

Alternative Energien: Vergleich Solar, Wind, Wasserstoff, Wasserkraft, Geothermie, Biomasse und Gezeitenkraft hinsichtlich Ökonomie und Ökologie

Thomas Kohl

Agricolastraße 14, 09599 Freiberg, Deutschland

Abstract. Durch eine verstärkte Nutzung regenerativer Energien soll die Energieversorgung in Deutschland ressourcensparender und umweltfreundlicher gestaltet werden. Dabei besteht das Ziel, den Beitrag erneuerbarer Energien, sowohl am Verbrauch von Primärenergie als auch an der Stromversorgung innerhalb der nächsten zehn Jahre zu verdoppeln. Es ergeben sich für die Zukunft enorme Potentiale, die für die Stromerzeugung in Deutschland nutzbar werden können. Als Folge des Ausbaus erneuerbarer Energien ergeben sich ökologische Auswirkungen auf die näher eingegangen werden soll.

1. Ökonomischer Vergleich erneuerbarer Energien

Anteile erneuerbarer Energien zur Strombereitstellung in Deutschland

Der Primärenergieverbrauch ¹⁾, 14334 PJ im Jahr 2003, basiert in Deutschland auf einem breiten Mix unterschiedlicher Energieträger (Staiß et al. 2004), der sich in den letzten zehn Jahren insbesondere zu Lasten der Kohle und zugunsten des Erdgases verändert hat. Fossile Energieträger (Mineralöl, Kohle, Erdgas) tragen, bisher zu 84 Prozent, zum Primärenergieverbrauch bei. Der Anteil der Kernenergie lag 2003 bei nahezu 13 Prozent. Erneuerbare Energien wie Wasserkraft, Wind, Biomasse u.a. decken gegenwärtig nur etwa 3,1 % des Primärenergieverbrauchs in Deutschland ab. Dabei umfasst dieser Anteil sowohl

¹⁾ Primärenergie ist der Energieinhalt von Energieträgern, die noch keiner Umwandlung unterworfen worden sind

die Energie zur Stromerzeugung als auch den Kraftstoffverbrauch und die Wärmeerzeugung.

Der alleinige Anteil der erneuerbaren Energien an der Strombereitstellung für den Endenergieverbrauch in Deutschland belief sich im Jahr 2003 auf 46258 GWh (Staiß et al. 2004). Dieser Anteil entspricht 7,9 % des Stromverbrauches in Deutschland. Die größten Prozentanteile haben dabei die Wasserkraft mit 3,5 % und die Windkraft mit 3,1 %. Diese Energien besitzen somit bislang die meiste Bedeutung. Die Fotovoltaik trägt mit 0,1 % bisher nur zu einem verschwindend geringen Teil zur Stromerzeugung, bezogen auf den Endenergieverbrauch, in Deutschland bei. Es ist aber anzumerken: Das Energieangebot aus Wasserkraft, Windenergie und Solarenergie unterliegt natürlichen Schwankungen, die sich sowohl kurzfristig wie auch saisonal auf den Jahresenergieertrag auswirken. Der Anteil der gesamten Biomasse, aus biogenen Festbrennstoffen, Biogas, Deponiegas u.ä. trägt momentan mit 1,21% zur Strombereitstellung bei. Geothermie ist bislang nicht an der Energiebereitstellung beteiligt, da sich diese Technologie für die Stromerzeugung noch in der Versuchsphase befindet (Staiß et al. 2004). Für die Bereitstellung von Strom aus Gezeitenkraft existieren weltweit nur wenige Kraftwerke, u.a. an der Rance- Mündung bei St.Malo in Frankreich. Dies sind bislang aber nur Prototypen. Für Deutschland ist die Errichtung solcher Anlagen aus technischen Gründen nicht möglich. Es existiert ein zu geringer mittlerer Tidenhub in der Nordsee (Lochmaier 2004). In Deutschland wird auch regenerativer Wasserstoff als erneuerbare Energie diskutiert. Wasserstoff fungiert aber nur als Speichermedium, da er selbst erst erzeugt werden muss. Seine Bedeutung als Energieträger hängt davon ab, mit welchem Energieträger er hergestellt wird. Er ist daher nicht direkt als erneuerbare Energie anzusehen und wird hier auch nicht weiter behandelt.

Stromgestehungskosten

Die Gestehungskosten für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sind, wie in Abbildung 1 erkennbar, sehr unterschiedlich. Nach heutigem Stand ist die Fotovoltaik mit 50-80 Cent/kWh (Nitsch et al. 2004) die mit Abstand teuerste erneuerbare Energieerzeugungstechnik, mit der Strom produziert werden kann, verursacht vor allem durch die hohen Produktionskosten. Diese resultieren aus dem hohen Energieverbrauch sowie den noch hohen Materialverlusten bei der Verarbeitung des Siliziums. Die große Bandbreite der Gestehungskosten von 5-30 Cent/kWh (Nitsch et al. 2004) bei Strom aus Biomasse resultiert aus der Vielfältigkeit der biogenen Einsatzstoffe. Die Wirtschaftlichkeit von Biomasse hängt in der Regel von den Brennstoffbereitstellungskosten ab. Diese erstrecken sich von „negativen Kosten“ - durch Gutschriften für vermiedene Entsorgungskosten - bis hin zu teureren Biomassebrennstoffen (BMVEL2004) wie Energieholz und speziell angebaute Biomasse aus Energiepflanzen.

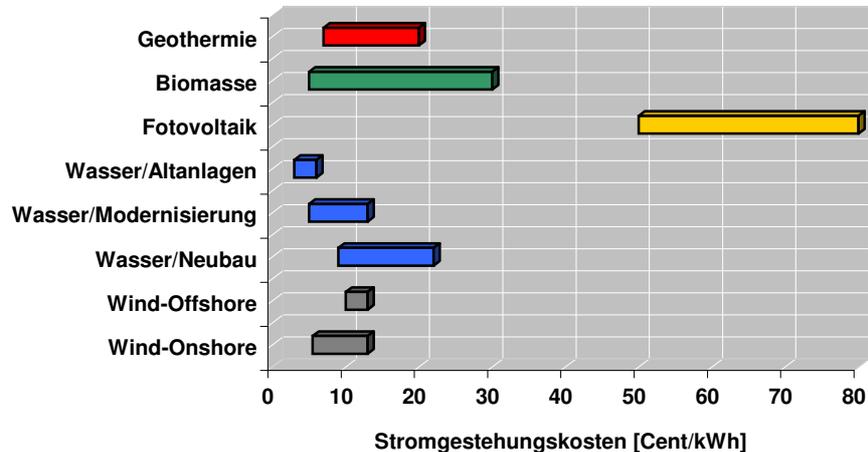


Abbildung 1. Bandbreite der derzeitigen Stromerzeugungskosten aus erneuerbaren Energien (Daten : Nitsch et al. 2004)

Bei der Stromerzeugung aus Windenergie an Land ergeben sich die Kosten aus den reinen Anlagenkosten und Zusatzkosten wie der Planung, Bau des Fundaments oder der Netzanbindung. Die Kostenstruktur wird dabei entscheidend von der Größe der Anlage sowie den örtlichen Gegebenheiten bestimmt. Unter Berücksichtigung der Betriebs- und Wartungskosten sowie des jeweiligen Windenergieangebots werden Stromerzeugungskosten zwischen 5,5-13 Cent/kWh (Nitsch et al. 2004) erreicht. Bei Offshore- Anlagen ist es möglich, größere Anlagen zu planen. Man geht trotz evtl. höher Bau- und Betriebskosten heutzutage von Stromerzeugungskosten zwischen 10 und 13 Cent/kWh aus. Die Kosten von Wasserkraftanlagen werden wesentlich von der installierten Leistung und den örtlichen Randbedingungen bestimmt. Das Spektrum der Stromerzeugungskosten reicht dabei von 9-22 Cent/kWh bei Neuanlagen, über 5-13 Cent/kWh (Nitsch et al. 2004) für modernisierte Anlagen bis hin zu bereits abgeschriebenen Anlagen mit Stromerzeugungskosten zwischen 2,5-6,6 Cent/kWh. Die Geothermie befindet sich erst noch in der Versuchsphase und steht am Anfang ihrer Entwicklung. Die realen Kosten der Geothermie sind nach heutigem Stand noch schwer abschätzbar. Es entstehen hohe Kosten allein für die Tiefenbohrung und Simulationsverfahren, die auch letztlich vom jeweiligen Standort abhängig sind. Die Stromerzeugungskosten von 7-20 Cent/kWh (Nitsch et al. 2004) bei der Geothermie hängen unter anderem auch davon ab wie hoch die Wärmeproduktion der jeweiligen Anlage ist. Bei der Gezeitenkraft gibt es momentan nur Prototypen, mit sehr unterschiedlichen Technologien. Für Wellen- und Gezeitenkraftprototypen in Europa wird von kalkulierten 7-10 Cent/kWh (Lochmaier 2004) Stromerzeugungskosten ausgegangen. Dieses sind aber nur vorläufige Abschätzungen.

Potentiale zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland

Die Darstellung in Abbildung 2 zeigt die vorläufige Abschätzung zum generellen Potential der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (ohne Stromimport) für die Zukunft, im Vergleich zu dem Anteil erneuerbarer Energien im Jahr 2003 (AG DLR/IFEU/WI 2004). Es ergeben sich zwei mögliche Szenarien. Zum einen das Potential „Basis“, welches alle potentiellen Ressourcen für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien berücksichtigt, die theoretisch bereitstehen. Das zweite mögliche Szenario ist das Potential „Naturschutz plus“, wonach stärker die Ressourcenbegrenzung im Sinne des Naturschutzes mit einbezogen wird. In der Abbildung 2 ist zu erkennen, dass das zukünftige Potential für die Wasserenergie weitgehend erschöpft ist (AG DLR/IFEU/WI 2004). Ein weiterer Ausbau ist nur begrenzt möglich, da Natur- und Gewässerschutzaspekte zu berücksichtigen sind. Beide Szenarien zeigen noch deutlichen Zuwachs für die Windenergie an Land, noch übertroffen durch die Potentiale im Offshore- Bereich. Bei der Geothermie wird zukünftig ebenfalls ein enormes Potential erwartet.

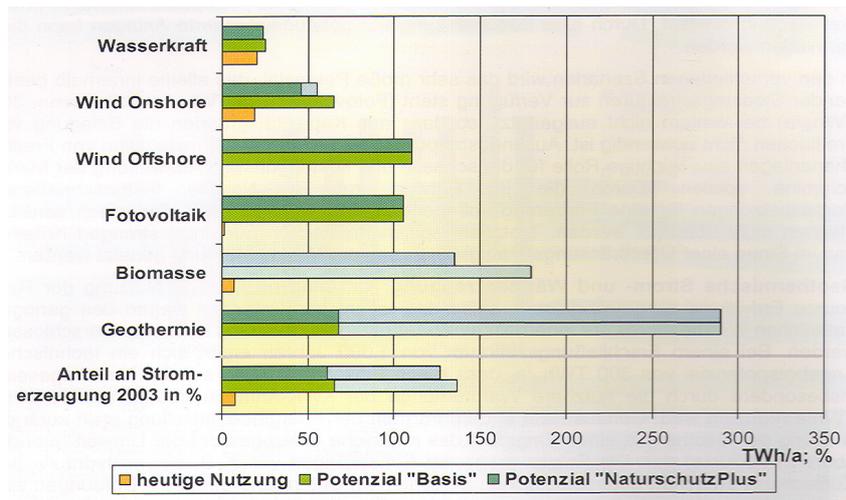


Abbildung 2: Potentiale zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland, ohne Import (Quelle: Arbeitsgemeinschaft DLR/IFEU/WI 2004)

Grundsätzlich ist die geothermische Stromerzeugung auf der gesamten Gebietsfläche Deutschlands möglich. Dabei ergeben sich aber Schwankungsbereiche bei der Stromerzeugung, abhängig von dem Anteil (AG DLR/IFEU/WI 2004) für die Wärmebereitstellung. Gelingt es den Untergrund einfacher und kostengünstiger zu erschließen und dadurch effizienter der Erde mehr Wärme zu entziehen und diese Übertage mit einem höheren Systemnutzungsgrad in elektrische Energie zu wandeln, können sich die Potentiale

deutlich erhöhen. Die Schwankungen für die Strombereitstellung aus Biomasse resultieren zum einen aus den unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten, zur Strom- oder Wärmeproduktion sowie der Erzeugung von Biokraftstoffen, zum anderen aus konkurrierenden Landnutzungsformen, da die landwirtschaftliche Nutzfläche nicht nur zum Anbau von Energiepflanzen genutzt wird. Es wird deutlich, dass die Potentiale aus Sicht des Natur- und Landschaftsschutzes für die einzelnen Technologien insbesondere für die Windenergie und auch für die Nutzung von Biomasse das verfügbare Potential reduzieren können, sie aber gesamt betrachtet nur unwesentlich einschränken.

Zukünftige Stromgestehungskosten der erneuerbaren Energien

Die derzeitige Bundesregierung geht in Zukunft von hohen Wachstumsraten für erneuerbare Energien aus. Dies wird hier zugrundegelegt. Für den Vergleich der zukünftigen Stromgestehungskosten wird ein Szenario mit hohem Wachstum der einzelnen Technologien gewählt. Abbildung 3 stellt dabei einen repräsentativen Kostenverlauf für Referenztechniken (Neuanlagen ab 2000) einzelner erneuerbarer Energien und den Kostenverlauf des Mittelwertes des gesamten Strommixes dar. Im Strombereich können erneuerbare Energien in einem optimierten Mix längerfristig große Mengen an Strom mit Durchschnittskosten um 5 Cent/kWh bereitstellen. Mittelfristig, also bis 2020, können die Kosten im Mix der Energieträger unter 7 Cent/kWh sinken. Dies ist auch mit auf den zukünftigen Stromimport, aus einem späteren Europäischen Verbundsystem, mit zurückzuführen. Weiterhin ist zu erkennen, dass für die Geothermie die Kostendegression, im Zuge ihres projektierten Ausbaus sehr schnell voranschreitet. Sie wird sich längerfristig (2050) den anderen Kosten erneuerbarer Energien angenähert haben. Diese erhebliche Kostenminderung wird durch zukünftig effizientere Bohr- und Simulationsverfahren und die Verbesserung des Wirkungsgrads erreicht (AG DLR/IFEU/WI 2004).

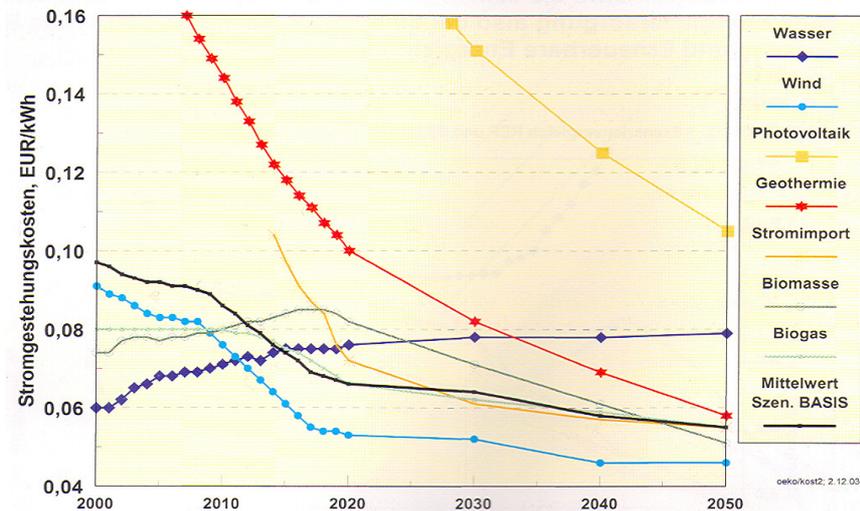


Abbildung 3. Repräsentativer Kostenverlauf für einzelne erneuerbare Energien und Kostenverlauf des gesamten Strommixes im Szenario BASIS (Quelle: Arbeitsgemeinschaft DLR/IFEU/ WI 2004)

Im Bezug auf die Fotovoltaik werden die Stromgestehungskosten in der Zukunft auch stark sinken. Die Entwicklungsarbeiten zur Reduzierung der Stromgestehungskosten konzentrieren sich dabei auf die Verbesserung der bestehenden Module und Systemkomponenten sowie auf günstigere Produktionsverfahren. Bis 2050 können Stromgestehungskosten aus Sonnenenergie in Deutschland um 11 Cent/kWh realisiert werden. Aus der Abbildung 3 wird deutlich, dass trotz dieser Kostendegression die Fotovoltaik auch in Zukunft die teuerste erneuerbare Energie zur Strombereitstellung sein wird. Auch bei Strom aus Windkraft wird es eine deutliche Kostenminderung geben. Dies wird in Zukunft vor allem an Land durch das Repowering möglich sein, entsprechend der Austausch veralteter Kleinanlagen durch modernere Großanlagen (AG DLR/IFEU/WI 2004), aber auch durch steigende Produktionszahlen. Im Offshore- Bereich haben Windkraftanlagen eine bessere Auslastung was höhere Stromerträge nach sich zieht. So können zukünftig günstige Stromgestehungskosten erreicht werden, die mit 3-5 Cent/kWh noch unter den Stromkosten an guten Standorten an Land liegen. Insgesamt werden die Stromgestehungskosten bei Windkraft langfristig unter 5 Cent /kWh sinken. Bei Wasserkraftwerken kann langfristig nicht von wesentlichen Kostensenkungen ausgegangen werden, da diese Technik seit Jahrzehnten weitgehend ausgereift ist. Es ist davon auszugehen, dass bei Neuanlagen bedingt durch Ausgleichmaßnahmen für den Naturschutz die Stromgestehungskosten eher steigen werden (AG DLR/IFEU/WI 2004).

2. Ökologischer Vergleich erneuerbarer Energien

Ökobilanz erneuerbarer Energien

Für den Vergleich der Umweltauswirkungen der unterschiedlichen Stromerzeugungstechniken werden die Ergebnisse einer Ökobilanzierung (Nill 2004) herangezogen. Durch eine Ökobilanzierung können Informationen über die Umweltinanspruchnahme des kompletten Lebensweges der einzelnen Technologien bereitgestellt werden. Jeder einzelne Energieträger wird auf die Wirkungskategorien Verbrauch an Primärenergie, Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt sowie Beitrag zur Versauerung und zur terrestrischen Eutrophierung untersucht. Diese Wirkungskategorien (Tabelle 1) werden repräsentiert durch die Wirkungsindikatoren Verbrauch von Primärenergie [GJ], CO₂- Äquivalent [t], SO₂- Äquivalent [kg] und PO₄³⁻- Äquivalent [kg], bezogen auf eine Gigawattstunde erzeugte Energie. Bei dem erst genannten wird der Verbrauch von Erdöl, Kohle und anderen Energien im Lebensweg der erneuerbaren Energien zugrundegelegt. In den Wirkungsindikator CO₂- Äquivalent - Emissionen gehen neben CO₂ alle Gase mit ein, die mit zum Treibhauseffekt beitragen. Im Fall des Indikators SO₂- Äquivalent- Emissionen wird der Beitrag zur Schädigung durch versauernde Stoffe, wie NO_x,NO₂ und anderen Gasen auf das Ökosystem untersucht. Die PO₄³⁻- Äquivalent- Emissionen umfassen den Eintrag von Nährstoffen in Böden und Gewässer verursacht durch lufteingetragene Schadstoffe. Alle Wirkungsindikatoren beziehen sich jeweils auf definierte Referenzanlagen:

- Sonnenenergie: netzgekoppelte Fotovoltaik- Hausanlage (5 kW)
- Windkraft: Windenergiekonverter im Binnenland (1,5 MW)
- Wasserkraft: Laufwasserkraftwerk 60 MW
- Biomasse: Holzkraftwerk 20 MW
- Geothermie: Anlage zur Nutzung trockener heißer Gesteinsschichten mit HDR-Technik 4500 m Tiefe, 850 kW_{el}

Die Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Ökobilanzierung für das Basisjahr 2000 und für das Jahr 2020. Für die Umwelteffekte der Technologien wird der heutige und der mögliche zukünftige Stand der Technik einbezogen. Es ergeben sich für die einzelnen Technologien unterschiedliche Umweltauswirkungen. In Tabelle 1 ist zu erkennen, dass die Umweltinanspruchnahme der einzelnen Technologie für das Jahr 2020 im Vergleich zum Basisjahr abnehmen. Allerdings variieren die Verringerungen bei den jeweiligen Technologien in großem Maß.

Tabelle 1: Ergebnisse der Ökobilanz für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in den Jahren 2000 und 2020 verändert nach M. NILL, 2004

Wirkungskategorie	Indikator	Jahr	Sonne	Wind	Wasser	Biomasse	Geothermie
Ressourcenbeanspruchung	GJ Primärenergie	2000	3215	552	174	623	1019
		2020	929	360	130	430	595
anth. Treibhauseffekt	t CO ₂ -Äqu.	2000	224	41	15	52	80
		2020	63	28	12	37	47
Versauerung	kg SO ₂ -Äqu.	2000	644	253	50	879	411
		2020	243	206	36	691	278
Eutrophierung	kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	2000	42	10	4	137	55
		2020	13	7	3	109	40

Im Basisjahr 2000 (Tabelle1) übersteigt der Primärenergieverbrauch der Stromerzeugung aus Sonnenenergie, gegenüber dem der anderen erneuerbaren Energien, mehr als den Faktor 3. Dies ist bedingt durch den Herstellungsprozess der Fotovoltaikanlagen, besonders für die energieintensive Fertigung des Reinstsiliziums (Nill 2004). Somit ergeben sich für diese Technologie auch die höchsten CO₂-Äquivalentemissionen aller erneuerbaren Energien. Der Herstellungsprozess bedingt auch eine starke versauernde Wirkung auf das Ökosystem. Der Verbrauch von Primärenergie und alle anderen Arten von Emissionen ergeben sich bei Wasserkraft, Windkraft und Geothermie ebenso durch den Bau der Anlagen (Nill 2004). Gerade die Tiefenbohrung verursacht bei der Geothermie einen hohen Primärenergiebedarf. Dadurch ergeben sich hier höhere Emissionen die zum Treibhauseffekt beitragen. Im späteren Betrieb der Anlagen wird, wie bei der Fotovoltaik keine Primärenergie benötigt. So entstehen auch keine schädigenden Emissionen. Bei der Biomassennutzung ergeben sich die Bilanzwerte weniger aus dem Anlagenbau, sondern überwiegend aus der Bereitstellung des Brennstoffs für den Anlagenbetrieb. Die direkten Emissionen, welche bei Verbrennung entstehen, werden als klimaneutral bewertet und fallen somit in der Bilanzierung nicht ins Gewicht. (Nill 2004). Aber hinsichtlich der SO₂- und PO₄³⁻-Äquivalentemissionen liegt die Biomasse deutlich über allen anderen Technologien. Die versauernde und eutrophierende Wirkung wird maßgeblich durch die direkten Emissionen beim Verbrennungsprozess der Anlagen bestimmt. Die Mehremissionen bleiben in Zukunft bestehen, auch wenn bedingt durch den technischen Fortschritt Emissionsminderungen zu erwarten sind.

„weiche“ Umwelteffekte erneuerbarer Energien

Bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gibt es allerdings auch Umweltauswirkungen, die sich nicht in Zahlen messen lassen. Mit der Nutzung erneuerbarer Energien greift man zum Teil in lokale und regionale Ökosysteme ein. Ein Vergleich dieser „weichen“ Faktoren der erneuerbaren Energien bezüglich der Ökologie ist nicht direkt möglich, da die einzelnen Energien sich ganz unterschiedlich auf die Umwelt auswirken. Die Umwelteffekte der einzelnen Technologien werden im Folgenden dargestellt.

Windkraft

Windenergieanlagen führen allein schon wegen ihrer Größe zu einer Veränderung des Landschaftsbildes. Je nach Gestaltung der Landschaft können Windräder landschaftliche Merkmale in ihrer „hohen Eigenart und Schönheit“ stören (AG DLR/IFEU/WI 2004). Somit stellt sich die Frage nach der gesellschaftlichen Akzeptanz der Windräder. Nach einer FORSA Studie 2004 zu urteilen, ist zwar die Mehrheit der Deutschen Bevölkerung (66 %) für einen weiteren Ausbau der Windenergie. Aber gerade in Gegenden wo eine starke Abhängigkeit von Tourismus besteht, werden Windräder eventuell als störend empfunden. Dies gilt im besonderen Maße für Küstenregionen. Gerade diese Standorte sind für die Windenergie interessant, weil günstige Bedingungen für die Windkraftanlagen gegeben sind. Windkraftanlagen werden in Deutschland nach wie vor als wenig störend empfunden. Windkraftkonverter gelten als umweltfreundliche und nachhaltige Methode der Energieerzeugung und besitzen aus diesem Grund ein gutes Image. (Kaltschmitt et al. 2003).

Für die Tierwelt ergeben sich andere mögliche Umweltauswirkungen. In einer vom Naturschutzbund Deutschland (Hötker et al. 2004) durchgeführten Studie wurden die Auswirkungen der Windenergienutzung auf Vögel und Fledermäuse untersucht. Gerade Watvögel werden negativ beeinflusst und im Brutverhalten gestört. Noch gravierender sind die Auswirkungen auf Rastvögel. Hier zeigen sich einige Vogelarten, besonders Gänse, Pfeifenten und Kiebitze als außerordentlich empfindlich. In dieser Studie kam man auch zu dem Erkenntnis, dass von Vogelschlag alle Vogelarten betroffen sind (Iken 2005). Nach bisherigen Erkenntnissen scheint aber keine der Vögel- oder Feldermausarten in Deutschland durch Windschlag in ihren Bestand gefährdet zu sein. Im Offshore-Bereich sind zusätzlich weitere potentielle Aspekte bezüglich der Umwelt in Diskussion (Kaltschmitt et al. 2003). Durch Schallabstrahlung der Windenergieanlagen ins Wasser kann es zu einer möglichen Lärmbelästigung für Tiere kommen, mit Auswirkungen auf Lebensgemeinschaften des Meeresbodens und auf die Fischfauna. Dazu gibt es aber zu Zeit noch zu wenig gesicherte Erkenntnisse. Es besteht also weiter Forschungsbedarf. Weiterhin könnte die Errichtung von Offshore- Windkraftanlagen auch zu einem vermehrten Kollisionsrisiko mit Schiffen beitragen mit den sich daraus ergebenden Umweltauswirkungen.

Solarenergie

Bei den ökologischen Auswirkungen der Fotovoltaikanlagen muss zwischen gebäudeintegrierten Systemen und großen Freiflächenanlagen „auf der Grünen Wiese“ unterschieden werden (AG DLR/IFEU/WI 2004). Bei den erst genannten ist der Betrieb aus der Sicht des Naturschutzes eher unproblematisch. Photovoltaikmodule sind dem Absorptions- und Reflektionsverhalten der Dächer relativ ähnlich (Kaltschmitt et al. 2003). Beeinflusst wird aber das bisherige Erscheinungsbild der Städte und Dörfer. Auch mit der zunehmenden Inbetriebnahme von Solarparks, bei einer Ausdehnung von mehreren Hektar, kann die Beeinflussung des Landschaftsbildes zukünftig eine Rolle spielen. Ähnlich wie bei der Windenergie kann sich eine Akzeptanzdiskussion in der Gesellschaft einstellen. Bei Fotovoltaikanlagen, die auf der freien Fläche installiert werden, wird die benötigte Fläche anderen Nutzungen ganz oder teilweise entzogen. Es stehen aber auch Brachen aus Militärischer Vornutzung, Industrie oder kontaminierte Flächen zur Verfügung (NABU 2004), die dann aus landschaftspflegerischer Sicht aufgewertet werden. Zu einer direkten Flächenversiegelung kommt es nur zu einem kleinen Teil, etwa drei Prozent der Nettofläche durch die Gestelltechnik. Brutto wird nur in etwa ein Drittel der Fläche mit Solarmodulen versehen, da große Abstände zwischen den Modulen eingehalten werden müssen, bedingt der auftretenden Schattenwirkung. Der überwiegend verbleibende Rest kann begrünt und landwirtschaftlich genutzt werden (Kaltschmitt et al. 2003). Aufgrund der überdeckten Flächen und dem stark abweichenden Absorptions- und Reflexionsverhalten der Module, im Vergleich zum Boden, können sich aber Auswirkungen auf das Mikroklima ergeben. Eine Relevanz ergibt sich nur bei einer sehr intensiven Nutzung der Fotovoltaik. Gerade von diesem Aspekt kann die Flora und Fauna profitieren (NABU 2004). Durch die Schattenwirkung der Module entstehen nach kurzer Zeit Kleinklimate, die die Artenvielfalt fördern. Diese Art der Biotopentstehung kann eine Verbesserung der ökologischen Bedingungen nach sich ziehen (Kaltschmitt et al. 2003). Noch nicht geklärt sind die Auswirkungen solcher Einrichtungen auf Vögel (Hötker et al. 2004). Gerade hier besteht also weiterer Forschungsbedarf.

Wasserkraft

Die Wasserkraft wird bereits seit langem als Energieträger benutzt. Die von einer Wasserkraftanlage ausgehenden Umweltauswirkungen auf Fließgewässer sind von lokalen Gegebenheiten und der eingesetzten Technologie abhängig. Gerade Wehranlagen wirken sich negativ auf das Gewässer aus. Durch das Aufstauen des Gewässers reduziert sich die Fließgeschwindigkeit, so verändert sich die Temperatur und der Sauerstoffgehalt, aber auch die Sedimentbeschaffenheit des Bodens bzw. des Gewässerbetts. Das beeinflusst Lebensräume und Lebensgemeinschaften. Wehre verhindern die Durchgängigkeit des Gewässers und behindern die Wanderung von Fischen und Kleinstlebewesen. Ein Anstauen schafft atypische Lebensverhältnisse im natürlichen Biotopverbund „Fluss“ (NABU Info 2004). Eine andere Form sind Ausleitungskraftwerke, wo das Wasser aus dem ursprünglichen Mutterbett ausgeleitet wird. Dabei kommt es zu einer

Verminderung des Abflusses im Mutterbett (Kaltschmitt et al. 2003). Eine sogenannte Mindestwasserführung regelt, dass eine bestimmte Restwassermenge nicht unterschritten werden darf. Die natürlichen jahres- und tagesperiodischen Abflussschwankungen verlieren aber ihre Bedeutung, auch Niedrigwasserperioden können sich verlängern. Damit können solche Anlagen erhebliche Auswirkungen auf Lebewesen und Lebensgemeinschaften des Gewässers haben, indem es z.B. zu einer Abnahme der Pflanzen- und Tierwelt kommt.

Geothermie

Die Nutzung der Geothermie stellt einen Eingriff in das natürliche Gleichgewicht der oberen Erdkruste dar (AG DLR/IFEU/WI 2004). Die Folgen möglicher Einwirkungen z.B. einem hydraulischen Kurzschluss zwischen den Schichten im Untergrund sind nach heutigem Wissensstand als gering einzuschätzen. Möglicherweise wird es durch die Abkühlung des Untergrunds zu Veränderungen der Chemie im Reservoir kommen und mikroseismische Erscheinungen nach sich ziehen. Hier ist aber weiterer Forschungsbedarf nötig. Der Landverbrauch solcher Anlagen ist gering, kann aber zu einer visuellen Beeinträchtigung des Landschaftsbildes führen (Kaltschmitt et al. 2003). Aufgrund der großen Tiefe und der im Allgemeinen fehlenden Verbindung zur Biosphäre, sind aus gegenwärtiger Sicht keine negativen Auswirkungen auf Mensch und die natürliche Umwelt zu erwarten.

Biomasse

Bioenergieträger können aus einer Vielzahl von biogenen Ressourcen bereitgestellt werden, vor allem aus der Land- und Forstwirtschaft, aber auch aus der Landschaftspflege, industriellen Prozessen oder Haushalten. Grundsätzlich schließen sich Naturschutz und Biomassebereitstellung nur auf sehr wenigen Flächen aus (AG DLR/IFEU/WI 2004). Durch den Anbau von Biomasse kommt es zu einer Flächeninanspruchnahme in der Land- und Forstwirtschaft. Bei Bioenergieträgern aus der Landwirtschaft können sich Umweltwirkungen insbesondere durch Nährstoffeintrag in Grund- und Oberflächengewässer oder durch Erosion ergeben. Es könnte auch bei Großflächenanbau eine Gefährdung durch Pestizide bestehen und ein Rückgang der Artenvielfalt bzw. Biodiversität nach sich ziehen.

Zusammenfassung

Unter Betrachtung der derzeitigen Stromgestehungskosten sind die Wasserkraft, die Windkraft und Teile der biogenen Energieträger zu heutigen Zeitpunkt die kostengünstigen Varianten Strom aus erneuerbaren Energien bereitzustellen. Es zeigt sich, dass bei den meisten Technologien unter Beibehaltung hoher Wachstumsraten die Möglichkeit besteht das die Stromgestehungskosten bis zum

Jahr 2020 auf ein Niveau zwischen 30 und 60% und nach 2040 auf bis unter 20 bis 50% der heutigen Kosten sinken können (AG DLR/IFEU/WI 2004).

Das gesamte Potential der erneuerbaren Energien reicht selbst im ungünstigsten Fall aus um 60% der Stromerzeugung, bezogen auf das Jahr 2003, in Deutschland decken zu können. Im günstigsten Fall wäre genug Potential vorhanden, um die Stromerzeugung der Zukunft, wenn sie der des Jahres 2003 entspricht, vollständig mit erneuerbaren Energien zu betreiben.

Trotz technologischen Fortschritts in der Herstellung wird die Fotovoltaik auch in Zukunft noch den höchsten Primärenergieverbrauch und die meisten Treibhausgasemissionen verursachen. Die Wasser- und Windenergie haben gegenwärtig und zukünftig den geringsten Primärenergiebedarf und auch die geringsten umweltschädigenden Emissionen aller erneuerbaren Energien.

Literatur

- AG DLR/IFEU/WI (2004) *Umweltpolitik - Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energie in Deutschland*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: 46 S.
- Bundesministerium für Verbraucherschutz Ernährung und Landwirtschaft (2004) *Konzept zur energetischen Nutzung von Biomasse*. 22 S.
- FORSA- Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH (2004) *Studie-Meinungen zu erneuerbaren Energien* http://www.inek.de/aktuell/forsa_ee_050429.pdf
- HÖTKER, H. et al. (2004) *Auswirkungen regenerativer Energiegewinnung auf die biologische Vielfalt am Beispiel der Vögel und der Fledermäuse*. Michael-Otto-Institut im NABU - <http://bergenhusen.nabu.de/bericht/VoegelRegEnergien.pdf>
- IKEN, J. (2005) *Artikel – Erhebliche Wissenslücken*. Sonne, Wind und Wärme 4/2005 S. 90-92
- KALTSCHMITT, M. et al. (2003) *Erneuerbare Energien- Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 692 S.
- LOCHMAIER, L. (2004) *Themen regenerative Energien*. Energiespektrum 11/2004, S.52-53
- NABU- Naturschutzbund Deutschland e.V. (2004) *Tagungsband- Naturschutz contra erneuerbare Energien?* - <http://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/1.pdf>
- NILL, M. (2004) *Dissertation zum Thema - Die zukünftige Entwicklung von Stromerzeugungstechniken*, TU Hamburg- Harburg, 161S.
- NITSCH, J. et al. (2004) *Erneuerbare Energien- Innovation für die Zukunft*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 128 S.
- STAIB, F. et al. (2004) *Erneuerbare Energie in Zahlen- nationale und internationale Entwicklung*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: 43 S.
- <http://www.nabu.de/ratgeber/wasserkraft.pdf> (Informationen vom Naturschutzbund Deutschland e.V. zur Wasserkraft) Datum: 30.05. 05