

Perspektiven regenerativer Energien am Beispiel Deutschlands

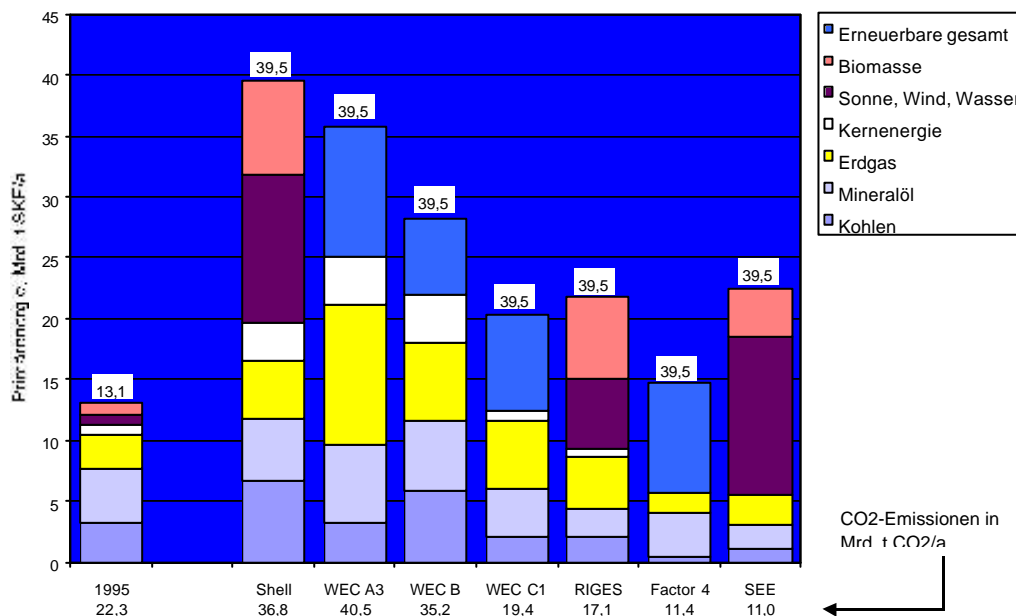
Joachim Nitsch, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Stuttgart

In diesem Beitrag werden die technischen Potenziale der Strom- und Wärmeerzeugung aus regenerativen Energien und deren Kostenstruktur betrachtet. Die Perspektiven eines stetigen Ausbaus der regenerativen Energien und deren Einordnung in die Energieversorgung Deutschlands werden mittels eines „Orientierungsszenarios“ skizziert. Die Ergebnisse zeigen, dass regenerative Energien im Jahr 2050 zu 45 % zum (bis dorthin um 35 % reduzierten) Endenergieverbrauch beitragen können. Die technischen Potenziale der Einzeltechnologien erlauben nach 2050 einen weiteren Ausbau bis zu einer prinzipiell 100 %-igen Deckung des Energiebedarfs durch regenerative Energieträger.

Zukünftige Bedeutung regenerativer Energien

Aus einer Gegenüberstellung aktueller globaler Energieszenarien (Abb. 1) ist ersichtlich, dass zukünftig weiterhin von einem Mehrbedarf an Energie infolge der Notwendigkeit einer Angleichung des weltweiten Pro-Kopf-Verbrauchs an Energie auszugehen ist. Alle Szenarien nehmen auch einen beträchtlichen Zuwachs an regenerativen Energien (REG) an; in Szenarien mit „business as usual“-Charakter (Shell, WEC A3 und B) steigen darüber hinaus jedoch sowohl der Bedarf an fossilen Ressourcen (und damit die Treibhausgasemissionen) und an Kernenergie. Lediglich Szenarien, die *gleichzeitig* eine weitaus effizientere Energienutzung (und damit einen absoluten Rückgang des Energieverbrauchs in den Industrieländern) unterstellen (WEC C1, RIGES, Factor 4, SEE), bieten die Chance zur substantiellen Verringerung des Verbrauchs endlicher Energieressourcen und von Treibhausgasemissionen.

Abb. 1: Aktuelle Szenarien des Weltenenergieverbrauchs für das Jahr 2050*



* Bevölkerung 2050: 9,5 Mrd.; Shell = Szenario „Nachhaltige Entwicklung“ (Shell 1995); WEC = Diverse Szenarien der Weltenergiekonferenzen 1995 und 1998 (WEC 1995, 1998); RIGES = „Renewable Intensive Global Energy Scenario“ (Johansson 1993); Factor 4 = Szenario aus (Lovins, Hennicke 1999); SEE = Szenario „Solar Energy Economy“ (Nitsch 1999); 1 Mrd. t SKE/a = 29,3 EJ/a

Ein deutlich verstärkter Ausbau regenerativer Energien stellt ein zentrales Element einer Nachhaltigkeitsstrategie dar; regenerative Energien werden daher zu Recht als eine der Schlüsseltechnologien dieses Jahrhunderts bezeichnet. Die Aussagen der Szenarien unterscheiden sich lediglich in der Dynamik und Intensität des Ausbaus. Für die zukünftige Entwicklung der REG liegen folgerichtig in der EU und speziell in Deutschland für 2010 konkrete Zielsetzungen in Form des „Verdopplungsziels“ vor. Ebenfalls diskutierte langfristige Zielsetzungen bis zum Jahr 2050 mit potenziellen Beiträgen der regenerativen Energien von dann rund 50 % am Energiebedarf Deutschlands sind anspruchsvoll, können aber zum Erreichen der bis dahin angestrebten 80 %-igen Treibhausgasemissionen Wesentliches beitragen; aus Potenzialsicht sind sie erreichbar.

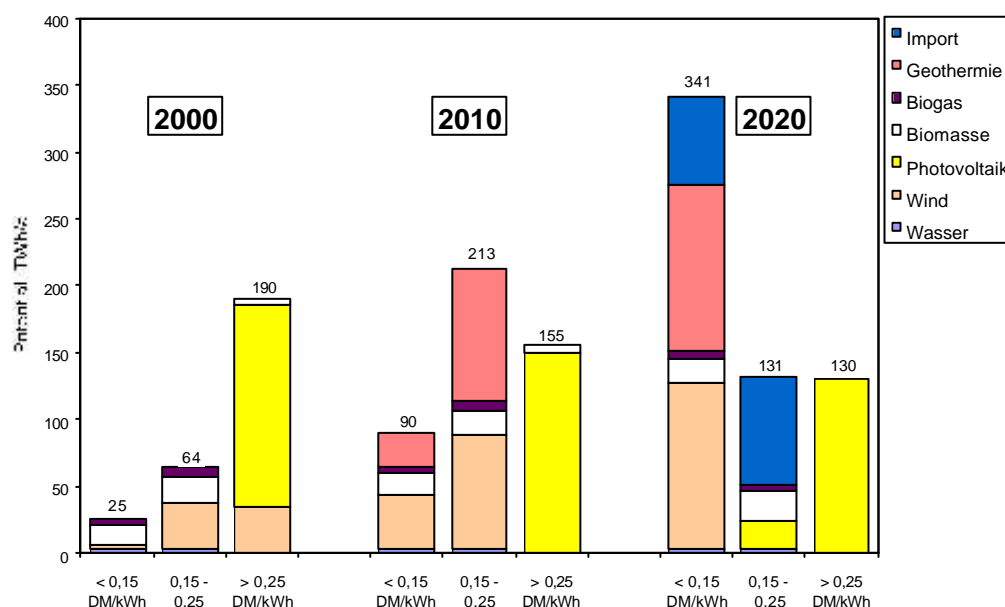
Technische Potenziale der Stromerzeugung und deren Kostenstruktur

Die gegenwärtigen Kosten von REG-Techniken überstreichen eine beträchtliche Bandbreite. Ohne Berücksichtigung der Photovoltaik, deren heutige Stromkosten in Deutschland zwischen 115 und 180 Pf/kWh liegen, bewegen sich die derzeitigen Stromge-

stehungskosten zwischen 4 und 35 Pf/kWh; sie variieren also um etwa eine Größenordnung. Die beträchtlichen technisch verfügbaren Potenziale der regenerativen Energien zur Stromerzeugung lassen sich nach Kostenklassen zusammenfassen. Ohne Stromimport beläuft sich die technische Potenzialuntergrenze für Deutschland bereits auf rund 450 TWh/a. Je nach der Nutzungsintensität von Offshore-Wind-Potenzialen, der Nutzung weiterer Dachflächen für die Photovoltaik und der Erschließung der Potenziale des Stromimports kann der heutige Stromverbrauch Deutschlands praktisch vollständig mit regenerativen Energien gedeckt werden. Außer der Wasserkraft und der Biomasse besitzen alle Technologien noch teilweise beträchtliche Kostenreduktionsmöglichkeiten, die u. a. auch von ihren Marktvolumina abhängen. Diese Rückkopplung ist von wesentlicher Bedeutung für Art und Ausgestaltung von Förderinstrumenten, die eine längerfristig wirksame Mobilisierung der REG zum Ziele haben. Die Analyse im Rahmen des HGF-Verbundprojektes „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland“ (Nitsch 2001) führt zu der in Abbildung 2 dargestellten Kostenstruktur der Potenziale.

Derzeit existiert ein kostengünstiges Potenzial mit Stromkosten bis zu 0,15 DM/kWh in

Abb. 2: Kostenstruktur der in den Jahren 2000, 2010 und 2020 verfügbaren Potenziale von regenerativen Energien zur Stromerzeugung



Höhe von rund 25 TWh/a. Zwischen 0,15 und 0,25 DM/kWh liegen rund 65 TWh/a. Weitere 190 TWh/a kosten mehr als 0,25 DM/kWh, davon allein 150 TWh/a der Photovoltaik. Das kostengünstige Potenzial allein reicht derzeit nicht aus, um die angestrebte Verdopplung des Beitrags bis 2010 zu erreichen. Dazu muss auf die nächste Potenzialklasse zurückgegriffen werden. Stromerzeugung aus Geothermie steht derzeit noch nicht zur Verfügung; Stromimport wird erst im Potenzial 2020 berücksichtigt.

Wird die Marktentwicklung aller Technologien ausreichend stimuliert, so kann das kostengünstige Potenzialsegment mit Kosten zwischen 0,10 und 0,15 DM/kWh infolge Kostendegressionen und Marktzutritt neuer Technologien (Offshore-Wind; Geothermie) bis 2010 auf rund 90 TWh/a anwachsen. Aus demselben Grund wächst das Gesamtpotenzial auf rund 450 TWh/a. Längerfristig (> 2020) kann durch weitere Mobilisierung aller Technologien das kostengünstige Potenzialsegment (Kosten < 0,15 Pf/kWh) auf rund 350 TWh/a steigen, das Gesamtpotenzial 600 TWh/a überschreiten.

Technische Potenziale der Wärmeerzeugung und deren Kostenstruktur

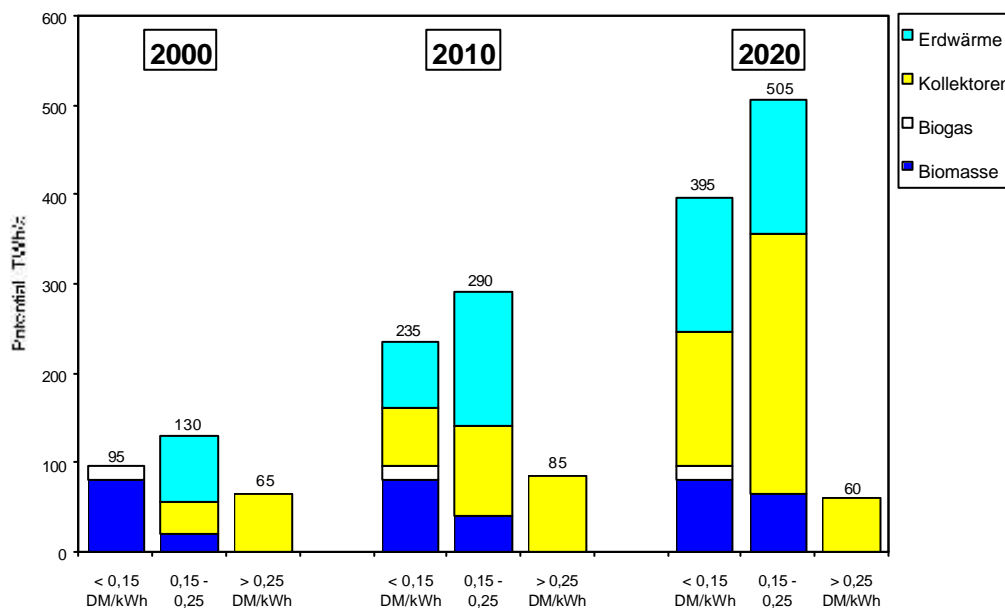
In entsprechender Weise lässt sich auch das Potenzial zur Wärmebereitstellung strukturie-

ren (Abb. 3). Insgesamt ergibt sich ein Nutzungspotenzial von 960 PJ/a (Endenergie), was rund 65 % der derzeit zur Wärmeerzeugung eingesetzten Brennstoffmenge entspricht. Etwa zwei Drittel stehen jedoch derzeit aus strukturellen und technischen Gründen noch nicht zur Verfügung (solare Nahwärme mit hohem Solaranteil, Erdwärme aus tiefen Schichten, Biomasse aus Energieplantagen). Das preisgünstige Potenzial unter 15 Pf/kWh_{th} in Höhe von derzeit knapp 100 PJ/a besteht ausschließlich aus Biomassereststoffen. Kostendegressionen erhöhen dieses Potenzial bis zum Zeitpunkt 2010 auf rund 235 PJ/a. Ist im Jahr 2020 das technische Potenzial vollständig erschließbar, so kann knapp die Hälfte davon (395 PJ/a) in diese Kostenkategorie eingestuft werden.

Der Ausbau regenerativer Energien in längerfristiger Perspektive – das „Orientierungsszenario“

Um die Wirkungen eines Ausbaus von regenerativen Energien auf das Energiesystem unter ökonomischen, ökologischen und sozialen Gesichtspunkten abschätzen zu können, bedarf es einer Vorstellung darüber, in welchem Ausmaß regenerativer Energien in den nächsten Jahrzehnten zur Energieversorgung Deutschlands beitragen können. Als „Einstieg“ für den Zeit-

Abb. 3: Kostenstruktur der in den Jahren 2000, 2010 und 2020 verfügbaren Potenziale regenerativer Energien zur Wärmeerzeugung



raum bis 2010 dient dazu eine Zubauentwicklung, die sich am Verdopplungsziel der Bundesregierung (und der EU) orientiert. Dieser Ausbau geht von einer „ausgewogenen“ Mobilisierung *aller Technologien* aus, so dass diese spätestens nach 2010 in die Lage versetzt werden, eigenständig wachsende Märkte herauszubilden. Die Erreichung dieses Zwischenziels ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass regenerative Energien überhaupt in den nächsten Jahrzehnten eine wichtige Rolle am Energiemarkt bestreiten können (BMU 2000). Für den Zeitraum nach 2010 wird davon ausgegangen, dass sich die angestoßene Ausbaudynamik im Rahmen der liberalisierten Märkte mit entsprechend angepassten Instrumenten weiter aufrechterhalten lässt. Auf der Basis dieser günstigen Rahmenbedingung wird ein „Orientierungsszenario“ des Ausbaus regenerativer Energien dargestellt, welches einen Ausbaupfad bis zum Jahr 2050 beschreibt. Er stellt etwa die obere Leitplanke des zukünftig möglichen Beitrags von REG an der Energiebedarfsdeckung dar (HGF 2001). Der Zeithorizont 2050 ist erforderlich, um dem langfristigen Charakter des Aufbauprozesses von REG gerecht zu werden und den Übergang von energiepolitisch gestützten Märkten, z. B. mittels Erneuerbarem Energie Gesetz (EEG) oder europäisch harmonisierten Quotenregelungen mit Zertifikaten zu eigenständigen Märkten darstellen zu können (Timpe, Bergmann, Nitsch 2001).

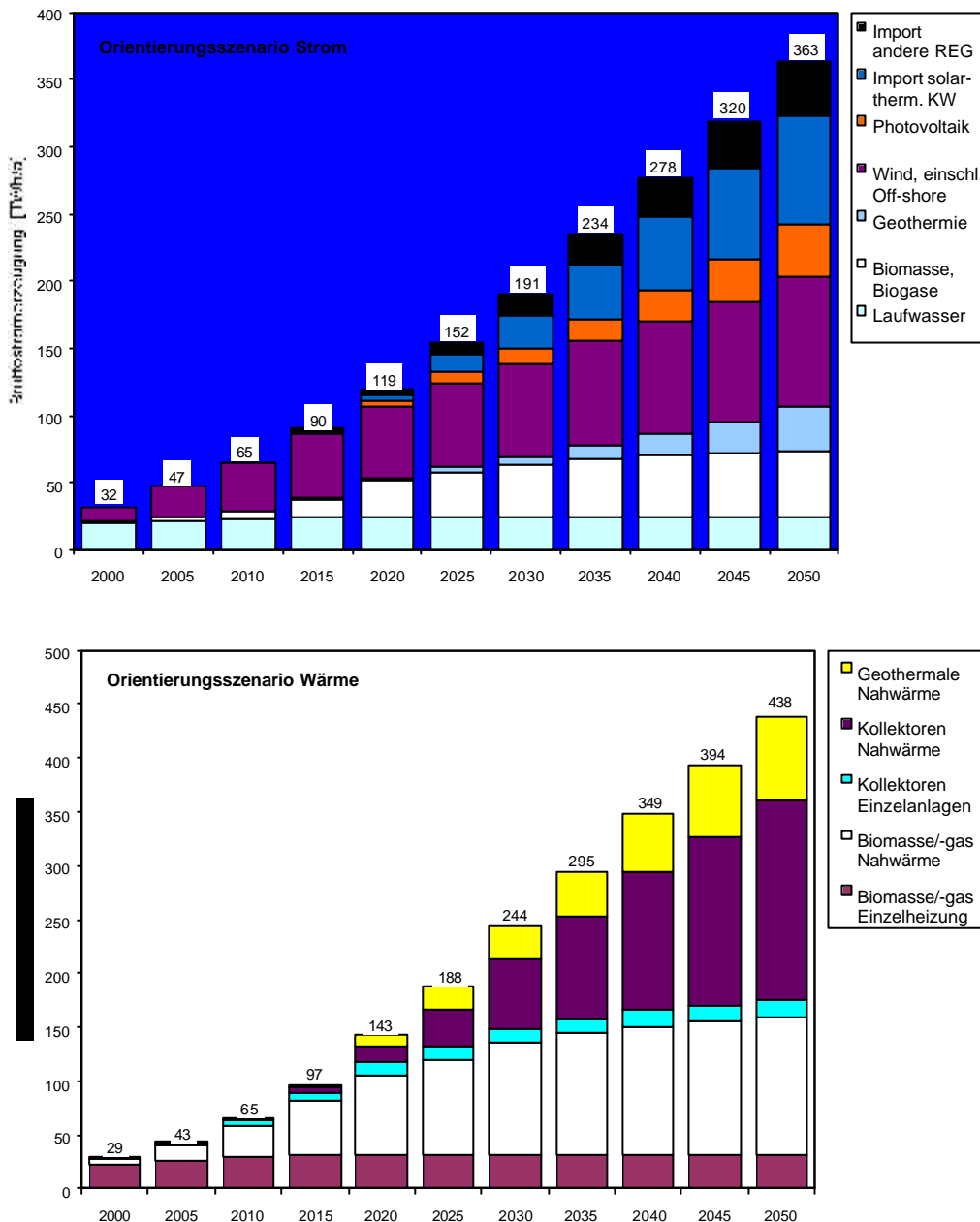
Die Beiträge der einzelnen Technologien im Orientierungsszenario zeigen bis zum Jahr 2020 im Strombereich (Abb. 4, oben) die Dominanz der Windenergie, die um 2005 die Wasserkraft überholt. Alle anderen Technologien etablieren sich ab ca. 2010 ebenfalls in beträchtlichem Umfang am Markt mit bis zum

zehnfachen Marktvolumen gegenüber heute. So erweitern vor allem Biomasse und Biogas ihren Beitrag bis 2020 deutlich und übertreffen dann ebenfalls die Wasserkraft. Der Import von Strom aus regenerativen Energien ist ab etwa 2015 Bestandteil dieses Orientierungsszenarios. Ihr Anteil erreicht, bezogen auf den gegenwärtigen Nettostromverbrauch von 510 TWh/a, im Jahr 2010 rund 13 % und im Jahr 2020 rund 23 % (1999: 5,7 %).

Im Wärmebereich (Abb. 4, unten) sind sowohl Ausgangssituation und Mobilisierungsbedingungen schwieriger. Ein dem EEG vergleichbares Förderinstrument gibt es hier nicht, der jetzige Beitrag ist mit rund 2 % am Brennstoffbedarf noch gering. Große Anteile von regenerativen Energien im Wärmebereich erfordern u. a. den Einsatz größerer Anlagen mit Nahwärmenetzen, für die heute noch keine adäquaten Förderinstrumente existieren. Die Wahrscheinlichkeit, die Ausbauziele 2010 und 2020 zu erreichen, ist hier deutlich unsicherer als bei der Stromversorgung. Bis 2020 dominiert die Nutzung der Biomasse, wobei wachsende Anteile von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) zum Einsatz kommen. Im Jahr 2020 decken REG rund 10 % des Nutzwärmebedarfs (Bezugswert 1999).

Die eigentliche Dynamik eines Ausbaus regenerativer Energien wird erst nach 2020 deutlich, da dann infolge einer deutlichen Verringerung der Kostenschere von einer weitgehenden Wirtschaftlichkeit der meisten REG-Technologien ausgegangen werden kann und damit energiepolitische Instrumente und Fördermittel größtenteils nicht mehr benötigt werden. Die Analyse bis 2050 führt – getrennt nach Strom- und Wärmebereitstellung – zu folgenden Ergebnissen:

Abb. 4: Orientierungsszenario für den möglichen Ausbau von regenerativen Energien in der Stromerzeugung (oben) und der Wärmeerzeugung (unten) bis 2050 unter günstigen energiepolitischen Rahmenbedingungen



Im *Strombereich* sind um 2020 die Potenzialgrenzen bei Wasserkraft mit 25 TWh/a zu 100 % ausgeschöpft: Auch das Wachstum von KWK-Anlagen auf der Basis von Biomasse verlangsamt sich nach starkem Wachstum zwischen 2010 und 2020 bereits wieder. Wind wächst weiterhin, wobei der Ersatzbedarf für heutige Anlagen an Bedeutung gewinnt. Die

übrigen Technologien, also Photovoltaik, Strom aus Erdwärme und Stromimport, beginnen mit ihrem energiewirtschaftlich relevanten Wachstum erst nach 2020. Um 2040 kann unter den genannten Rahmenbedingungen mit dem Überschreiten der 50 %-Marke an der Stromerzeugung und bis zur Jahrhundertmitte mit dem Erreichen der 65 %-Marke gerechnet werden.

Die in REG-Anlagen insgesamt installierte Leistung beträgt zu diesem Zeitpunkt 120 GW (Wasser 5; Wind 40; Biomasse 10, Photovoltaik 40; Geothermie 5, Importleistung 20 GW). Damit ist auch die Biomasse völlig erschlossen, während die anderen inländischen Potenziale erst zu etwa 30 bis 35 % ausgeschöpft sind. Importpotenziale stehen noch in sehr großem Umfang zur Verfügung (TAB 2000). Potenziell sind also auch nach 2050 noch große Spielräume für eine weitergehende Deckung des Strombedarfs durch regenerative Energien vorhanden.

Im *Wärmemarkt* stützt sich der Zuwachs nach 2020 weitgehend auf Nahwärmeanlagen, wobei sowohl bei Kollektor- wie auch Erdwärmeanlagen lang anhaltende mittlere Zuwachsraten um 10 %/a bei jährlichen Umsätzen um 20 Mio. m²/a bzw. 1.000 MW_{th}/a (Erdwärme) vorausgesetzt werden. Bis 2040 sind, in Verbindung mit der Stromerzeugung in KWK-Anlagen, die Potenziale der Biomasse vollständig ausgeschöpft. Solarkollektoren und Erdwärme verfügen zwar noch über weitere Nutzungspotenziale, jedoch sind bedarfsseitig (Höhe des Niedertemperaturbedarfs) um 2050 die Nutzungsmöglichkeiten weitgehend ausgeschöpft. Ein weiteres Vordringen der regenerativen Energien in der Energieversorgung erfordert spätestens dann die Bereitstellung eines speicherbaren Energieträgers, wozu sich insbesondere Wasserstoff anbietet.

Einordnung des REG-Ausbaus in die gesamte Energieversorgung

Mit der Ausweitung des Beitrags von REG in der Energieversorgung sind erhebliche Umstrukturierungen der heutigen Erzeugungs- und Nutzungsstrukturen für Energie verbunden. Da gleichzeitig neben die (Teil-)Strategie des REG-Ausbaus eine gleichwertige (Teil-)Strategie zur deutlich rationelleren Energienutzung treten muss, ist zu prüfen, wie diese Teilstrategien in kompatibler Form zusammenwirken können. Für die unterstellte Gesamtentwicklung der Energieversorgung wurden dazu die maßgebenden Eckwerte bis 2020 (Prognos 2000, vgl. auch Politik 1999) entnommen und näherungsweise bis 2050 fortgeschrieben (Langniß u. a. 1997, FEES 2001). Die derzeit wirksamen energiepolitischen Rahmenbedin-

gungen und Zielsetzungen wurden berücksichtigt. Der obige REG-Ausbau wurde dementsprechend mit einer Strategie der intensivierten Effizienzsteigerung (REN-Strategie) bei der Energiewandlung (Kraft-Wärme-Kopplung – KWK) und Energienutzung (insbesondere Raumheizung; Verkehr) verknüpft.

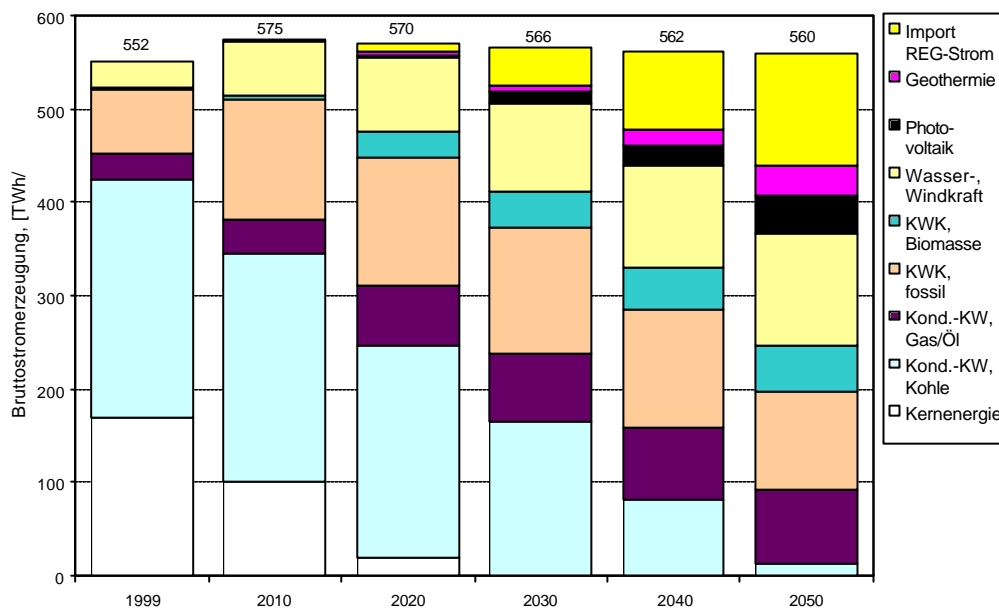
Diese REN-Strategie ist durch einen Verringerung der Primärenergieintensität bis 2020 um durchschnittlich - 3,2 %/a gekennzeichnet (Referenz nach Prognos 2000: - 2 %/a) und zwischen 2020 und 2050 um durchschnittlich - 2,2 %/a. Im Jahr 2050 beträgt demnach die Primärenergieintensität noch 27 % des Wertes von 1999. Der entsprechende Wert für die Endenergie liegt bei 32 %, der für Elektrizität bei 50 %. In Verbindung mit dem angenommenen Wachstum des Bruttoinlandsprodukt um 48 % bis 2020 und um 105 % bis 2050 resultiert daraus zu diesem Zeitpunkt ein Endenergieverbrauch von 6.100 PJ/a und ein Stromverbrauch von 1.775 PJ/a. Der gesamte Endenergieverbrauch geht also bis 2050 auf zwei Drittel des heutigen Wertes zurück. Regenerative Energien tragen dann mit 45 % zur Endenergiebereitstellung bei. Der Anteil von regenerativen Energien am Primärenergieeinsatz beträgt 2050 knapp 43 %; die CO₂-Emissionen aus der energetischen Nutzung sinken bis 2010 auf 75 % des Bezugswerts 1990, auf 51 % im Jahr 2030 und auf 23 % im Jahr 2050.

Der Zeitraum von 50 Jahren erlaubt prinzipiell eine weitgehende Umgestaltung der Energieversorgung, wenn der Umbau zielgerichtet und stetig erfolgt. In der Stromerzeugung ergeben sich daraus die in Abbildung 5 dargestellten Strukturveränderungen im Stromsektor. Der Rückgang der Kernenergie verläuft entsprechend des „Energiekonsenses“ mit einer Regellaufzeit von 32 Kalenderjahren. Im nahezu konstant bleibenden Strommarkt verlagert sich die Investitionstätigkeit zu Gas-GuD-Kondensationskraftwerken, KWK-Anlagen (einschließlich Brennstoffzellen) und REG-Anlagen. Bis 2020 bleibt der Steinkohleeinsatz bei einer Verlagerung hin zum KWK-Bereich nahezu konstant, der Braunkohleeinsatz verringert sich um rund 15 %, dagegen steigt der Gaseinsatz auf das Dreifache, wovon jedoch der größte Teil in KWK-Anlagen eingesetzt wird. REG-Anlagen haben zu diesem Zeitpunkt einen Anteil von 21 % an der Stromerzeugung. Nach

2020 beschleunigt sich der Strukturwandel hin zu regenerativen Energien. Im Jahr 2050 besteht die fossile Stromversorgung im wesentlichen aus Gas-GuD-Anlagen, die sich dem Stromangebot der regenerativen Energien anpassen und aus KWK-Anlagen auf Gas- und Steinkohlebasis.

die Verringerung des Raumwärmebedarfs um nahezu 50 % den größten Anteil hat. Gleichzeitig verändert sich, ähnlich wie bei der Stromversorgung, auch hier die Versorgungsstruktur in diesem Zeitraum sehr weitgehend. Derzeit stammen 88 % der gesamten Wärme aus Einzelheizungen und nur 12 % aus Fern-

Abb. 5: Bruttostromerzeugung nach Kraftwerksarten im Orientierungsszenario bis 2050, getrennt nach Kondensationskraftwerken, KWK- und REG-Anlagen.



Die CO₂-Emissionen der Stromversorgung sinken von 293 Mio. t/a im Jahr 1999 auf 276 Mio. t/a bis 2020 nur leicht. Der Abbau der Kernenergie führt nicht zu Mehremissionen, die gewünschten nationalen Reduktionsziele können in diesem Zeitraum allerdings nur von den übrigen Verbrauchssektoren erbracht werden. Nach 2020 sinken die Emissionen dagegen deutlich und belaufen sich im Jahr 2050 noch auf 70 Mio. t/a, also auf nur noch 25 % des heutigen Wertes. Die CO₂-Intensität der gesamten Stromerzeugung liegt dann bei 0,125 kg/kWh_{el}. Der in der Abbildung 5 gezeigte Strukturwandel der Stromversorgung ist mit der Altersstruktur der bestehenden Kraftwerke kompatibel.

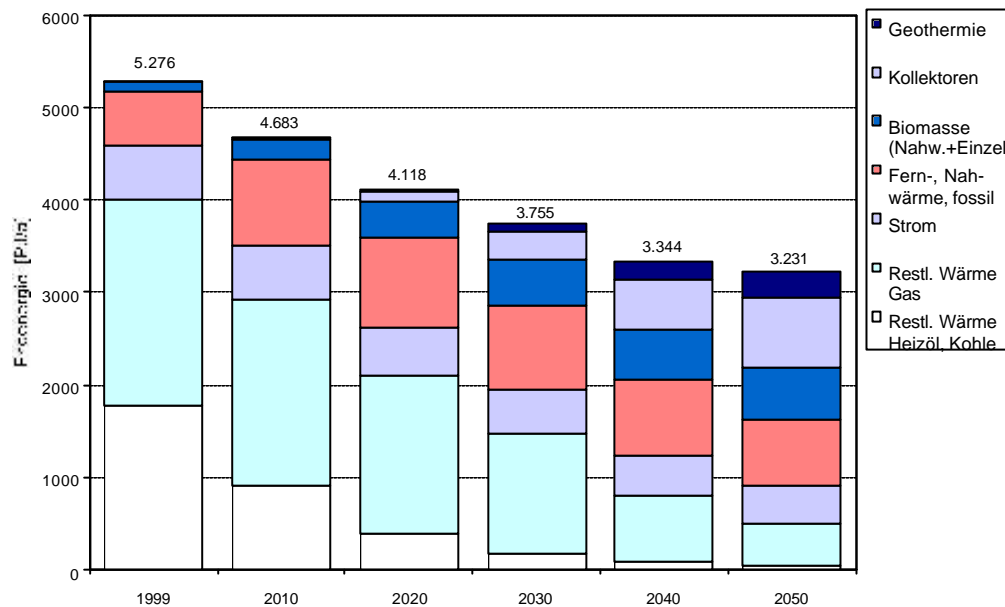
Im Wärmebereich (Abb. 6) wird der Einfluss einer forcierten REN-Strategie noch deutlicher. Der Endenergieeinsatz für Wärme sinkt bis 2050 auf 60 % des heutigen Wertes, woran

und Nahwärmeversorgungen. Im Jahr 2050 ist die direkte Versorgung mit Gas, Heizöl, Biomasse und Strom auf 32 % geschrumpft, aus Fern- und Nahwärmeversorgungen (fossil, Biomasse und Erdwärme) kommen 45 % und aus Kollektoranlagen 23 %. Die Umsetzung dieser Veränderungen erfordert eine beschleunigte Altbausanierung und gleichzeitig ein Vordringen von Nahwärmenetzen und -inseln in Altbaubestände. Der weitere Ausbau der KWK verstärkt die Wechselwirkungen zwischen Strom- und Wärmeversorgung. Er kann die für eine breitere Nutzung von regenerativen Energien notwendigen Strukturen vorbereiten, da der KWK-Ausbau bis 2020 im Wesentlichen abgeschlossen sein wird. Im Gegensatz zur Stromerzeugung sinken die CO₂-Emissionen der Wärmebereitstellung bereits bis 2020 deutlich von derzeit rund 350 Mio. t/a auf 215 Mio. t/a, also um 40 %, und kompen-

sieren so den geringen Rückgang in der Stromerzeugung. Bis 2050 ist die Wärmeerzeugung mit CO₂-Emissionen von 50 Mio. t/a nur noch in sehr geringem Ausmaß an den Treibhausgasemissionen beteiligt.

chen Struktur des Szenarios liegt dagegen ein Zielkatalog zugrunde, der den angestrebten Zustand der wesentlichen energierelevanten Nachhaltigkeitsindikatoren bis zum Jahr 2050 enthält. Der Ausbau der REG-Technologien im

Abb. 6: Strukturveränderungen im Wärmemarkt im „Orientierungsszenario“ bis 2050 nach Einzelsystemen und Fern- und Nahwärmeversorgungen



Zusammenfassung und Fazit

Der lange Betrachtungszeitraum des „Orientierungsszenarios“ erlaubt es, den gesamten Prozess einer Einführung regenerativer Energien – der aus energiewirtschaftlicher Sicht gerade erst beginnt – mit hinreichender Genauigkeit beschreiben zu können. Es können dabei mehrere Phasen unterschieden werden:

- bis 2010: Energiepolitisch gestützter „Einstieg“ (vgl. UBA 2000)
- 2010 – 2020: „Stabilisierung“ des Wachstums
- 2020 – 2030: Vollwertige „Etablierung“
- nach 2030: Beginnende „Dominanz“ in der Energieversorgung

Die bedarfsbestimmenden Eckdaten für die gesamte Energieversorgung bis 2050 (Bevölkerung, BIP-Wachstum, Anzahl Haushalte, Gebäude und Wohn- bzw. Nutzflächen, Fahrzeuge und Fahrleistungen u. a.) sind Trendentwicklungen entnommen. Der energiewirtschaftli-

Rahmen des hier beschriebenen Orientierungsszenarios hat zusammenfassend folgende Wirkungen auf Umwelt, Volkswirtschaft und Gesellschaft:

- Mit rund 2.800 PJ/a tragen regenerative Energien im Jahr 2050 zu 45 % zum (bis dorthin um 35 % reduzierten) *Endenergieverbrauch* bei. Die technischen Potenziale der Einzeltechnologien erlauben nach 2050 einen weiteren Ausbau bis zu einer prinzipiell 100 %-igen Deckung des Energiebedarfs durch regenerative Energien.
- Zur Reduktion der *CO₂-Emissionen* im Orientierungsszenario zwischen 1999 und 2050 um insgesamt 610 Mio. t/a tragen regenerative Energien mit rund 220 Mio. t/a bei; insgesamt 300 Mio. t/a tragen die verstärkte rationelle Energienutzung (d. h. über die Trendentwicklung hinaus) einschließlich des Ausbaus der Kraft-Wärme-Kopplung bei. Im Jahr 2020 betragen die *CO₂-Emissionen* 650 Mio. t/a (= 66 % von

1990), bis 2010 werden die ursprünglichen Kyoto-Reduktionsziele (Reduktion um 21 % bis 2008 – 2012) mit – 25 % erreicht.

- Das zur Erfüllung der Zielvorgaben erforderliche *Wachstum der REG-Technologien* kann von einer modernen Industriegesellschaft leicht bewältigt werden. Für einen effektiven Einstieg in die Energiewirtschaft ist jedoch eine gute Abstimmung des Wachstums der Einzeltechnologien untereinander erforderlich.
- Die mit dem Ausbau von regenerativen Energien verknüpften *ökologischen Belastungen* entstehen im wesentlichen *durch die Anlagenherstellung*. Für den REG-Anlagenmarkt im Jahr 2050 werden 5 % der (heutigen) Stahlproduktion, 6 % der NE-Metallproduktion und 0,4 % der Steine/Erden-Produktion benötigt. Die im Mittel höhere Materialintensität von REG-Anlagen, verglichen mit fossil betriebenen Kraftwerken oder Heizungen, ist kein gravierendes Hindernis für deren Ausbau. Weitere negative ökologische Auswirkungen eines Ausbaus regenerativer Energien können bei sorgfältiger Planung, angepasster Auslegung und bei möglichst rationeller Energienutzung verglichen mit alternativen Optionen weitgehend vermieden werden.
- Der Ausbau der REG-Technologien entwickelt sich bei den angenommenen Ausbauraten zu einem beachtlichen *Wirtschaftsfaktor*. Die Anlageninvestitionen im Jahr 2050 von rund 50 Mrd. DM/a entsprechen etwa dem Wert der Mineralölimporte des Jahres 2000. Schätzungsweise 250.000 Bruttoarbeitsplätze werden durch sie hervorgerufen. REG zeigen insgesamt eine *positive Arbeitsplatzbilanz*.
- Die Substitution fossiler Energien durch regenerative Energien (sowie durch rationelleren Energieeinsatz) erhöht die *Versorgungssicherheit* bei der Energieversorgung. Die Importquote sinkt von derzeit 60 % auf 35 % im Jahr 2050. Parallel dazu erfolgt eine zunehmende *Abkopplung von zu erwartenden Preisanstiegen* bei fossilen Energierohstoffen.
- Die im Orientierungsszenario beschriebene Entwicklung kann nicht isoliert in Deutschland ablaufen. Abgesehen von

Vorreitereffekten, die aus Wettbewerbs-sicht für einen gewissen Zeitraum Vorteile erbringen können, muss eine vergleichbare Entwicklung EU-weit und letztlich global stattfinden. REG-Technologien ermöglichen in besonderem Maße arbeitsteilige *Kooperationen zwischen Industrie- und Entwicklungsländern*, woraus sich erhebliche Chancen für eine beiderseitige „win-win“-Situation ableiten lassen.

- Auf der Basis heutiger und in absehbarer Zeit bestehender Energiepreise sind REG-Technologien in größerem Ausmaß *noch nicht wirtschaftlich*. Sie benötigen daher „geschützte“ Märkte, um sich hinsichtlich Marktgröße, Kostendegression und Technologiereife in dem im Orientierungsszenario unterstellten Ausmaß entwickeln zu können.
- Die Unterstützung der regenerativen Energien muss ausreichend lange bestehen, aus heutiger Sicht – abgestuft nach Technologien – bis etwa zum Jahr 2020. Dies verlangt eine außerordentlich *zielstrebige und langfristig angelegte Energiepolitik*. Die durch diese Vorleistungen hervorgerufenen spezifischen Mehrbelastungen sind mit maximal 1 Pf/kWh allerdings relativ gering. Je nach Preisanstieg fossiler Energien kann die im Orientierungsszenario bereitgestellte Energie ab 2030/2040 kostengünstiger werden, als diejenige ohne Ausbau der regenerativen Energien.
- Das für einen selbsttragenden REG-Ausbau erforderliche *Strom- bzw. Wärmekostenniveau liegt bei etwa dem Zweifachen der heutigen Werte* (Strom und Wärme aus Neuanlagen). Rationellere Energienutzung reduziert die absoluten Mehrkosten bis 2050 auf real 30 % bei einem gegenüber heute zweifach höheren Pro-Kopf-Einkommen.

Als *Fazit* kann festgehalten werden, dass eine deutliche Erhöhung des Anteils von regenerativen Energien an der zukünftigen Energieversorgung die derzeitigen *Nachhaltigkeitsdefizite der Energieversorgung deutlich mindern* kann ohne größere neuartige, nicht bewältigbare Probleme aufzuwerfen. Die Entlastungseffekte treten allerdings anfänglich nur langsam in Erscheinung und erfordern ausreichend hohe und lang andauernde Vorleistungen. Die Wirkung kann in Ver-

bindung mit einer ebenfalls anspruchsvollen *Strategie der rationelleren Energienutzung* erheblich beschleunigt werden. Letztere ist sogar Voraussetzung, damit sich die anfänglich erforderlichen Aufwendungen in REG-Technologien in Grenzen halten und aus ihrem Einsatz ein ausreichend hoher Nutzen in hinreichend kurzer Zeit resultiert. In Vorbereitung auf eine effektive Marktteilnahme von regenerativen Energien müssen so lange Unterstützungsmaßnahmen ergriffen werden, bis die Energiepreise aktiv (d. h. mittels gezielter Energie- oder Emissionssteuern; Umwelt- oder Emissionszertifikate) oder passiv (Ressourcenverknappung und deren Folgen) ein deutlich höheres Niveau (im Mittel zweifach) als derzeit erreichen.

Literatur

Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalyse (FEES), 2001: Modelleexperiment II. Executive summary (Rev.01) und Rahmendaten. Download www.ier.uni-stuttgart.de

Hennicke, P.; Lovins, A., 1999: Voller Energie – Die globale Faktor Vier-Strategie für Klimaschutz und Atomausstieg. Frankfurt, New York: Campus

Johansson, T. B.; Kelly, H. et al., 1993: Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity. Washington, D. C.: Island Press

Kraft, A.; Markewitz, P.; Ziegelmann, A., 2000: Auswirkungen eines verstärkten Einsatzes regenerativer Energien und rationeller Energienutzung. Studie für die ARGE Solar NRW (STE, FZ Jülich). In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 50, Heft 10, S. 766-769.

Langniß, J.; Nitsch, J.; Luther, E.; Wiemken, O., 1997: Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung – Ein solares Langfristszenario für Deutschland. Studie von DLR Stuttgart und Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (FhG-ISE) Freiburg, Stuttgart, Freiburg, Oktober

Nitsch, J., 1999: „Entwicklungsperspektiven erneuerbarer Energien und ihre Bedeutung für die Energieversorgung von Entwicklungsländern.“ In: *Tätigungsband zur Tagung: „Märkte der Zukunft – Erneuerbare Energien für Entwicklungsländer.* Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Friedrichshafen, 27.1.1999

Nitsch, J.; Fishedick, M.; Allnoch, N.; Staiß, F. u. a., 2000: Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Umweltbundesamtes. Berichte des UBA 2/00, Berlin: Erich Schmidt Verlag

Nitsch, J.; Rösch, C. u. a., 2001: Schlüsseltechnologie Regenerative Energien. Teilbericht im Rahmen des HGF-Verbundprojekts: „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland“. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Stuttgart, Forschungszentrum Karlsruhe, Juli

Nitsch, J.; Trieb, F., 2000: Potenziale und Perspektiven regenerativer Energieträger. Studie im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Stuttgart, März

Prognos AG, EWI, 2000: Energiereport III – Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag

Shell-AG Hamburg, 1995: „Energie im 21. Jahrhundert.“ Studie der Shell-AG Hamburg, Aktuelle Wirtschaftsanalysen 5, Heft 25

Stein, G.; Strobel, B. (Hrsg.), 1999: Politikszenerarien für den Klimaschutz II. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2020 (DIW Berlin, FZ Jülich, FhG-ISI, Öko-Institut). Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin. In: *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment*, Band 20, Jülich

Timpe, C.; Bergmann, H.; Nitsch, J. (Öko-Institut/DLR), 2001: „Umsetzungsaspekte eines Quotenmodells für Strom aus erneuerbaren Energien. Untersuchung im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr in Baden-Württemberg. Entwurf des Endberichts. Freiburg, Heidelberg, Stuttgart, Februar

World Energy Council (WEC), 1995: „Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond.“ Joint IIASA – World Energy Council Report, Luxemburg, London

World Energy Council (WEC), 1998: „Energie für Deutschland – Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext.“ Deutsches Nationales Komitee (DNK) des Weltenergieerates. Düsseldorf

Kontakt

Dr. Joachim Nitsch
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
 Institut für Technische Thermodynamik
 Abt. Systemanalyse und Technikbewertung (STB)
 Postfach 80 03 20, 70503 Stuttgart
 Tel.: +49 (0) 68 62 - 4 83
 Fax: +49 (0) 68 62 - 7 83
 E-Mail: joachim.nitsch@dlr.de
 URL: www.dlr.de/tt/system

«