

Regenerative Energien im Rahmen einer nachhaltigen Energieversorgung¹

Joachim Nitsch, DLR Stuttgart; Christine Rösch, FZ Karlsruhe

1. Leitlinien und Regeln für eine nachhaltige Energieversorgung

Die Ursprünge des Begriffes „Nachhaltigkeit“ liegen in der Energiekrise gegen Ende des 18. Jahrhunderts. Die Gesellschaft war damals auf den deutschen Wald als Rohstoff- und Energiequelle angewiesen. Um der Übernutzung des Waldes Einhalt zu gebieten und die Versorgungsbasis zu sichern, wurde in Deutschland eine auf langfristige Ressourcenerhaltung angelegte Forstwirtschaft zur rechtlichen und sozialen Norm.

Eine ausreichende Verfügbarkeit von Energie (und Rohstoffen) steht auch heute wieder im Zentrum gesellschaftspolitischer Entscheidungen. Energie ist eine fundamentale Voraussetzung für die soziale und wirtschaftliche Entwicklung einer Gesellschaft. Für Deutschland und andere Industriegesellschaften stellt sie den zentralen Lebensnerv für Produktion und Konsum dar. Vor dem Hintergrund einer Steigerung des Weltenergieverbrauchs seit 1950 auf mehr als das Vierfache (in Deutschland auf rund das Dreifache) und bei Zugrundelegung derzeitiger globaler Verbrauchsniveaus werden die fossilen Energieträger zwar unterschiedlich rasch, spätestens jedoch in wenigen Generationen erschöpft sein. Besonders problematisch ist dabei, dass gerade diejenigen mit den kürzesten Reichweiten (also Gas und Erdöl) zur Zeit die größten Zuwachsraten aufweisen. Die heute als sicher einzustufenden Reserven reichen auch auf der Grundlage heutiger Fördermengen bei Öl nur noch etwas mehr als 40 Jahre und bei Erdgas noch rund 65 Jahre (Zittel et al. 2000).

Gleichzeitig ist die Ausbeutung nicht-erneuerbarer fossiler Ressourcen eng verknüpft mit der Beanspruchung der Aufnahmefähigkeit der Umwelt für Abfälle und Emissionen. Der überwiegende Teil anthropogener Emissionen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen sind auf Förderung, Umwandlung, Transport und Verbrennung fossiler Energieressourcen zurückzuführen, die, global gesehen, einen Anteil von rund 85 % am Primärenergieverbrauch haben. Mindestens ebenso gravierend wie eine Verknappung an Energie sind die möglichen Folgen eines Klimawandels infolge einer anhaltenden energiebedingten CO₂-Freisetzung. Außerdem ist die Nutzung von Energieressourcen mit gewissen Stör- und Unfallrisiken verbunden, die zu signifikanten Gefährdungen der Umwelt und der menschlichen Gesundheit führen können. Im Fall der Kernenergie kommen eine extrem langfristige Belastung nachfolgender Generationen mit Entsorgungserfordernissen bzw. -risiken und die Risiken des Missbrauchs bei weltweiter Verbreitung oder bei einem Übergang auf langlebige Systeme (Brütertechnologie) hinzu.

Zwischen energiebezogenen Aktivitäten mit ihren teilweise globalen ökologischen Auswirkungen und (globalen) Problemen wie Armut, Bevölkerungswachstum, unzulängliche Ernäh-

¹ Kurzfassung des Teilberichts: J. Nitsch, J. Kopfmüller, M. Nast, M. Pehnt, C. Rösch, F. Trieb: „Schlüsseltechnologie Regenerative Energien“, Stuttgart, Karlsruhe, Juli 2001; im Rahmen des HGF-Verbundprojekts: Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland. Arbeitsgemeinschaft FZK, DLR, FZJ, GMD im Auftrag des BMBF.

rung, mangelnde Sicherheit oder Defizite in Wirtschaft und Handel besteht häufig eine unmittelbare Verknüpfung [UNDP/SEI 1997]. Zwischen dem Pro-Kopf-Energieverbrauch der ärmsten Ländern (z. B. Äthiopien) und dem eines Amerikaners liegt der Faktor Hundert. Außerdem wird in den Entwicklungsländern im Durchschnitt deutlich weniger energieeffizient produziert als in den Industriestaaten. Dem Unterschied im Verbrauch entsprechen Unterschiede in der Versorgung mit Energie. Ein auch nur tendenzieller Ausgleich dieser Unterschiede im Energieeinsatz führt – auch bei deutlich verstärkten Anstrengungen zu einer rationelleren Energienutzung – bei einem Anstieg der Weltbevölkerung auf 9 bis 10 Mrd. Menschen bis 2050 zu einem weiteren Wachstum der globalen Energienachfrage. Damit kommt der Energieversorgung bzw. dem Zugang und dem angemessenen Umgang mit Energieressourcen eine zentrale Bedeutung für die Realisierung der Ziele einer nachhaltigen Entwicklung zu.

Wie angesichts dieser Diagnose eine nachhaltige Entwicklung im Energiebereich erreicht werden kann, ist heute nicht definitiv und abschließend beantwortbar. Im Zuge des erforderlichen gesellschaftlichen Diskussionsprozesses über das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung im allgemeinen und seine Übertragung auf die Energieversorgung ist es jedoch erforderlich, ein aus heutiger Sicht angemessenes Anforderungsprofil zu erarbeiten und Orientierungs- und Handlungswissen zur Gestaltung einer nachhaltigen Energieversorgung bereitzustellen.

Auf der inter- bzw. supranationalen Ebene sind von verschiedener Seite derartige Leitlinien formuliert worden (siehe insbesondere [UN-ECOSOC 2000] oder [UNDP/SEI 1997]). In Deutschland hat dies u. a. das „Forum für Zukunftsenergien“ getan [Eichelbrönnner/Henssen 1998]. Als Ausgangspunkt für dieses Anforderungsprofil ist, in Anlehnung an die Basisdefinition des Brundtland-Berichts, eine nachhaltige Energieversorgung in einer allgemeinen Form wie folgt definiert:

„Energie soll ausreichend und - nach menschlichen Maßstäben - langandauernd so bereitgestellt werden, dass möglichst alle Menschen jetzt und in Zukunft die Chance für ein menschenwürdiges Leben haben, und in die Wandlungsprozesse nicht rückführbare Stoffe sollen so deponiert werden, dass die Lebensgrundlagen der Menschen jetzt und zukünftig nicht zerstört werden“ [Eichelbrönnner/Henssen 1998].

Unter Berücksichtigung dieser Definition sowie in dem Versuch einer Übertragung des integrativen Ansatzes des HGF-Projekts auf den Energiebereich werden nachfolgend energiespezifische Leitlinien aufgeführt [Kopfmüller 2000]. Sie sollen als generelle Orientierung für die im Energiesektor handelnden Akteure bzw. für die Entwicklung (politischer) Handlungsstrategien dienen (die gewählte Reihenfolge impliziert dabei keine Gewichtung):

- **Ressourcenschonung:** Kommenden Generationen ist die Nutzungsoptionen für die verschiedenen Energieressourcen offen zu halten oder es müssen vergleichbare Optionen der Bereitstellung von Energiedienstleistungen geschaffen werden. Neben den Energieressourcen selbst muss dies auch für nichtenergetische Ressourcen gelten, die im Zusammenhang mit der Förderung, Umwandlung und Nutzung von Energie verbraucht werden.
- **Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit:** Die Regenerations- und Anpassungsfähigkeiten natürlichen Systeme (der „Umwelt“) dürfen durch energiebedingte Emissionen nicht überschritten werden. Gefahren für die menschliche Gesundheit, etwa durch Akkumulation problematischer Schadstoffe, sind zu vermeiden.

- **Risikoarmut und Fehlertoleranz:** Unvermeidbare Risiken bei der Energieerzeugung und -nutzung sind grundsätzlich zu minimieren sowie in ihrer räumlichen und zeitlichen Ausdehnung zu begrenzen. Hierbei sind auch fehlerhaftes Verhalten, unsachgemäße Handhabung oder mutwillige Zerstörung zu berücksichtigen.
- **Zugang und Verteilungsgerechtigkeit für alle:** Für alle Menschen sind vergleichbare Chancen des Zugangs zu Energieressourcen bzw. -dienstleistungen zu gewährleisten.
- **Umfassende Wirtschaftlichkeit:** Energiedienstleistungen sollen - in Relation zu anderen Kosten des Wirtschaftens und des Konsums – zu vertretbaren gesamtwirtschaftlichen Kosten bereitgestellt werden. Das Kriterium der „Vertretbarkeit“ bezieht sich dabei zum einen auf die reinen betriebswirtschaftlichen, im Zusammenhang mit der Energieerzeugung oder -nutzung entstehenden Kosten. Zum anderen schließt es auch die Inanspruchnahme anderer Produktionsfaktoren wie Arbeit und natürliche Ressourcen ein, also auch die externen ökologischen und sozialen Kosten, soweit diese ermittelt werden können.
- **Bedarfsgerechte Nutzungsmöglichkeit und dauerhafte Versorgungssicherheit:** Die zur Befriedigung von nachhaltigkeitskompatiblen Bedürfnissen erforderliche Energie muss dauerhaft, in ausreichender Menge und zeitlich und räumlich bedarfsgerecht zur Verfügung stehen. Hierzu ist u.a. eine ausreichende räumliche und energieträgerbezogene Diversifizierung der Energiequellen anzustreben, um auf unvorhersehbare Krisen reagieren zu können und um generell Handlungsspielräume für die Zukunft zu erhalten bzw. zu vergrößern. Ebenso sind leistungsfähige Versorgungsstrukturen zu schaffen und zu erhalten, die sich gleichzeitig gut in Siedlungsstrukturen einpassen lassen.
- **Soziale Verträglichkeit:** Bei der Gestaltung von Energieversorgungssystemen ist zu gewährleisten, dass allen Betroffenen die Teilhabe an den jeweiligen Entscheidungsprozessen möglich ist. Die Handlungs- und Gestaltungsspielräume von wirtschaftlichen Akteuren bzw. von Gemeinwesen dürfen durch diese Systeme nicht eingeengt werden, sondern sind möglichst zu erweitern.
- **Internationale Kooperation:** Die Gestaltung der Energiesysteme auf der internationalen Ebene soll Destabilisierungstendenzen und etwa durch den Mangel an Ressourcen bedingte Konfliktpotentiale vermeiden und die friedliche Kooperation der Staaten fördern. Generell sind bi- und multilaterale Kooperationen bei Gestaltung und Betrieb von Energiesystemen anzustreben.

2. Indikatoren für eine nachhaltige und zukunftsfähige Entwicklung der Energieversorgung

Geeignete Indikatoren sollen dazu beitragen, den Gestaltungsprozess in Richtung einer nachhaltigeren Energieversorgung so zu steuern, dass krisenartige Zustände und Zuspitzungen in ökologischen, ökonomischen und sozialen System weitestgehend vermieden werden und ein möglichst friktionsarmer Umstellung hin zu einer zukunftsfähigen Entwicklung der Energieversorgung möglich wird. Der Vielfalt der Funktionen entspricht Charakter und Qualität der Indikatoren. Unterschieden wird vielfach nach „Pressure-“, „State-“ und „Response-“Indikatoren (CSD- Struktur), also problemerzeugenden Indikatoren (z.B. Verbrauch nicht regenerativer Energierohstoffe), Zustandsindikatoren (z.B. Reichweite dieser Energierohstoffe) und Indikatoren, welche den Grad der Problemlösung bzw. Anteile daran aufzeigen (z.B. Anteil regenerativer Energien). Bei vielen der aufgeführten Indikatoren ist jedoch eine eindeutige Zuordnung nicht oder nur schwer möglich, so dass sie im folgenden auch

nicht explizit benutzt wird. Gelegentlich wird daher auch nur nach Messindikatoren („Pressure-“ und „State-Indikatoren-“) und Indikatoren mit Zielcharakter unterschieden [BMW 1999].

Für das Indikatorensystem „Energie“ werden nur solche Indikatoren ausgewählt, die einen klaren Bezug zu den Regeln und Zielen einer nachhaltigen Energieversorgung haben (*Kriterium der Regeladäquanz*) und bei denen eindeutig ist, in welche Richtung sie sich verändern sollten, um mehr Nachhaltigkeit zu erreichen (*Kriterium der Zielfähigkeit*). Des Weiteren sollten die Indikatoren die wesentlichen in der Gesellschaft diskutierten Problembereiche abdecken (*Kriterium der Problemadäquanz*). Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Auswahl von Indikatoren zur Beurteilung der Nachhaltigkeit der Energieversorgung ist die *Datenverfügbarkeit*. Das ausgewählte Indikatorensystem sollte sich auf vorhandene Daten bei den Statistischen Ämtern auf europäischer, nationaler und regionaler Ebene stützen. Die Daten sollten in einer Zeitreihe von mindestens 10 Jahren abgebildet werden, um Trends ablesen zu können. Die Erhebung neuer Daten stößt einerseits auf finanzielle Sachzwänge, zum anderen auf unvermeidliche zeitliche Lücken zwischen dem Entstehen eines Bedarfs an Statistik und der Verfügbarkeit entsprechender harmonisierter Datensätze. Grundsätzlich sollte die Datenbeschaffung mit einem vertretbaren Aufwand verbunden sein, ebenso die regelmäßige periodische Aktualisierung.

Neben quantifizierbaren Indikatoren sind verschiedene Indikatoren zunächst nur qualitativ formulierbar. Im ökonomischen und sozialen Bereich dominieren sie sogar. Gleichzeitig ist die eindeutige Zuordnung dort nicht immer möglich, vielmehr gibt es relativ große Schnittmengen (z.B. im Themenfeld „Beschäftigung“). Die vorgeschlagenen Indikatoren sollten vorwiegend objektiver Art sein, d.h. sich auf prinzipiell „messbare“ Daten beziehen, auch wenn die Daten nicht immer beschaffbar sind oder in ausreichender Qualität vorliegen. Wo es sinnvoll ist, können weiche (subjektive) Indikatoren verwendet werden, wie z.B. Akzeptanz und Einstellung der Bevölkerung gegenüber bestimmten Technologien.

Nachfolgend sind ausgewählte Indikatoren aufgeführt, die zur Beurteilung der Nachhaltigkeit der Energieversorgung relevant sind (**Tabelle 1**). Dem HGF-Ansatz folgend sind die Indikatoren den drei substantiellen Zielen nachhaltiger Entwicklung und deren Regeln zugeordnet. Die Indikatoren sind überwiegend eindimensional beschaffen, d. h. nicht aggregiert und nicht in Sinne der vor allem von der CSD angesprochenen „interlinkages“-Thematik ausgerichtet. Da die Indikatoren nationale Gültigkeit haben, stellen sie bereits Aggregationen über die räumliche Ebene dar. Auf eine weitere Aggregation der Indikatoren (z. B. zu einem Index) wird verzichtet. Statt dessen wird versucht, aussagekräftige Leitindikatoren für Entscheidungsträger in Politik und Gesellschaft (mittlere Spalte) auszuwählen, um die Zahl der Indikatoren auf ein akzeptables Maß zu beschränken.

Die vorgestellte Auswahl von Indikatoren ist vorläufig. Die praktische Anwendung dieser Indikatoren kann durchaus zur Streichung oder Neuformulierung von Indikatoren führen. Auch können in Zukunft andere Probleme als bisher in den Vordergrund treten (sei es aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse oder aufgrund sich verschiebenden öffentlichen Interesses) was ebenfalls eine Revision des Indikatorensystems zur Folge haben sollte.

Tabelle1: Indikatoren für die Entwicklung eines nachhaltigen Energiesystems

Regeln	Leitindikatoren	Weitere Indikatoren
Ziel: Sicherung der menschlichen Existenz		
Gewährleistung der Grundversorgung	<ul style="list-style-type: none"> • Pro-Kopf-Verbrauch Energie • Selbstversorgungsgrad • Importanteil am Primärenergieeinsatz • Diversifizierungsgrad der Importstruktur (Energieträger, Herkunft) • Anteil der Energiekosten an den Lebenshaltungskosten der Privaten Haushalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgewandte Mittel für den Import von Energieträgern • Kosten je Energieeinheit beim Nutzer je Endenergieträger bzw. Energietechnik/-system • Kosten je Energieart, welche vergleichbare Energiedienstleistungen erbringen kann (Strom, Nutzwärme, Kraftstoffe bzw. Fahrstrecke) • Kosten je Endenergieträger bzw. Energietechnik/-system • Zentralisierungs- bzw. Dezentralisierungsgrad der Energieversorgung (z.B. Anteil von Anlagen < 10 MW)
Schutz der menschlichen Gesundheit	<ul style="list-style-type: none"> • Aufkommen an toxischen Abfällen und Emissionen • Aufkommen an radioaktiv belasteten Abfällen und Emissionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil des Energiesektors am Gesamtaufkommen dieser Abfälle • Schadensausmaß möglicher Großunfälle (insbes. nuklearer Anlagen)
Selbständige Existenzsicherung	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl Erwerbstätige und Beschäftigte in der Energiewirtschaft • Anteile der Energiekosten an den Gesamtkosten der Industrie (nach Branchen), des Gewerbes und des Handwerks 	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil Voll-, Teilzeit- und saisonal bzw. prekär Beschäftigter • Erforderliche Beschäftigtenzahl zur Erbringung von Energiedienstleistungen
Ziel: Erhalt des gesellschaftlichen Produktivpotentials		
Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil regenerativer Energieträger am Verbrauch von Primärenergie, Strom, Brennstoffen, Kraftstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> • Biomasse: Nutzungsrate bezogen auf die Regenerationsrate • Anteil am nutzbaren (technischen) Potenzial von REG
Nachhaltige Nutzung nicht-erneuerbarer Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Verbrauch nicht erneuerbarer Energierohstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas, Uran) • Reichweite der Reserven und Ressourcen dieser Energieträger • Effizienz bei Förderung, Umwandlung, Bereitstellung und Nutzung von Energierohstoffen • Anteil Kraft-Wärme-Kopplung an Stromerzeugung und Wärmebedarfsdeckung • Materialintensität der Energieversorgungssysteme (z.B. Eisen, 	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil Deutschlands am globalen Verbrauch fossiler Energieträger • Anteil dieser Energieträger am Primärenergieverbrauch in und für D nach Sektoren und Nutzungsarten • Rohstoffproduktivität: (BIP zu Verbrauch nicht erneuerbarer Rohstoffe) • Anteil von Abfallrecycling und -wiederverwendung (Glas, Kunststoffe, Metalle) • Flächenversiegelung (z.B. Fundamente, Zufahrtsflächen, Abraumhal-

	Aluminium, Kupfer, Glas, Zement	den u.ä.) und Flächenmodifikation (z.B. Windparkfläche, Aufständigung von Sonnenkollektoren, Ackerfläche) für Energieerzeugung, - wandlung und -verteilung
Nachhaltige Nutzung der Umwelt als Senke	<ul style="list-style-type: none"> • Treibhausgasemissionen nach Kioto-Protokoll • Versauerungspotenzial (NO_x, SO₂, NH₃) in SO₂-Äquivalenten • Eutrophierungspotenzial (NO_x, NH₃) in PO₄₃-Äquivalenten • Aufkommen an nicht-toxischen Abfällen (differenziert nach Verwertung und Beseitigung) 	<ul style="list-style-type: none"> • VOC-Emissionen • Chemischer Sauerstoffbedarf • Anteil des Energiesektors an den gesamten nationalen Treibhausgasemissionen; CO₂-Emissionen und den anderen genannten Emissionen
Vermeidung unvertretbarer techn. Risiken	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl nuklearer Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl genehmigungspflichtiger Anlagen
Nachhaltige Entwicklung des Sach-, Human- und Wissenskapitals	<ul style="list-style-type: none"> • Brutto-/Nettoanlagevermögen/ und Anlageinvestitionen der Energiewirtschaft und Anteil für regenerative Energien • Relative Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der Energietechnik • Arbeitsproduktivität (BWS je Akh) • RCA-Werte (Export-Import-Relation) • RPA-Werte (relative Patenthäufigkeiten) • Anzahl/Größe der Unternehmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwendungen für FuE und die Markteinführung bzw. –stützung neuer Technologien • Verhältnis zw. Erhaltungs- und Neuananschaffungsinvestitionen • Zahl der in FuE tätigen Wissenschaftler und Ingenieure • Ausgaben für Aus- und Weiterbildung • Kapitalproduktivität • Ressourcenproduktivität • Totale Faktorproduktivität • Patentanmeldungen/–erteilungen
Ziel: Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten		
Partizipation an gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil Betriebe mit Betriebsräten • Anteil der Betriebe, in denen ein Teil des Gehalts als betriebsbezogene Aktien erworben werden können 	<ul style="list-style-type: none"> • Gewerkschaftlicher Organisationsgrad • Pluralität, bzw. Anzahl und Handlungsspielraum wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Akteure
Erhaltung der kulturellen Funktionen der Natur	<ul style="list-style-type: none"> • Verlust an Vielfalt in der Landnutzung und Zunahme von Monokulturen 	<ul style="list-style-type: none"> • Verlust, Zerstörung und Fragmentation geschützter Flächen • Gesetzliche Partizipationsmöglichkeiten von NGOs
Instrumentelle Wie-Regeln		
Internalisierung externer ökologischer und sozialer Folgekosten	<ul style="list-style-type: none"> • Treibhausgas- (bzw. CO₂-) Vermeidungskosten je Energieträger bzw. Energietechnik (-system); bzw. je Energieart 	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil (direkt oder indirekt energiebezogener) ökologischer Steuern am Gesamtsteueraufkommen
Internationale Wirtschaftsbeziehungen	<ul style="list-style-type: none"> • Liberalisierungsgrad des Energiehandels 	<ul style="list-style-type: none"> • Intensität des Außenhandels im Energiebereich; Konzentrationsgrad

	<ul style="list-style-type: none"> • Exportmärkte (Mittelvolumen) von Energietechniken 	<ul style="list-style-type: none"> • Verteilung ausländischer Direktinvestitionen • Umfang regionaler Strukturen und Anzahl grenzüberschreitender Fusionen
Resonanzfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Umfang der Entwicklungshilfe, die in energiebezogene Entwicklungsprojekte fließt • Anzahl nach ISO 14001 zertifizierter Unternehmen bzw. deren Anteil an allen Unternehmen/Branchen 	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl von CDM/JI – Projekten bzw. deren Emissionsreduktions-Umfang.
Reflexivität	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl an Energieberatungszentralen und deren Nutzungsintensität 	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl an Querschnittsreferaten auf verschiedenen Verwaltungsebenen
Steuerungsfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Grad bzw. Intensität des staatlichen Ordnungsrahmens • Erfüllungsgrad politisch gesetzter Ziele 	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil REG am Verbrauch von Primärenergie, Strom, Brennstoffen

3. Nachhaltigkeitsdefizite der derzeitigen Energieversorgung und abgeleiteter Zielkatalog

Aus den Regeln und Indikatoren lassen sich unmittelbar die wesentlichen Nachhaltigkeitsdefizite der derzeitigen Energieversorgung ableiten. Das Ausmaß dieser Nachhaltigkeitsdefizite und der Dringlichkeitsgrad ihrer Beseitigung oder Verringerung werden in der energiepolitischen Diskussion zwar immer noch sehr unterschiedlich bewertet, jedoch lassen sich auch Gemeinsamkeiten und Konsensbereiche feststellen.

1. Die *globale Klimaerwärmung* wird in der wissenschaftlichen Diskussion ganz überwiegend als ein mit der Nutzung fossiler Energieträger (hier vor allem Kohle) zusammenhängendes Problem mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit betrachtet. Die Teile der wissenschaftlichen Gemeinschaft, welche die bisher vorliegenden Indizien für das Klimaproblem für nicht schwerwiegend genug halten, sind zwar in der (vor allem außereuropäischen) Diskussion wissenschaftlicher und öffentlicher Natur klar vernehmbar, bleiben jedoch eine deutliche Minderheit. Diese beiden Positionen spiegeln sich auch im Bereich der internationalen Energiepolitik wider, worauf im wesentlichen der schleppende Fortgang der Rio-Folgekonferenzen und zuletzt das Scheitern der Den-Haag-Konferenz zurückzuführen ist.
2. Als zweiter Problemkreis rückt seit einiger Zeit wieder *die Verknappung und Verteuerung der Reserven von Erdöl und Erdgas* in den Blickwinkel von Politik und Öffentlichkeit. Die Reichweiten dieser beiden Energieträger werden zunehmend kritischer gesehen, woran auch die weiter stetig steigende Nachfrage nach ihnen ihren Anteil hat. Während allerdings für die absoluten (statischen) Reichweiten noch deutlich unterschiedliche Zeitpunkte genannt werden, wird der sog. „depletion mid-point“ beim Erdöl – also der Zeitpunkt bei dem das weltweite Fördermaximum erreicht wird - weitgehend übereinstimmend bereits in 15-20 Jahren erwartet. Über die damit einhergehenden Preissteigerungen besteht dagegen wieder ein uneinheitliches Bild, je nach dem wie weit der Einsatz fossiler Back-stop -Technologien und moderner Kohletechnologien (Ölschiefer,

Teersande; CO₂-Rückführung) als Optionen betrachtet werden und ob beim Erdgas noch von bedeutenden nicht explorierten Ressourcen ausgegangen wird. Im energiepolitischen Handeln stehen die Perspektiven einer baldigen Verknappung von Erdöl und Erdgas derzeit (noch) nicht im Mittelpunkt des Interesses; die unterschiedliche Gewichtung der Zielsetzungen „Klimaschutz“ und „Ressourcenschonung“ dürfte allerdings in Zukunft geringer werden.

3. Deutlich größere Differenzen existieren hinsichtlich der *nuklearen Gefährdung*. Hier wird zwar von nahezu keiner Seite die Möglichkeit nuklearer Unfälle ausgeschlossen, die Auseinandersetzungen betreffen hier vor allem die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Folgen von Katastrophenfällen sowie das Ausmaß und Zeitdauer der radioaktiven Belastungen jenseits großer Unfälle. Die energiepolitische Situation ist ebenfalls gespalten. Zahlreiche (europäische) Länder haben auf die Nutzung der Kernenergie verzichtet, weitere haben faktisch Moratorien und wieder andere bereiten die Stilllegung der vorhandenen Reaktoren vor. Andere (vor allem viele außereuropäische Industrie- und Schwellenländer und jüngst auch wieder die USA) setzen dagegen auf die weitere Nutzung der Kernenergie.
4. Das vierte Nachhaltigkeitsdefizit besteht in dem *sehr starken Gefälle des Energieverbrauchs zwischen Industrie- und Entwicklungsländern*, das sich in den letzten Jahren praktisch nicht verringert hat. Derzeit verbrauchen 21 % der Weltbevölkerung in den ersteren 70 % der konventionellen Energie (Elektrizität 75 %). Am untersten Ende der Skala stehen die LDC (gering entwickelte Länder) mit 33 % der Weltbevölkerung und 4 % des kommerziellen Energieverbrauchs [UN 1988]; rund 2 Mrd. Menschen haben keinen Zugang zu Elektrizität. Zwischen dem Pro-Kopf-Energieverbrauch der ärmsten Ländern (Äthiopien, Niger, Bangladesh u.a.) und dem eines Amerikaners liegt der Faktor Hundert. Ein auch nur tendenzieller Ausgleich dieser Unterschiede im Energieeinsatz führt – auch bei deutlich verstärkten Anstrengungen zu einer rationelleren Energienutzung – zusammen mit dem weiteren Wachstum der Weltbevölkerung auf 9 bis 10 Mrd. Menschen in 2050 zu einem weiteren Wachstum der globalen Energienachfrage. Diese Tendenz verschärft wiederum die Nachhaltigkeitsdefizite 1-3, wenn nicht gleichzeitig überproportional der Einsatz fossiler und nuklearer Energie reduziert wird.

Darüber hinaus ist die Verteilungsfrage auch hinsichtlich finanzieller oder ökologischer Folgelasten von großer Bedeutung. Im Fall der Klimaproblematik besteht eine potentielle Konfliktverschärfung darin, dass die voraussichtlich am stärksten von den Folgen möglicher Klimaänderungen betroffenen Regionen nach heutigen Erkenntnissen vorwiegend solche sein werden, die am wenigsten zu ihrer Verursachung beigetragen haben oder die diesen Folgen am wenigsten mit technischen und finanziellen Mitteln entgegenwirken können.

In längerfristig angelegten Entwicklungsszenarien der globalen Energieversorgung werden obige Nachhaltigkeitsdefizite bzw. die Notwendigkeit, sie zu verringern, durchaus berücksichtigt, wobei die Gewichtungen allerdings unterschiedlich sind (**Abb. 1**). Ersichtlich ist, dass alle Szenarien von einem Mehrbedarf an Energie infolge der Notwendigkeit einer Angleichung des weltweiten Pro-Kopf-Verbrauchs an Energie ausgehen (Verringerung des 4. Nachhaltigkeitsdefizits). Alle Szenarien nehmen auch einen beträchtlichen Zuwachs an REG an; Szenarien mit „business as usual“-Charakter (Shell, WEC A3 und B) verringern allerdings die Nachhaltigkeitsdefizite 1 bis 3 nicht sondern vergrößern sie sogar, da sowohl der Bedarf nach fossilen Ressourcen (und damit die Treibhausgasemissionen) und nach Kernenergie bis 2050 weiter steigt. 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 gleichzeitigen Verringerung aller vier genannten Nachhaltigkeitsdefizite. *Erst eine Kombination von Effizienz-, Konsistenz- und (in den Industrieländern) auch von Suffizienzstrategien, erlauben*

offensichtlich ein gleichzeitiges Angehen aller Nachhaltigkeitsdefizite der heutigen Energieversorgung.

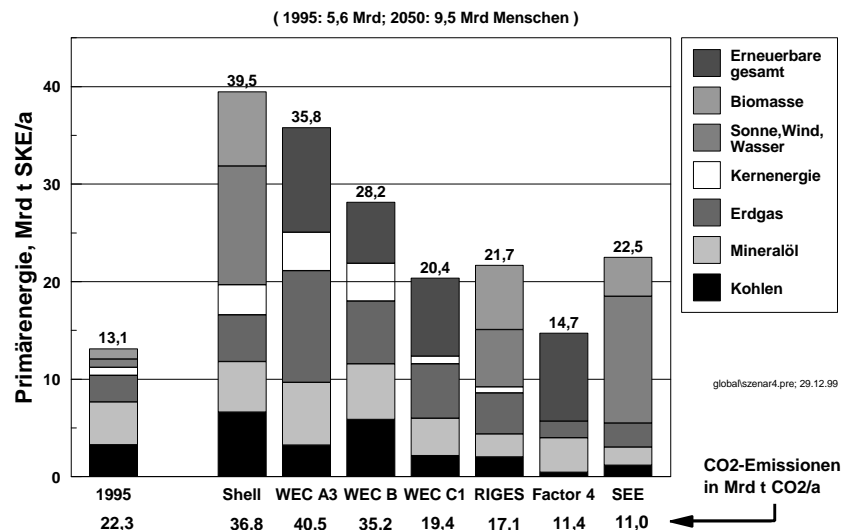


Abbildung 1: Aktuelle Szenarien des Weltenenergieverbrauchs für das Jahr 2050 im Vergleich zum derzeitigen Verbrauch (Bevölkerung 2050: 9,5 Mrd.; Shell = Szenario „Nachhaltige Entwicklung“ [Shell 1995]; WEC = Diverse Szenarien der Weltenergiekonferenzen 1995 und 1998 [WEC 1995, 1998]; RIGES = „Renewable 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

4. Ziele zur Erreichung einer nachhaltigen Energieversorgung

Eine Objektivierung des Problemkomplexes zwischen überwiegend anerkannter Klimagefährdung, den divergierenden Haltungen zu den Risikoaspekten der Kernenergie, den zu erwartenden Verknappungstendenzen im fossilen Bereich und den aus der extrem unausgewogenen Zugang zu Energie entstehenden volkswirtschaftlichen und sozialen Schäden erscheint aus heutiger Sicht nicht möglich. Versuche in dieser Richtung mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden wie der Monetarisierung externer Kosten müssen zum heutigen Zeitpunkt als weitgehend gescheitert angesehen werden. Über zentrale Annahmen solcher Verfahren konnte bisher kein Konsens erzielt werden und wird wohl auch in näherer Zukunft nicht zu erzielen sein. Beim Klimaproblem sind dabei weniger die Eintrittswahrscheinlichkeit sondern Art und Kosten der Folgen mit riesigen Unsicherheiten behaftet. Bei der nuklearen Gefährdung sind die Unsicherheiten hinsichtlich der Folgen und ihrer Kosten zwar durchaus geringer, angesichts der wissenschaftlichen Kontroversen zur Eintrittswahrscheinlichkeit ergibt sich jedoch ein ähnliches Unsicherheitspotential. Ungelöst bzw. umstritten bleiben insbesondere wichtige Bewertungsfragen, vor allem hinsichtlich der Kosten heutiger und künftiger Menschenleben, die obigen Nachhaltigkeitsdefiziten zum Opfer fallen oder nur unzureichend zur Entfaltung kommen. Auch die indirekt hervorgerufenen Gefährdungen, wie verstärkte Migrationen oder aus Energieknappheit resultierende kriegerische Konflikte, sind monetär nicht erfassbar. Demzufolge ist auch kein einheitliches politisches oder gesellschaftliches Handeln bezüglich der Weiterentwicklung der Energiewirtschaft in Richtung stärkerer Nachhaltigkeit auf globaler Ebene zu erwarten. National und im europäischen Umfeld kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die Gestaltungsimpulse in diese Richtung weiter verstärken werden. Dabei wird jedoch dem vierten Nachhaltigkeitsdefizit „Ungleichverteilung“ nur am Rande Beachtung geschenkt werden.

Zwar akzeptiert die Politik die von der Wissenschaft vorgeschlagenen Kriterien und Zielvorstellungen zur Verminderung der Nachhaltigkeitsdefizite der Energieversorgung im Grundsatz und hält ihre Umsetzung im Prinzip für erforderlich. Allerdings fallen die politischen Ziele teilweise deutlich weniger ambitioniert aus als die in von der Wissenschaft vorgeschlagenen Zielsysteme. Weiterhin konzentrieren sich die konkreten politischen Zielsetzungen relativ stark auf die ökologischen Aspekte einer zukunftsfähigen Energieentwicklung, während ökonomische und soziale Ziele nur in sehr allgemeiner Form angesprochen werden.

Hinsichtlich der potentiellen Lösungsoptionen zum existierenden Problempotential gibt es speziell in Deutschland keinen wesentlichen Dissens zu den *technischen Möglichkeiten*. Unterschiedliche Positionen ergeben sich hauptsächlich hinsichtlich der Kostenaspekte, vor allem vor dem Hintergrund der Verminderung von Klimarisiken bei gleichzeitigem Verzicht auf die Kernenergie. Im wesentlichen wird der Dissens durch drei Lösungsansätze geprägt: Eine erste Denkrichtung kommt zum Ergebnis, dass aus Kostengründen ein Verfolgen des Klimaschutzpfades ohne Ausbau der Kernenergienutzung nicht zu vertreten ist. Im Kontrast dazu steht eine zweite Diskussionsrichtung, die postuliert, dass Klimaschutz in der benötigten Konsequenz erst durch einen (schnellen) Ausstieg aus der Kernenergienutzung angestoßen werden kann. Die dritte - und die Diskussion derzeit prägende - Position erkennt im Verfolgen von Klimaszutzzielen und dem gleichzeitigen Abbau nuklearer Risiken durch einen Ausstieg aus der Kernenergienutzung durchaus Zielkonflikte, hält diese aber angesichts der vorhandenen Lösungsoptionen sowohl prinzipiell als auch hinsichtlich ihrer Kostenaspekte (ökonomische bzw. soziale Nachhaltigkeit) für lösbar, wenn diese Optionen frühzeitig und konsequent verfolgt werden.

Alle drei Argumentationslinien sehen allerdings in der verstärkten und effizienten Nutzung von REG ein zentrales Element einer Strategie zur Verringerung der wesentlichen Nachhaltigkeitsdefizite. Dies kommt auch in den oben gezeigten Szenarien (Abb. 1) zum Ausdruck. Die Aussagen unterscheiden sich lediglich in der Dynamik des Ausbaus und hinsichtlich der einzusetzenden Instrumente zur Durchsetzung dieser Dynamik. *REG können daher zu Recht als eine der Schlüsseltechnologien dieses Jahrhunderts bezeichnet werden.*

Ein operables Konzept für die Ableitung konkreter energiepolitischer Ziele vor dem Hintergrund der oben diskutierten Nachhaltigkeitsdefizite verlangt einen Abgleich zwischen den bereits in der Politik diskutierten oder vereinbarten Zielvorstellungen und den vielfältigen unter Experten für notwendig gehaltenen oder angestrebten Veränderung der wesentlichen Indikatoren. Ein systematischer Vergleich der Zielvorstellungen bzw. der anzustrebenden Zustände wurde u.a. in [BMW 1999] angestellt und daraus ein Zielkatalog für Deutschland abgeleitet der als Grundlagen für zu entwerfenden Energieszenarien dienen kann. Er kann, mit leichten Modifikationen, auch als Zielorientierung für die hier abzuleitenden Ausbauszenarien regenerativer Energien genutzt werden. Der so ermittelte Zielkatalog ist in **Tabelle 2** dargestellt.

Speziell für die Entwicklung der REG liegen für 2010 konkrete Zielsetzungen in Form des „Verdopplungsziels“ vor, das sich an den Vorschlägen der EU orientiert. Die langfristigen Zielsetzungen sind sehr anspruchsvoll, könnten aber zur Erreichen einer ökologischen Nachhaltigkeit wesentliches beitragen; aus Potenzielsicht sind sie erreichbar. Im fossilen Bereich stehen die Bemühungen eines Ausbaus der Kraft-Wärme-Kopplung im Vordergrund. Das in Übereinstimmung mit der EU auch dort formulierte Verdopplungsziel bis 2010 ist – vor allem vor dem Hintergrund der Liberalisierung der Energiemärkte und dem derzeitigen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen – sehr anspruchsvoll. Potenzielseitig sind die Ziele realistisch. Die derzeitigen deutschen Zielsetzungen im Bereich einer rationelleren Energienutzung entsprechen einer jährlichen Effizienzsteigerung (Erhöhung der Energieproduktivität) von etwa 3,5 %. Der tatsächliche Wert der letzten Jahre liegt bei etwa der Hälfte. Die Zielsetzungen ist anspruchsvoll, liegt aber im Bereich der wissenschaftlich diskutierten Zielvorstellungen. Sektorale bedarf es sehr unterschiedlicher Anstrengungen zur Zielerreichung.

Tabelle 2: Zielkatalog für eine zukunftsfähige Energieentwicklung in Deutschland

Bereich	Mindestanforderung			Ziel		
	2005	2008/2012		2005	2010/2020	2040/2050
Ökologie						
CO ₂ / weitere Treibhausgase	CO ₂ : - 25 % auf Basis 1990	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, PFC, HFC, SF ₆ : - 21 % auf Basis 1990		- 25 % auf Basis 1990 bzw. 1995	- 30 – 40 % auf Basis 1990 bzw. 1995	- 70 – 80 % auf Basis 1990 bzw. 1995
SO ₂	- 92 % in 2010 auf Basis 1990			k. A.	- 70 – 80 %	k. A.
NO _x	- 60 % in 2010 auf Basis 1990			- 60 - 70 %	- 70 – 90 %	- 90 – 100%
Regenerative Energien	2010	2030	2050	2010/2020	2040/2050	
	Verdopplung des Anteils an der Stromerzeugung auf 10 % und am Primärenergieverbrauch auf 4 %	25 % des Primärenergieverbrauchs	50 % des Primärenergieverbrauchs	10 bis 20% des Primärenergieverbrauchs	40 bis 65 % des Primärenergieverbrauchs	
Fossile Brennstoffe	2010			2005/2010	2040/2050	
	18 % KWK-Anteil an Bruttostromerzeugung; vgl. auch CO ₂ -Minderungsziele (EU-Ziel)			20 – 25 % Anteil	35 – 40 % Anteil	
Rationelle Energiewandlung	Jährliche Energieeffizienzsteigerung um 3,5 % bis 2020					
Materialverbrauch	Erhöhung der Rohstoffproduktivität auf das Zweieinhalbfache bis 2020			2010/2020	2040/2050	
				- 20 – 30 %	- 80 – 90 %	
Ökonomie/Soziales System						
Internationale übergeordnete Ziele	Sicherung internationaler Zusammenarbeit durch fairen Welthandel von Gütern und Rohstoffen, Sicherstellung eines angemessenen Finanz-, Technologie- und Innovationstransfers zwischen Industrie- und Entwicklungsländern und gezielte friedenssichernde Maßnahmen					
Nationale Wirtschaftsstruktur	Mögl. große Branchen- und Unternehmensvielfalt, hohe Innovationsfähigkeit und Krisenfestigkeit					
Versorgungssicherheit	Ist zu gewährleisten durch Diversifikation der Energiequellen und –träger, durch entsprechenden Netzbetrieb sowie durch Energieeffizienzsteigerungen (bei Energieerzeugung und –nutzung)					
Infrastruktur für Energie	Aufbau, Erhalt und Optimierung der zur Energieversorgung und zur Energieeffizienzsteigerung notwendigen Infrastruktur (Strom- u. Gasnetz inkl. Regelung für Betrieb, Energieeffizienzagentur)					
Produktions- und Konsumgewohnheiten	Unterstützung nachhaltiger Konsum- und Produktionsweisen, sowie öko-effizienter Dienstleistungen (nicht nur Energiedienstleistungen, sondern z. B. auch Car-Sharing etc.)					
Gesundheit	Reduzierung der energiebedingten Gesundheitsrisiken: Verringerung der Emissionen, Vorsorge gegen Strahlenbelastungen, Vermeidung von Schwermetallemissionen und Lärm					
Beschäftigung	Keine Arbeitsplatzverluste auf gesamtwirtschaftlicher Ebene, ggf. erforderliche strukturelle Veränderungen (Verschiebungen zwischen Sektoren u. Veränderung der Qualifikationsstruktur) müssen sozial- und wirtschaftsverträglich gestaltet werden			(nachhaltige) Vollbeschäftigung		
Soziale Verträglichkeit	Energiekosten müssen in einem angemessenen Verhältnis zu Kosten anderer Gütern und Dienstleistungen stehen; insbesondere muss Energie auch für sozial schwache Haushalte bezahlbar bleiben (z.B. auch durch die Möglichkeit ggf. mit öffentlicher Unterstützung in Energieeffizienzmaßnahmen zu investieren). An der Ausgestaltung des Energiesystems müssen Akteure unterschiedlicher Interessengruppen in ausreichender Zahl beteiligt sein					
Wirtschaftlichkeit	Betriebswirtschaftliche Wirtschaftlichkeit der Investitionen/Maßnahmen muss gegeben sein, regenerative Energien und Techniken zur Energieeffizienzsteigerung ggf. zeitlich begrenzt fördern (als Markteinführungsstrategie); Internalisierung externer Effekte					

k. A.: Keine ausreichenden Angaben verfügbar. Quellen: Prognos und Wuppertal-Institut; nach [BMWi 2000], eigene Ergänzungen

Während im Industrie- und Kleinverbrauchsbereich die Entwicklung in Richtung der Zielwerte verläuft, sind im Verkehrssektor und im Gebäudebereich die Maßnahmen deutlich zu verschärfen, wenn die Ziele rechtzeitig erreicht werden sollen

5. Eckdaten der Technologien zur Nutzung regenerativer Energie

5.1 Stromgestehungskosten und Kostenstruktur der technischen Potenziale

Die ermittelten Kosten aller REG - Referenztechniken zur Stromerzeugung sind im folgenden im Überblick zusammengestellt. Gezeigt ist der jeweilige Minimalwert und die durch unterschiedliches Energieangebot und Einheitsleistung sowie im Fall von Biomasse und Biogas infolge unterschiedlicher Brennstoffkosten und Wärmegutschriften im Betrieb mit Kraft-Wärme-Kopplung verursachte Bandbreite der Stromgestehungskosten (**Abb. 2**). Mögliche Entsorgungserlöse im Fall der Biomasse (Altholz) und des Biogases (Abfälle für Kofermentation) wurden **nicht** berücksichtigt. Der Kalkulationszinssatz beträgt einheitlich 6 %, die Abschreibungsdauer variiert anlagenbedingt zwischen 15 und 30 Jahren. Ohne Berücksichtigung der Photovoltaik (heutige Kosten zwischen 114 und 180 Pf/kWh) und von Biomasse - HKW mit kostenlosem Restholz und hoher Wärmegutschrift (keine zusätzlichen Stromkosten) liegen die derzeitigen minimalen Stromgestehungskosten zwischen **4 und 30 Pf/kWh**, die Bandbreite der Höchstwerte liegt zwischen 15 und 37 Pf/kWh. Die Strompreise variieren also um etwa eine Größenordnung.

Bis zum Jahr 2010 reduzieren sich insbesondere die Kosten der Stromerzeugung aus Photovoltaik und Windenergie. Erstere liegt dann im Bereich 55-82 Pf/kWh. Auch im Bereich der Biogaserzeugung und -nutzung und der Biomassevergasung dürften die Kosten noch sinken, sobald größere Anlagenstückzahlen hergestellt werden und sich Betriebs- und Wartungskosten verringern. Jedoch ist Intensität und zeitlicher Ablauf dieser Kostendegressionen ungewiss. Für den Technologiestatus 2010 verringert sich die Kostenbandbreite der minimalen Stromgestehungskosten auf **2 bis 18 Pf/kWh**. Ein großer Teil der Technologien liegt mit den günstigen Kosten im Bereich **um 10 Pf/kWh**. Bis 2020 sinken die Kosten der Photovoltaik (35-58 Pf/kWh) und der Windenergie (7-15 Pf/kWh) weiter, die Bandbreite der minimalen Kosten liegt zwischen 2 und 16 Pf/kWh, maximale Werte (ohne PV) reichen noch bis rund 30 Pf/kWh.

Die technischen Potenziale der REG lassen sich nach Kostenklassen zusammenfassen. Dabei bestehen bei der Biomasse Freiheitsgrade hinsichtlich der Aufteilung in Strom und Nutzwärme in Abhängigkeit der eingesetzten Technologien. Für die folgende Darstellung wurde, entsprechend der eingesetzten Referenztechnologien, davon ausgegangen, dass ein möglichst hoher Anteil der Biomasse in Kraft-Wärme-Kopplung umgesetzt werden sollte. Aus maximal 900 PJ/a fester Biomasse (davon 500 TWh/a Reststoffe und 400 TWh/a Energiepflanzen einschließlich heutiger Brennholznutzung in Höhe von 85 PJ/a) kann so bei voller Erschließung 40 TWh/a Strom und 145 TWh/a Nutzwärme bereitgestellt werden, was einem Gesamtnutzungsgrad (netto; d.h. abzüglich aller Verluste einschließlich Vergasung u.ä.) von 75 % entspricht. Entsprechend kann aus 115 PJ/a Bruttoaufkommen an Bio- und Klärgas 9 TWh/a Strom und 14 TWh/a Nutzwärme bereitgestellt (Nutzungsgrad netto 72 %).

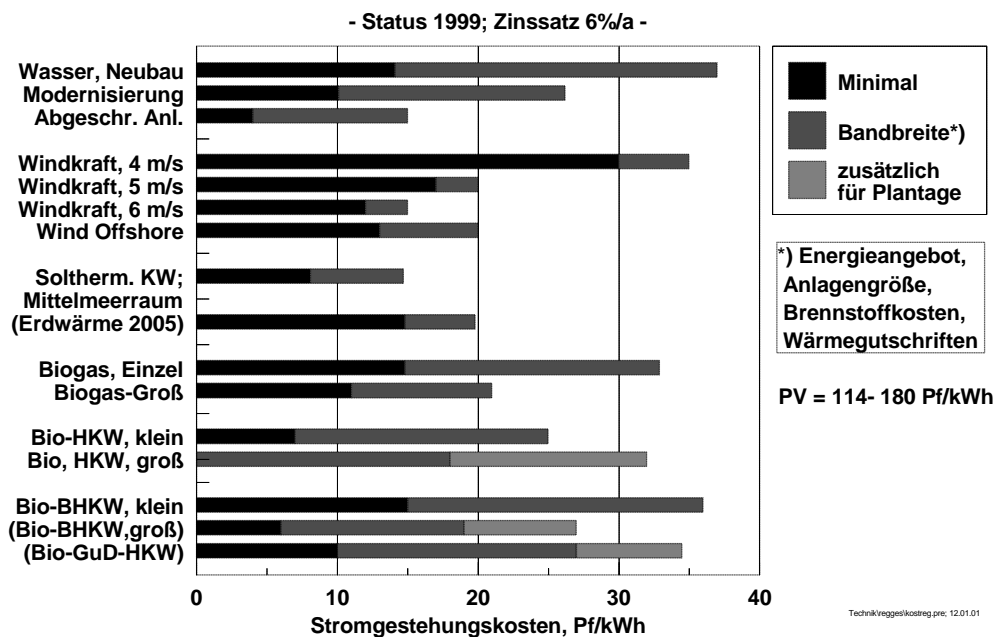


Abbildung 2: Derzeitige Stromgestehungskosten regenerativer Energien (ohne Photovoltaik) unter Berücksichtigung der Bandbreite infolge unterschiedlichem Energieangebot, Einheitsleistung, Brennstoffkosten und Wärmegutschriften

Die technisch verfügbaren Potenziale der REG zur Stromerzeugung sind beträchtlich. Ohne Stromimport beläuft sich die technische Potenzialuntergrenze bereits auf rund **450 TWh/a**. Je nach der Nutzungsintensität von Offshore-Wind-Potenzialen, der Nutzung weiterer Dachflächen für die Photovoltaik und insbesondere im Falle 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 entsprechend der vorliegenden Daten auf der Basis von Lernkurven wesentlich 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 führt zu der in **Abb.3** dargestellten Kostenstruktur der Potenziale

Derzeit existiert ein kostengünstiges Potenzial mit Stromkosten bis zu **0,15 DM/kWh** in 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 die Photovoltaik. Das kostengünstige Potenzial allein reicht 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 das Verdopplungsziel mit einem ausgewogenen Technologiemix umgesetzt – d.h. wird die Marktentwicklung aller Technologien ausreichend stimuliert - so wächst 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**. 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** anwachsen, das Gesamtpotenzial 600 TWh/a überschreiten. Hauptursache dafür ist der dann mögliche Stromimport aus solar thermischen Kraftwerken und die breite Ausnutzung von Wind-Offshore- und Geothermie-Potenzialen.

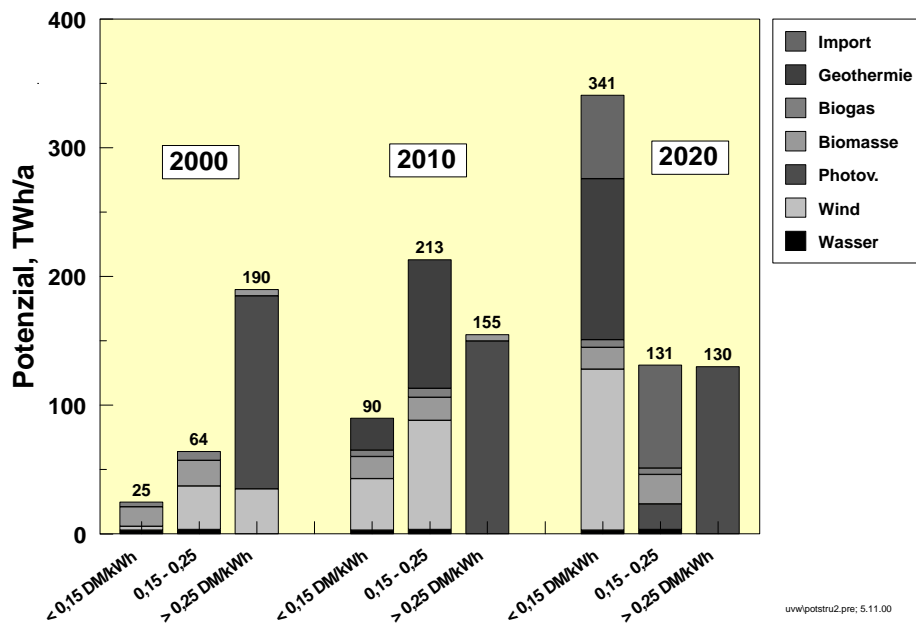


Abbildung 3: Kostenstruktur der in den Jahren 2000, 2010 und 2020 verfügbaren Potenziale von REG zur Stromerzeugung; für 2010 und 2020 sind Kostendegressionen bei wachsenden Marktvolumina vorausgesetzt.

5.2 Wärmegestehungskosten und Kostenstruktur der technischen Potenziale

Wärme aus REG kann durch Einzelsysteme (z.B. Holzheizkessel, WW-Kollektoren) und mittels Nahwärmenetze bereitgestellt werden. Insbesondere letztere spielen bei einer weitgehenden Erschließung des Wärmemarktes eine sehr große Rolle. Vielfach ist nur über sie eine Nutzung möglich (Erdwärme, Kollektorstärme für Raumheizung in größerem Ausmaß, KWK-Anlagen mit Biomasse). Typische Wärmeverteilkosten von Nahwärmenetzen liegen zwischen 4 und 6 Pf/kWh (im wesentlichen Kapitalkosten der Netze). Da zentrale Heizanlagen i. allg. geringere spezifische Kosten als Kleinanlagen für Einzelgebäude aufweisen, sind Wärmekosten auf der Basis von Nahwärmeversorgungen bei sorgfältiger Auslegung und vollständiger Nutzung des Netzes meist kostengünstiger als Einzelheizungen. Im folgenden Kostenvergleich beziehen sich alle Kosten auf Nutzwärme frei Gebäude.

Auch die Wärmekosten der REG überstreichen eine größere Bandbreite zwischen **7 und 55 Pf/kWh**. Relativ teuer sind heute mit 40-50 Pf/kWh noch die meist eingesetzten kleinen Kollektorsysteme zur Warmwasserbereitung. Auch heutige solare Nahwärmeversorgungen besitzen Kosten, die deutlich über denen von Heizungssysteme auf der Basis fossiler Brennstoffe liegen (Vollkosten Einzelheizung 10-13 Pf/kWh). Günstiger liegen mit rund 15 Pf/kWh hydrothermale Erdwärmeversorgungen und Strohheizwerke. Die günstigsten Kosten besitzen mit Werten um 10 Pf/kWh Holzheizwerke mit kostengünstigen Brennstoffen (**Abb. 4**). Auch KWK – Anlagen auf Biomassebasis liefern kostengünstig Wärme, wenn Erlöse für Strom auf der Basis des EEG berücksichtigt werden.

Kostensenkungspotenziale besitzen insbesondere noch Kollektorsysteme und dort vor allem die heute noch wenig eingesetzten großen Systeme zur Warmwasserbereitung (mehrere 100 bis 1.000 m²) mit zukünftigen Wärmegestehungskosten um 10 Pf/kWh. Solare Nahwärmeversorgungen können in den Bereich um 15 Pf/kWh gelangen. Längerfristig können dementsprechend die meisten relevanten Wärmeversorgungssysteme auf der Basis regenerativer Energien Heizwärme in einem Kostenbereich von 15-20 Pf/kWh frei Verbraucher bereitstellen. Angesichts zukünftig vermutlich steigender Heizöl- und Erdgaspreise kön-

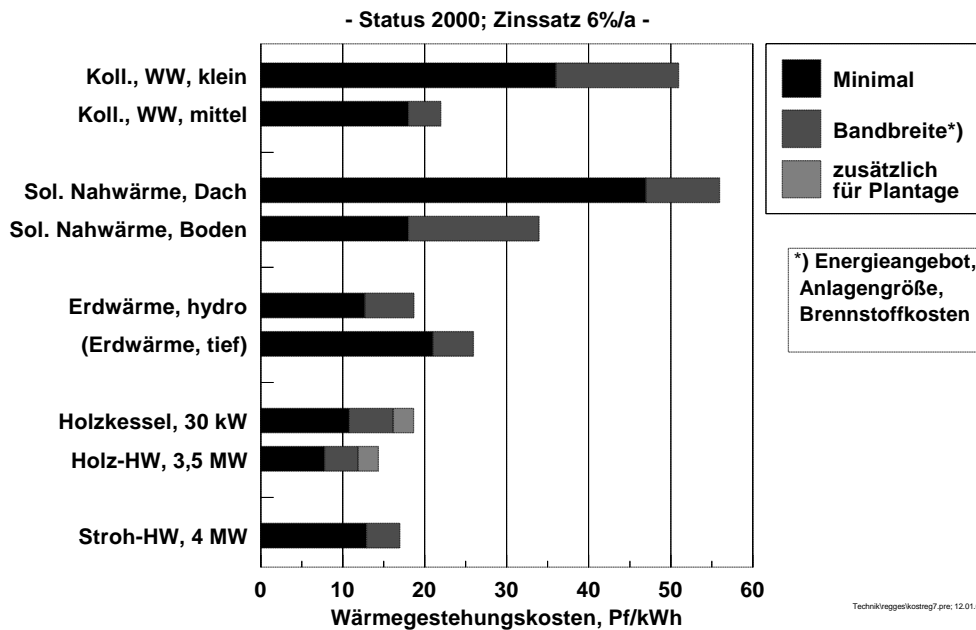


Abbildung 4: Derzeitige Wärmegestehungskosten von REG unter Berücksichtigung der Bandbreite infolge unterschiedlichem Energieangebot, Einheitsleistung und Brennstoffkosten (Biomasse)

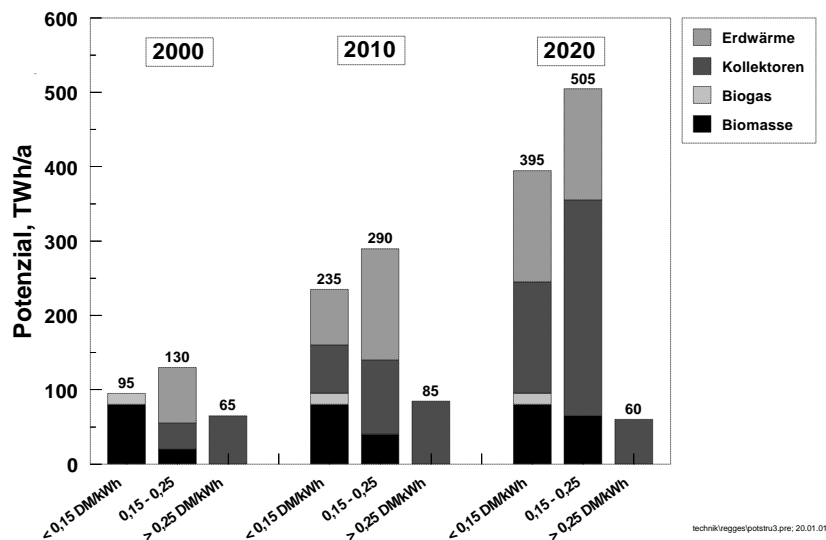


Abbildung 5: Kostenstruktur der in den Jahren 2000, 2010 und 2020 verfügbaren REG - Potenziale zur Wärmeerzeugung; für 2010 und 2020 sind Kostendegressionen wachsenden Marktvolumina vorausgesetzt.

nen also insbesondere Biomasse, aber auch Erdwärme und Solaranlagen mittelfristig konkurrenzfähig Wärme bereitstellen.

In ähnlicher Weise wie das Stromerzeugungspotenzial lässt sich das Potenzial zur Nutzwärmebereitstellung strukturieren (**Abb. 5**). 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, insbesondere bei Kollektoranlagen, 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.

5.3 Ökologische Eckdaten von REG - Technologien

Grundsätzlich können REG - Anlagen zur Strombereitstellung einen deutlichen Beitrag zur Entlastung verschiedener Umwelteinwirkungen beitragen. Besonders unkritisch bei den Treibhausgasemissionen (**Abb. 6**) sind Windenergie und Wasserkraft. Auch bei mittelfristigen Photovoltaik-Produktionsrouten ist der Treibhauseffekt deutlich niedriger als bei fossilen Vergleichssystemen. Bei modernen PV -Systemen werden Erntefaktoren deutlich über 1 und Energierückzahlauern zwischen 3 und 5 Jahren (Mitteleuropa) bzw. 1 und 2 Jahren (Sonnengürtel) erreicht [Pehnt 2000]. Die Versauerung liegt ebenfalls unter fossilen Systemen, allerdings nicht so deutlich wie die der anderen Strombereitstellungssysteme. In zukünftigen Systemen sind weitere deutliche Absenkungen der Einwirkungen vorhersehbar. Bei solarthermischen Kraftwerken ist bei rein solarem Betrieb ein extrem großes, im hybriden Betrieb immer noch beträchtliches Reduktionspotenzial gegeben.

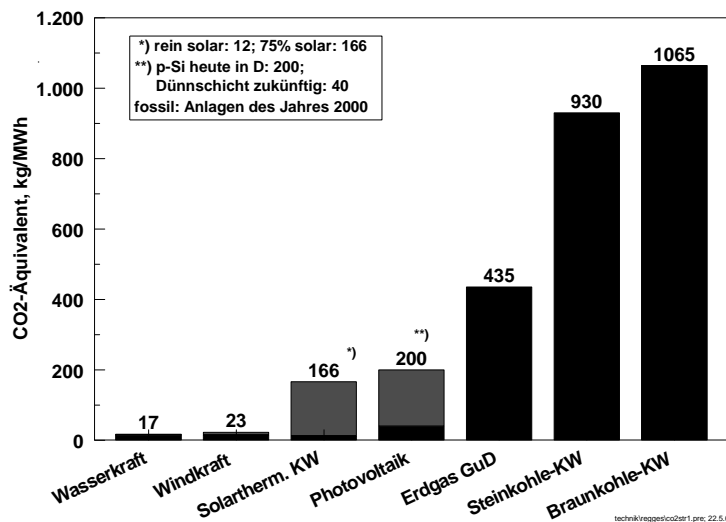


Abbildung 6 : Treibhauseffekt verschiedener Strombereitstellungssysteme auf regenerativer Basis und Vergleich mit besten fossilen Technologien.

Die REG - Wärmebereitstellung ist vor allem bezüglich der Treibhausgas-Emissionen (**Abb. 7**) deutlich besser als die fossile Konkurrenz. Bei der Versauerung wirkt sich der erhöhte Materialeinsatz aus. Durch eine bewusste Wahl der Materialien und einen hohen Recycling-Anteil lassen sich diese Einwirkungen deutlich minimieren.

Der Flächenverbrauch, der durch die Indikatoren Flächenversiegelung und Flächenmodifikation als Produkt von Fläche x Zeitdauer (der Inanspruchnahme) definiert ist, wurde nicht eigens berechnet, sondern der Literatur entnommen. Er liegt bei regenerativen Energiesystemen – im Gegensatz zu weit verbreiteter Ansicht - nicht grundsätzlich über dem der fossilen Systeme. Bei versiegelter Fläche kann, mit Ausnahme von Windanlagen auf dem Land, eine Verringerung identifiziert werden, bei modifizierter Fläche liegen Wasserkraftanlagen, PV-Systeme und Windkraftanlagen auf dem Land über der Vergleichstechnik Erdgas - GuD - Kraftwerk.

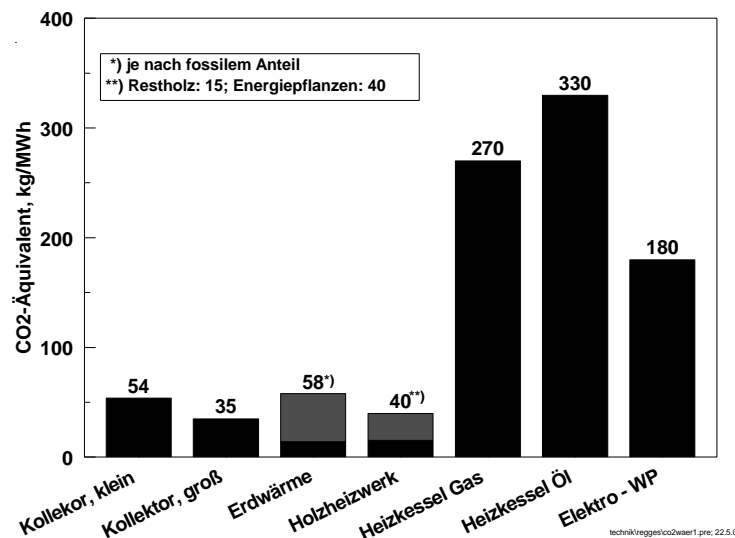


Abbildung 7: Treibhauseffekt verschiedener Wärmebereitstellungssysteme auf regenerativer Basis und Vergleich mit verschiedenen fossilen Optionen.

In **Tabelle 3** sind die zur Erzeugung 1 GWh Elektrizität erforderlichen Materialmengen gegenübergestellt. Neben Erdgas GuD-Kraftwerken sind auch die Angaben zu anderen modernen konventionellen Kraftwerken zu finden.[ESU 1996; Hartmann 1998; Pehnt 2000; IER 2000; eigene Berechnungen]. Differenziert ist nach nichtenergetischen und energetischen Rohstoffen. REG-Technologien erfordern i.allg. eine größere Menge an nichtenergetischen Rohstoffen (im wesentlichen Anlagenbau) als konventionelle Energieanlagen, wobei sich insbesondere Photovoltaiksysteme (solargrade Si; Mitteleuropa) herausheben.

Der Bedarf an diesen Materialien muss unter verschiedenen Blickwinkeln bewertet werden:

- Zum einen handelt es sich selbst bei sehr hohen Anteilen von REG an der Stromerzeugung um relativ geringe Anteile am gesamten Umsatz dieser Rohstoffe. Würde z.B. der gesamte heutige Strombedarf mittels Windenergie bereitgestellt, wären dazu rund 8 % der jährlich in Deutschland umgesetzten Eisenerzmenge erforderlich. Vergleichsweise werden derzeit rund 25 % des Erzbedarfs für die Herstellung von Fahrzeugen und 20 % zur Errichtung von Gebäuden benötigt.
- Die eingesetzten Rohstoffe werden nicht verbraucht und während des Gebrauchs nicht kondaminiert. Sie sind daher nach Abriss der Anlagen in ähnlichem Ausmaß rezyklierbar wie bei anderen Anlagen, Maschinen und Konsumgütern. Wegen der unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten generell anzustrebende möglichst hohe Rezyklierrate solcher Materialien dürfte ein verstärkter Ausbau von REG-Anlagen hier keine schwerwiegenden Probleme aufwerfen.
- Nicht oder nur wenig rezyklierbare Rohstoffe, wie Kalkstein werden bei REG-Anlagen in ähnlichem Umfang wie bei konventionellen Anlagen benötigt.

Tabelle 3: Erforderliche Materialmengen zur Bereitstellung 1 GWh Elektrizität in modernen Kraftwerken (Status „2005“) einschließlich Energierohstoffe (kg/GWh_{el})

Kraftwerke → Materialien	Steinkohle 45,5 %	Braunkohle 44 %	Erdgas, GuD 58 %	Kernenergie, DWR	Wasserkraft, 3 MW	Windkraft, 1,5 MW, Küste	Solarthermie Kraftwerke	Photovoltaik, sg-Si, Dach
Eisenerz	2.000	2.00	1.200	420	2.400	5.200	3.470	5.200
Bauxit	16	18	2	27	4	44	6	2.000
Kupfer	2	7	1	6	5	65	252	230
Kalkstein	7.000	20.000	6.400	800	6.000	2.490	2.100	10.000
Nickel (ab Erz)	1,4	1,1	0,4	15,5	0,4	0,4	0,5	14
Steinkohle	501.300	3.500	255	880	2.860	3.840	2.700	14.000
Braunkohle	5.180	1.017.000	300	500	2.750	5.100	745	32.900
Erdgas	1.160	800	185.705	1.070	730	1.560	440	5.690
Rohöl	3.760	1.200	2.220	610	580	720	1.750	4.300
Uran (ab Erz)	0,34	0,2	0,003	26,5	0,007	0,02	0,03	0,92

Die Gegenüberstellung dieser nichtenergetischen Materialien mit dem Verbrauch an Energierohstoffen macht deutlich, wo tatsächliche Ressourcenprobleme (und damit verknüpft Emissionsprobleme) auftreten. Der Bedarf an fossilen Energieträger ist um ein bis zwei Größenordnungen höher als der an nichtenergetischen Rohstoffen. Diese werden zudem nahezu vollständig in Emissionen umgewandelt.

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

Um die Gesamtwirkung eines Ausbaus regenerativer Energien auf das Energiesystem und damit auf die Volkswirtschaft als Ganzes unter ökonomischen, ökologischen und sozialen Gesichtspunkten abschätzen zu können, bedarf es einer Vorstellung darüber, in welchem Ausmaß REG in den nächsten Jahrzehnten zur Energieversorgung Deutschlands beitragen können. Aus den Ausführungen des Abschnitts 3 ging bereits hervor, dass ein verstärkter REG - Ausbau und ihr substantieller Beitrag zur Mitte des Jahrhunderts in jedem Fall Bestandteil einer Nachhaltigkeitsstrategie sein müssen. Auf der Basis der technischen Potenziale und ihrer Verknüpfung mit den erläuterten Kostenfunktionen der Einzeltechnologien lassen sich zukünftige Ausbaupfade von REG im Rahmen der Weiterentwicklung der gesamten Energiewirtschaft und ihre ökonomischen und ökologischen Wirkungen relativ genau darstellen. Als „Einstieg“ für den Zeitraum bis 2010 dient dazu eine Zubauentwicklung, die sich am Verdopplungsziel der Bundesregierung (und der EU) orientiert. Dieser 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 REG überhaupt in den nächsten Jahrzehnten eine wichtige Rolle am Energiemarkt bestreiten können [BMU 2000].

Ausgangspunkte dieser Entwicklung sind sowohl die derzeitige Marktdynamik, speziell der Windenergie, als auch die derzeit geltenden Förder- bzw. Vergütungsbedingungen in Form des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG), des 100.000-Dächer-Programms, des 300 Mio./a Förderprogramms des Bundes und der Förderprogramme der Länder für die übrigen REG, die den weiteren Zuwachs der REG für die nächsten Jahre bestimmen dürften. Für den Zeitraum nach 2010 wird davon ausgegangen, dass sich die angestoßene Ausbaudynamik im Rahmen der dann weiterentwickelten liberalisierten Märkte mit entsprechend angepassten Instrumenten weiter aufrechterhalten lässt. Das setzt voraus, dass der weitere Ausbau der REG über längere Zeiträume zum Zielkatalog der deutschen bzw. europäischen Energiepolitik gehört (vgl. z.B. die Zielsetzung des BMU eines 50 %igen REG- Beitrags um 2050). Auf der Basis dieser günstigen Rahmenbedingung wird im folgenden ein „Orientierungsszenario“² des REG-Ausbaus dargestellt, welches einen Ausbaupfad bis zum Jahr 2050 beschreibt. Dieser ist aus heutiger Sicht technisch und strukturell beschreibbar, bedarf jedoch noch über längere Zeiträume einer aktiven politischen und gesellschaftlichen Unterstützung. Er geht über eine Trendentwicklung [z.B. Prognos 2000] hinaus und stellt somit die obere Leitplanke des zukünftig möglichen Beitrags von REG an der Energiebedarfsdeckung dar. Dieser Ausbaupfad wurde in Teilen bereits in [Langniß u.a. 1997] und aktuell in [TAB 2000] vorgestellt und wird hier, insbesondere im Bereich der Wärmeversorgung, weiter detailliert und aktualisiert. Die Ergebnisse weiterer aktuelle Szenarien für Deutschland [Wuppertal 2000; Matthes 2000; HBS 2000; STE 1999; Altner 1995;] wurden ebenfalls berücksichtigt (vgl. auch Abschnitt 6) Der Zeithorizont 2050 ist erforderlich um dem langfristigen Charakter des Aufbauprozess von REG gerecht werden und den Übergang von energiepolitisch gestützten Märkten (z.B. mittels EEG und Quotenregelungen mit Zertifikaten u.ä.) zu eigenständigen Märkten darstellen zu können.

Die Beiträge der einzelnen Technologien im Orientierungsszenario zeigen bis zum Jahr 2020 (**Abb. 8, oben**) im Strombereich die Dominanz der Windenergie, die ab 2005 die Wasserkraft überholt und im Jahr 2020 mit 54 TWh/a knapp die Hälfte der gesamten Stromerzeugung aus REG (120 TWh/a) bestreitet. Die Marktvolumina der Windenergie liegen dabei bei durchschnittlich 1.300 MW/a, also unterhalb der derzeitigen Rekordumsätze. Alle anderen Technologien haben sich ab ca. 2010 – entsprechend der Verdopplungsstrategie – ebenfalls in beträchtlichem Umfang am Markt etabliert mit bis zum zehnfachen Marktvolumen im Vergleich zu heute. So erweitert vor allem die Biomasse (einschließlich Biogas) ihren Beitrag bis 2020 deutlich und übertrifft dann ebenfalls die Wasserkraft. Der Import von Strom aus REG ist ab ca. 2015 Bestandteil dieses Orientierungsszenarios. Der Anteil von REG 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. 8, unten**) sind sowohl Ausgangssituation und Mobilisierungsbedingungen schwieriger. Ein dem EEG vergleichbares Förderinstrument gibt es hier nicht, der jetzige Beitrag ist mit 2,2 % am Brennstoffbedarf noch gering und besteht größtenteils aus der Nutzung von Holz in Klein- und Kleinstanlagen. Große Anteile von REG im Wärmebereich erfordern u.a. den Einsatz größere Anlagen mit Nahwärmenetzen für die heute noch keine adäquaten Förderinstrumente existieren. Die Wahrscheinlichkeit, die Ausbauziele 2010

² Der längerfristige Ausbau von REG orientiert sich am Zielkatalog des Abschnitts 3, der aus den Nachhaltigkeitsdefiziten der derzeitigen Energieversorgung abgeleitet wurde. REG werden danach in ihrer Gesamtheit zu einer dominierenden Energiequelle des 21. Jahrhunderts. Dementsprechend „passt“ es vom Typ in erster Linie zur Kategorie des „Nachhaltigkeitsszenarios“ nach [Schäfer, Schön, 1998] bzw. „Great Transitions“ des Stockholm Environment Institute [SEI 1997]. Es enthält jedoch auch zahlreiche Elemente des Einsatzes modernster Technologien und setzt starke und koordinierte politische Aktivitäten voraus, kann also auch als Teil des Szenariotyps „Ökologische Modernisierung“ [Schäfer, Schön 1998] bzw. „Policy Reform“ [SEI 1997] aufgefasst werden. Demgegenüber stehen Szenarien des Typs „Globalisierung“ bzw. „Conventional Worlds“, in denen REG nur langsam wachsen und auf mittlere Zeit nur mäßige Anteile erreichen (sog. „additive“ Energien). Dazu gehört für Deutschland [Prognos 2000] und weltweit die Szenarien des Weltenergieerates [WEC 2000]

und 2020 zu erreichen, ist hier also deutlich unsicherer als im Bereich der Stromversorgung. Mengenmäßig dominiert bis 2020 eindeutig die Nutzung der Biomasse, wobei wachsende Anteile von KWK - Anlagen (Holzvergasung) zum Einsatz kommen. Die relativ stärksten Zuwachsraten habe jedoch KWK - Anlagen mit Biogas, die jedoch potenziell begrenzt sind, Kollektoranlagen (insbesondere Nahwärmesysteme) und Erdwärmeanlagen. Im Jahr 2020 decken REG rund 10% des Nutzwärmebedarfs (Bezugswert 1999).

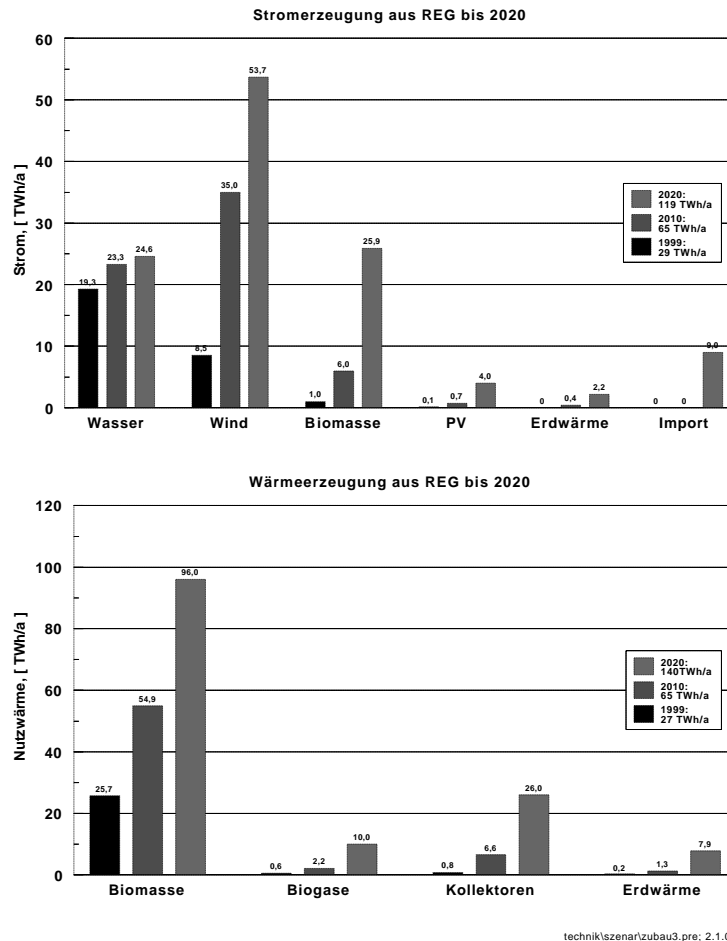
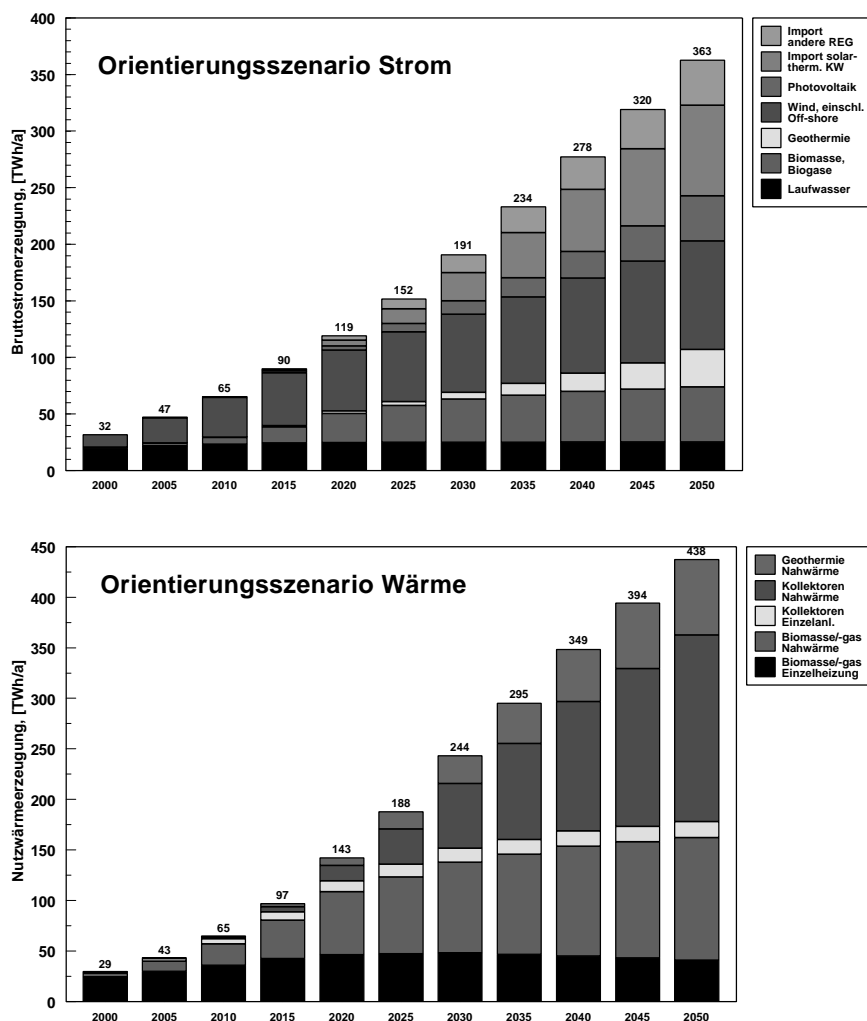


Abbildung 8: Struktur des „Orientierungsszenarios“ der Stromerzeugung (oben) und der Wärmeerzeugung (unten) aus REG bis zum Jahr 2020 (u.a. nach [BMU 2000; TAB 2000]). Ausbau bis 2010 auf der Basis derzeitig geltender Rahmenbedingungen, Vergütungsregelungen und Förderprogramme. Bei der Stromerzeugung ist Biogas in Biomasse enthalten

Die eigentliche Dynamik eines REG - Ausbaus wird erst nach 2020 deutlich, da dann infolge einer deutlichen Verringerung der Kostenscherre (einerseits Kostendegressionen bei REG – andererseits Anstieg der Preise konventioneller Energien) von einer weitgehenden Wirtschaftlichkeit der meisten REG - Technologien ausgegangen werden kann und damit energiepolitische Instrumente und Fördermittel größtenteils nicht mehr benötigt werden. Der weitere Ausbau der REG kann vor diesem Hintergrund in Form charakteristischer logistischer Wachstumskurven für neue Technologien verlaufen, wobei die ermittelten Potenzialgrenzen und Kostenrelation die wesentlichen Parameter für den Ausschöpfungsgrad darstellen. Die Analyse führt bis 2050 – getrennt nach Strom- und Wärmebereitstellung – zu folgenden Ergebnissen (**Abb.9**):

Um 2020 sind die Potenzialgrenzen bei Wasserkraft mit 25 TWh/a zu 100 % ausgeschöpft. Auch das Wachstum von KWK - Anlagen auf der Basis von Biomasse und Biogas verlangsamt sich nach starkem Wachstum zwischen 2010 und 2010 bereits wieder. Wind wächst weiterhin gleichmäßig mit konstantem Marktvolumen, wobei bereits der Ersatzbedarf für heutige Anlagen an Bedeutung gewinnt. Die übrigen Technologien, also Photovoltaik, Strom aus Erdwärme und Stromimport, beginnen mit ihrem eigentlichen, 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. Potenziell ist dann 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].



HGF-bericht/orientsz.pre; 7.2.01

Abbildung 9: Orientierungsszenario für den möglichen Ausbau von REG in der Stromerzeugung (oben) und der Wärmeerzeugung (unten) bis 2050 mit einer zweckmäßigen Aufteilung auf die verschiedenen Reg-Technologien unter günstigen energiepolitischen Rahmenbedingungen

Potenziell sind auch nach 2050 noch große Spielräume für eine weitergehende Deckung des Strombedarfs durch REG vorhanden, wenn eine Strategie der ausgewogenen Erschließung aller REG-Quellen bzw. -Technologien verfolgt wird. Die Anteile einzelner Energiearten der REG liegen in 2050 zwischen 5 und 15 % bzw. erreichen bei massiver Er-

schließung maximal 20 % (Beispiel Wind einschließlich Offshore) und ergänzen sich daher in ihrer Erzeugungscharakteristik. Der Anteil deutlich fluktuierender REG (Wind, PV) erreicht 30 %, was bei entsprechender Anpassung der übrigen (fossilen) Kraftwerke beherrschbar sein dürfte. Importstrom ist wegen der Speichermöglichkeiten in solarthermischen Kraftwerken keinen kurzzeitigen Fluktuationen unterworfen, Wasserkraft hat saisonale Schwankungen, Biomasse und Geothermie sind einer fossilen Grundlastversorgung gleichwertig. In 2050 beträgt die in REG - Anlagen insgesamt installierte Leistung 120 GW (Wasser 4,7; Wind 40; PV 41; Geothermie 4,7 Importleistung 20,6 GW); damit ist eine mittlere Ausnutzung aller Anlagen von 2.830 h/a verbunden mit einer Bandbreite zwischen 980 h/a (PV Inland) und 6.500 h/a (Import Wasser, Geothermie).

Im Wärmemarkt (**Abb. 9, unten**) ist die Biomasse bis 2020 mit Einzelheizungen, Heizwerken und einer stark wachsenden Zahl von KWK - Anlagen der Hauptträger des Zuwachses an REG. Gleichzeitig wird bis dahin von einer Dominanz von Nahwärmanlagen ausgegangen, die zu diesem Zeitpunkt bereits 60 % der REG - Wärmemenge bereitstellen. Nach 2020 stützt sich der weitere Zuwachs praktisch vollständig auf Nahwärmanlagen, wobei sowohl bei Kollektor- wie auch Erdwärmanlagen 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 2050 sind, in Verbindung mit der Stromerzeugung in KWK - Anlagen die Potenziale der Biomasse vollständig ausgeschöpft³. Solarkollektoren und Erdwärme verfügen zwar noch über weitere Nutzungspotenziale, jedoch sind bedarfsseitig (Höhe des Niedertemperaturbedarfs) um 2050 die Nutzungsmöglichkeiten weitgehend ausgeschöpft. Weiterhin muss berücksichtigt werden das gerade der Niedertemperaturwärmebedarf und dort insbesondere der Raumwärmebedarf noch große Einsparmöglichkeiten besitzen (verstärkte Wärmedämmung im .Altbaubestand; „solares“ Bauen u.a.).

7. Einordnung des Orientierungsszenarios 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, wie bereits in Abschnitt 3 ausgeführt, neben die (Teil-) Strategie des REG - Ausbaus eine gleichwertige (Teil-) Strategie zur rationelleren Energienutzung treten muss, wenn alle genannten Nachhaltigkeitsdefizite gleichzeitig verringert werden sollen, ist zu prüfen, wie diese Teilstrategien in kompatibler Form zusammenwirken können.

Für die Gesamtentwicklung der Energieversorgung maßgebenden Eckwerte sind bis 2020 [Prognos 2000] entnommen und wurden näherungsweise bis 2050 fortgeschrieben [Langniß u.a. 1997; FEES 2001; Prognos 2001]. Gleichzeitig sind die derzeit geltenden Rahmenbedingungen zum Ausstieg aus der Kernenergie, zum Verdopplungsziel bei REG (bei Strom also die Wirkung des EEG) und die Vorstellungen zum deutlichen Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung aufgegriffen worden. Der obige REG - Ausbau wurde dementsprechend mit einer Strategie der intensivierten Effizienzsteigerung (REN - Strategie) bei der Energiewandlung (Stichwort: Kraft-Wärme-Kopplung) und Energienutzung (insbesondere Raumheizung; Verkehr) verknüpft. Die Gesamtentwicklung entspricht daher ebenfalls der Kategorie „Nachhal-

³ In diesem Orientierungsszenario wird nur die Erschließung des Strom- und Wärmemarktes durch REG betrachtet. Biomasse kann aber auch für die Bereitstellung von Kraftstoffen (Methanol, Biodiesel, Ethanol) eingesetzt werden. Dementsprechend würden – bei unveränderten Potenzialgrenzen - die Beiträge zur Strom- und Wärmeenergie zurückgehen. Auf absehbare Zeit ist jedoch die Strom- und Wärmebereitstellung die ökonomisch und ökologisch günstigere Option; u.a. muss bei der Herstellung von Kraftstoffen auf eine möglichst weitgehende Verwertung von Nebenprodukten und Abfallstoffen Wert gelegt werden, um günstige Ökobilanzen zu erzielen.

tigkeitsszenarien“, da nur innerhalb dieser Zuordnung ein deutlicher Ausbau von REG konsistent und plausibel ist.

Diese REN - Strategie ist durch eine 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 die Primärenergieintensität demnach 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 Primärenergieverbrauch von rund 8.000 PJ/a, ein Endenergieverbrauch von 6.100 PJ/a und ein Stromverbrauch von 1.775 PJ/a.

Tab. 4 zeigt die wesentlichen Energieverbrauchsdaten dieses Szenarios. Der gesamte Endenergieverbrauch geht also bis 2050 auf zwei Drittel des heutigen Wertes zurück bei im wesentlichen konstantem Stromverbrauch und einem auf 20 % wachsenden Anteil der Wärme aus Fern-, Nahwärmenetzen und industriellen KWK - Anlagen. REG tragen dann mit 45 % zur Endenergiebereitstellung bei, (zur Stromerzeugung mit 65 %) wobei sich in diesem Szenario der Verkehr noch zu 100 % auf fossile Kraftstoffe abstützt. Der Primärenergieeinsatz sinkt auf 56 % des heutigen Wertes⁴. Der Anteil von REG 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 – wie im Orientierungsszenario angenommen – der Umbau zielgerichtet und stetig erfolgt. In der Stromerzeugung ergeben sich daraus die in **Abb. 10** dargestellten Strukturveränderungen bei den eingesetzten Kraftwerksarten. Der Rückgang der Kernenergie verläuft entsprechend des „Energiekonsenses“, wo eine Regellaufzeit von 32 Kalenderjahren vereinbart wurde. Im nahezu konstant bleibenden Strommarkt verlagert sich die Investitionstätigkeit zu Gas-GuD - Kondensationskraftwerken, KWK - Anlagen auf der Basis von Erdgas, Biomasse und Kohle und zu 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 ein großer Teil in KWK-Anlagen eingesetzt wird. REG-Anlagen haben zu diesem Zeitpunkt einen Anteil von 21 % an der Stromerzeugung, die Stromerzeugung aus KWK ist auf das 2,3-fache des heutigen Wertes (72 TWh/a) gestiegen, wobei der größte Zuwachs von dezentralen öffentlichen, privaten und industriellen Anlagen stammt. Nach 2020 beschleunigt sich der Strukturwandel hin zu REG. Im Jahr 2050 besteht die fossile Stromversorgung im wesentlichen aus Gas-GuD - Anlagen, die sich dem Stromangebot der REG anpassen und aus KWK - Anlagen auf Gas- und Steinkohlebasis; Braunkohle wird nicht mehr eingesetzt. Die CO₂-Emissionen der Stromversorgung⁵ sinken von 293 Mio. t/a im Jahr 1999 auf 276 Mio. t/a bis 2020 nur leicht ab.

⁴ Ein Teil der Reduktion ist auf die Benutzung der Wirkungsgradmethode für Strom aus Wasser, Wind und Solarstrahlung zurückzuführen (Strom = Primärenergie). Dadurch treten in der Bilanz keine Umwandlungsverluste auf. Die thermischen Umwandlungsverluste der fossilen und nuklearen Kraftwerke sinken von derzeit 3.100 PJ/a auf 540 PJ/a auf Grund deutlich zurückgehenden Anteils an der Strombereitstellung, effizienterer neuer Kraftwerke und dem Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung.

⁵ Hierbei ist die gesamte KWK-Wärmeerzeugung abgezogen, im Gegensatz zur Abgrenzung der statistischen Kategorie „Kraft- und Fernheizwerke“ bei der lediglich die Wärmeerzeugung in Industriekraftwerken abgezogen ist.

Tabelle 4: End- und Primärenergieverbrauch (PJ/a) bis 2050 im Orientierungsszenario nach Energieträgern, Verbrauchssektoren und Nutzungsarten, sowie resultierende Anteile von REG und CO₂-Emissionen (Mio. t/a)

Energiemengen in PJ/a	1993	1996	1999	2010	2020	2030	2040	2050
Gesamte Endenergie	9232	9689	9288	8450	7650	7000	6400	6100
nach Energieträgern:								
Elektrizität	1582	1647	1700	1789	1789	1786	1782	1775
Kollektorwärme+ Erdwärme	2	2	4	31	133	404	739	1043
Fern-,Nahwärme (öff. + Industrie) und direkte Wärme aus Biomasse	65	65	95	206	382	487	544	574
Fern-,Nahwärme (öff. + Industrie) einschl. SK-Anteile, fossil 1)	605	612	598	942	982	923	826	706
Gase (Direktnutzung)	1846	2305	2226	2031	1714	1300	710	451
Heizöl und Kohle (Direktnutzung)	2583	2482	1949	1000	450	200	100	50
Kraftstoffe	2549	2576	2717	2450	2200	1900	1700	1500
Regenerativ gesamt	127	137	191	440	888	1494	2161	2772
Anteil REG an END (%)	1,4	1,4	2,1	5,2	11,6	21,3	33,8	45,4
nach Verbrauchssektoren:								
Industrie	2433	2424	2383	2193	1973	1925	1748	1735
Priv. Haushalte	2617	2890	2649	2360	2115	1880	1715	1650
Kleinverbraucher	1585	1749	1480	1375	1276	1194	1125	1093
Verkehr	2597	2626	2776	2522	2286	2001	1812	1622
nach Nutzenergiearten:								
Raumheizung	2800	3100	2878	2500	2200	1900	1700	1600
Warmwasser	470	480	450	420	380	350	330	330
Prozesswärme	2201	2266	1947	1763	1538	1505	1313	1302
Kraft/Licht stationär	1164	1217	1237	1245	1248	1245	1245	1246
Kraft, mobil	2597	2626	2776	2522	2286	2001	1812	1622
Umwandlungsverluste	4244	4058	3836	3476	2514	1924	1383	966
Nichtenerg. Verbrauch	888	973	1070	1000	980	950	925	900
Primärenergie 3)	14364	14720	14194	12626	11144	9874	8708	7966
Mineralöl	5803	5783	5595	4905	4119	3029	2069	1876
Steinkohlen, Sonstige	2249	2230	2019	1700	1400	1100	900	400
Braunkohlen	1984	1685	1468	1200	1000	700	300	0
Erdgas, Erdöl, Gas, Grubengas	2544	3133	3028	3200	3400	3200	2800	2300
Fossile Primärenergie	12580	12831	12110	11005	9919	8029	6069	4576
Kernenergie	1673	1764	1852	1080	201	0	0	0
REG - Inland 3)	107	145	235	541	992	1697	2337	2960
Importsaldo Strom 3) 4)	4	-20	-3	0	32	148	302	430
Anteil REG an PEV (%) ,	0,7	1,0	1,7	4,3	9,2	18,7	30,3	42,6
CO₂-Emissionen, (Mio t/a)	912	898	836	742	648	499	346	226
1990 = 100 (986 Mio.t/a)	93	91	85	75	66	51	35	23
1) SK (= Spitzenkesselanteile der KWK-Anlagen) mit Gas/Heizöl; 2) Struktur 1998 nach IfE/TU München 1999 3) Für Wind-, PV-, Wasserkraftstrom und REG-Stromimport mit Wirkungsgradmethode bestimmt 4) ab 2020 Import REG-Strom Quellen für Ist: BMWi "Energiedaten 2000"; AG Energiebilanzen; IfE 1999; eigene Ergänzungen für REG								

HGF-Bericht\gestruk.wk3; 6.02.01

Der Abbau der Kernenergie führt also 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 Abbildung gezeigte Strukturwandel der Stromversorgung ist mit der Altersstruktur der bestehenden Kraftwerke kompatibel.

Im Wärmebereich wird der Einfluss einer forcierten REN - Strategie noch deutlicher. Der Endenergieeinsatz für Wärme (Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme) sinkt bis 2050 auf 60 % des heutigen Wertes, wovon die Verringerung des Raumwärmebedarfs um nahezu 50 % den größten Anteil hat (**Abb. 11**). Gleichzeitig verändert sich, ähnlich wie bei der Stromversorgung, auch hier die Versorgungsstruktur in diesem Zeitraum vollständig. Derzeit stammen 88 % der gesamten Wärme aus Einzelheizungen mit Gas, Heizöl, Biomasse und Strom und nur 12 % aus KWK-Anlagen bzw. aus Fern- 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 % (überwiegend auch aus Nahwärmeversorgungen). Die Umsetzung dieser Veränderungen erfordert eine beschleunigte Altbausanierung und **gleichzeitig**, im Zuge von Sanierungsmaßnahmen, ein Vordringen von Nahwärmenetzen und -inseln in Altbaubestände, wobei die Größe der Netze u.a. stark vom Dezentalisierungsgrad der KWK-Anlagen abhängt. Auch die „große“ Fernwärme weitet sich noch aus, überwiegend jedoch durch Abrundung der vorhandenen Versorgungsgebiete und einer Erhöhung des Anschlussgrades. Im Prozesswärmebereich dringt die KWK-Wärme weiter vor, aber auch die Biomasse und teilweise auch die Kollektorzwärme sichern sich Anteile. Der forcierte KWK – Ausbau verstärkt die Wechselwirkungen zwischen Strom- und Wärmeversorgung. Im Wärmebereich kann er einerseits die für eine breitere Nutzung von REG notwendigen Strukturen

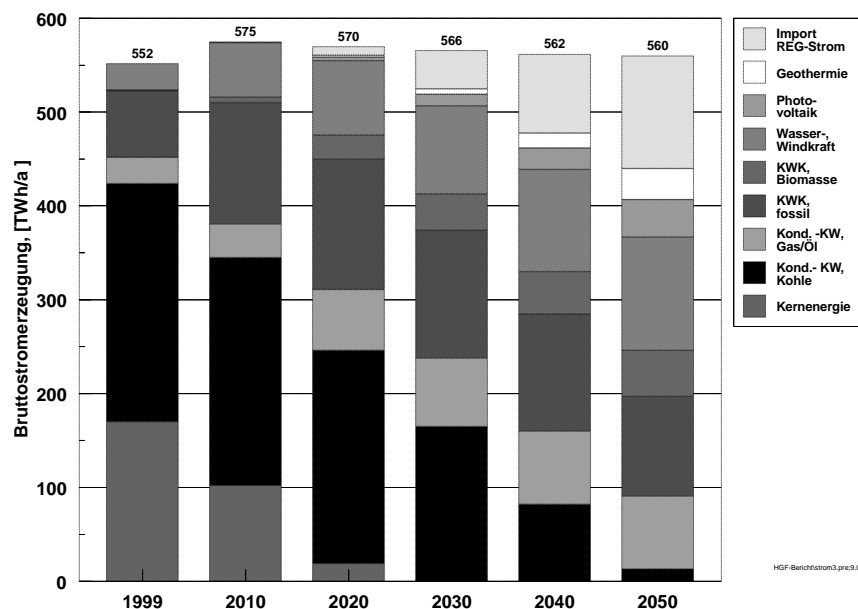


Abbildung 10: Bruttostromerzeugung nach Kraftwerksarten im Orientierungsszenario bis 2050, getrennt nach Kondensationskraftwerken, KWK-Anlagen (fossil, Biomasse) und REG-Anlagen

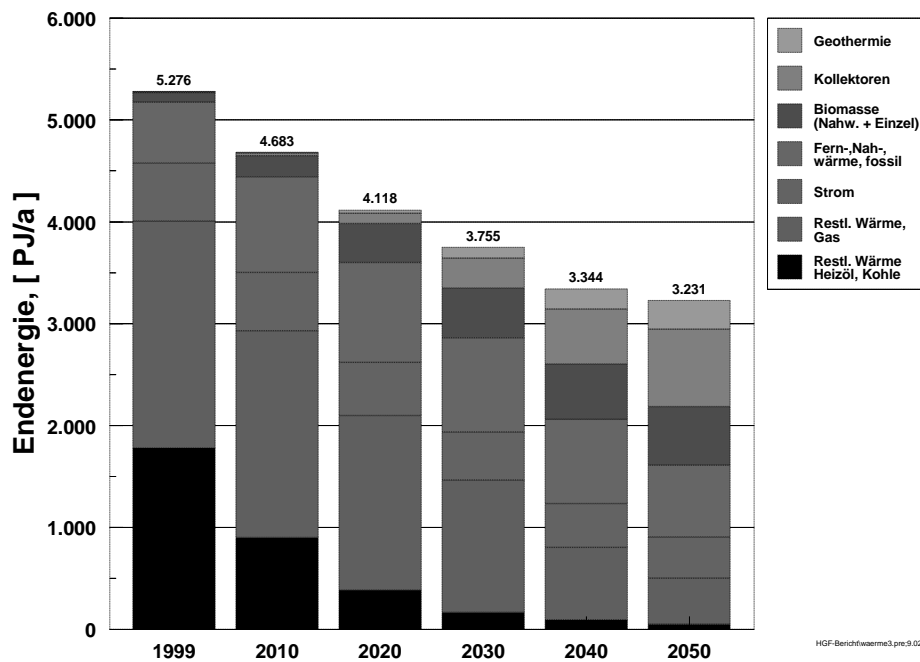


Abbildung 11: Strukturveränderungen im Wärmemarkt im Orientierungsszenario bis 2050 nach Energieträgern bzw. Einzelsystemen und Fern- und Nahwärmeversorgungen

vorbereiten, da der KWK-Ausbau bis 2020 im wesentlichen abgeschlossen sein wird. Die angestrebten Anteile der KWK im Wärmemarkt (und damit auch bei der Stromversorgung) sind nämlich nur möglich, wenn konsequent die Etablierung von Nahwärmenetzen und -inseln verfolgt wird. Diese werden aber auch benötigt um Biomasse, Geothermie und Kollektorwärme in größerem Umfang nutzen zu können. Andererseits kann nach 2030 die Ausweitung letzterer an Grenzen stoßen, wenn nicht wieder ein Teil der (fossilen) KWK-Wärme durch regenerative Energien verdrängt werden kann. Im Szenario erreicht daher die KWK-Wärme um 2030 mit dem 1,9fachen des heutigen Beitrags ihr Maximum und geht bis 2050 wieder leicht zurück auf das 1,7fache des heutigen Wertes (1999: ca. 500 PJ/a). 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 kompensieren 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.

8. Vergleich mit anderen Zukunftsentwürfen der Energieversorgung

8.1 Vergleich mit Szenarien für Deutschland

Es gibt eine größere Anzahl von Szenarien der letzten fünf Jahre, die schwerpunktmäßig von einer weitgehenden Einhaltung der energie-, umwelt- und klimapolitischen Zielsetzungen in Deutschland ausgehen und dabei dem Ausbau von REG Beachtung schenken. Sie sind damit vergleichbar mit dem hier vorgestellten Orientierungsszenario. Im Einzelnen handelt es sich dabei um:

1. Gruppe Energie 2010: „Zukünftige Energiepolitik“ [Altner u.a.1995]
2. DLR/ISE: „Ein solares Langfristszenario für Deutschland“ [Langniß et al. 1997]

3. FhG-ISI/Siemens: „Strategien zur CO₂-Minderung“ [ISI/Siemens 1997]
4. Wuppertal-Institut: „Bedeutung des Sektors Bauen und Wohnen für den Klimaschutz“ [Wuppertal 1998]
5. Prognos: „Möglichkeiten der Marktanreizförderung von regenerativen Energien“ [Prognos 1998]
6. Quaschnig: „Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung“ [Quaschnig 1999]
7. BMU: „Klimaschutz durch Nutzung regenerativer Energien“ [BMU 2000]
8. Öko-Institut: „Energiewende 2020 – Der Weg in eine zukunftsfähige Energiewirtschaft“ [Matthes 2000]
9. Jülich/STE: „Auswirkungen eines verstärkten Einsatzes regenerativer Energien und rationaler Energienutzung“ [STE 2000]

Zur Gegenüberstellung mit einer „Business as usual“-Entwicklung kann insbesondere der Energiereport III [Prognos 2000] herangezogen werden. Weiter liegen die „Politiksznarien für den Klimaschutz“ [Politik 1999] vor, die im Auftrag des Umweltbundesamt mit Hilfe des IKARUS-Modell erstellt wurden. Sie können in Bezug auf die REG-Technologien ebenfalls als Trendszenarien aufgefasst werden, da sie verschiedene Maßnahmen zur Treibhausgasreduktion unter kostenminimalen Gesichtspunkten bestimmen; somit haben REG im Betrachtungszeitraum (bis 2010) gegenüber REN - Maßnahmen nur relativ geringe Wachstumschancen

Den für Deutschland vorliegenden Trendszenarien ist gemeinsam, dass sie von einem leichten Rückgang von Primärenergie- und Endenergieverbrauch in Deutschland bis zum Jahr 2010 bzw. 2020 ausgehen. Die angestrebten Klimaschutzziele der Bundesregierung werden nicht erreicht; der CO₂-Ausstoß bleibt annähernd auf dem heutigen Niveau (836 Mio. t/a in 1999), was einer Reduktion um ca. 15 % gegenüber dem Bezugswert des Jahres 1990 entspricht. Alle Trendszenarien sehen auch moderate Wachstumsraten für die Stromerzeugung und Wärmebereitstellung auf der Basis von REG bis hin zu einer etwa 50 %-igen Erhöhung ihres derzeitigen Beitrags vor

Die Übersicht in **Abb. 12** veranschaulicht im Überblick die Einschätzungen der verschiedenen Szenarien zur zukünftigen Entwicklung des Anteils der REG an der Stromversorgung bis zum Jahr 2050. Relativ einhellig wird von einem Erreichen bzw. Überschreiten des 10%-Anteils bis 2010 ausgegangen⁶, das aktuelle Trendszenario „Prognos III“ nach [Prognos 2000] macht davon keine Ausnahme. War dies für die früheren Szenarien nur in den optimistischen Varianten vorstellbar (z.B. E 2010 II in [Altner et al. 1995]), so erlaubt die Dynamik des gegenwärtigen Windenergieausbaus in den neueren Szenarien eine relativ sichere Einschätzung dieser Entwicklung. Das Orientierungsszenario hat dies berücksichtigt und kommt daher auf einem Anteil von 12,7 % im Jahr 2010. Im Trend bleibt der Zuwachs an REG nach 2010 schwach. Das wird auch in einem früheren Szenario von Prognos [Prognos 1988] so gesehen. In den Ausbauszenarien wird dagegen nach Erreichen des Verdopplungsziels im Jahr 2010 von einem weiteren deutlich Wachstum ausgegangen. Für die Stromversorgung bedeutet dies, dass nach Überschreiten der 10 %-Marke im Jahr 2010 innerhalb eines weiteren Jahrzehnts mit dem Überschreiten der 20 %-Marke gerechnet wird.

Für längerfristige Zeiträume geht das Langfristszenario DLR/ISE [Langniß et al. 1997], der Vorläufer des Orientierungsszenarios, von einem stetigen Wachstum aus, so dass im Jahr 2030 die 30 %-Marke und bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts deutlich die 60 %-Marke überschritten würde.⁷ Die ISE/Siemens-Modellrechnungen [ISI/Siemens 1997] zeigen, dass

⁶ Bezogen auf die Nettostromerzeugung des Jahres 1999 in Höhe von 514 TWh/a

⁷ In allen Szenarien steigt der Stromverbrauch – wenn auch teilweise geringfügig – noch an. Die tatsächlichen Deckungsanteile des REG-Stroms sind daher in den Szenarien geringer als in den entsprechenden obigen Grafiken

bei einer angestrebten 80 %-igen Reduzierung der CO₂-Emissionen und gleichzeitigem Verzicht auf Kernenergie die REG-Beiträge bis 2050 die 50 %-Marke überschreiten müssen. Das Szenario der TU Berlin [Quaschnig 1999] geht mit 44 % (2030) und 80 % (2050) von den höchsten REG-Beiträgen aus. Das Orientierungsszenario liegt mit 70 % (bezogen auf Szenarioverbrauch 2050 beträgt der Anteil 65 %) zwischen diesen Zukunftsentwürfen.

Nach den vorliegenden zielorientierten Szenarien können also REG bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts zur dominierenden Energiequelle werden. Dies weist zumindest darauf hin, dass aus potenzieller und struktureller Sicht ein derartiger Ausbau für möglich gehalten wird. Die in verschiedenen Szenarien vorgeschlagenen Instrumente und Maßnahmen zur Erreichung dieser Zielsetzung sind allerdings nur bis 2010 detailliert diskutiert worden (u.a. [BMU 2000]) Sie weisen darauf hin, dass über das derzeitige Maß hinaus noch weitere energiepolitische Unterstützungen erforderlich sind, um selbst dieses "Etappenziel" zu erreichen. Von einer selbstverständlichen Umsetzung der weitergesteckten längerfristigen Ziele, insbesondere im Wärmemarkt, kann nicht ausgegangen werden. Die angestrebten REG – Anteile geben jedoch Hinweise auf den Grad der noch erforderlichen Veränderung des derzeitigen Strom- (bzw. Energie-) –versorgungssystems, die damit verknüpften Investitionen und Investitionszeitpunkte und die damit verbundenen Auswirkungen technischer und ökonomischer Art.

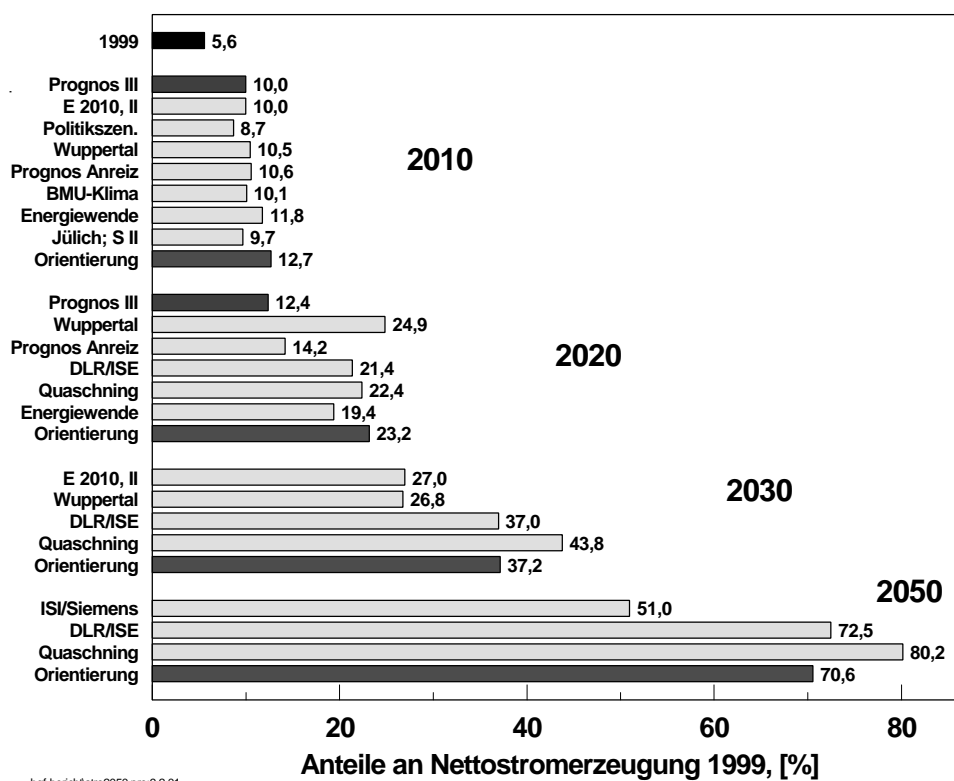


Abbildung 12: Entwicklung der regenerativen Stromversorgung bis zum Jahr 2050 im Szenarienvergleich (Bezugswert: Nettostromerzeugung 1999; ohne Müllverbrennung). Die Quellen sind jeweils nach ihrem Erscheinungszeitpunkt aufgeführt (außer Trendentwicklung)

ken. Im Fall des DLR/ISE-Szenarios sind es 32 % im Jahr 2030 und 63 % im Jahr 2050; ähnlich liegen die Werte des Orientierungsszenarios.

8.2 Perspektiven regenerativer Energien aus europäischer und globaler Sicht

Mit dem „Energy Outlook to 2020“ der Generaldirektion für Energie (DGXVII) der Europäischen Kommission von November 1999 liegt ein aktueller Ausblick der möglichen Energieversorgung der 15 EU-Länder vor [Outlook, 1999] der u.a. auch auf die potentielle Rolle der REG eingeht. Die dort vorgestellte Veränderung der zukünftigen Energieversorgung hat den Charakter einer „Business as usual“-Entwicklung; d.h. bestehende Trends werden fortgeschrieben und strukturelle Veränderungen im wesentlichen nur im Rahmen der im Modell vorgegebenen Wirtschaftlichkeitsparameter zugelassen. Daher führt diese Fortschreibung u.a. auch zu einem Anstieg der CO₂-Emissionen, läuft also den Zielen von Kyoto entgegen. Auch die Entwicklung von REG verläuft vor dem Hintergrund des unterstellten Energiepreinsniveaus selbst im Rahmen der Maximalvariante (sensitivity scenario S6) relativ langsam ab. In der Basisversion erreichen REG im Jahr 2020 einen Anteil am Primärenergieverbrauch von lediglich 6,2 % (1995: 5,3 %), im Szenario S6 liegt er bei 8,4 %.

Dem gegenüber sehen die Empfehlungen des „Weißbuchs“ der EU-Kommission [Weißbuch 1997] eine Verdopplung des Anteils von REG auf etwa 12 % Anteil bereits im Jahr 2010 vor. Dieses Verdopplungsziel wurde in einer „Kampagne für den Durchbruch“ [Kampagne 1999] weiter konkretisiert. Ein Ziel ist u.a. der Ausbau der Photovoltaik von derzeit rund 100 MWp auf 3.000 MWp im Jahr 2010 bzw. auf 1.000 MWp bereits bis 2003. Auch die aus den globalen Zielsetzungen zum Klimaschutz ableitbaren „Teilziele“ für die Europäische Union verlangen deutlich größere Anstrengungen zum Ausbau der REG als es der aktuelle EU-Outlook vorsieht. Sie werden im folgenden für den Bereich der Stromversorgung den Angaben aus [Outlook 1999] gegenübergestellt .

Das wesentliche Merkmal der EU-Fortschreibung ist ein weiteres starkes Anwachsen des Stromverbrauch (**Abb. 13**, obere Kurve). Wirksame Substitutionsanstrengungen durch REG werden dadurch sehr erschwert. Als Ergebnis wächst der Anteil der REG an der Stromversorgung der EU 15 von derzeit 14 % auf lediglich 17% im Jahr 2030 und bei einer Extrapolation der Angaben aus [EU-Outlook 1999] bis 2050 auf lediglich 20 %. Die absolute Differenz zwischen Gesamtbedarf und REG-Beitrag wächst stetig. Und dies obwohl insbesondere die Windenergie und die Biomasse relativ stark ausgebaut werden, was zu einer Verdopplung des absoluten REG-Beitrags bis 2030 (**Abb. 13**, untere Kurve) führt. Zu ähnlichen Anteilen kommen auch die Szenarien der TERES – Studie [TERES 1997]. Ein alleiniger REG-Ausbau ohne gleichzeitig verstärkte Anstrengungen einer deutlich rationelleren Energie- (bzw. hier Strom-) -verwendung führt also unter den Gesichtspunkten des Klimaschutzes und der Ressourcenschonung nicht zum Ziel.

Werden dagegen die Annahmen zu einem effizienteren Stromeinsatz denjenigen des Orientierungsszenario (für Deutschland) angepasst, so kann der absolute Stromverbrauch der EU 15 nach 2010 wieder sinken und erreicht im Jahr 2030 etwa wieder das derzeitige Niveau. Die Wirksamkeit einer Substitution fossiler Energien durch REG ist in diesem Szenario dementsprechend deutlich wirksamer. Gleichzeitig verlangen die Klimaschutzziele, eine deutlich stärkere Mobilisierung von REG als im EU-Outlook angenommen. Abgeleitet aus dem globalen Ansatz des Szenarios „Solar Energy Economy (SEE)“ [Nitsch 1999; Nitsch 2001] und in Übereinstimmung mit den Vorgaben des Weißbuchs der EU sollte unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten eine Entwicklung der REG in EU 15 angestrebt, werden wie sie am Beispiel der Stromerzeugung in **Abb. 14** dargestellt ist. Der Beitrag von REG wächst danach von 325 TWh/a (1997) auf 540 TWh/a in 2010 und auf 765 TWh/a in 2030. Im Jahr 2050 erreicht er 1.500 TWh/a.

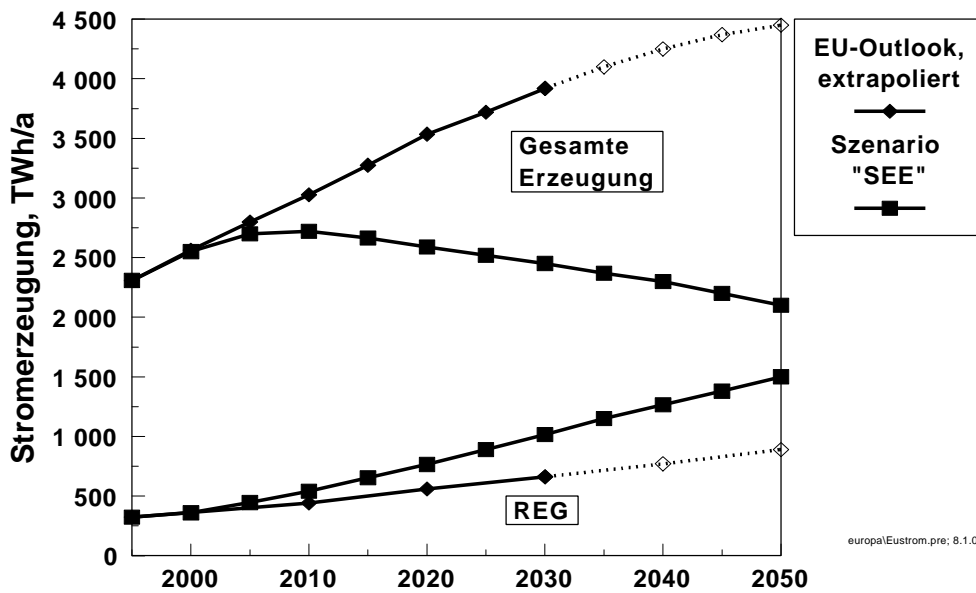


Abbildung 13: Entwicklung des zukünftigen Stromverbrauchs und des Anteils von REG in Europa (EU15) entsprechend EU-Outlook 1999 und dem Szenario: „Solar Energy Economy“ [Nitsch 2001]

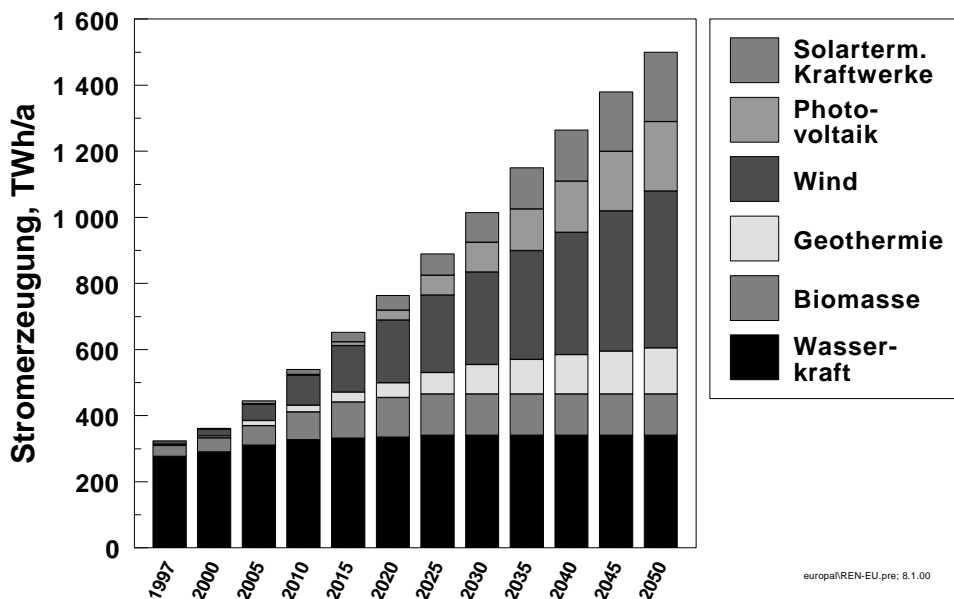


Abbildung 14: Stromerzeugung aus REG in Europa (EU 15) nach Primärenergiequellen bis zum Jahr 2050 im Szenario „SEE“ mit verstärkter REN und REG-Strategie [Nitsch 2001]

Die Struktur dieser REG-Stromversorgung zeigt, dass Im Jahr 2035 die Windenergie mit dann 130 GW Leistung die Wasserkraft als bedeutendste REG-Quelle ablöst. Aber auch alle anderen REG tragen ab 2020 mit substantiellen Anteilen zur Stromversorgung Europas bei. In Verbindung mit dem sparsamen Umgang mit Elektrizität steigen sie REG-Anteile an der Stromversorgung signifikant auf 20 % im Jahr 2010, 30 % in 2020 und 42 % in 2030 und liefern ab 2040 (55 % Anteil) den größten Beitrag zur Stromversorgung Europas.

Auf Überlegungen zur Einführung von REG im Rahmen globaler Szenarien wurde im Zusammenhang mit der Diskussion der Nachhaltigkeitsdefizite der Energieversorgung (vgl. Abschnitt 3) bereits eingegangen. Im Unterschied zur nationalen und europäischen Perspektive ist im globalen Rahmen in jedem Fall – d.h. auch bei verstärkten Anstrengungen zu einer rationelleren Energienutzung - von einem weiteren Anwachsen des Energiebedarfes auszugehen. Andererseits ist bereits der heutige globale Beitrag der REG höher als in Deutschland oder im europäischen Durchschnitt. So liefert die Wasserkraft mit 18,3 % nach der Kohle den zweitgrößten Beitrag zur globalen Stromversorgung. Alle aufgeführten Szenarien gehen von stark wachsenden Anteilen der REG an der zukünftigen Energieversorgung aus.

Im Folgenden wird auf das bereits erwähnte zielorientierte Szenario „Solar Energy Economy (SEE)“ Bezug genommen, welches die Vorgaben der IPCC für 2050 hinsichtlich der CO₂-Emissionen erfüllt, gleichzeitig aber den beträchtlichen Nachholbedarf an Energie in den Entwicklungsländern berücksichtigt. Es ist in ebenfalls in Abb. 1 (rechter Balken) aufgeführt. Der gesamte REG-Beitrag am globalen Primärenergieverbrauch beträgt dort im Jahr 2050 75 %, ist aber mit 17 Mrd. t SKE/a absolut geringer als derjenige im Shell-Szenario mit nahezu 20 Mrd. t SKE/a (Abb. 1, zweiter Balken von links). Das Szenario stellt idealtypisch die Zielsetzungen: Klimaverträglichkeit, Risikoarmut und Angleichung der globalen Lebensbedingungen einer nachhaltigen Energieversorgung für das nächste Jahrhundert dar und zeigt einen möglichen Übergang vom heutigen Zustand auf. Es kann daher als Orientierung für die erforderlichen Schritte auf globaler Ebene dienen, die in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft unternommen werden müssen, um die in Abschnitt 3 erläuterten Nachhaltigkeitsdefizite im Bereich der Energieversorgung zu verringern.

9. Ökonomische Wirkungen des Orientierungsszenarios

Der zukünftige Ausbau von REG wird insbesondere unter ökonomischen Gesichtspunkten diskutiert. Dies resultiert aus der Tatsache, dass viele REG - Technologien im Vergleich zum derzeitigen Kostenniveau der Energieversorgung teurer sind und deshalb unterschiedliche Einschätzungen über die auftretenden Zusatzbelastungen bestehen, wenn dieser Ausbau forciert wird. Adäquate Informationen zu dieser Frage müssen den dynamischen Prozess dieser Entwicklung berücksichtigen, der einerseits durch die Kostendegressionspotenziale der REG - Technologien, andererseits durch die zukünftig zu erwartenden Kostensteigerungen der konventionellen Energieversorgung bedingt ist. Die Frage ist daher nicht, ob REG „zu teuer“ sind, sondern in welchem Ausmaß und wie lange monetäre Vorleistungen zu erbringen sind, bevor sich die Investitionen in REG „rentieren“. Tatsächlich nehmen die jährlichen Investitionen in REG im Verlauf der Ausbaustrategie – entsprechend dem wachsenden Beitrag an der Energieversorgung - beträchtliche Volumina an (**Tab. 5**). Allein bis 2010 ergeben sich kumulierte Investitionen von 88 Mrd. DM. Insbesondere zeigt sich, dass die derzeit noch niedrigen Investitionen im Wärmemarkt schneller als diejenigen im Strommarkt wachsen und diese bereits um 2020 nahezu erreichen. In diesen Investitionen sind auch die erforderlichen Wärmenetze für die Nahwärmeversorgungen enthalten. In allen Zahlenangaben sind auch die erforderlichen Ersatzinvestitionen enthalten, die ab etwa 2020 relevante Werte annehmen (Nutzungsdauern der REG-Anlagen zwischen 15 a (Wind) bis 30 a (Wasserkraft, Wärmenetze).

Tabelle 5: Jährliche Investitionen in REG-Technologien (Mio. DM/a, Geldwert 1999) im Orientierungsszenario bis zum Jahr 2050

	1999	2010	2020	2030	2040	2050
Stromversorgung *) ⁸	4331	5845	11360	14158	18450	23635
Wärmeversorgung **)	1339	5143	10087	14335	20212	26079
Gesamt	5670	10988	21447	28493	38662	49714
Anteil an PEV (%)	1,7	4,3	9,2	18,7	30,3	42,6

*) ab 2015 einschl. Investitionen für Solarstromimport; **)einschließlich Nahwärmenetze

Die bis dahin sich deutlich vergrößernden Märkte führen allerdings auch zu deutlich Kostendegressionen. Dazu zeigt sich z.B. in **Abb. 15** am Kostenverlauf der zukünftigen REG - Stromversorgung auf der Basis des Orientierungsszenarios. Zwischen 2000 und 2010 dominiert zunächst die zukünftige Kostenentwicklung der Windenergie die mittleren Stromgestehungskosten des Gesamtausbaus, da sie über 70 % zum Zubau in diesem Zeitraum beiträgt. Bis 2010 sinken die mittleren Kosten von 0,178 DM/kWh (2000) auf 0,148 DM/kWh. Nach 2010 kommt die Degression zum Stillstand, obwohl bei der Windenergie auch danach noch von weiteren Kostensenkungen (Offshore-Anlagen) ausgegangen werden kann. Einerseits liegt die nun stärker dominierende Biomasse in einem ähnlichen Kostenband um 0,14-0,16 DM/kWh. Zum anderen wird von einem anhaltenden Wachstum der Photovoltaik ausgegangen, die trotz deutlicher Kostendegressionen in diesem Zeitraum immer noch mittlere

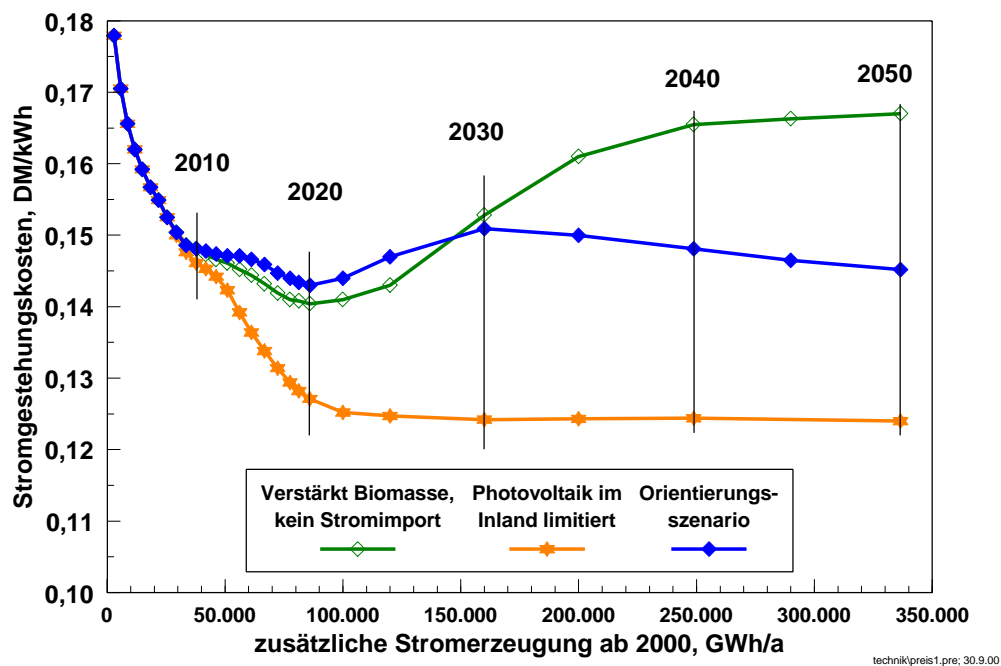


Abbildung 15: Stromkosten von REG für den Ausbaue Zeitraum 2000 bis 2050 für unterschiedliche Ausbaupfade. Dargestellt sind die mittleren Kosten des jeweiligen Bestandes (ohne „Altanlagen“ bis 1999); der Nullpunkt der Kostenskala ist unterdrückt.

⁸ Die Aufwendungen für den Solarstromimport (einschließlich der Übertragungsleitungen) sind hier als Investitionen ausgewiesen um die Differenzkosten voll erfassen zu können. Nach einer Übergangszeit wird der Strom zu kostendeckenden Preisen importiert werden und die weiteren Investitionen würden von den Standortländern bzw. global agierenden Energieunternehmen getätigt. An die Stelle von importiertem Rohöl tritt – allerdings in geringem Ausmaß – importierter Solarstrom (und später möglicherweise importierter regenerativer Wasserstoff).

Stromgestehungskosten zwischen 0,80 und 0,50 DM/kWh aufweist (Neuanlagen in 2020: 0,35 DM/kWh). Geringfügig kompensierend wirkt sich die beginnende Stromerzeugung aus Geothermie aus, für die nach Ablauf der Demonstrationsphase Kosten von 0,12 DM/kWh angenommen wurden. Der Stromimport liegt mit Kosten zwischen 0,16 DM/kWh (2015) und 0,14 DM/kWh (2020) in vergleichbarer Höhe. Im Jahr 2020 stellen sich danach in der Basisentwicklung des Orientierungsszenarios mittlere Stromgestehungskosten von 0,145 DM/kWh ein mit leicht steigender Tendenz.

Verlängert man bei stetigem weiteren Wachstum regenerativer Energien den Betrachtungszeitraum bis 2050, so bleibt das Kostenniveau, mit leichten Schwankungen, stabil zwischen 0,14 und 0,15 DM/kWh. Wind-, Geothermie- und Importstrom kompensieren in diesem Szenario näherungsweise die mit dem weiteren Photovoltaikausbau verbundenen höheren Kosten. Variationen der Basisentwicklung werden bis 2010 weitgehend durch die starke Dynamik der Windenergie überlagert. Limitiert man beispielhaft den Ausbau der Photovoltaik bei einem Beitrag von 1 TWh/a (**Variante I: PV im Inland limitiert**), so setzt sich nach 2010 die Kostendegression zunächst abgeschwächt, danach wieder stärker (wegen des Stromimports) fort und mündet in einem langfristig stabilen Kostenniveau für REG-Strom um 0,125 Pf/kWh. Schließt man dagegen den Import von Strom aus REG aus, so wird dies zunächst einen stärkeren Ausbau der Biomasse und der noch verfügbaren Windenergie induzieren als im Basisausbau angenommen ist. Dies führt zu einem etwas geringeren mittleren Kostenniveau um das Jahr 2020 mit knapp 0,140 DM/kWh (**Variante II: kein Stromimport**). Nachdem deren Potenziale aber weitgehend ausgeschöpft sind, verteuert sich die Strombereitstellung, da nun verstärkt auf die Photovoltaik zurückgegriffen wird. Nach 2040 stellt sich ein Kostenniveau von 0,165 DM/kWh ein. Eine langfristig angelegte Ausbaustrategie wird also aus deutscher Sicht nicht ohne Import von REG auskommen, was nicht anderes bedeutet, als REG möglichst an den jeweils günstigsten Standorten zu nutzen, sobald es darum geht, in größerem Umfang fossile und nukleare Energien zu ersetzen. Ein wesentliches Strategieelement des Orientierungsszenarios stellt daher die optimale Abwägung zwischen der (zeitlich früheren) lokalen und regionalen Nutzung von REG und der (zeitlich nachfolgenden) überregionalen Nutzung in einen europäischen bzw. sogar mediterranen Energieverbund dar [TAB 2000].

Die entstehenden Differenzkosten (Kapitalkosten, Betriebs- und Wartungskosten, Brennstoffkosten bei Biomasse abzüglich der Erlöse **ohne** Förderung) des Orientierungsszenarios hängen selbstverständlich stark von den anlegbaren Kosten einer Energieversorgung ohne Ausbau der REG und damit von der zukünftigen Energiepreisentwicklung und der Besteuerung konventioneller Energien ab. In 1999 betragen die resultierenden Differenzkosten für die bis zum Jahresende installierten Anlagen knapp 2 Mrd. DM/a, wenn von anlegbaren Strompreisen von 6 Pf/kWh und Wärmepreisen von 9,4 Pf/kWh ausgegangen wird (vgl. Tabelle). Diese Differenzkosten werden durch die vorhandenen Förderinstrumente (EEG, Förderprogramme von Bund, Ländern und Kommunen, durch zinsverbilligte Kredite sowie durch Eigenleistungen von Energieversorgern, Unternehmen und Bürgern [BMU 2000]) aufgebracht. Umgelegt auf die gesamte Strom- bzw. Wärmeerzeugung entspricht dies derzeit spezifischen Mehrkosten von $0,25 \text{ Pf/kWh}_{\text{el}}$ und $0,05 \text{ Pf/kWh}_{\text{th}}$, ist also im Vergleich zu anderen Energiepreisveränderungen gering.

Die zukünftige Entwicklung der Differenzkosten gibt Aufschluss über die aufzubringenden Vorleistungen zur Erschließung der REG-Märkte, über die Zeitdauer einer erforderlichen Unterstützung und über die Art und Intensität dazu erforderlicher Instrumente. In **Abb. 16** sind sie als Funktion der Preisentwicklung einer Energieversorgung ohne weiteren Ausbau der REG im zeitlichen Verlauf von 2000 bis 2050 dargestellt. Die dazugehörigen angenommene Preisentwicklung zeigt **Tab. 6** Die angenommenen Preissteigerungen reichen von sehr geringen Werten (Variante 0: bis 2020 10 % reale Steigerung (Strom bis 2010 konstant), bis

Tabelle 6:

Angenommen Entwicklung realer anlegbarer Preise für die Strom- und Wärmebereitstellung aus regenerativen Energien (Geldwert 1999); S = Mittlere Stromgestehungskosten ohne REG, Ausgangswert 2000: 6,0 Pf/kWh_{el} (=100); W = Mittelwert einer betrachteten Bandbreite von Wärmegestiegungskosten auf der Basis von Heizöl und Erdgas, (Einzelheizung; Großabnehmer, Nahwärmeversorgungen), Ausgangswert 2000: 9,4 Pf/kWh_{th} (=100)

Varianten	0		1a		1b		2b		3c	
	S	W	S	W	S	W	S	W	S	W
2000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2005	100	102	103	102	105	102	105	104	110	106
2010	100	105	105	105	110	105	110	109	120	113
2020	110	110	122	111	135	111	135	118	145	130
2030	128	117	150	123	173	123	173	137	190	157
2040	150	127	182	140	223	140	223	163	248	197
2050	173	141	223	162	285	162	285	197	325	250

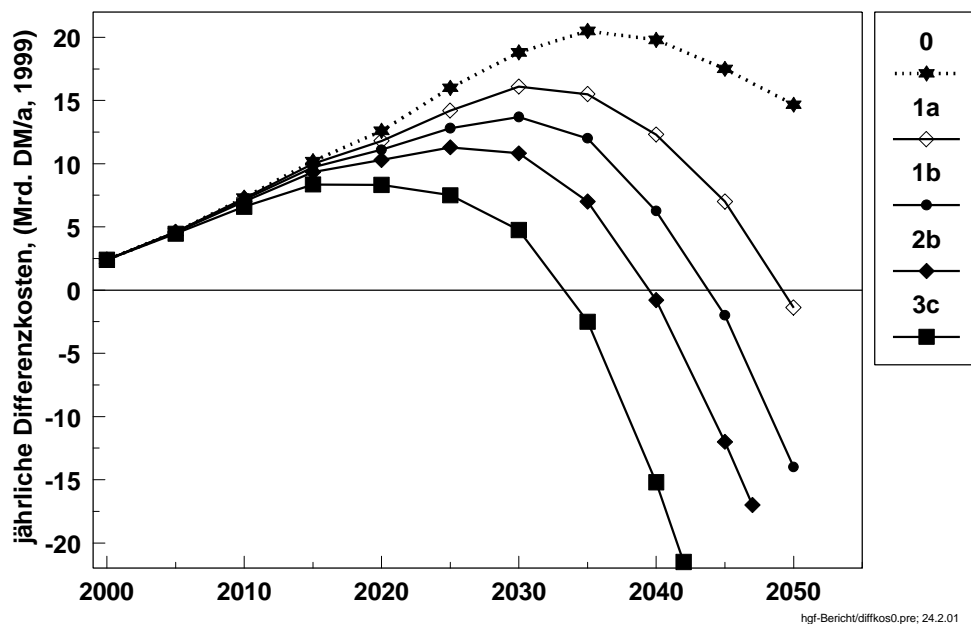


Abbildung 16 : Verlauf der jährlichen Differenzkosten im Orientierungsszenario gegenüber einer Energieversorgung ohne Einführung von REG in Abhängigkeit unterschiedlicher Preissteigerungen von Strom- und Wärmepreisen auf fossiler Basis (vgl. Tab. 6)

2050 bei Strom 70 %, bei Wärme 40 %; wobei der Ausgangswert für Strom wegen des gegenwärtigen Überangebots und der laufenden Marktberaumigungsprozesse außerordentlich niedrig ist) bis zu deutlichen Steigerungen (Variante 3c: bis 2020 bei Strom 45 %, bei Wärme 30 %, bis 2050 bei Strom eine reichliche Verdreifachung, bei Wärme eine Steigerung auf das 2,5fache). In dieser Variante verdoppeln sich die Preise für Gas und Heizöl bis 2030; bis

2050 vervierfachen sie sich etwa. Angesichts der langen Zeiträume sind derartige Preissteigerungen durchaus realistisch, bis 2030 sind ähnliche Annahmen in [Prognos 2000] und [FEES 2001] zu finden. In allen Varianten sind die anfänglichen Steigerungsraten (bis 2010) sehr gering, nehmen aber nach 2020 deutlich zu.

Ersichtlich ist die Notwendigkeit, den Prozess der Markteinführung von REG über einen angemessen langen Zeitraum zu betrachten, da sich die volkswirtschaftliche Vorteilhaftigkeit einer REG-Ausbaustrategie im wesentlichen erst im Zeitabschnitt nach 2020 zeigt. Die anfängliche Kostendifferenz und die angenommenen Markteinführungsgradienten der Einzeltechnologien führen zunächst – auch unter Berücksichtigung der möglichen Kostendegressionen - zu stetig steigenden Differenzkosten. Sie unterscheiden sich in den Varianten bis zum Zeitpunkt 2010/2015 wegen des zunächst schwachen Preisanstiegs fossiler Energien kaum und liegen für das Orientierungsszenario im Jahr 2010 zwischen 6,6 Mrd. DM/a für Variante 3c und 7,4 Mrd. DM/a für Variante 0 (ca. 0,75 Pf/kWh_{el} und 0,22 Pf/kWh_{th}). Die Kostenschere schließt sich danach unterschiedlich rasch. Bei geringfügigen Preisanstiegen (V 0) steigen die Differenzkosten noch bis zum Jahr 2040 auf dann 19,8 Mrd. DM/a: Aber auch in dieser ungünstigen (und unwahrscheinlichen) Entwicklung beträgt die spezifische Belastung maximal 1,5 Pf/kWh_{el} bzw. 1,4 Pf/kWh_{th} und sinkt danach wieder. Bei höheren Preissteigerungen (V 3c) ist bereits 2015 mit 8,4 Mrd. DM/a (0,95 Pf/kWh_{el} und 0,27 DM/kWh_{th}) der Maximalwert erreicht, zwischen 2030 und 2035 wird die Energiebereitstellung mittels REG im Mittel kostengünstiger als eine bis dahin allein auf konventionelle Energien sich abstützende Energieversorgung. Während sich die kumulierten Differenzkosten dieser Variante bis 2030 noch auf 195 Mrd. DM (Geldwert 1999; nicht abdiskontiert) belaufen, ergibt sich kumuliert von 2000 bis 2045 eine ausgeglichene Bilanz. Die bis 2030 erbrachten Vorleistungen in eine nachhaltige Energieversorgung würden sich also bei dem in der Variante 3c unterstellten Verlauf der fossilen Energiebereitstellungskosten bereits um das Jahr 2045 voll amortisiert haben. Externe Kosten der Energiebereitstellung sind dabei noch gar nicht berücksichtigt.

Andererseits ist auch ersichtlich, dass Kostendegression und technologischer Fortschritt bei REG allein nicht ausreichen werden, gegen eine fossile Energiewirtschaft zu konkurrieren, wenn von reichlich verfügbaren Energierohstoffen – also etwa einem Mehreinsatz von Kohle oder von nichtkonventionellen Erdöl (Ölschiefer, Teersände u.ä.) als Ersatz für Öl und später Erdgas - und damit von höchstens gering steigenden Energiepreisen ausgegangen wird (Variante 0) und externe Kostenbetrachtungen außer acht gelassen werden. Die kumulierten Differenzkosten dieser Variante belaufen sich nämlich bis 2030 bereits auf 310 Mrd. DM (Geldwert 1999, **nicht** abdiskontiert) und steigen auch danach weiter (2000-2050: 675 Mrd. DM). Der verstärkte Kohleeinsatz würde aber zu unkalkulierbaren externen Kosten (Verstärkung des Treibhauseffekts) führen, die gerade bei einer derartigen Strategie berücksichtigt werden müssten.

Ebenfalls zeigt sich, dass der begonnene REG-Einführungsprozess mit der Flankierung durch wirksame energiepolitische Instrumente bis gut 2015 durchgehalten werden muss, um den weiteren Ausbau sicherzustellen und den sich erst längerfristig einstellenden Nutzen absichern zu können. Die aufzubringenden Differenzkosten, die derzeit rund 2 Mrd. DM/a betragen, liegen zu diesem Zeitpunkt bei 8 bis 10 Mrd. DM/a (die bis dahin kumulierten Investitionen bei 156 Mrd. DM) und müssen durch entsprechende Instrumente aufgebracht werden. Angesichts der Größenordnung kann dies höchsten noch punktuell durch direkte Förderung geschehen (z.B. Photovoltaik; Solare Nahwärme, HDR-Stromerzeugung), vielmehr bieten sich marktwirtschaftlich orientierten Instrumente, wie das jetzige EEG (mit entsprechender Weiterführung der Kostendegression) oder eine Quotenregelung mit Zertifikatehandel an [Öko/DLR 2001].

10. Zusammenfassung der Wirkungen eines deutlichen Ausbaus von REG

Die gesamtsystemaren Wirkungen eines stetigen REG - Ausbaus in der Energieversorgung werden mittels eines „**Orientierungsszenarios**“ beschrieben, welches – auf der Basis der ermittelten differenzierten Technologie- und Kostenpotenziale, sowie der strukturellen Erfordernisse – die Integration eines repräsentativen REG-Technologiemix in die deutsche Energieversorgung über fünf Jahrzehnte beschreibt. Dieser lange Zeitraum ist erforderlich, um den gesamten Prozess einer REG-Einführung – 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 energiewirtschaftlichen Struktur des Szenarios liegt dagegen ein Zielkatalog zugrunde, der den angestrebten Zustand der wesentlichen energierelevanten Nachhaltigkeitsindikatoren bis zum Jahr 2050 enthält. Das Szenario lässt sich auf Grund dieses Zielkatalogs in die Kategorie der Nachhaltigkeitsszenarien einordnen. Es beschreibt Wirkungen der Strategieelemente „Effizienz“ und „Konsistenz“.

Der Ausbau der REG-Schlüsseltechnologien im Rahmen des hier beschriebenen Orientierungsszenarios hat zusammenfassend folgende **Wirkungen auf Umwelt, Volkswirtschaft und Gesellschaft**:

- Mit rund 2.800 PJ/a tragen REG im Jahr 2050 zu 45 % zum (bis dorthin um 35 % reduzierten) **Endenergieverbrauch** bei. Im Jahr 2020 erreicht der Beitrag rund 900 PJ/a, was einem Anteil von knapp 12 % entspricht (1999: 190 PJ/a). Die technischen Potenziale der Einzeltechnologien erlauben nach 2050 einen weiteren Ausbau bis zu einer prinzipiell 100 %-igen Deckung des Energiebedarfs durch REG. Von wachsender Bedeutung wird dabei der Verkehrssektor, der im Orientierungsszenario beim REG-Ausbau noch nicht berücksichtigt wurde (regenerativer Wasserstoff).
- Zur Reduktion der **CO₂-Emissionen** im Orientierungsszenario zwischen **1999 und 2050** um insgesamt 610 Mio. t/a tragen REG mit rund 220 Mio. t/a bei, mit den derzeit bereits vermiedenen Emissionen von knapp 20 Mio. t/a [BMU 2000] sind es insgesamt 240 Mio. t/a. Weitere 90 Mio. t/a stammen aus der Verschiebung des fossilen Brennstoffmixes hin zu Erdgas; insgesamt 300 Mio. t/a tragen die verstärkte rationelle Energienutzung (d.h. über die Trendentwicklung hinaus) einschließlich des Ausbaus der Kraft-Wärme-Kopplung bei. Daran zeigt sich auch die Gleichwertigkeit der Teilstrategien: „Verstärkte rationellere Energienutzung“ und „Ausbau regenerativer Energien“. Die im Jahr 2050 verbleibenden CO₂ - Emissionen liegen mit 225 Mio. t/a bei 23% des Bezugswertes von 1990; die CO₂-Intensität des gesamten Endenergieverbrauchs beträgt 0,037 t/GJ und hat sich damit gegenüber 1999 mit 0,090 t/PJ deutlich verringert.
- Im Jahr **2020 betragen die CO₂-Emissionen 650 Mio. t/a** (= 66% von 1990), bis 2010 werden die Kyoto-Reduktionssziele (Reduktion um 21% bis 2008 – 2012) mit – 25% erreicht. Die CO₂-Intensität des Endenergieverbrauchs reduziert sich wegen des Rückgangs der Stromerzeugung aus Kernenergie bis 2020 in diesem Zeitabschnitt erst relativ gering auf 0,085 t/GJ). Für Strom (Endenergie) allein beträgt die CO₂ – Intensität dann 0,56 kg/kWh_{el} (1999: 0,62).
- Das zur Erfüllung der Zielvorgaben erforderliche **Wachstum der REG-Technologien** kann von einer modernen Industriegesellschaft leicht bewältigt werden. Die jährlichen

Wachstumsraten der Märkte erreichen im Mittel des ersten Jahrzehnt (2000-2010) 20 %/a, kurzfristig können Werte um 30 %/a auftreten. Das Beispiel des Wachstums der Windenergie zwischen 1995 und 2000 mit durchschnittlich 50 %/a zeigt, dass Fertigung, Vertrieb und Installation flexibel genug sind, wenn entsprechend günstige Rahmenbedingungen vorliegen. Für einen effektiven Einstieg in die Energiewirtschaft wesentlich ist eine optimale Abstimmung des Wachstums der Einzeltechnologien untereinander. Während preiswerte und technisch schon weiter entwickelte Technologien (Windenergie, Verbrennung von Biomasse, restliche Wasserkraft) zunächst den Hauptanteil des wachsenden REG-Anteils leisten, müssen noch wenig eingeführte und i.allg. teurere Technologien (Solarkollektoren, Erdwärme, Vergasungstechnologie für Biomasse, Photovoltaik) in ihrer Entwicklung, Demonstration und Markteinführung so unterstützt werden, dass sie ab 2010 in relevanter Form am Marktgeschehen teilnehmen können. Sie haben in dieser Phase daher die höchsten Wachstumsraten und binden den größeren Teil der aufzuwendenden Mittel.

- Die mit dem Ausbau von REG verknüpften **ökologischen Belastungen** entstehen im wesentlichen **durch die Anlagenherstellung**. Im Jahr 2050 (REG – Anteil 45 %) werden für einen Inlandsmarkt von dann 50 Mrd. DM/a für Neubau und Ersatz von REG-Anlagen 4,8 % der Stahlproduktion (Umsatz 1999), 5,8 % der NE-Metalle und 0,4 % der Steine/Erden-Produktion benötigt. Vergleichsweise wird derzeit 25 % der Stahlproduktion im Fahrzeugbau und 20 % im Baugewerbe eingesetzt.⁹ Wird verstärkt eine Erhöhung der Rezyklierungsquote von Rohstoffen angestrebt, so erleichtert dies den REG - Ausbau, da die eingesetzten Materialien weitgehend wieder genutzt werden können. Die im Mittel höhere Materialintensität von REG - Anlagen, verglichen mit fossil betriebenen Kraftwerken oder Heizungen, ist kein gravierendes Hindernis für deren Ausbau. Andere Industrie- und Konsumgüter beanspruchen deutlich höhere Materialmengen; steigende Rückführungsquoten von Basismaterialien und eine zunehmend emissionsärmere Energiebereitstellung (vgl. sinkende CO₂ – Intensität) entschärfen diese Problematik generell. Kontaminierte Materialien entstehen bei einem REG – Ausbau praktisch nicht. Die problematischsten Herstellungsprozesse (Wafer für Solarzellen) verlangen in jedem Fall ein ordnungsgemäßes Recycling, wie es z.B. in der chemischen Industrie üblich und vorgeschrieben ist.
- **Weitere ökologische Belastungen** eines REG-Ausbaus können bei sorgfältiger Planung (z.B. Windvorrangflächen), Leistungsbegrenzung (Wasserkraft), entsprechenden Auflagen (Wasserkraft; Emissionen bei Biomassenutzung), in Gesamtkonzepten eingepasste Nutzung (Holz, Energiepflanzen), angepasste Siedlungskonzepte (Dachflächen- und Fassadennutzung) und einer möglichst rationellen Energienutzung verglichen mit alternativen Optionen weitgehend vermieden werden.
- Der Ausbau der REG-Technologien entwickelt sich bei den angenommenen Ausbauraten zu einem beachtlichen **Wirtschaftsfaktor**. Die jährlichen Investitionsvolumina für den Inlandsmarkt steigen von derzeit knapp 6 Mrd. DM/a auf 11 Mrd. DM/a in 2010, auf 28 Mrd. DM/a in 2030 und auf 50 Mrd. DM/a in 2050 (Tabelle 2). Der letzte Wert entspricht etwa dem Wert der Mineralölimporte des Jahres 2000 (46 Mrd. DM/a), stellt also für die Energiewirtschaft einerseits keine neuartige Situation dar. Andererseits werden diese Mittel zum größten Teil im Inland verausgabt was zu erheblichen Strukturveränderungen in der Vorleistungsstruktur der Energieversorgung. Ressourcenkonsum (Energieträgerimport) wird durch investive Maßnahmen ersetzt, was einer nachhaltigeren Wirtschaftsweise deutlich entgegenkommt.

⁹ Es sei daran erinnert, dass das Orientierungsszenario im Jahr 2050 von der 2-fachen Wirtschaftleistung des Jahres 1999 ausgeht. Dies verringert die genannten Anteile im Vergleich zu anderen Wirtschaftstätigkeiten.

- Die Investitionen des Jahres 2050 entsprechen schätzungsweise 250.000 Bruttoarbeitsplätzen. Berücksichtigt man Verdrängungseffekte¹⁰, so dürften durch den REG - Anteil zu diesem Zeitpunkt rund 100.000 Nettoarbeitsplätze entstanden sein, etwa ein Viertel der derzeit in der Energieversorgung Beschäftigten. Hauptgründe für die **positive Arbeitsplatzbilanz** ist einerseits der Ersatz von Energieimporten durch überwiegend inländisch erzeugte Güter und Dienstleistungen und andererseits die Tatsache, dass die Arbeitsintensität zur Herstellung von REG - Techniken i.allg. höher ist, als die zur Bereitstellung konventioneller Energieträger. Die Arbeitsplätze beruhen einerseits auf vielfältigem technologischem Wissen in den (eher größeren) Fertigungsstätten der unterschiedlichen Anlagen (etwa vgl. dem heutigen Automobilbau, jedoch vielfältiger), zum andern auf der dezentral erforderlichen Installation, Überwachung und Wartung zahlreicher Anlagen, sowie im Fall der Biomasse auf die Brennstoffbereitstellung in ländlichen Räumen; insgesamt also auf einer relativ krisenfesten Mischung und einer größeren Branchen- und Unternehmensvielfalt.
- Die Substitution fossiler Energien durch REG (sowie durch rationelleren Energieeinsatz) verringert die Importabhängigkeit bei der Energieversorgung. Derzeit beträgt die Importquote rund 60 % (ohne Kernbrennstoffe); im Jahr 2050 liegt sie unter Berücksichtigung des Solarstromimports bei 35 %. Die **Versorgungssicherheit** wird durch die erweiterte Nutzung der „heimischen“ Energiequelle REG deutlich erhöht. Parallel dazu erfolgt eine zunehmende **Abkopplung von zu erwartenden Preisanstiegen** bei fossilen Energierohstoffen. Die verbleibenden bzw. neu entstehenden Importverflechtungen können auf konstruktive Weise zum Abbau von Nord-Süd-Ungleichgewichten eingesetzt werden (s. nächster Punkt).
- Die im Orientierungsszenario beschriebene Entwicklung kann nicht isoliert in Deutschland ablaufen. Abgesehen von Vorreitereffekten, die aus Wettbewerbssicht für einen gewissen Zeitraum Vorteile erbringen können, muss eine vergleichbare Entwicklung EU-weit und letztlich global stattfinden. Die dezentralen REG - Technologien fügen sich, wie andere Massengüter, sehr gut in einen globalen Güterhandel ein. Sie erlauben – in unterschiedlichem Ausmaß – arbeitsteilige **Kooperationen zwischen Industrie- und Entwicklungsländern**, sind unproblematisch handelbar, ungefährlich und kaum missbrauchsfähig. Speziell für Europa bietet eine verstärkte Kooperation im mediterranen Raum erhebliche Chancen für eine beiderseitige „win-win“ Situation im Bereich der Energieversorgung. Länder mit großen solaren Ressourcen in Nordafrika können mit Hilfe der EU-Staaten solare Energieversorgungsstrukturen für sich selbst aufbauen, längerfristig Anteile des Energiebedarfs der nördlichen EU-Länder mit solaren Energien (Strom, Wasserstoff) decken und sich somit eine wichtige Einkommensquelle verschaffen. Dies wird im Orientierungsszenario am Beispiel des Imports von Solarstrom berücksichtigt. Eine weitere längerfristige Möglichkeit stellt der Import von regenerativem Wasserstoff für den Verkehrssektor dar.
- 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. Politische Zielsetzungen in dieser Hinsicht sind sowohl auf EU- als auf nationaler Ebene bis zum Zeitraum 2010, teilweise auch darüber hinaus (Deutschland, Dänemark) formuliert worden. Auch geeignete Instrumente existieren in Form von garantierten Einspeisevergütungen (EEG), Quotenregelungen, Handel mit Umweltzertifikaten u.ä. in den

¹⁰ Hohmeyer 1997; Ziegelmann, Markewitz u.a. 2000

meisten europäischen Ländern. Die EU – Kommission strebt eine Harmonisierung dieser Instrumente an.

- Die Unterstützung der REG muss ausreichend lang bestehen, aus heutiger Sicht – abgestuft nach Technologien – bis etwa zum Jahr 2020. Dies verlangt eine außerordentlich langatmige und zielstrebige Energiepolitik. Die entsprechenden **Vorleistungen** (derzeit rund 2 Mrd. DM/a) im Orientierungsszenario wachsen für den Inlandsmarkt auf rund 7 Mrd. DM/a im Jahr 2010 und auf rund 10 Mrd. DM/a im Jahr 2020. Die durch die Vorleistungen hervorgerufenen spezifischen Mehrbelastungen sind für die Konsumenten relativ gering. Sie belaufen sich beim Strom auf maximal 1 Pf/kWh_{el}, bei Brennstoffen auf maximal 0,7 Pf/kWh_{th}. Je nach Anstieg konventioneller Energiepreise kann sich die Vorleistung in den REG-Ausbau bereits bis 2050 voll amortisiert haben, da ab 2035/2040 die im Orientierungsszenario bereitgestellte Energie kostengünstiger als diejenige ohne REG-Ausbau sein dürfte.
- Das für einen selbsttragenden REG- Ausbau erforderliche **Strom- bzw. Wärmekostenniveau liegt bei etwa dem Zweifachen der heutigen Werte** (Strom und Wärme aus Neuanlagen). In den berücksichtigten Preisvarianten wird dieses Niveau zwischen 2030 und 2050 erreicht. Gleichzeitig kann der absolute Endenergieverbrauch im Orientierungsszenario bis 2050 im Mittel auf rund 65 % des heutigen Wertes reduziert werden. Die jährlichen Energieausgaben der Verbraucher würden sich also durchschnittlich um real rund 30 % erhöhen. Das bis dahin verfügbare Pro-Kopf-Einkommen liegt jedoch nach den Szenarioannahmen ebenfalls beim Zweifachen des heutigen Wertes, so dass insgesamt die Energiekostenbelastung für die Konsumenten geringer ausfällt als heute. Die Energiekosten einer weitgehend auf REG beruhenden Energieversorgung stellen daher aus sozialverträglicher Sicht kein wesentliches Hindernis dar.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass eine deutliche Erhöhung des Anteils von REG 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 Verbindung 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.¹¹ In Vorbereitung auf eine effektive Marktteilnahme von REG müssen solange 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.

¹¹ . Dies gilt in noch deutlicherem Maße für zahlreiche andere Länder, die bei der rationellen Energienutzung bisher noch weniger Fortschritte als Deutschland zu verzeichnen haben (bei den Industrieländern insbesondere USA; aber auch die osteuropäischen Staaten , sowie Russland; auch nahezu alle Entwicklungsländer)

11. Literatur

- Altner et al. 1995 G. Altner, H.P. Dürr, G. Michelsen, J. Nitsch. „Zukünftige Energiepolitik – Vorrang für rationelle Energienutzung und regenerative Quellen.“ Economica-Verlag, Bonn, 1995
- Anhörung 2000 J. Kopfmüller, R. Coenen, J. Nitsch et al.: „Konkretisierung und Operationalisierung des Leitbilds Nachhaltige Entwicklung für das Aktivitätsfeld Energie“. Beantwortung des Fragenkatalogs der Enquete-Kommission: Nachhaltige Energieversorgung; ITAS Karlsruhe; DLR Stuttgart, Sept. 2000
- BMU 1997 BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit). Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung in Deutschland. Bericht der Bundesregierung anlässlich der UN-Sondergeneralversammlung über Umwelt und Entwicklung im Juni 1997 in New York, Bonn 1997
- BMU 1998 Nachhaltige Entwicklung in Deutschland. Entwurf eines umweltpolitischen Schwerpunktprogramms, Bonn 1998
- BMU 2000 J. Nitsch, M. Fishedick, N. Allnoch, F. Staiß u.a.: Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien. Studie im Auftrag des BM für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Umweltbundesamtes, Berichte des UBA 2/00, Erich Schmidt Verlag Berlin, 2000
- BMW i 1999 DIW, EWI, ISI, Öko-Institut, Prognos, RWI, Wuppertal-Institut: „Energie-wirtschaftliche Voraussetzungen und energiepolitische Handlungsmöglichkeiten für eine zukunftsfähige Energieentwicklung in Deutschland – wissenschaftliche Begleitung des Energiedialogs; Kapitel 2 des Zwischenberichts an das BMWi, Berlin 1999.
- Eichelbrönner/Henssen 1998 M. Eichelbrönner, H. Henssen: Langfristige Aspekte der Energieversorgung. Ergebnisse eines Diskussionsprozesses, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Vol. 48 (1998), Nr. 8, S. 496-500
- Enquete 1995 Enquête-Kommission des 12. Deutschen Bundestags „Schutz der Erdatmosphäre“ (Hrsg.): Mehr Zukunft für die Erde - nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz, Bonn 1995
- ESU 1996 ESU, Ökoinventare von Energiesystemen. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen. R. Frischknecht et.al. Zürich 1996
- EU-Outlook 1999 European Union Energy Outlook to 2020. EU-Commission, DG XVII, The Shared Analysis Project, Special Issue, Nov. 1999
- FEES 2001 Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalyse, Modelleexperiment II. Executive summary (Rev.01) und Rahmendaten. Download www.ier.uni-stuttgart.de
- Fishedick 1999 M. Fishedick, D. Wolters. Globale Energieszenarien als Basis für die Marktanalyse von Zukunftstechnologien, VDI-Berichte 1457, Fortschrittliche Energiewandlung und –anwendung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999
- Hartmann 1998 D. Hartmann, M. Kaltschmitt: Von der Wiege bis zur Bahre. Vergleich der gesamten Emissionen einer Stromerzeugung aus regenerativen Energien. BWK 50 (1998), S. 56-61.

HBS 2000	Hans-Böckler-Stiftung: Wege in eine nachhaltige Zukunft. Verbundprojekt von DIW Berlin, WZB Berlin und Wuppertal-Institut, Düsseldorf, Juli 2000
Hohmeyer 1997	O. Hohmeyer: Beschäftigungseffekte durch die Umsetzung einer REN- und REG-Strategie. Expertise im Rahmen des Projekts „Zukünftige Energiepolitik“, Phase II (Gruppe Energie 2010), Mannheim, Dezember 1997
ISI/Siemens 1997	E. Tönsing et al., Energieszenarien mit reduzierten CO ₂ -Emissionen bis 2050, Energiewirtschaftliche Tagesfragen (42), Heft 8, S. 474 ff, 1997
Johansson 1993	T. B. Johansson, H. Kelly et al.: Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity. Island Press, Washington DC, 1993
Kampagne 1999	EU-Vommission: Renewable Sources of Energy, „Campaign für Take-off.“ Service Paper DOCSEC (99)504, Brussels, april 1999.
Langniß et al. 1997	O. Langniß, J. Nitsch, J. Luther, E. Wiemken, Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung – Ein solares Langfristszenario für Deutschland. Studie von DLR Stuttgart und Fraunhofer Institut ISE Freiburg, Stuttgart, Freiburg, Oktober 1997
Long-Term 1998	LTI-Research Group (Ed.). Long-Term Integration of Renewable Energy Sources into the European Energy System. Physica-Verlag, Heidelberg, New York. 1998
Lovins/Hennicke 1999	P. Hennicke, A. Lovins. Voller Energie – Die globale Faktor Vier-Strategie für Klimaschutz und Atomausstieg. Campus Verlag, 1999
Matthes 2000	F.Chr. Matthes, M. Cames. Energiewende 2020 – Der weg in eine zukunftsfähige Energiewirtschaft. Öko-Institut. Studie im Auftrag der Heinrich Böll Stiftung (Hrsg.), Berlin, Juli 2000.
Nitsch 1999	J. Nitsch: „Entwicklungsperspektiven erneuerbarer Energien und ihre Bedeutung für die Energieversorgung von Entwicklungsländern.“ In Tagungsband zur Tagung: „Märkte der Zukunft – Erneuerbare Energien für Entwicklungsländer. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Friedrichshafen, 127.1.1999.
Nitsch 2001a	J. Nitsch, F. Staiß. Strategies of Introducing Renewable Energies. In: Photovoltaic Guide Book for Decision Makers, Chapter 1, Veröffentlichung in Vorbereitung.
Nitsch 2001 b	J. Nitsch, C. Rösch u.a.: Schlüsseltechnologie Regenerative Energien. Teilbericht im Rahmen des HGF-Verbundprojekts: Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland, Stuttgart, Karlsruhe, Februar 2001.
Pehnt 2000	M. Pehnt: Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen. Dissertation, DLR – Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart 2000
Politik 1999	G. Stein, B. Strobel (Hrsg.). Politikszenerarien für den Klimaschutz II. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO ₂ -Emissionen in Deutschland bis 2020. DIW Berlin, FZ Jülich, FhG-ISI, Öko-Institut. Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin. In Schriften des FZ Jülich, Reihe Umwelt/Environment, Band 20, Jülich.1999.
Prognos 1998	Prognos AG: „Möglichkeiten der Marktanzreizförderung für erneuerbare Energien auf Bundesebene unter Berücksichtigung veränderter wirtschaftlicher Rahmenbedingungen“. Studie im Auftrag des BMWI, Bonn Dezem-

ber 1998

- Prognos 2000 Prognos AG, EWI: Energiereport III - Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart 2000
- Prognos 2001 Prognos AG: Szenarienerstellung – soziodemographische und ökonomische Rahmendaten. Zwischenbericht für die Enquete-Kommission: „Nachhaltige Energieversorgung“ des Dt. Bundestages, Basel, Februar 2001.
- Quaschnig 1999 V. Quaschnig: Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert, Habilitationsschrift, TU Berlin 1999
- Shell 1995 „Energie im 21. Jahrhundert.“ Studie der Shell-AG Hamburg, aktuelle Wirtschaftsanalysen 5, Heft 25 (1995)
- SRU 1994 SRU (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen): Umweltgutachten 1994. Für eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung, Stuttgart 1994
- SRU 2000 SRU: Umweltgutachten 2000. Schritte ins nächste Jahrtausend, Stuttgart 2000
- STE 2000 A. Kraft, P. Markewitz, A. Ziegelmann: Auswirkungen eines verstärkten Einsatzes regenerativer Energien und rationeller Energienutzung. Studie für die ARGE Solar NRW. STE, FZ Jülich, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 50, Heft 10 (2000), S. 766-769.
- TAB 2000 J. Nitsch, F.Trieb. Potenziale und Perspektiven regenerativer Energieträger. Studie im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung am Dt. Bundestag (TAB), Stuttgart, März 2000
- TERES 1997 McChesney et al. The European Renewable Energy Study, Study prepared for the EU-Altener-Program, Wiltshire, 1997
- UBA 1997 Umweltbundesamt: Nachhaltiges Deutschland. Wege zu einer dauerhaft-umweltgerechten Entwicklung, Berlin 1997
- UN 1998 Bericht über die menschliche Entwicklung. UNDP-Bericht, Dt. Ges. für die Vereinten Nationen, Bonn 1998
- UNDP 1998 UNDP (United Nations Development Programme): Bericht über die menschliche Entwicklung 1998, New York 1998
- UNDEP/SEI 1997 UNDP/SEI (Stockholm Environment Institute)/UNCSD (United Nations Commission on Sustainable Development): Energy after Rio: Prospects and Challenges, New York 1997
- UN-EECOSOPC 2000 UN-ECOSOC (United Nations-Economic and Social Council): Energy and Sustainable Development: Key Issues. Preparation for the ninth Session of the Commission on Sustainable Development by the Intergovernmental Group of Experts on Energy and Sustainable Development; Document Nr. E/CN.17/ESD/2000/3, New York 2000
- Weltbank 2000 World Development Indicators 2000, Weltbank Washington 2000

WEC 1995	„Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond.“ Joint IIASA - World Energy Council Report, Luxemburg, London 1995
WEC 1998	„Energie für Deutschland - Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext.“ Dt. Nat. Komitee DNK des Weltenergieerates. Düsseldorf 1998
WEC 2000	Energy for Tomorrow's world – Acting Now. WEC Statement 2000.
Weissbuch 1997	Erneuerbare Energien – Weissbuch für eine Gemeinschaftsstrategie und Aktionsplan. European Parliament, COM (97)599 final (26/11/1997), Strasbourg 1997
Wuppertal 1996	Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie: Zukunftsfähiges Deutschland - Ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung. Studie im Auftrag von BUND und Misereor, Basel 1996
Wuppertal 1998	Der Beitrag des Sektors Bauen und Wohnen für den Klimaschutz, Studie im Auftrag des Ministeriums für Bauen und Wohnen des Landes Nordrhein-Westfalen, Wuppertal Institut, 1998
Wuppertal 2000	M. Fishedick et al.: Bewertung eines Ausstiegs aus der Kernenergie aus klimapolitischer Sicht. Studie im Auftrag des Bundesumweltministeriums, Wuppertal 2000
Ziegelmann 2000:	A. Ziegelmann, P. Markewitz u.a.: Arbeitsmarkteffekte ressourcenschonender Klimagas-Reduktionsstrategien in Deutschland. Ruhr-Universität Bochum, FZ Jülich, Bochum, Jülich, Oktober 2000.