

Vergleichende Kostenanalyse einer windtechnischen und photovoltaischen Stromerzeugung

Von Andreas Wiese, Martin Kaltschmitt, Ulrich Fahl und Alfred Voß, Stuttgart*)

Eine Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung wird derzeit – und das kann als allgemein akzeptierter energiewirtschaftlicher Konsens angesehen werden – als die Elektrizitätsgewinnungsoption betrachtet, die durch die geringsten Umweltbelastungen gekennzeichnet ist. Größter Nachteil der durch die Nutzung dieser erneuerbaren Energieträger möglichen elektrischen Energiegewinnung sind die – verglichen mit konventionellen Stromerzeugungsoptionen – noch zu hohen spezifischen Stromgestehungskosten. Deshalb wurden, um hier Kostensenkungen zu initiieren und damit eine weitergehende Nutzung dieser Energiequellen zu ermöglichen, von staatlicher Seite Förderprogramme ins Leben gerufen (250-MW-Wind-Programm bzw. 1000-Dächer-Programm). Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieser Untersuchung, unter den in der Bundesrepublik Deutschland vorliegenden meteorologischen Gegebenheiten die Gestehungskosten einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung ohne und mit Fördermaßnahmen darzustellen und zu diskutieren.

1 Allgemeines

Nicht nur wegen der derzeit heftig diskutierten möglichen globalen Klimaveränderungen wegen der energiebedingten Emission klimarelevanter Spurengase wird die Forderung nach einer Umstrukturierung unserer elektrischen Energieversorgung weg von einer vorrangig auf fossilen und nuklearen Brennstoffen beruhenden Energiebereitstellung hin zu einer umweltverträglicheren Energieversorgungsstruktur immer lauter. Dies drückt sich u. a. auch in einem Vorschlag der Enquete-Kommission »Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre« des II. Deutschen Bundestages aus, nach dem der Kohlendioxidausstoß in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2005 um über ein Viertel, bezogen auf das Jahr 1987, reduziert werden soll [1]. Im Bereich der Elektrizitätswirtschaft kann ein Beitrag zur CO₂-Minderung außer durch das Ausschöpfen sicherlich noch vorhandener Energieeinsparmöglichkeiten auf der Verbraucherseite und einer Stromerzeugung mit zunehmend geringerem Primärenergieeinsatz (höherer Wirkungsgrad der Konversionsanlagen) oder mit Kernenergie auch durch einen verstärkten Einsatz regenerativer Energieträger erreicht werden. Neben der bereits derzeit genutzten Wasserkraft müßten dann vor allem die erneuerbaren Energieträger Sonne und

Wind stärker als bisher für die Erzeugung elektrischer Energie genutzt werden. Auch aus diesem Grund wurden die von den Versorgungsunternehmen zu zahlenden Einspeisevergütungen für Strom aus erneuerbaren Quellen durch gesetzliche Maßnahmen ab dem 1. Januar 1991 auf 90 % des Durchschnittserlöses der Stromabgabe an die Letztverbraucher erhöht [2].

Neben der neuen Einspeisevergütung wird – um eine Kostensenkung zu initiieren und damit mittelfristig eine wirtschaftliche und konkurrenzfähige Stromerzeugung auf der Basis von Windkraft und Solarstrahlung zu ermöglichen – zusätzlich von staatlicher Seite sowohl die Windkraftnutzung (250-MW-Wind-Programm) als auch die direkte photovoltaische Sonnenenergienutzung (1000-Dächer-Programm, zwischenzeitlich aufgestockt auf 2250 Dächer) durch öffentliche Förderprogramme finanziell unterstützt. Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieser Untersuchung, die Kosten einer windtechnischen und photovoltaischen Stromerzeugung aufzuzeigen und die sich ergebenden spezifischen Stromgestehungskosten unter verschiedenen Randbedingungen darzustellen. Dabei sollen besonders die Auswirkungen der aktuellen Förderprogramme auf die spezifischen Gestehungskosten näher analysiert werden.

2 Stromerzeugung aus Windkraft

Von der Vielzahl der technisch möglichen Windenergiekonvertertypen haben sich auf dem Markt nur die Horizontalachsenkonverter, meist ausgestattet mit einem, zwei oder drei Rotorblättern, durchgesetzt. Das derzeit angebotene Anlagenspektrum – wie es auch in den bereits bestehenden Windparks vornehmlich an der Nordseeküste wiedergefunden werden kann – läßt sich entsprechend der installierten elektrischen Leistung in kleine (rd. 20 bis 90 kW), mittlere (rd. 90 bis 500 kW) und große Anlagen (rd. 500 bis über 3000 kW) unterteilen.

Große Anlagen befinden sich derzeit noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium; sie sind nur als Prototypen verfügbar. Eine betriebswirtschaftliche Analyse der Stromgestehungskosten ist deshalb – aus der Sicht eines unabhängigen Investors – für solche Anlagen nicht sinnvoll, da für die derzeit verfügbaren, meist Forschungs- und Entwicklungszwecken dienenden Konverter die aufzubringenden Kosten aufgrund der hohen Entwicklungsaufwendungen ein Vielfaches der Herstellungskosten betragen; außerdem ist das derzeitige Angebot für eine repräsentative Markt- und Kostenanalyse noch zu klein. Anlagen mit einer installierten elektrischen Leistung über 500 kW werden deshalb hier nicht betrachtet; nur kleine und mittlere Anlagen werden näher untersucht. Dazu wurden die technischen und ökonomischen Daten von insgesamt 30 Anlagen ausgewertet, die in der Bundesrepublik Deutschland angeboten werden und nach dem 250-MW-Wind-Programm gefördert werden können.

Die für die Berechnung der spezifischen Stromgestehungskosten einer Windkraftnutzung relevanten Gesamtinvestitionen setzen sich aus den Anlagenkosten ab Werk, aus den Kosten für Transport und Montage, den Kosten für das Fundament und die Netzanbindung sowie den sonstigen Kosten (u. a. Planungskosten usw.; u. U. Wegekosten o. ä.) zusammen. Die jährlich anfallenden Betriebskosten errechnen sich im wesentlichen aus den Wartungs- und Instandhaltungskosten, den Pachtkosten für das Aufstellungsgelände und den Versicherungskosten.

Werden die Kostenkomponenten für die Errichtung einer einzelnen Anlage zusammengestellt, ergeben sich – entsprechend der durchgeführten Marktanalyse – die in Bild 1 gezeigten Aufwendungen. Dargestellt ist jeweils ein konkreter Konverter, der für die entsprechende Anlagengrößenklasse als repräsentativ angesehen werden kann.

Aus Bild 1 geht hervor, daß – auch bei zusätzlicher Berücksichtigung der Aufwendungen für Transport und Montage, für das Fundament (Standardfundament

*) Dipl.-Ing. A. Wiese, Dr.-Ing. M. Kaltschmitt, Dr. rer. pol. U. Fahl und Prof. Dr.-Ing. A. Voß, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart.

Wenn nichts weiter vermerkt, handelt es sich in diesem Aufsatz immer um elektrische Leistungen.

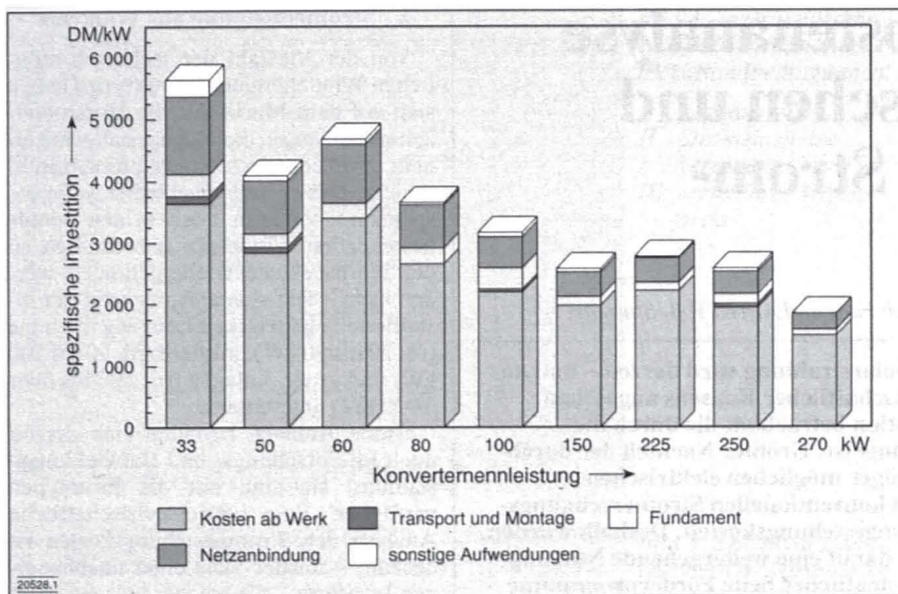


Bild 1. Spezifische Investitionen verschiedener Windkraftanlagen

ohne Tiefgründung), für die Netzanbindung (erdgelegtes Kabel einer Länge von rd. 450 m) und für die sonstigen anfallenden Kosten – mit steigender installierter Anlagenleistung die spezifischen Investitionen sinken. Dabei liegen *Bild 1* die folgenden Zusammenhänge bzw. Annahmen zugrunde:

- In der Bundesrepublik Deutschland kann derzeit von Anlagenkosten ab Werk bei Konvertern mit installierten elektrischen Leistungen von 20 bis 90 kW zwischen 2 150 und 7 850 DM/kW, bei Anlagen mit Generatorleistungen von 90 bis 500 kW zwischen 1 585 und 3 030 DM/kW ausgegangen werden. Große Anlagen mit installierten Leistungen im Megawattbereich sind deutlich teurer (3 700 bis 18 500 DM/kW [3]).

- Ist eine ausreichende Zuwegung zum potentiellen Standort vorhanden, so sind bei den meisten Anbietern die Aufwendungen für Transport und Montage in den Anlageninvestitionen enthalten. Andere Hersteller verrechnen im Schnitt rd. 5 bis 6 % der Investitionskosten der Windkraftanlage für Transport und Montage.

- Die für das Anlagenfundament zu veranschlagenden Aufwendungen hängen extrem von den lokalen Gegebenheiten am potentiellen Standort ab. Bei einem Standardfundament ohne Tiefgründung kann von Kosten von rd. 6 % der Anlageninvestition ab Werk ausgegangen werden. Bei ungünstigen Bodenverhältnissen können die Aufwendungen jedoch um ein Vielfaches höher liegen.

- Die 'Netzanbindungskosten' werden ebenfalls stark von der Situation vor Ort beeinflusst. Diese Aufwendungen liegen meist bei rd. 10 bis 25 % der Konverterinvestition ab Werk. Bei Kabel- und Legekosten von 130 bis 200 DM/m entsprechen die *Bild 1* zugrunde gelegten Netzanbindungskosten einer mittleren Kabellänge von 400 bis 500 m.

- Die sonstigen Aufwendungen (beispielsweise für Planung, Baugenehmigung und/oder Geländeerschließung) bewegen sich bei 1,5 % der Kosten ab Werk.

Aufbauend auf den in *Bild 1* dargestellten Kosten für einzelne Anlagen zeigt *Tafel 1* die Bandbreite der gesamten spezifischen Investitionen für die verschiedenen Konverterklassen. In der dargestellten Bandbreite der Investitionen sind alle untersuchten Konverter enthalten.

Tafel 1. Mittlere spezifische Aufwendungen für Windkraftanlagen, wie sie derzeit in der Bundesrepublik Deutschland angeboten werden

Anlagenklasse	Turmhöhe	gesamte Investitionen
20 bis 40 kW	18 bis 30 m	3 067 bis 7 850 DM/kW
40 bis 90 kW	10 bis 40 m	2 150 bis 4 017 DM/kW
90 bis 200 kW	24 bis 30 m	1 960 bis 3 030 DM/kW
200 bis 500 kW	28 bis 50 m	1 585 bis 2 933 DM/kW

Aus den Investitionen und den Betriebskosten können mit Hilfe der Annuitätenmethode die über die Abschreibungsdauer der Windkraftanlage konstanten mittleren barwertigen Kosten berechnet werden. Als Berechnungszeitpunkt wird der Zeitpunkt der Inbetriebnahme, d. h. das Bezugsjahr 1991, zugrunde gelegt. Zunächst werden die während des Betriebs entstehenden Kosten auf den Inbetriebnahmezeitpunkt abdiskontiert. Diese Summe der gesamten laufenden Kosten wird mit den Investitionen in jährliche – über die Abschreibungsdauer gleichbleibende – An-

nuitäten umgerechnet. Auch die während des Abschreibungszeitraumes durch die erzeugte elektrische Energie entstehenden Einnahmen müssen auf den Inbetriebnahmezeitpunkt abdiskontiert werden. Damit können letztlich bei bekannter Stromerzeugung die über den Abschreibungszeitraum konstanten spezifischen Stromgestehungskosten berechnet werden [4]. Dabei wird hier ein Abschreibungszeitraum von zehn Jahren zugrunde gelegt (d. h. der Zeitraum, innerhalb dessen Betriebskostenzuschüsse aus dem 250-MW-Wind-Programm gezahlt werden); es wird mit der realen Diskontrate im Mittel der letzten 35 Jahre gerechnet (d. h. 4 %). Die Angaben sind damit untereinander, aber nicht mit nominalen Angaben vergleichbar.

Im Rahmen des 250-MW-Wind-Programms des Bundesministeriums für Forschung und Technologie kann die Errichtung und der Betrieb einer Windkraftanlage mit einem Betriebs- oder einem Investitionskostenzuschuß gefördert werden [7]. Daraus ergeben sich auf der Grundlage der dargestellten Investitionen und Betriebskosten für verschiedene Anlagen unterschiedliche Stromgestehungskosten, die zusätzlich vom Windangebot am potentiellen Standort beeinflusst werden. *Bild 2* zeigt für zwei Konverterstandorte mit einer jahresmittleren Windgeschwindigkeit von 5 bzw. 6 m/s die sich ergebenden spezifischen Gestehungskosten ohne und mit entsprechender Förderung. Zusätzlich ist die Bandbreite der Kosten angegeben, die sich bei Berücksichtigung der von unterschiedlichen Herstellern angebotenen Anlagen ergibt. Da der Investitionszuschuß maximal bis zu einer Höhe von 90 000 DM gewährt wird, führt bei kleinen Anlagen ein Zuschuß zu den Investitionen zu niedrigeren Stromgestehungskosten. Bei großen Anlagen dagegen ist ein Betriebskostenzuschuß ökonomisch sinnvoller, da ein auf die Stromerzeugung bezogener jährlicher Zuschuß im Verlauf der ersten Betriebsjahre insgesamt eine höhere Förderung ergibt als ein einmaliger Investitionszuschuß. Bei den in *Bild 2* dargestellten spezifischen Stromgestehungskosten wurde jeweils die für einen potentiellen Betreiber günstigere Fördervariante gewählt.

Wird von der derzeitigen und in Zukunft als real konstant angesehenen Vergütung für in das Netz der öffentlichen Versorgung eingespeiste elektrische Energie in Abhängigkeit vom Versorgungsunternehmen von rd. 16,7 Pf/kWh ausgegangen, können an einem potentiellen Standort mit einer jahresmittleren Windgeschwindigkeit von rd. 6 m/s unter den diskutierten Annahmen (kein Spezialfundament, kurze Netzanbindung, keine zusätzliche Zuwegung, mittlere Konverterkosten, usw.) Windkraftanlagen ab rd. 150 kW ohne eine Förderung ökonomisch betrieben werden. Bei einem Standort mit einer jahresmittleren Windgeschwindigkeit von 5 m/s ist dagegen ein wirtschaftlicher Betrieb bei mittleren Konverterkosten nur mit einer staatlichen Förderung ab einer installierten Leistung der Windkraftanlage von rd. 170 kW möglich (Bild 2).

Aus Bild 2 wird auch deutlich – und das erhärten auch die anderen Ergebnisse der Marktanalyse –, daß Windkraftkonverter mit installierten Leistungen zwischen 90 und 500 kW bei einer ökonomischen Betrachtung auf jeden Fall Anlagen mit geringeren installierten Leistungen überlegen sind. Ursachen hierfür sind zum einen die deutlich niedrigeren spezifischen Investitionen solcher Anlagen, zum anderen die meist größeren Turmhöhen, die am gleichen Standort eine höhere jahresmittlere Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe bedingen, da mit zunehmender Höhe über Grund die mittlere Luftströmungsgeschwindigkeit ansteigt. Da die gewinnbare Energie von der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit abhängt, ist damit eine überproportional höhere Stromerzeugung am gleichen Standort möglich.

Wesentlichen Einfluß auf die spezifischen Stromgestehungskosten haben – neben den Anlageninvestitionen – die jahresmittleren Windgeschwindigkeiten am potentiellen Standort, die der Wirtschaftlichkeitsberechnung zugrunde liegende Diskontrate und die Abschreibungsdauer. In einer Sensitivitätsanalyse wurden diese Parameter variiert. Bild 3 zeigt die Ergebnisse am Beispiel eines Converters mit einer installierten Leistung von 100 kW ohne Berücksichtigung staatlicher Zuschüsse. Demnach hat die jahresmittlere Windgeschwindigkeit den größten Einfluß auf die Stromgestehungskosten. Ebenfalls große Auswirkungen hat die Abschreibungsdauer. Die Anlageninvestitionen und die Diskontrate wirken sich demgegenüber deutlich weniger auf die Gestehungskosten einer windtechnischen Stromerzeugung aus (Bild 3).

Zusätzlich zu den in Bild 3 dargestellten Parametern, die die Wirtschaftlichkeit einer Windkraftanlage beeinflussen, gibt es weitere – besonders standortabhängige – Einflußfaktoren. Dazu gehört z. B. die

Bild 2. Bandbreite der durchschnittlichen spezifischen Stromgestehungskosten von Windkraftanlagen unterschiedlicher Leistung ohne und mit einer Förderung nach dem 250 MW-Wind-Programm

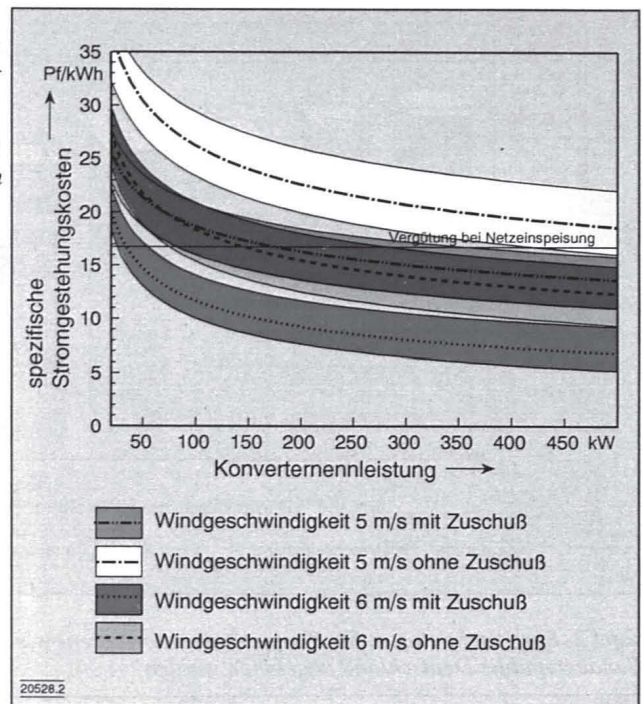
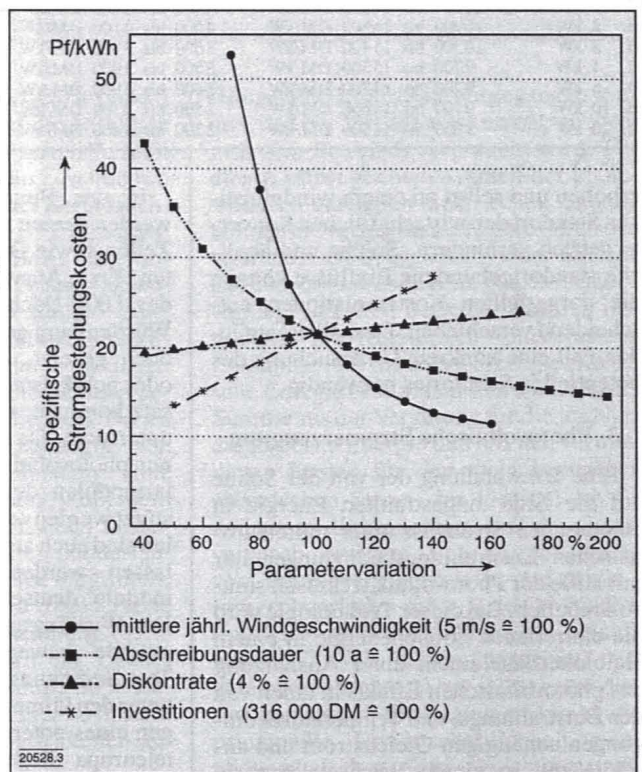
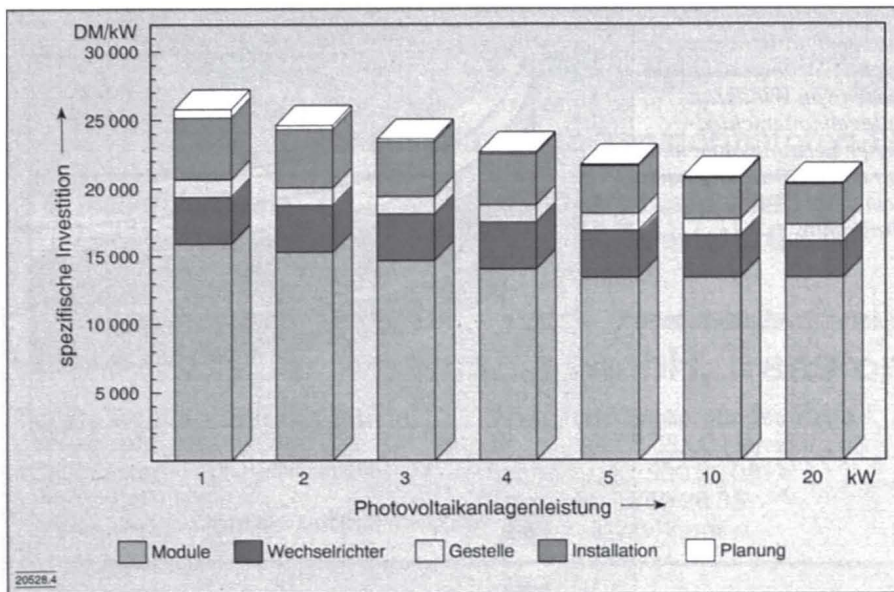


Bild 3. Einfluß der jahresmittleren Windgeschwindigkeit, der Abschreibungsdauer, der realen Diskontrate und der Gesamtinvestitionen auf die Stromgestehungskosten am Beispiel einer Windkraftanlage mit einer installierten Leistung von 100 kW ohne Berücksichtigung staatlicher Zuschüsse



vorhandene bzw. u. U. noch zu schaffende Infrastruktur am potentiellen Standort (u. U. Bau einer entsprechend tragfähigen Zufahrtsstraße) und die Tragfähigkeit des

Untergrundes (d. h. Standardfundament oder Spezialfundament mit Tiefgründung). Auch ist die zu überbrückende Entfernung zur nächsten Netzanbindungsmöglichkeit entscheidend für den wirtschaftlichen Betrieb einer Anlage. Über große Entfernungen neu zu legende Leitungen können die Investitionen stark



Tafel 2. Spezifische Kosten für Photovoltaikgeneratoren, wie sie derzeit in der Bundesrepublik Deutschland angeboten werden

Anlagengröße	Module	Wechselrichter	gesamte Investitionen
rd. 1 kW	11600 bis 17200 DM/kW	4400 bis 5100 DM/kW	22900 bis 28900 DM/kW
rd. 2 kW	10900 bis 16500 DM/kW	4000 bis 4100 DM/kW	22100 bis 28100 DM/kW
rd. 3 kW	10300 bis 15400 DM/kW	3600 bis 3900 DM/kW	21500 bis 27000 DM/kW
rd. 4 kW	9700 bis 15300 DM/kW	3500 bis 3900 DM/kW	20200 bis 25500 DM/kW
rd. 5 kW	9200 bis 14700 DM/kW	3400 bis 3900 DM/kW	19200 bis 24700 DM/kW
rd. 10 kW	9100 bis 14600 DM/kW	2500 bis 3700 DM/kW	18300 bis 23900 DM/kW
rd. 20 kW	9000 bis 14500 DM/kW	2200 bis 3400 DM/kW	18100 bis 22800 DM/kW

erhöhen und selbst an einem windgünstigen Standort den wirtschaftlichen Konverterbetrieb verhindern. Solche und ähnliche standortgebundene Einflüsse können die dargestellten Kostenrelationen entscheidend verschieben. Deshalb ist auf jeden Fall eine konkrete Untersuchung des potentiellen Standortes notwendig.

3 Photovoltaische Stromerzeugung

Eine Umwandlung der von der Sonne auf die Erde eingestrahelten Energie in elektrischen Strom ist unter mitteleuropäischen Einstrahlungsbedingungen nur mit Hilfe der Photovoltaik technisch sinnvoll möglich. Bei dieser Technologie wird die eintreffende Sonnenenergie in einem Halbleiterbauelement unter Ausnutzung des photovoltaischen Effekts in einen von den Einstrahlungs- und Temperaturbedingungen abhängigen Gleichstrom und anschließend in einem Wechselrichter in netzkompatiblen Wechselstrom umgewandelt.

In der Bundesrepublik Deutschland werden derzeit mono- und polykristalline Zellen sowie Dünnschichtzellen angeboten. Erste Auswertungen der im Rahmen des 1000-Dächer-Programms in Baden-Württemberg gestellten Anträge haben jedoch gezeigt, daß ausnahmslos mono- oder polykristalline Solarzellen zum Einsatz kommen; nur sie werden hier näher untersucht. Da bei dem Förderprogramm nur photovoltaische Generatoren mit Solarmodulen deutscher Hersteller unterstützt werden – lediglich in Ausnahmefällen sind auch ausländische Anbieter zugelassen – werden vorrangig auch nur Solarmodule deutscher Anbieter analysiert. Die Wirkungsgrade dieser Photovoltaikmodule bewegen sich bei Standard-Test-Bedingungen zwischen 11 und 13 %; unter den klimatischen Rahmenbedingungen eines potentiellen Standortes in Mitteleuropa liegen sie – aufgrund der Temperatur- und Einstrahlungsabhängigkeit des Wirkungsgrades – durchschnittlich 7 bis 9 % unter diesen Standardwirkungsgraden [5]. Aufgrund des leistungsabhängigen Wirkungsgrades des Wechselrichters liegt der mittlere jährliche Gesamtsystemwirkungsgrad eines Photovoltaikgenerators letztlich nur noch zwischen 8 und 10 %.

Die gesamten Aufwendungen für die Errichtung und den Betrieb photovoltaischer Generatoren, wie sie von einem po-

Bild 4. Spezifische Investitionen photovoltaischer Anlagen mit unterschiedlichen installierten Leistungen

tentiellen Anlagenbetreiber aufzubringen wären, setzen sich bei den Investitionen aus den Modul- und Wechselrichterkosten, den Aufwendungen für die Gestelle, den Planungs- und Installationskosten und den sonstigen Aufwendungen (u. a. Gebühren für die Baugenehmigung) zusammen. Die Betriebskosten errechnen sich aus den Wartungs- und Instandhaltungskosten, den Versicherungskosten und den sonstigen Aufwendungen (z. B. Modulreinigung, Zählermiete).

Werden Photovoltaikgeneratoren mit unterschiedlichen installierten Leistungen konzipiert und die entsprechenden Aufwendungen auf der Basis von Händlerangeboten ermittelt, ergeben sich die in Bild 4 dargestellten spezifischen Investitionen. Es wird deutlich, daß bei Anlagen mit installierten Leistungen (Peak-Werte) zwischen 1 und 5 kW (Anlagengrößen, die im Rahmen des 1000-Dächer-Programms gefördert werden) höhere spezifische Investitionen als bei Anlagen mit größeren installierten Leistungen gegeben sind. Beispielsweise liegen bei einer 1-kW-Anlage die – über alle vorliegenden Angebote gemittelten – gesamten spezifischen Anlageninvestitionen bei rd. 26 500 DM/kW, während sie bei einer 10-kW-Anlage rd. 20 % niedriger, d. h. bei rd. 21 700 DM/kW liegen. Ursache hierfür sind vor allem die Mengenrabatte der Modulhersteller bei größeren Abnahmemengen und die ebenfalls sinkenden spezifischen Wechselrichterkosten mit höheren installierten Leistungen.

Werden die einzelnen Kostenkomponenten näher analysiert, ergeben sich die in Tafel 2 dargestellten durchschnittlichen Aufwendungen. Es wird die große Schwankungsbreite deutlich, innerhalb der sich die Aufwendungen für die angebotenen Module bewegen, wobei polykristalline Module eher das untere, monokristalline tendenziell das obere Spektrum abdecken. Die ebenfalls in Tafel 2 dargestellten Inverterkosten machen einen weiteren wesentlichen Anteil an den Gesamtinvestitionen eines Photovoltaikgenerators aus. Obwohl eine Vielzahl unterschiedlicher Wechselrichter angeboten

werden, hat eine Auswertung bisher gestellter Anträge aus dem 1000-Dächer-Programm gezeigt, daß meist nur drei Inverter zum Einsatz kommen; hier bewegen sich die entsprechenden Aufwendungen zwischen 2 900 und 5 100 DM/kW.

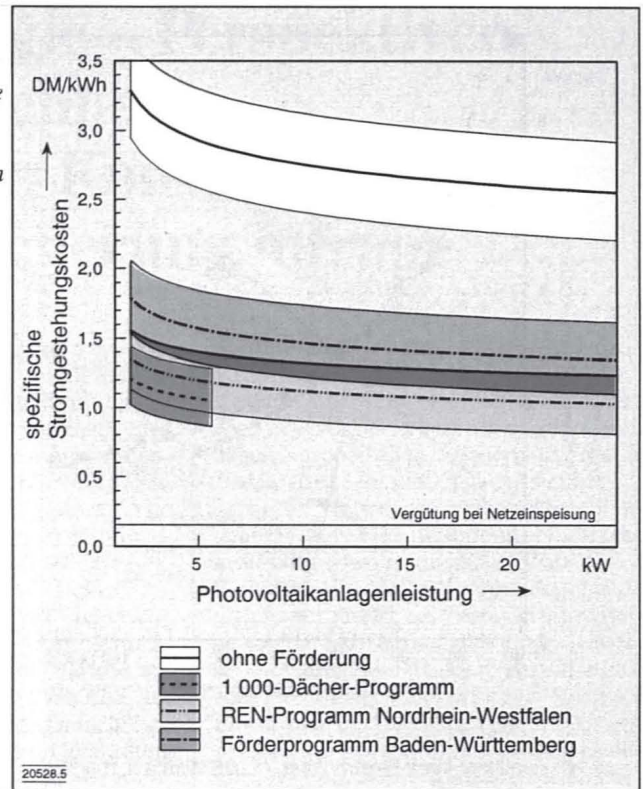
Die Module können entweder auf gebäudenahen Freiflächen, auf Flachdächern mit Hilfe von Gestellen bzw. auf geneigten Dächern auf den Dachziegeln oder integriert in die Dachabdeckung installiert werden. Die Aufwendungen für die benötigten Tragegestelle liegen zwischen 5 und 8 % der Modulinvestitionen. Müssen die Solarmodule aufgeständert werden, betragen die zusätzlichen Kosten für die Tragegestelle rd. 9 % der Investitionen für die Solarmodule. Die Aufwendungen für die Installationsarbeiten liegen im Durchschnitt bei 15 bis 18 % der Modulinvestitionen. Dabei enthalten diese Angaben sowohl die komplette Dachmontage als auch die Elektroinstallation einschließlich Zählerkasten, Zählereinbau und Kabelkosten bis zur Kopplung an das öffentliche Netz in dem entsprechenden Gebäude. Die Planungskosten können – ein bestimmtes Erfahrungspotential bei dem Planungsbüro vorausgesetzt – mit rd. 1 % der gesamten Anlageninvestitionen veranschlagt werden.

In Anlehnung an die Untersuchung der Stromgestehungskosten aus Windkraft wurde auch bei der Berechnung der spezifischen Kosten photovoltaischer Anlagen die reale Diskontrate im Durchschnitt der letzten 35 Jahre (d. h. 4 %) und eine Abschreibungsdauer von ebenfalls zehn Jahren zugrunde gelegt.

Bei den in der Bundesrepublik Deutschland gegebenen Einstrahlungsbedingungen und den damit möglichen Energieerträgen zeigt sich, daß die photovoltaischen Stromgestehungskosten rd. 2,5 bis 3,3 DM/kWh betragen (Bild 5). Damit liegen die spezifischen Gesteungskosten um eine Größenordnung über den Kosten bei der Nutzung der Windenergie (siehe Kapitel 2). Mit zunehmender installierter Leistung gehen die spezifischen Stromgestehungskosten zurück; bei einer Erhöhung der Anlagenleistung sinken die mittleren spezifischen Investitionen bei gleichzeitiger Verbesserung des durchschnittlichen Wirkungsgrades der Wechselrichter. Dieser Kostenrückgang ist jedoch weit geringer ausgeprägt als bei der Windkraftnutzung, da bei steigender Leistung der Windkraftanlagen die spezifischen Investitionen vergleichsweise stärker sinken bei gleichzeitiger überproportionaler Zunahme der gewinnbaren Energiemenge.

Im Rahmen des 1000-Dächer-Programmes des Bundesministeriums für Forschung und Technologie wird ein Zuschuß bei photovoltaischen Anlagen mit

Bild 5. Bandbreite der spezifischen Stromgestehungskosten photovoltaischer Anlagen ohne und mit Berücksichtigung unterschiedlicher Fördermöglichkeiten



installierten Leistungen zwischen 1 und 5 kW von 50 %, bezogen auf die gesamten Investitionen, gewährt. Zusätzlich zahlt das jeweilige Bundesland ein Zuschuß von 20 % der Investitionen. Unter Berücksichtigung dieser 70prozentigen Bezuschussung ergeben sich auf der Basis der erhobenen Daten spezifische Gesteungskosten, die deutlich über der Einspeisevergütung liegen, die aufgrund der gesetzlichen Vorgaben [2] von dem jeweiligen Elektrizitätsversorgungsunternehmen gezahlt werden. Bild 5 zeigt die spezifischen Stromgestehungskosten, abhängig von der installierten Anlagenleistung ohne und mit staatlicher Förderung. Außerdem sind beispielhaft die spezifischen Kosten bei der Bezuschussung durch bundesländerinterne Förderprogramme dargestellt, (d. h. Förderprogramm für regenerative Energien in Baden-Württemberg (35 % Zuschuß); REN-Programm des Landes Nordrhein-Westfalen (maximal 50 % Zuschuß); zusätzlich können hier noch steuerliche Abschreibungsmöglichkeiten genutzt werden [7]).

Bei privat betriebenen dezentralen Photovoltaikanlagen auf Gebäudedächern

(Haushalte) kann davon ausgegangen werden, daß ein Teil des solar erzeugten Stromes vom Betreiber verbraucht wird. Für diesen selbst genutzten Anteil der photovoltaisch erzeugten elektrischen Energie können die vermiedenen Kosten durch den verminderten Bezug elektrischer Energie aus dem öffentlichen Netz gutgeschrieben werden. Die dem Betreiber dadurch insgesamt – rein rechnerisch – entstehenden Einnahmen für die selbst erzeugte elektrische Energie bestimmen sich dann aus der Summe aus der Vergütung für die ins Netz eingespeiste Energie und aus den vermiedenen Kosten für den nicht bezogenen elektrischen Strom. Im Idealfall ist die Anlage so dimensioniert, daß die photovoltaisch erzeugte Energie vollständig vom Betreiber genutzt wird und damit – rein rechnerisch – mit z. B. rd. 19 Pf/kWh (mittlerer verbrauchsabhängiger Haushaltstarif, RWE Versorgungsgebiet) vergütet werden kann. Aber selbst unter diesen günstigsten Bedingungen bleibt die prinzipielle Unwirtschaftlichkeit einer photovoltaischen Stromerzeugung unter den derzeitigen ökonomischen Rand- und Rahmenbedingungen bestehen.

Bei einer Analyse der wesentlichen Einflußparameter auf die spezifischen Kosten der photovoltaischen Stromerzeugung – d. h. der Abschreibungsdauer, der spezifischen Investitionen, des solaren Strahlungsangebots und der Diskontrate – zeigt

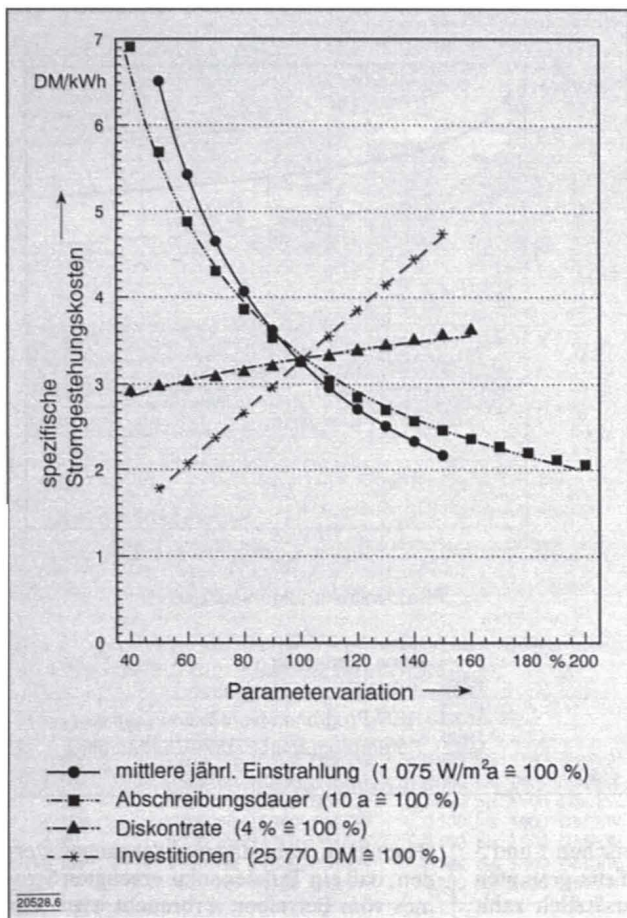


Bild 6. Einfluß der mittleren jährlichen Einstrahlung, der Diskontrate, der Abschreibungsdauer und der spezifischen Investitionen auf die Stromgestehungskosten eines photovoltaischen Generators mit einer installierten Leistung von 1 kW ohne Berücksichtigung staatlicher Zuschüsse

die solare Einstrahlung den größten Einfluß (Bild 6). Beispielsweise würden bei einer Einstrahlung von 1500 kWh/m²a (d. h. günstiger Standort in Südeuropa) die spezifischen Kosten auf rd. 70 % des in der Bundesrepublik Deutschland gegebenen Niveaus sinken. Innerhalb Deutschlands sind die Möglichkeiten der Einstrahlungsoptimierung allerdings vergleichsweise begrenzt, da die mittlere jährliche Einstrahlung nur zwischen rd. 930 und 1220 kWh/m²a variiert. Eine solare Angebotsmaximierung ist hier nur unter Berücksichtigung des Mikroklimas (verstärkte Luftverunreinigungen über Talkesseln und an Industriestandorten bzw. Klarluftgebiete) und an einem vorgegebenen Standort durch eine Optimierung der Modulneigung und -ausrichtung möglich.

4 Schlußbetrachtung

Aus der dargestellten Analyse der derzeitigen Kostensituation einer Stromerzeugung

aus Windkraft und Solarstrahlung können die folgenden Schlüsse gezogen werden:

- Bei Windkraftanlagen mit installierten Leistungen zwischen 90 und 500 kW liegen die spezifischen Stromgestehungskosten deutlich niedriger als bei Konvertern geringerer installierter Leistung (20 bis 90 kW).

- Bei Windkraftkonvertern mit installierten Leistungen zwischen 90 und 500 kW kann die Windstromerzeugung an einem Standort mit hoher jahresmittlerer Windgeschwindigkeit (> 6 m/s) unter Berücksichtigung der derzeitigen Netzeinspeisevergütung [2] bereits heute auch ohne staatliche Förderung ökonomisch sinnvoll sein. Bei einer Förderung im Rahmen des 250-MW-Wind-Programmes kann sich die Nutzung der Windenergie derzeit auch an weniger günstigen Standorten für einen potentiellen Betreiber »rechnen«. Jedoch ist auf jeden Fall aufgrund der hohen zeitlichen und örtlichen Variationsbreite des Windangebots eine detaillierte Untersuchung des potentiellen Standortes notwendig.

- Größten Einfluß auf die Stromgestehungskosten hat die jahresmittlere Windgeschwindigkeit, die näherungsweise mit der dritten Potenz in die jährliche Energieerzeugung eingeht; beispielsweise steigen die mittleren Stromgestehungskosten, be-

zogen auf einen Standort mit einer jahresmittleren Windgeschwindigkeit von 5 m/s, bei einer Abnahme des Windenergieangebots um 0,5 m/s um rd. 30 %, bei einem Rückgang um 1,0 m/s um etwa 80 %.

- Photovoltaisch erzeugte elektrische Energie kostet unter mitteleuropäischen Einstrahlungsbedingungen eine Größenordnung mehr als Strom aus Wind; ohne staatliche Zuschüsse liegen die spezifischen Gestehungskosten – je nach installierter elektrischer Leistung der Anlage – zwischen 2,5 und 3,3 DM/kWh. Unter Berücksichtigung eines Zuschusses im Rahmen des 1000-Dächer-Programmes bewegen sich bei Anlagen zwischen 1 und 5 kW die Stromgestehungskosten zwischen 1,0 und 1,2 DM/kWh.

- Größten Einfluß auf die Stromgestehungskosten einer photovoltaischen Energieerzeugung hat das solare Strahlungsangebot, das jedoch – im Gegensatz zur Windenergie – nur linear mit der jährlichen Energieerzeugung zusammenhängt. Auch schwankt die jahresmittlere Einstrahlung innerhalb der Bundesrepublik Deutschland nur geringfügig und kann deshalb durch die Wahl des Standortes nur in engen Grenzen optimiert werden.

Damit ist die Stromerzeugung aus Windkraft – im Gegensatz zur photovoltaischen Energiegewinnung – deutlich billiger und – aus der Sicht eines potentiellen Betreibers – bei hohen jahresmittleren Windgeschwindigkeiten an der Schwelle zur Wirtschaftlichkeit. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht liegen die Stromgestehungskosten aus Windkraft oder Solarstrahlung jedoch noch über den im konventionellen Kraftwerkspark vermiedenen Brennstoffkosten. Dies gilt auch dann, wenn diesen beiden regenerativen Energieträgern ein bestimmter Kapazitätseffekt [8] gutgeschrieben wird. Auch ist das Potential einer windtechnischen Stromerzeugung innerhalb der Bundesrepublik Deutschland nur sehr begrenzt. Beispielsweise hat eine Potentialuntersuchung für Baden-Württemberg gezeigt, daß die technischen Potentiale einer Windstromerzeugung maximal bei rd. 4,5 %, die einer photovoltaischen Elektrizitätserzeugung allein auf Gebäudedächern aber bei rd. 17,4 % der Bruttostromerzeugung des öffentlichen Kraftwerksparks liegen

[6]. Da diese Zusammenhänge innerhalb der Bundesrepublik Deutschland nicht grundsätzlich anders sind, wird die Windkraft deshalb nur einen kleinen Beitrag zur Bruttostromerzeugung leisten können. Damit wird mittelfristig – sollen erneuerbare Energieträger für die Stromerzeugung stärker genutzt werden – die Photovoltaikoption in den Vordergrund rücken. Sie kann aber nur dann einen merklichen Anteil der nachgefragten Energie bereitstellen, wenn es gelingt, bei gleichzeitiger drastischer Kostenreduktion die Wirkungsgrade photovoltaischer Generatorsysteme deutlich zu verbessern.

5 Schrifttum

- [1] Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) Beschluß der Bundesregierung vom 7. November 1990 zur Reduzierung der Kohlendioxidemissionen in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2005. Bonn, März 1991.
- [2] Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz. Bonn 1990.
- [3] *Molly, J. P.*: Windenergie; Theorie, Anwendungen, Messungen. Verlag C. F. Müller, Karlsruhe 1990.
- [4] *Schulz, W.*: Volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Aspekte der Wirtschaftlichkeitsrechnung. VDI Berichte 851 »Regenerative Energien«. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1991.
- [5] *Haug, G.; Kiefer, K.*: Kennlinienmessung an Solarmodulen. Sonnenenergie 3/1991, S. 17 – 19.
- [6] *Kaltschmitt, M.; Friedrich, R.*: Potentiale erneuerbarer Energieträger in Baden-Württemberg. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 41 (1991), S. 300 – 305.
- [7] Fachinformationszentrum Karlsruhe, Forum für Zukunftsenergien, Deutscher Wirtschaftsdienst (Hrsg.). Förderfibel Energie. Öffentliche Finanzhilfen für den Einsatz erneuerbarer Energiequellen und die rationelle Energieanwendung. Deutscher Wirtschaftsdienst, Köln 1990.
- [8] *Kaltschmitt, M.; Voß, A.*: Leistungseffekte einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung. Elektrizitätswirtschaft 90 (1991), S. 365 – 371.

