

# Der Ausbau erneuerbarer Energien in längerfristiger Perspektive<sup>1</sup>

J. Nitsch, DLR-Institut für Technische Thermodynamik Stuttgart

Der Einsatz von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien (EE) auf der Basis eines „Orientierungsszenarios“ bis 2050 hat zusammenfassend folgende **Wirkungen auf Umwelt, Volkswirtschaft und Gesellschaft**:

- Im **Jahr 2050** können erneuerbare Energien **45 % des Endenergieverbrauchs** (der dann im Vergleich zu heute um 35 % reduziert ist) decken. Dies entspricht einer Energiemenge von rd. 2.800 PJ/a. Im Jahr 2020 erreicht der Beitrag rd. 900 PJ/a, was einem Anteil von knapp 12 % entspricht (1999: 190 PJ/a). Die technischen Potenziale der EE erlauben nach 2050 einen weiteren Ausbau bis zu einer prinzipiell möglichen **100 %-igen Deckung des Energiebedarfs durch EE**.
- Zur Reduktion der **CO<sub>2</sub>-Emissionen** im Orientierungsszenario zwischen **1999 und 2050** tragen EE mit rund 220 Mio. t/a bei. Dies entspricht gut einem Drittel der gesamten Reduktionsleistung von insgesamt 610 Mio. t CO<sub>2</sub>/a. Hinzu kommen die bereits vermiedenen Emissionen durch die Substitution fossiler Energien von knapp 20 Mio. t/a [BMU 2000]. Nur die verstärkte rationelle Energienutzung (d.h. über die Trendentwicklung hinaus) einschließlich des Ausbaus der Kraft-Wärme-Kopplung kann einen höheren Reduktionsbeitrag (300 Mio. t/a) leisten. Weitere 90 Mio. t/a verringerte CO<sub>2</sub>-Emission stammen aus der Verschiebung des fossilen Brennstoffmixes hin zu Erdgas. Daran zeigt sich auch die Gleichwertigkeit der Handlungsstrategien „Verstärkte rationellere Energienutzung“ und „Ausbau regenerativer Energien“. Die im Jahr 2050 verbleibenden CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen mit 225 Mio. t/a bei 23 % des Bezugswertes von 1990; die CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Emissionen 650 Mio. t/a. Dies entspricht 66 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1990. **Bis 2010 werden die Kyoto-Reduktionsziele mit einer Reduktion um –25 % des 1990er Wertes unterschritten**. Die CO<sub>2</sub>-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 die Bereitstellung von Strom (Endenergie) beträgt die CO<sub>2</sub>-Intensität dann 0,56 kg/kWh<sub>el</sub>. Zum Vergleich: 1999 lag diese bei 0,62 kg/kWh<sub>el</sub>.
- Der zur Erfüllung der Zielvorgaben der EU und der deutschen Bundesregierung erforderliche **Ausbau der EE-Technologien** kann von einer modernen Industriegesellschaft bewältigt werden. Die jährlichen Wachstumsraten der Märkte erreichen im Mittel des ersten Jahrzehnt (2000-2010) 20 %, kurzfristig können Werte um 30 % auftreten. Das Beispiel des Wachstums der Windenergie zwischen 1995 und 2000 mit durchschnittlich 50 % pro Jahr zeigt, dass Fertigung, Vertrieb und Installation flexibel genug sind, wenn entsprechende Rahmenbedingungen vorliegen. Entscheidend für einen effektiven Einstieg in die Energiewirtschaft ist eine optimale Abstimmung des Wachstums der Einzeltechnologien untereinander. Zunächst werden preiswerte und technisch schon weiter entwickelte Tech-

---

<sup>1</sup> Kurzfassung der Ergebnisse aus der Untersuchung: J. Nitsch, C. Rösch u.a. „Schlüsseltechnologien Regenerative Energien“. Teilbericht im Rahmen des HGF-Verbundprojekts „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland.“ FZK, DLR, FZJ, GMD, Stuttgart, Karlsruhe, Februar 2001 (Entwurfassung), [Nitsch 2001].

nologien (Windenergie, Verbrennung von Biomasse, restliche Wasserkraft) den Hauptanteil des wachsenden EE-Anteils leisten. Damit die anderen, noch wenig eingeführten und erprobten (und deshalb i.allg. teureren) Technologien (Solarkollektoren, Erdwärme, Vergasungstechnologie für Biomasse, Photovoltaik) ab 2010 die erforderlichen Beiträge liefern können, müssen sie in ihrer Entwicklung, Demonstration und Markteinführung angemessen unterstützt werden.

- Die mit dem Ausbau von EE verknüpften **ökologischen Belastungen** entstehen im wesentlichen **durch die Anlagenherstellung**. Im Jahr 2050 (EE-Anteil 45 %) werden für einen Inlandsmarkt von dann 50 Mrd. DM/a für Neubau und Ersatz von EE-Anlagen 4,8 % der Stahlproduktion, 5,8 % der NE-Metalle und 0,4 % der Steine/Erden-Produktion benötigt. Die Angaben beziehen sich auf den Umsatz 1999. Vergleichsweise werden derzeit 25 % der Stahlproduktion im Fahrzeugbau und 20 % im Baugewerbe eingesetzt. Kann eine erhöhte Recyclingquote erreicht werden, so erleichtert dies den EE-Ausbau, da die eingesetzten Rohstoffe und Materialien dann weitgehend wieder genutzt werden. Die im Mittel höhere Materialintensität von EE-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 CO<sub>2</sub>-Intensität) entschärfen diese Problematik generell. Kontaminierte Materialien entstehen bei einem EE-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 EE-Ausbaus können bei sorgfältiger Planung (z.B. Windvorrangflächen), Leistungsbegrenzung (Wasserkraft), entsprechenden Auflagen (Wasserkraft; Emissionen bei Biomassenutzung), in räumliche, flächen- und betriebsbezogene Nutzungskonzepte integrierter Energiepflanzenanbau, angepasste Siedlungskonzepte (Dachflächen- und Fassadennutzung) und einer möglichst rationellen Energienutzung verglichen mit alternativen Optionen weitgehend vermieden werden.
- Der Ausbau der EE-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. Der letzte Wert entspricht etwa dem Wert der Mineralölimporte des Jahres 2000 (46 Mrd. DM/a), stellt also für die Energiewirtschaft keine neuartige Situation dar. Andererseits werden diese Investitionen zum größten Teil im Inland getätigt, was zu erheblichen Strukturveränderungen in der Vorleistungsstruktur der Energieversorgung führen wird. Ressourcenkonsum (Energieträgerimport) wird durch investive Maßnahmen ersetzt, was einer nachhaltigeren Wirtschaftsweise deutlich entgegenkommt.
- Die Investitionen des Jahres 2050 entsprechen schätzungsweise 250.000 Bruttoarbeitsplätzen. Berücksichtigt man Verdrängungseffekte, bleiben mindestens 100.000 Nettoarbeitsplätze als Folge des EE-Ausbaus. Dies entspricht etwa einem Viertel der heute Beschäftigten in der Energieversorgung. Hauptgründe für die **positive Arbeitsplatzbilanz** sind der Ersatz von Energieimporten durch überwiegend inländisch erzeugte Güter und Dienstleistungen und die i.a. höhere Arbeitsintensität zur Herstellung von EE-Techniken verglichen mit der Bereitstellung konventioneller Energieträger. Die Arbeitsplätze beruhen auf vielfältigem technologischem Wissen in den (eher größeren) Fertigungsstätten der Anlagen (etwa vgl. dem heutigen Automobilbau). Arbeitschaffend ist darüber hinaus die

dezentrale Organisation der Energiebereitstellung. Diese ist mit einem entsprechenden Aufwand für Installation, Überwachung und Wartung der zahlreichen Anlagen verbunden. Im speziellen Fall der Energiegewinnung aus Biomasse führt die Erzeugung, Konditionierung, Lagerung und Bereitstellung des Brennstoffs zur Arbeitsplatzbeschaffung in ländlichen Räumen. Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß ein höherer EE-Anteil insgesamt zu einer stärker diversifizierten und damit relativ krisensicheren Ausgestaltung des Energiesektors und zu einer größeren Branchen- und Unternehmensvielfalt beitragen kann.

- Die Substitution fossiler Energien durch EE (sowie durch rationelleren Energieeinsatz) verringert die Importabhängigkeit 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 EE deutlich erhöht. Gleichzeitig 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 für Deutschland muss vor dem Hintergrund einer vergleichbaren EU-weiten und letztlich globalen Entwicklung gesehen werden. Die dezentralen EE-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 „win-win“-Situation im Bereich der Energieversorgung. Länder mit großen solaren Ressourcen in Nordafrika können mit Hilfe der EU-Staaten solare Energieversorgungsstrukturen aufbauen. Mittel- bis langfristig gesehen können diese Anlagen auch dazu beitragen, Anteile des Energiebedarfs der nördlichen EU-Länder mit solaren Energien (Strom, Wasserstoff) zu decken. Der EE-Export kann damit zu einer wichtigen Einkommensquelle für diese Länder werden. 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 EE-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. Entsprechende politische Zielsetzungen sind auf nationaler und EU-Ebene bis zum Zeitraum 2010, teilweise auch darüber hinaus (Deutschland, Dänemark) formuliert worden. Die meisten europäischen Ländern verfügen über ein geeignetes Instrumentarium zur Erreichung der Zielvorgaben. Besondere Relevanz haben zur Zeit garantierte Einspeisevergütungen (EEG). Auch Quotenregelungen und der Handel mit Umweltzertifikaten werden eingesetzt. Die von der EU mittelfristig angestrebte Harmonisierung dieser Instrumente ist für eine längerfristige Absicherung der Wachstumsimpulse von großer Bedeutung.
- Die Unterstützung der EE muss ausreichend lang bestehen. Das bedeutet aus heutiger Sicht eine Förderung – abgestuft nach Technologien – mindestens bis 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 Vorleistungen hervorgerufenen spezifischen Mehrbelastungen sind für die Konsumenten relativ gering. Sie belaufen sich beim Strom auf maximal 1 Pf/kWh<sub>el</sub> und bei Brennstoffen auf maximal 0,7 Pf/kWh<sub>th</sub>. Je nach Anstieg konventioneller Energiepreise kann sich die Vorleistung in den EE-Ausbau bereits bis 2050 voll amortisiert haben, **da ab 2035/2040 die im Orientierungsszenario bereitgestellte Energie kostengünstiger als diejenige ohne EE-Ausbau sein dürfte.**

- Das für einen selbsttragenden EE-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 EE beruhenden Energieversorgung stellen daher aus sozialverträglicher Sicht kein wesentliches Hindernis dar.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass aus gegenwärtiger Sicht eine deutliche Erhöhung des Anteils von EE an der zukünftigen Energieversorgung die derzeitigen **Nachhaltigkeitsdefizite der Energieversorgung deutlich mindern** kann ohne größere neuartige, nicht bewältigbare Nachhaltigkeitsprobleme aufzuwerfen. Die Entlastungseffekte treten 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 EE-Technologien in Grenzen halten und aus ihrem Einsatz ein ausreichend hoher Nutzen in hinreichend kurzer Zeit resultiert. In Vorbereitung auf eine effektive Marktteilnahme von EE 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.

Es folgen einige wesentliche Ergebnisse der Untersuchung::

- ◆ **Tabelle 1** gibt einen Überblick über die wesentlichen energetischen Eckdaten des Orientierungsszenarios.
- ◆ Die **Abbildungen 1 und 2** zeigen die resultierende Strukturveränderung in den Teilbereichen Strom- und Wärmebereitstellung.
- ◆ Die für den EE-Ausbau prinzipiell zur Verfügung stehenden technischen Potenziale und die mit ihrer Erschließung einhergehenden Kostenentwicklung sind in den **Abbildungen 3 und 4** dargestellt.
- ◆ **Tabelle 2** informiert über die durch die Ausbaustrategie ausgelösten Investitionen in EE-Anlagen (Neuanlagen und Ersatz) im Strom- und Wärmemarkt.

**Tabelle 1: End- und Primärenergieverbrauch (PJ/a) bis 2050 im Orientierungsszenario nach Energieträgern, Verbrauchssektoren und Nutzungsarten, sowie resultierende Anteile von EE und CO<sub>2</sub>-Emissionen (Mio. t/a)**

Energiemengen in PJ/a	1993	1996	1999	2010	2020	2030	2040	2050
<b>Gesamte Endenergie</b>	<b>9232</b>	<b>9689</b>	<b>9288</b>	<b>8450</b>	<b>7650</b>	<b>7000</b>	<b>6400</b>	<b>6100</b>
<b>nach Energieträgern:</b>								
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
<b>Regenerativ gesamt</b>	<b>127</b>	<b>137</b>	<b>191</b>	<b>440</b>	<b>888</b>	<b>1494</b>	<b>2161</b>	<b>2772</b>
<b>Anteil REG an END (%)</b>	<b>1,4</b>	<b>1,4</b>	<b>2,1</b>	<b>5,2</b>	<b>11,6</b>	<b>21,3</b>	<b>33,8</b>	<b>45,4</b>
<b>nach Verbrauchssektoren:</b>								
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
<b>nach Nutzenergiearten:</b>								
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
<b>Primärenergie 3)</b>	<b>14364</b>	<b>14720</b>	<b>14194</b>	<b>12626</b>	<b>11144</b>	<b>9874</b>	<b>8708</b>	<b>7966</b>
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, Erdölgas, 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
<b>Anteil REG an PEV (%)</b> ,	<b>0,7</b>	<b>1,0</b>	<b>1,7</b>	<b>4,3</b>	<b>9,2</b>	<b>18,7</b>	<b>30,3</b>	<b>42,6</b>
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen, (Mio t/a)</b>	<b>912</b>	<b>898</b>	<b>836</b>	<b>742</b>	<b>648</b>	<b>499</b>	<b>346</b>	<b>226</b>
<b>1990 = 100 (986 Mio.t/a)</b>	<b>93</b>	<b>91</b>	<b>85</b>	<b>75</b>	<b>66</b>	<b>51</b>	<b>35</b>	<b>23</b>
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

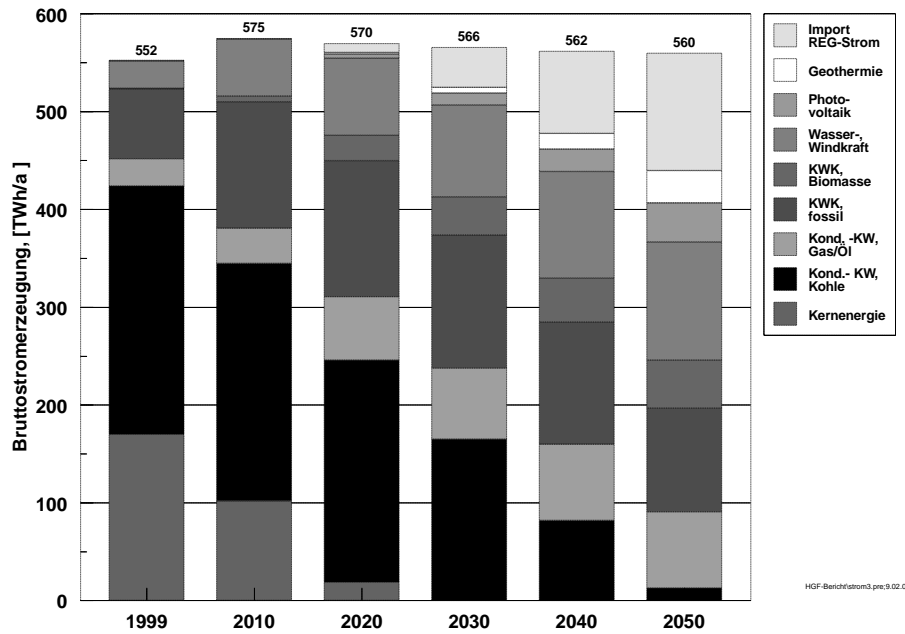


Abbildung 1: Bruttostromerzeugung nach Kraftwerksarten im Orientierungsszenario bis 2050, getrennt nach Kondensationskraftwerken, KWK-Anlagen (fossil, Biomasse) und EE-Anlagen

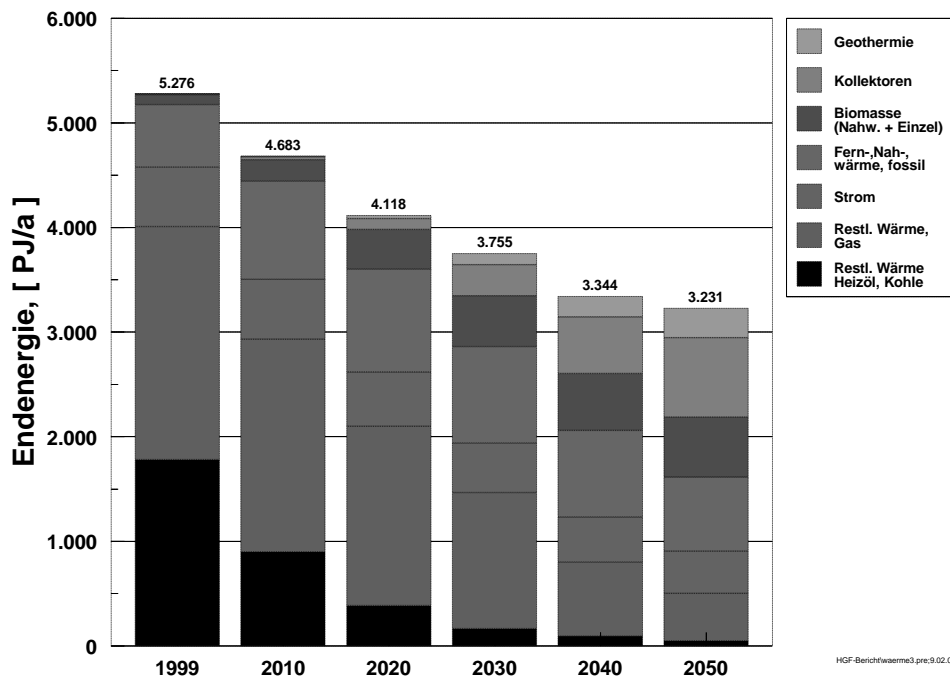


Abbildung 2: Strukturveränderungen im Wärmemarkt im Orientierungsszenario bis 2050 nach Energieträgern bzw. Einzelsystemen und Fern- bzw. Nahwärmeversorgungen

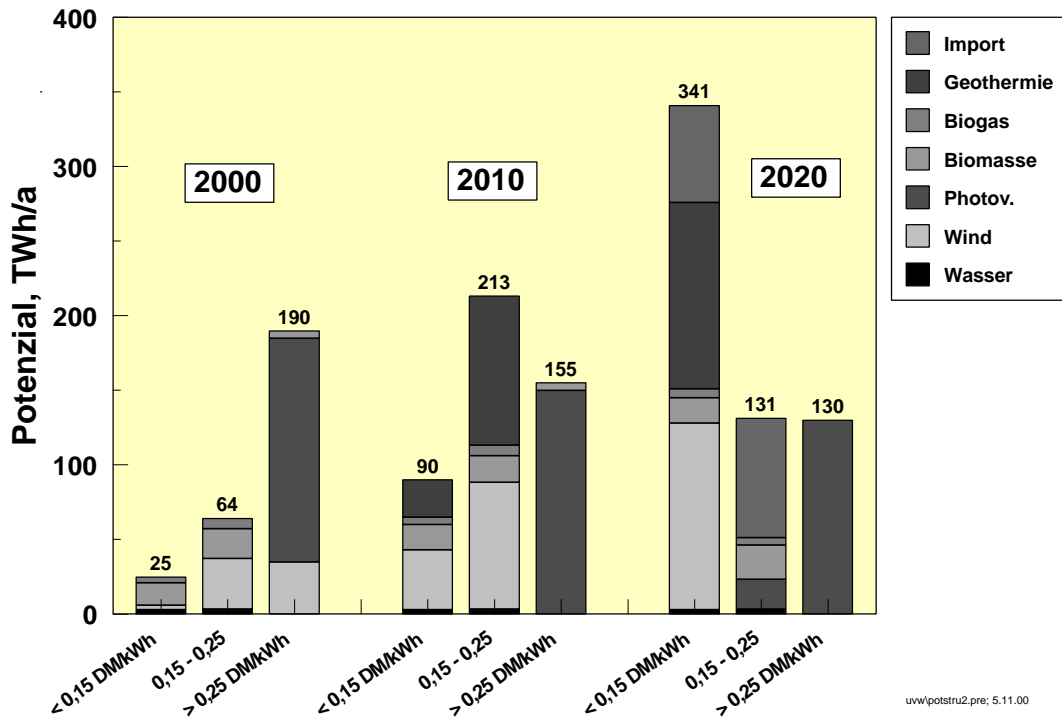


Abbildung 3: Kostenstruktur der in den Jahren 2000, 2010 und 2020 verfügbaren Potenziale erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung; für 2010 und 2020 sind Kostendegressionen auf der Basis von Lernkurven bei wachsenden Marktvolumina vorausgesetzt.

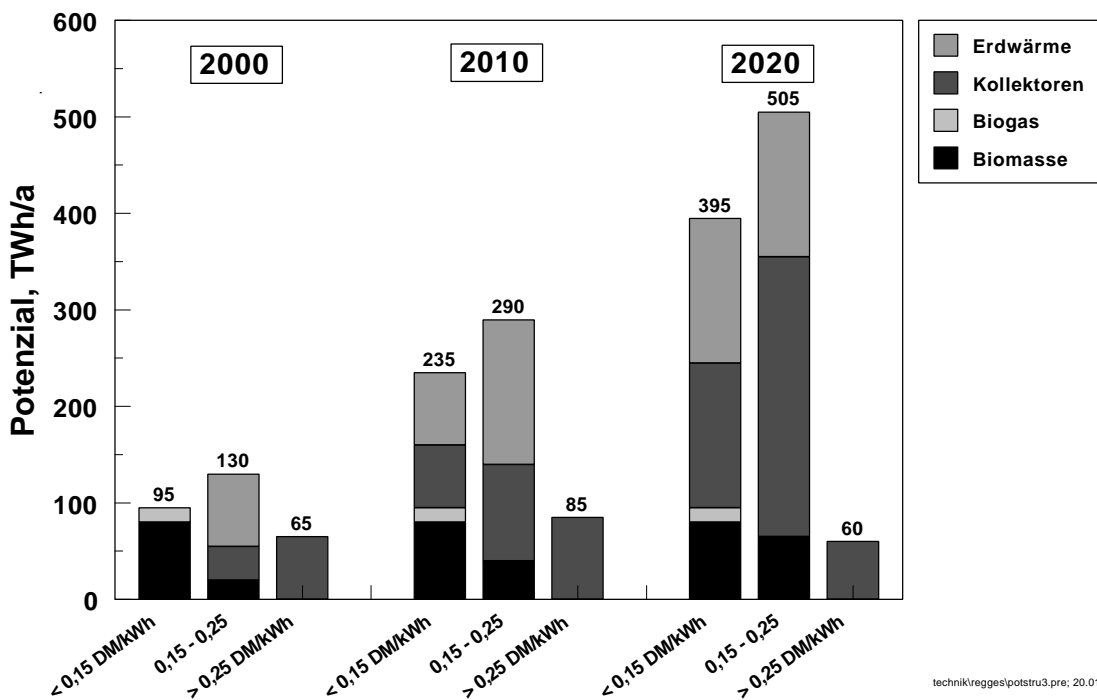


Abbildung 4: Kostenstruktur der in den Jahren 2000, 2010 und 2020 verfügbaren Potenziale erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung; für 2010 und 2020 sind Kostendegressionen auf der Basis von Lernkurven bei wachsenden Marktvolumina vorausgesetzt.

**Tabelle 2: Jährliche Investitionen in EE - Technologien (Mio. DM/a, Geldwert 1999) im Orientierungsszenario bis zum Jahr 2050**

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

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

Literatur:

BMU 2000: J. Nitsch, M. Fishedick u.a.: Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien. Untersuchung für das BMU und das UBA. Berichte des Umweltbundesamtes 2/00. Erich Schmidt Verlag, Berlin 2000.

Nitsch 2001: J. Nitsch, M. Nast, M. Pehnt, F. Trieb, C. Rösch, J. Kopfmüller: „Schlüsseltechnologien Regenerative Energien“. Teilbericht im Rahmen des HGF-Verbundprojekts „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland“. FZK, DLR, FZJ, GMD. Stuttgart, Karlsruhe, Februar 2001 (Entwurfssfassung).