl kaum den Unterschieden der verschiedenen Methoden gerecht. Diese Ungenauigkeiten werden hier mit einem Fehler von +/-30 % berücksichtigt. Zum Beispiel könnte bei einem errechneten Preis von 10 Cents pro Kilowattstunde der wirkliche Preis in einem Intervall zwischen 7 und 13 Cents liegen. Innerhalb dieses Fehlerintervalls stimmen die Resultate mit den Ergebnissen anderer, aufwändigerer Studien zumindest für den Fall von Kohle- und Kernkraftwerken überein /3/.

Referenzen:

/1/ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie Berlin, „Energiedaten“, Excel-Tabelle "energie-daten-gesamt". Internet (Stand 29.5.2011): www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/Energiedaten/gesamtausgabe.html

/2/ Internet (Stand 30.5.2011): http://www.iea.org/stats/renewdata.asp?COUNTRY_code=29

/3/ S. Wissel, S. Rath-Nagel, M. Blesl, U. Fahl, A. Voß, Arbeitsbericht „Stromerzeugungskosten im Vergleich“, IER, Universität Stuttgart, Februar 2008. Internet (Stand 29.5.2011): www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/arbeitsberichte/Arbeitsbericht_04.pdf

/4/ J. Nitsch u.a., "Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland", Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stuttgart, 2004. Internet (Stand 29.5.2011): www.dlr.de/tt/en/desktopdefault.aspx/tabid-2885/4422_read-6555/

/5/ H. Paschen, D. Oertel, R. Grünwald, „Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland“, Büro für Technikfolgen-Abschätzung des Deutschen Bundestags, Arbeitsbericht Nr. 84, Februar 2003. Internet (Stand 29.5.2011): www.tab-beim-bundestag.de/de/publikationen/berichte/ab084.html

/6/ M. Kelm, F. Taube, „Energiebilanz der Biogaserzeugung aus Gras- und Maissilage“, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität Kiel, 2007, Internet (Stand 29.5.2011): www.umwelt-nek.de/download/aggf_2007_kelm_taube.pdf