

# Nachhaltigkeit als Konzept eines zukünftigen Energiesystems

*Von*

Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak

Mitglied im „Beirat zur Nachhaltigen Entwicklung“  
des Freistaats Thüringen

2012

## **Inhalt**

1 Energiegeschichte als Geschichte der Energiekrisen.....	3
2 Grundprobleme des globalen Energiesystems .....	5
3 Lösungsansätze .....	13
4 Bausteine einer nachhaltigen Energiepolitik .....	16
5 Die Zukunft der Energieversorgung .....	23
Literatur .....	29

*„Wenn die Wälder um unsere Städte erschöpft sind, wird sich jemand Geschäftstüchtiges finden, der gegen eine entsprechende Summe Geld Holz aus entfernteren Wäldern herbeischafft. Und wenn er damit Erfolg hat, tragen wir die Verantwortung dafür, dass auch die entfernteren Wälder zerstört werden. Schließlich werden wir auf Kohle als Brennstoff zurückgreifen müssen, die glücklicherweise überall gefunden werden kann. Warum ergreifen wir diese Option nicht schon heute? Warum verbieten wir nicht den Gebrauch von Holz in den Fällen, in denen es leicht ersetzt werden kann? Wenn wir dies schon heute und nicht erst später tun, werden sich die Wälder früher beginnen zu regenerieren. Treffen wir dann noch ähnliche Schutzmaßnahmen wie in der Vergangenheit, werden die Wälder, so sie sich wieder im Gleichgewicht befinden, alle unsere Bedürfnisse befriedigen können. So sinnvoll diese Überlegungen erscheinen, so weisen sie doch den nicht unerheblichen Mangel auf, dass wir dazu neigen, unsere heutigen Bedürfnisse über die der Nachkommenden stellen.“*

**Denis Diderot, Philosoph (1752)**

*„Wir verdanken der Sonne nicht nur Tag und Nacht oder Frühling und Herbst - vielmehr ist es die Energie der Sonne, die gespeichert in der Kohle, in den Wasserfällen, in der Nahrung alle Arbeit in der Welt verrichtet.“*

**Sir Joseph John Thomson (1909)**

*„Wenn einmal der Kohlenverbrauch so überhand genommen haben wird, dass man ernstlich daran gehen muss, der jetzigen Kohleverschwendung zu steuern, so wird man außer im fließenden Wasser und im Wind noch andere Kraftquellen wie den niederfallenden Regen, die Ebbe und Flut, endlich die direkte Sonnenwärme auszunutzen lernen, die man heute noch unbenutzt lässt.“*

**Leo Graetz, Physiker (1912)**

*„Wenn die gegenwärtige Zunahme der Weltbevölkerung, der Industrialisierung, der Umweltverschmutzung, der Nahrungsmittelproduktion und der Ausbeutung von natürlichen Rohstoffen unverändert anhält, werden die absoluten Wachstumsgrenzen auf der Erde im Laufe der nächsten hundert Jahre erreicht. Mit großer Wahrscheinlichkeit führt dies zu einem ziemlich raschen und nicht aufhaltbaren Absinken der Bevölkerungszahl und der industriellen Kapazität.“*

**Dennis Meadows (1972)**

## 1 Energiegeschichte als Geschichte der Energiekrisen

Der Erfolg eines Energiesystems zeigt sich in seiner Fähigkeit, eine Gesellschaft zu erhalten und zu entwickeln. Energiekrisen treten immer dann auf, wenn das Energiesystem an seine Begrenzungen stößt.

Die betroffenen Gesellschaften begegnen Energiekrisen in der Regel mit einer Forcierung ihres bestehenden Energiesystems. Die angewandten Forcierungsstrategien können qualitativ oder quantitativer Natur sein:

- erstere in Form technischer Innovationen,
- letztere beispielsweise in Form einer räumlichen Expansion.

Ein Scheitern dieser Forcierungsstrategien zieht in der Regel einen gesellschaftlichen Einschnitt bis hin zu einem Zusammenbruch der Zivilisation nach sich.

### Forcierungsstrategien

Beispiele für Energiekrisen und deren Begegnung mittels einer Forcierung finden sich zahlreich in der Geschichte: Die Expansion der großen Bewässerungskulturen in Altägypten oder dem chinesischen Kaiserreich scheiterte an der Ausdehnung ihres Energiesystems auf Gebiete, die dafür nicht geeignet waren. Die intensive Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen benötigte einen enormen Einsatz von Arbeitskräften, der sich nur bei entsprechender Produktivität, d.h. mehreren Ernten pro Jahr, darstellen ließ. Das römische Energiesystem basierte auf einem permanenten Zustrom an Sklaven, der durch militärische Expansion sichergestellt wurde. Als die Expansion „am Ende der bekannten Welt“ zum Stillstand gekommen war, kollabierte das System.

Die Frage, ob das mittelalterliche Energiesystem an der Holzkrise zugrunde gegangen wäre, ist müßig, da es im Rahmen der industriellen Revolution durch das fossile Energiesystem abgelöst wurde. Insofern stellt die industrielle Revolution eine Ausnahme dar: hier konnte die Gesellschaft die durch ihr bisheriges Energiesystem aufgegebenen Begrenzungen durch einen Wechsel zu einem neuen Energiesystem überwinden. [1]

Unser heutiges Energiesystem kann als Forcierung des aus der industriellen Revolution hervorgegangenen Energiesystems betrachtet werden. Enorme Investitionen in Kraftwerke, Leitungsnetze, aber auch in Forschung und Technologie engen den gesellschaftlichen Spielraum

für Alternativen ein und schaffen damit einen Sachzwang, d.h. eine von der Gesellschaft lange Zeit als zwingend interpretierte Festlegung. Die folgenden Beispiele illustrieren die vor allem auf Expansion angelegte Forcierungsstrategie:

1973 löste eine Drosselung der Ölförderung die sogenannte „Ölkrise“ aus. Die Abhängigkeit des globalen Energiesystems von dem Energieträger Erdöl wurde offensichtlich. Diese politisch motivierte Verknappung wurde in demselben Zeitraum – beispielsweise durch die Studie *Die Grenzen des Wachstums* – durch das Bewusstsein der generellen Endlichkeit des Energieträgers ergänzt. Wenn man die vorrangig privat initiierten Maßnahmen zur Energieeinsparung einmal vernachlässigt, so ist die Folge der Ölkrise nicht eine Intensivierung der Suche nach Alternativen, sondern die Forcierung der Anstrengungen, politische Kontrolle über bestehende oder vermutete Ölreserven zu erlangen.

Aktuelle Forcierungsstrategien sind

- die Produktion von Biotreibstoffen zur Substitution von fossilen Kraftstoffen sowie
- die angesichts der Klimaproblematik fossiler Energieträger in vielen Staaten beschlossene Laufzeitverlängerung für Kernkraftwerke.
- Beim Einsatz von Biotreibstoffen wird das bestehende Mobilitätskonzept mit dem zugehörigen Energiesystem auf Kosten der Nahrungsmittelproduktion fortgeschrieben.

Das Festhalten am bestehenden Energiesystem – inklusive der Importabhängigkeit der Industriestaaten – löst bereits heute eine spürbare und für die Bevölkerung vor Ort problematische Verteuerung von Lebensmitteln in vielen Staaten der Dritten Welt aus, die nun zu Produzenten von Bioethanol oder Palmöl werden.

### **Die solare Revolution?**

Wie sieht nun das Energiesystem der Zukunft aus und welche gesellschaftlichen Bedingungen müssen dafür vorherrschen?

Der deutsche SPD-Politiker Hermann Scheer (1944-2010) sprach von der Notwendigkeit einer „schöpferischen Zerstörung der Energiewirtschaft“, die als Kernelement eine Regionalisierung der Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien beinhaltet [10].

Tatsächlich haben sich in den vergangenen Jahren jenseits der Forcierungsstrategien des fossilen und nuklearen Energiesystems Technologien entwickelt, die das Potential haben, die Energieversorgung der Menschheit sicherzustellen. Sieht man einmal von der Geothermie ab, so bedienen sich all diese Technologien der Strahlungsenergie der Sonne: unmittelbar in Form von Solarthermie und Photovoltaik oder mittelbar in Form von Biomasse, Wind- und Wasserkraft.

Die durch den Klimawandel und die Endlichkeit der fossilen und nuklearen Ressourcen vorgegebenen Begrenzungen des derzeitigen Energiesystems lassen sich durch eine weitere Forcierung kaum lösen. Sie können ohne negative Folgen für die menschliche Zivilisation nur durch einen konsequenten Umstieg auf ein erneuerbares Energiesystem überwunden werden.

Die dafür notwendigen Veränderungen des Energiesystems sind in ihrer Tragweite nur mit der industriellen Revolution vergleichbar und kämen in ihren Auswirkungen zweifelsohne einer solaren Revolution gleich.

## 2 Grundprobleme des globalen Energiesystems

Der weltweite Energiebedarf ist in den letzten 150 Jahren kontinuierlich angestiegen. Nur singuläre Ereignisse wie die Weltwirtschaftskrise 1929 oder die Ölkrise 1973 haben zu einem kurzzeitigen Rückgang geführt.

Die Energiebereitstellung erfolgte dabei mit unterschiedlichen Energieträgern: so dominierte die Biomasse die Energiebereitstellung bis weit in das 19. Jahrhundert. Erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts übertreffen Stein- und Braunkohle die Nutzung von Biomasse. In den 1920er Jahren tritt zunächst Rohöl und später auch Naturgas hinzu.

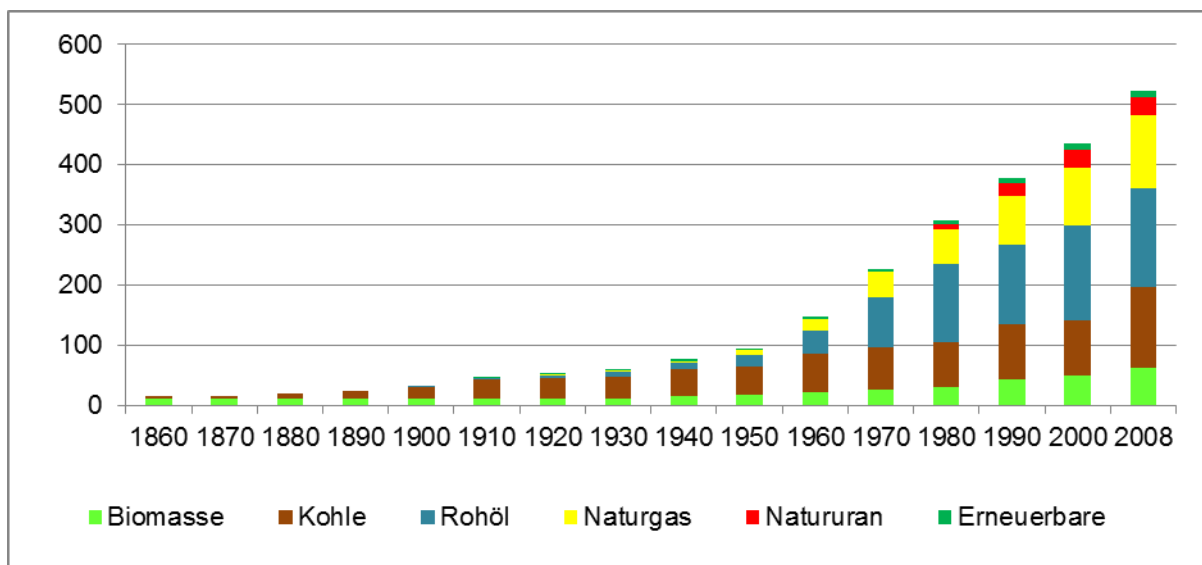
Bemerkenswert ist dabei, dass kein Energieträger einen anderen abgelöst hat, sondern die neuen Energieträger jeweils hinzugetreten sind. So hat sich beispielsweise die weltweite Nutzung von Stein- und Braunkohle durch das aufkommende Rohöl nicht vermindert, sondern wächst bis heute an, um den steigenden Energiebedarf zu decken. Nur die relative Bedeutung der Kohle hat sich in den letzten 100 Jahren von 70 Prozent auf heute 27 Prozent des Primärenergiebedarfs reduziert.

Die folgende Abbildung zeigt, dass die heutige Energieversorgung überwiegend von der Nutzung fossiler Energieträger abhängig ist. Daraus erwachsen eine Reihe von Problemen, die sich in den drei Punkten

- Endlichkeit der fossilen und nuklearen Energieträger,
- Verteilung von Energieressourcen und
- Emission klimarelevanter Treibhausgase

zusammenfassen lassen.

Jeder einzelne Problembereich beschränkt die Entwicklungsmöglichkeiten heutiger und die Handlungsmöglichkeiten zukünftiger Generationen. Die sich innerhalb dieser Rahmenbedingungen stellende Zukunftsaufgabe eines nachhaltigen Energiesystems ist nur in einem globalen Kontext zu lösen.



Weltweiter Primärenergiebedarf von 1860 bis 2008 nach Energieträgern [1]

Die Mengenangabe erfolgt in Exajoule (EJ). Die Unterscheidung in „Biomasse“ und „Erneuerbare“ ist historisch bedingt. Die Daten im Feld „Erneuerbare“ enthalten Wasserkraft, Windkraft, Photovoltaik, Solarthermie und Geothermie.

### Endlichkeit der fossilen und nuklearen Energieträger

Die Diskussion um die Endlichkeit der Energieträger fokussiert sich seit vielen Jahren besonders stark auf das Erdöl. Jedoch weisen auch die anderen fossilen und nuklearen Energieträger nur noch eingeschränkte Verfügbarkeiten auf. Bezieht man die weltweit nachgewiesenen und mit bekannter Technologie wirtschaftlich gewinnbaren Reserven eines Energieträgers auf den

derzeitigen Verbrauch, so können die in der folgenden Tabelle angegebenen globalen Reichweiten berechnet werden:

Erdöl	58 Jahre
Erdgas	61 Jahre
Stein- und Braunkohle	158 Jahre
Kernbrennstoffe	56 Jahre

Reichweiten fossiler und nuklearer Energieträger bei der Annahme gleichbleibenden Verbrauchs [2]

Dabei wurde vorausgesetzt, dass sich der Primärenergieverbrauch des Jahres 2008 in seinem Betrag und in seiner Aufteilung nicht mehr verändert. Dies ist insbesondere hinsichtlich der ersten Annahme wenig realistisch, so dass die angegebenen Reichweiten eher eine Abschätzung nach oben darstellen. Andererseits wurden geologisch mögliche, aber noch nicht nachgewiesene Lagerstätten bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Diese werden in Abgrenzung zu den Energiereserven als Energieressourcen bezeichnet, so dass sich aus dieser Perspektive die Reichweiten als eine untere Abschätzung interpretieren lassen.

Entscheidend für die weltweite Energieversorgung ist jedoch nicht die theoretische Reichweite eines Energieträgers (und damit die Frage, ob dieser Energieträger noch 40 oder 60 Jahre reicht), sondern der Zeitpunkt, ab dem die Förderung beispielsweise von Erdöl die wachsende Nachfrage nicht mehr decken kann. Die Möglichkeiten, die Förderung weiter zu steigern, sind stark begrenzt. So verlagert sich die Erschließung neuer Erdölfelder immer weiter in den offshore-Bereich, also in das offene Meer weitab der Küstenregionen. Dies ist mit hohen Kosten und Risiken verbunden, wie der Untergang der Ölplattform „Deep Water Horizon“ im Golf von Mexiko und die anschließende Ölkatastrophe im Jahr 2010 eindrucksvoll vor Augen geführt haben.

Bei der Erdgasförderung wird immer stärker die Erschließung sogenannter unkonventioneller Vorkommen forciert (tatsächlich handelt es sich dabei um eine Forcierungsstrategie im Sinne des vorangegangenen Abschnitts). Dabei ist das Gas in Gesteinsschichten oder Kohleflözen gebunden und daher nicht direkt förderbar. Um es zu fördern, muss die Durchlässigkeit der entsprechenden Schichten zunächst künstlich erhöht werden. Bei diesem als „fracking“ bezeichneten Verfahren wird unter Hochdruck Flüssigkeit in eine Vielzahl von Bohrlöchern gepresst, um das Gestein aufzusprengen. Der Flüssigkeit werden chemische Additive zugesetzt, u.a. um die entstandenen Risse offen zu halten. Da diese Additive z.T. in der Gesteins-

---

schicht verbleiben oder in Einzelfällen sogar in das Grundwasser gelangen können, ist das Verfahren wegen möglicher Umweltauswirkungen stark umstritten.

Es wird allgemein davon ausgegangen, dass das globale Ölfördermaximum – der sogenannte peak-oil – voraussichtlich innerhalb der nächsten 10 Jahre erreicht sein wird. Die meisten Förderländer haben ihr Ölfördermaximum bereits hinter sich: z.B. USA (1971), Großbritannien (1999), Norwegen (2001), Mexiko (2004). Ähnliche Untersuchungen lassen sich auch für Erdgas, Kohle und die Kernbrennstoffe Uran und Thorium anstellen.

Eine Verknappung und damit eine Verteuerung der Energieträger werden also deutlich vor dem tatsächlichen Ende ihrer Reichweite auftreten, zuallererst beim Erdöl.

Um einen Eindruck von der Größe der Welt-Erdölreserven zu erhalten, soll folgende Überschlagsrechnung dienen: Die weltweiten Erdölreserven betragen etwa 1.400 Milliarden Barrel. Um sich diese Zahl vorstellen zu können, soll eine Umrechnung pro Kopf der Weltbevölkerung erfolgen. Bei gut 7 Milliarden Menschen betragen die Welt-Erdölreserven jedes lebenden Menschen noch 200 Barrel, was etwa 30.000 Litern entspricht.

Die Zahlen zur Reichweite zeigen, dass auch die Kernenergie, losgelöst von den Risiko- und Endlagerdiskussionen, keine langfristige Alternative darstellt. Bei einem derzeitigen Anteil der Kernenergie am Weltenergiebedarf von etwa sechs Prozent beträgt die Reichweite der Kernbrennstoffe bei einem Einsatz in Leichtwasserreaktoren knapp 60 Jahre. Wollte man den Anteil der Kernenergie verdoppeln, so würde sich die Reichweite entsprechend halbieren.

Durch Brutreaktoren, die ein schwereres Uranisotop als Leichtwasserreaktoren nutzen, könnte die Reichweite erheblich ausgeweitet werden. Gegen dieses Reaktorkonzept sprechen erhebliche technologische Bedenken, die dazu geführt haben, dass weltweit unter den über 400 kommerziell betriebenen Kernkraftwerken nur ein einziger Brutreaktor ist.

### **Gerechtigkeit der Verteilung**

Der weltweite Primärenergieverbrauch beträgt derzeit etwas mehr als 500 Exajoule – das ist eine fünf mit 20 Nullen. Bezieht man auch diese Zahl auf die gesamte Weltbevölkerung, so ergibt sich ein täglicher Primärenergiebedarf von etwa 55 kWh pro Einwohner. Der weltweite Primärenergiebedarf ist jedoch sehr ungleich verteilt:



- während ein Einwohner Deutschlands rechnerisch einen Primärenergieverbrauch von 125 kWh pro Tag aufweist,
- beträgt dieser Wert beispielsweise in Indien nur ein gutes Zehntel.

Der Energieverbrauch und damit einhergehend auch die Kohlendioxidemissionen konzentrieren sich auf Europa, Japan und insbesondere Nordamerika. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über den Primärenergieverbrauch und die energiebedingten Kohlendioxidemissionen unterschiedlicher Regionen sowie deren Anteil an der Weltbevölkerung.

	Bevölkerung		Energieverbrauch		CO <sub>2</sub> -Emission	
	in Mio.	anteilig	in EJ	anteilig	in Mt	anteilig
Welt	6.688	100 %	518	100 %	29.381	100 %
Afrika	984	15 %	27	5 %	890	3 %
Asien	3.764	56 %	181	35 %	11.566	39 %
- davon China	1.333	20 %	89	17 %	6.550	22 %
- davon Indien	1.140	17 %	26	5 %	1.428	5 %
Lateinamerika	569	9 %	32	6 %	1.476	5 %
Nordamerika	338	5 %	106	21 %	6.117	21 %
GUS	285	4 %	43	8 %	2.426	8 %
Europa, Japan, Ozeanien	749	11 %	107	21 %	5.873	20 %
- davon Deutschland	82	1 %	14	3 %	803	3 %

Bevölkerung, Primärenergieverbrauch und energiebedingte Kohlendioxidemissionen nach Weltregionen 2008, nach [3]

So sind beispielweise 5 Prozent der Weltbevölkerung in Nordamerika für 21 Prozent des Weltenergieverbrauchs und Kohlendioxidausstoßes verantwortlich. Umgekehrt haben auch die sich dynamisch entwickelnden Schwellenländer wie Indien oder China derzeit noch einen geringeren Anteil am Weltenergieverbrauch als es ihrem Anteil an der Weltbevölkerung entspricht. Die ökonomische Entwicklung dieser Schwellenländer mit zum Teil zweistelligen jährlichen Wachstumsraten geht mit einem steigenden Energiebedarf einher und verschärft die Ressourcenproblematik zusätzlich.

Bereits jetzt zeichnen sich wachsende Konflikte um den Zugang zu energetischen Ressourcen zwischen China und den USA beispielsweise in Afrika ab.

## **Klimawandel**

Die Erdatmosphäre kann man sich als Filter vorstellen, das Licht unterschiedlicher Wellenlängen unterschiedlich gut passieren lässt. Diese wellenlängenabhängigen Transmissionseigenschaften der Atmosphäre sind dadurch gekennzeichnet, dass kurzwellige Strahlung vergleichsweise gut, langwellige Strahlung vergleichsweise schlecht passieren kann. Dabei ist es für den Strahlungsdurchgang zunächst unerheblich, aus welcher Richtung die Strahlung kommt. Bei der Anordnung Sonne-Erde tritt kurzwellige Strahlung von außen durch die Atmosphäre und wird auf der Erdoberfläche absorbiert. Die Erde erwärmt sich dadurch und sendet langwellige Wärmestrahlung aus, die nun ihrerseits teilweise durch die Atmosphäre in das Weltall abgestrahlt wird. Ein anderer Teil wird an der Atmosphäre reflektiert und verbleibt damit auf der Erde. Dieser natürliche Treibhauseffekt hat zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Temperatur um etwa 10 Grad auf der Erde geführt und damit erst das Leben auf diesem Planeten ermöglicht.

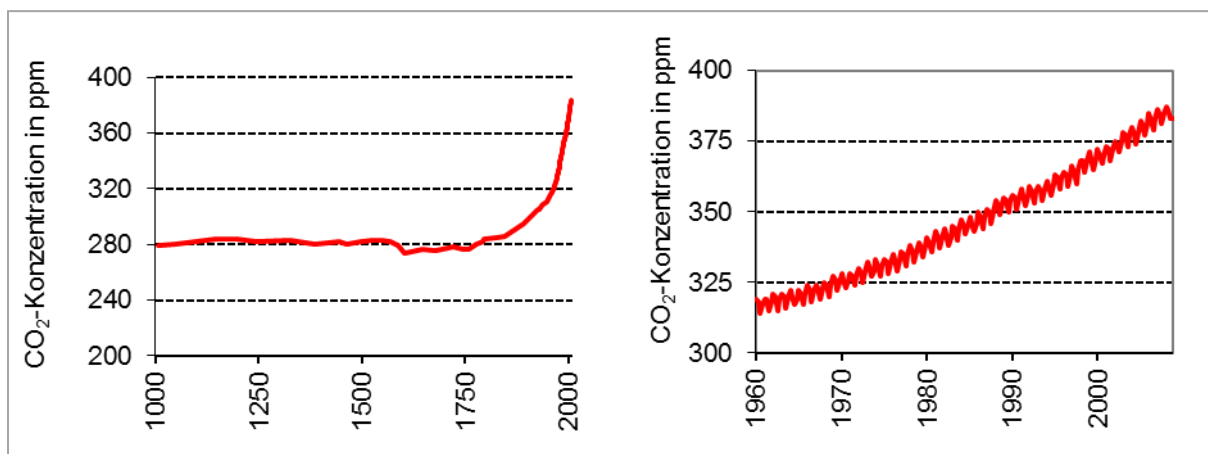
Verändert man nun die Zusammensetzung der Atmosphäre, so hat dies auch Auswirkungen auf die wellenlängenabhängigen Transmissionseigenschaften. Das Kohlendioxid und andere sogenannte Treibhausgase wie Methan wirken im langwelligen Bereich als Filter, d.h. sie reduzieren die Durchlässigkeit der Atmosphäre hinsichtlich der Wärmestrahlung. Andere Bestandteile der Atmosphäre haben ebenfalls nur in bestimmten Wellenlängenbereichen einen Einfluss, wie beispielsweise das Ozon, das für die ultraviolette Strahlung als Filter wirkt, indem es diesen Strahlungsanteil absorbiert. Erhöht sich der Anteil der Treibhausgase in der Atmosphäre, so wird die Filterwirkung verstärkt, d.h. die Durchlässigkeit hinsichtlich der langwelligen Strahlung verschlechtert sich. Die Konsequenz ist, dass sich die Wärmeabstrahlung in das Weltall verringert und in der Folge eine Erwärmung unseres Planeten stattfindet. Eine höhere Temperatur führt wiederum zu einer stärkeren Wärmeabstrahlung, so dass sich nach einem Ausgleichsvorgang über einen gewissen Zeitraum ein neuer Gleichgewichtszustand zwischen einfallender kurzwelliger und abgestrahlter langwelliger Strahlung einstellt, der aber auf einem höheren Temperaturniveau des Planeten liegt.

Die Emissionen solcher klimarelevanter Treibhausgase – und hier insbesondere das Kohlendioxid – haben in den letzten 150 Jahren zu einem dramatischen Konzentrationsanstieg in der Erdatmosphäre geführt. Die seit dem Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert zunehmende Verbrennung fossiler Energieträger führt zu einer kurzfristigen Freisetzung von

Kohlendioxid, das über Jahrmillionen in Form von Kohle, Rohöl oder Naturgas in der Erdkruste eingeschlossen war. Neben Kohlendioxid gibt es weitere klimarelevante Treibhausgase wie beispielsweise Methan oder Lachgas.

Während Kohlendioxid für etwa 60 Prozent des vom Menschen gemachten Treibhauseffektes verantwortlich ist und überwiegend durch Prozesse im Energiesektor freigesetzt wird, werden Methan und Lachgas durch Landwirtschaft und Viehzucht verursacht.

Die weiteren Treibhausgase werden entsprechend ihrer Klimawirksamkeit in Kohlendioxid-Äquivalente umgerechnet und mit den Kohlendioxidemissionen zusammengerechnet. Insgesamt ist der Energiesektor für etwa die Hälfte der klimarelevanten Treibhausgase verantwortlich.



Konzentration des klimawirksamen Treibhausgases Kohlendioxid in der Erdatmosphäre [1]

Die obige Abbildung zeigt die zeitliche Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre. Die Werte vor 1960 wurden auf der Basis von Eisbohrkernen ermittelt. Nach 1960 sind die mittleren jährlichen (links) bzw. mittleren monatlichen Messwerte (rechts) der Station Mauna Loa auf Hawaii notiert. Bei den monatlichen Messwerten fällt eine dem Anstieg überlagerte Schwankung der Kohlendioxidkonzentration auf, die in jedem Jahr durchlaufen wird:

- Im Frühjahr findet eine vermehrte Aufnahme von Kohlendioxid durch den Stoffwechsel der Pflanzen statt,
- während im Herbst durch Zersetzungsprozesse eine vermehrte Freisetzung aus der Biomasse beobachtet werden kann.

Der vom Menschen gemachte Treibhauseffekt wird sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nur dann auf eine durchschnittliche Temperaturerhöhung von 2 bis 4 Grad begrenzen lassen, wenn die Treibhausgasemissionen drastisch eingeschränkt werden. Dies ist wissenschaftlich inzwischen unbestritten.

Ein Temperaturanstieg von 2 Grad wird als an der Grenze des Beherrschbaren angesehen, wengleich auch er einen starken Einfluss auf das Klima nach sich ziehen wird. Zu erwarten sind Veränderungen in der Niederschlagsverteilung, Verschiebung von Klima- und Vegetationszonen, Degradationserscheinungen von Böden und daraus folgend eine Verschlechterung der Welternährung.

Die steigende Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre führt auch zu einer verstärkten Lösung von Kohlendioxid in den Ozeanen. Dies bremst einerseits den Anstieg, da die Ozeane als Kohlendioxid-Senken wirken. Andererseits wird dadurch der pH-Wert des Meerwassers hin zu saureren Werten verändert – mit bisher noch nicht abzusehenden Konsequenzen für die Ökosysteme der Ozeane.

Eine wichtige Rolle in der wissenschaftlichen Diskussion über Ursache und Folgen des Klimawandels kommt dem 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen und der Weltorganisation für Meteorologie ins Leben gerufenen Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zu. Seine Aufgabe ist es,

- den wissenschaftlichen Kenntnisstand zum Klimawandel zusammenzutragen,
- Folgen abzuschätzen und
- Lösungsstrategien zu entwickeln.

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in Sachstandsberichten zusammengefasst, die als Stand der Wissenschaft auf dem Gebiet des Klimawandels gelten [4].

Konkret bedeutet die Forderung nach einer drastischen Beschränkung der Treibhausgasemissionen, dass bis zum Jahr 2050 der weltweite Kohlendioxidausstoß auf etwa die Hälfte des Wertes von 1990 reduziert werden muss. Damit wäre eine Stabilisierung der Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre bei einem Wert von 450 ppm erreichbar, was einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung von 2 Grad bis zum Ende des Jahrhunderts entsprechen würde.

Eine weitere wirtschaftliche Entwicklung der Entwicklungs- und Schwellenländer ist dabei nur möglich, wenn die Industriestaaten eine deutlich stärkere, in der Größenordnung von 80 Prozent liegende Reduktion ihres Kohlendioxidausstoßes vornehmen.

### 3 Lösungsansätze

Die Lösung der drei in dem vorangegangenen Abschnitt genannten Problemkomplexe stellt eine enorme Zukunftsaufgabe dar und ist nur in einem globalen Kontext möglich. Die dafür notwendigen politischen Entscheidungsprozesse verlaufen nicht immer linear und entlang der wissenschaftlichen Erkenntnisse. Häufig sind Kompromisse zu schließen oder Partikularinteressen dominieren bzw. blockieren den Entscheidungsprozess.

Sowohl die Klimaproblematik als auch die Beschränktheit der Ressourcen geben ein enges Zeitfenster von wenigen Jahrzehnten vor, in dem die globale Energieversorgung auf eine völlig neue Grundlage gestellt werden muss: die erneuerbaren Energien.

Meilensteine auf dem Weg zu einem nachhaltigen Energiesystem stellen auf internationaler Ebene die UNCED-Konferenz und das Kyoto-Protokoll dar.

#### Rio-Konferenz

1992 fand in Rio de Janeiro die Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (UNCED) statt. Die Konferenz formulierte im Rahmen ihrer Abschlusserklärung das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung der Erde.

Der Begriff der Nachhaltigkeit stammt ursprünglich aus der Forstwirtschaft und bezeichnet eine Waldbewirtschaftung, die lediglich den jährlichen Holzzuwachs nutzt und damit den Bestand dauerhaft zu erhalten vermag. Seit den 70er-Jahren des letzten Jahrhunderts wird der Begriff auch auf den Bereich der Umwelt- und Entwicklungspolitik übertragen und ist heute zum zentralen Schlagwort der Zukunftsdiskussion geworden.

Dabei bezeichnet Nachhaltigkeit eine Entwicklung, die im Rahmen des von der Umwelt Verknäpfbaren verbleibt, die Lebenschancen zukünftiger Generationen nicht schmälert sowie einen Ausgleich zwischen Nord und Süd herbeiführt.

Die Berücksichtigung von Aspekten der Nachhaltigkeit beinhaltet einen Perspektivwechsel von Politik, da politische Entscheidungen nicht nur aus der Perspektive der jetzigen, sondern auch aus der Sicht zukünftiger Generationen getroffen werden müssen. Gleichzeitig wurden Versuche zur politischen Umsetzung unternommen, die über die bisher praktizierte staatliche Umwelt- und Entwicklungspolitik hinausgehen. Neben der Verabschiedung der Klimarahmenkonvention, die zum Kyoto-Abkommen führte, wurde mit der Agenda 21 ein Aktionsprogramm für das 21. Jahrhundert verabschiedet, zu dessen Umsetzung sich über 170 Regierungen verpflichteten. Diese hohe Zustimmung wurde jedoch durch rechtlich unverbindliche Formulierungen ermöglicht, so dass sich die Agenda 21 besser als ein Orientierungsrahmen gesellschaftlicher Entwicklung charakterisieren lässt.

### **Kyoto-Protokoll**

1997 verabschiedete die 3. Konferenz der Klimarahmenkonvention das Kyoto-Protokoll. Darin wurden erstmals konkrete Reduktionsziele für die wichtigsten klimarelevanten Treibhausgase und für unterschiedliche Staatengruppen festgeschrieben sowie Instrumente für einen Handel mit Emissionen vorgesehen.

Insgesamt haben sich die Industriestaaten vertraglich verpflichtet, ihre Emissionen klimarelevanter Treibhausgase bis 2012 um mindestens 5,2 Prozent unter das Niveau von 1990 zu senken. Dabei wurden je nach Ausgangslage unterschiedliche Reduktionsziele für die einzelnen Staaten festgelegt.

So hat sich beispielsweise Deutschland zu einer Reduktion von 21 Prozent verpflichtet. Insbesondere der Transformationsprozess der osteuropäischen Industrien hatte im Jahr der Verabschiedung in den betroffenen Staaten bereits zu einem deutlichen Rückgang der Emissionen im Vergleich zu 1990 geführt – so auch in Deutschland.

Neben den Reduktionszielen wurden drei Mechanismen definiert, über die Staaten ihre Reduktionsverpflichtungen in anderen Staaten erbringen können:

- Emissionshandel zwischen Industrieländern,
- Klimaschutzprojekte zwischen Industrieländern und
- Klimaschutzprojekte zwischen Industrie- und Entwicklungsländern.

Dabei wird einerseits das Ziel verfolgt, Emissionen handelbar zu machen und damit als Kosten zu internalisieren. Andererseits werden dadurch Klimaschutzprojekte dort gefördert, wo sie bezogen auf die Investitionssumme den größten Effekt erzielen.

Ein weiterer Mechanismus erlaubt bis zu einer bestimmten Obergrenze die Anrechnung von Kohlendioxidsenken auf die eigenen Reduktionsverpflichtungen. Dabei kann es sich beispielweise um Projekte zur Wiederaufforstung handeln, mit denen Kohlendioxid aus der Atmosphäre in Biomasse eingebunden wird.

Das Kyoto-Protokoll ist nur ein erster Schritt zur Reduzierung der Emission klimarelevanter Treibhausgase. Auf der einen Seite ist das Inkrafttreten des Protokolls ein Beleg für die Handlungsfähigkeit der internationalen Staatengemeinschaft angesichts des Klimawandels und für den Stellenwert, den dieser inzwischen einnimmt. Auf der anderen Seite sind die vereinbarten Reduktionsziele von 5,2 Prozent für die Industriestaaten zu gering und werden durch eine Steigerung der Emissionen in den Entwicklungs- und Schwellenländern bis 2012 voraussichtlich kompensiert werden.

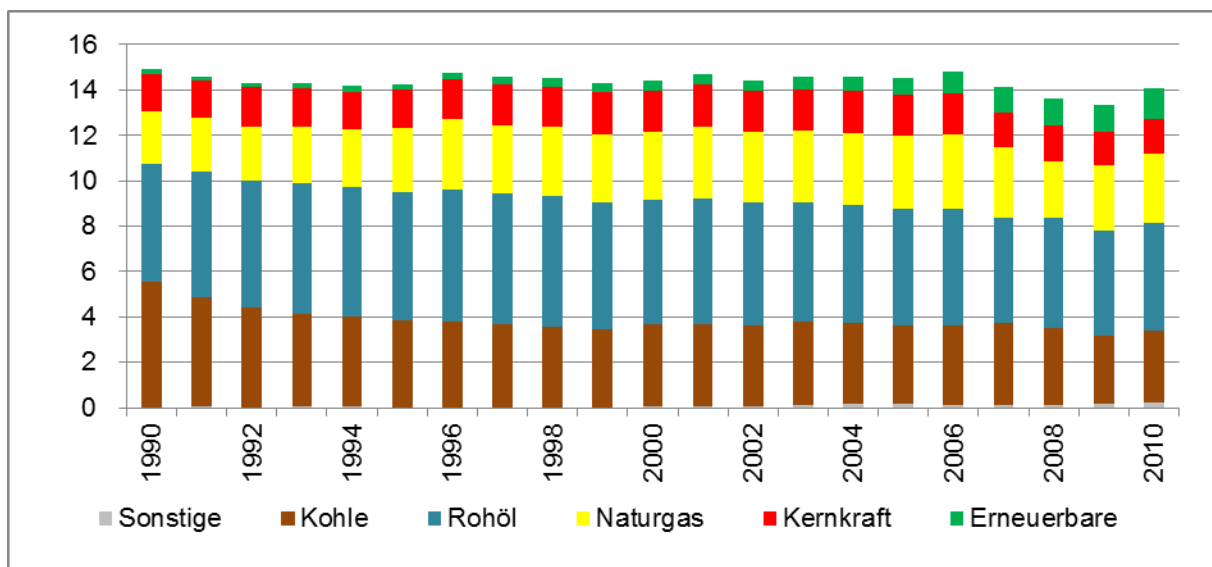
Darüber hinaus beruht der Rückgang der Emissionen in den Industrieländern überwiegend auf Sondereffekten wie dem Zerfall des Ostblocks und weniger auf eigenen Klimaschutzbemühungen.

Die Verhandlungen über ein Folgeabkommen müssen die Forderungen der Schwellenländer – und hier insbesondere von China und Indien – berücksichtigen, die vor der Zusage eigener Reduktionsverpflichtungen stärkere Anstrengungen der Industrieländer erwarten. Dieser Punkt war mit ausschlaggebend für das Scheitern der 15. Klimakonferenz der Vereinten Nationen 2009 in Kopenhagen. Anstelle eines Folgeabkommens für das Kyoto-Protokoll wurde lediglich ein unverbindliches Bekenntnis zu dem Ziel abgegeben, die Erderwärmung auf 2 Grad im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Dieser Konfliktpunkt wird auch die kommenden Klimaschutzverhandlungen bestimmen.

## 4 Bausteine einer nachhaltigen Energiepolitik

Der Primärenergieverbrauch in Deutschland ist in den letzten 20 Jahren im Gegensatz zu der weltweiten Entwicklung weitgehend konstant geblieben. Während der globale Primärenergieverbrauch jährlich im Durchschnitt um zwei Prozent gestiegen ist, kann für Deutschland seit 2007 sogar ein tendenziell sinkender Primärenergieverbrauch beobachtet werden.

Für die Aufteilung nach Energieträgern ergibt sich für Deutschland ein der globalen Situation vergleichbares Bild, bei tendenziell sinkendem Kohleverbrauch und wachsenden Beiträgen der erneuerbaren Energien.



Primärenergiebedarf in Deutschland von 1990 bis 2010 nach Energieträgern [1]  
 Die Mengenangabe erfolgt in Exajoule (EJ). Die Daten im Feld „Erneuerbare“ enthalten Biomasse, Wasserkraft, Windkraft, Photovoltaik, Solarthermie und Geothermie.

Internationale Vereinbarungen wie die Agenda 21 oder das Kyoto-Protokoll spiegeln sich in der deutschen Energie- und Klimapolitik wieder. Die aktuellen Klimaschutzziele der deutschen Bundesregierung gehen deutlich über das Kyoto-Protokoll hinaus und beinhalten eine Reduktion des Kohlendioxidausstoßes um 40 Prozent bis zum Jahr 2020 und um 80 bis 95 Prozent bis 2050, jeweils im Vergleich zu 1990 [5]. Dies soll vor allem durch eine Steigerung der Energieeffizienz und einen starken Ausbau der erneuerbaren Energien erreicht werden.

Diese Zielsetzungen sind auch in die 2002 verabschiedete Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung eingeflossen. Um Nachhaltigkeit messbar zu machen, wurden 21 Indikatoren festgelegt und mit Zielwerten unteretzt. Der Energiebereich wird durch die Indikatoren



Energieproduktivität, Treibhausgasemissionen und Anteil erneuerbarer Energien (EE) am Primärenergieverbrauch sowie am Stromverbrauch abgebildet.

Indikator	Zielwert bis 2020	Istwert 2010
Energieproduktivität	+ 100 %	+ 38,6 % (Basisjahr 1990)
Treibhausgasemissionen	- 40 %	- 21,0 % (Basisjahr 1990)
Anteil EE am Primärenergieverbrauch	10 %	9,4 %
Anteil EE am Stromverbrauch	30 %	16,8 %

Energiebezogene Nachhaltigkeitsindikatoren und ihre Zielwerte gemäß der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung sowie der in 2010 erreichte Stand, nach [6]

Die oben angeführten formulierten Zielwerte der Nachhaltigkeitsstrategie können mit Ausnahme der Energieproduktivität voraussichtlich mit den bisher verabschiedeten gesetzlichen Maßnahmen bis zum Jahr 2020 erreicht werden. Für den Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch gehen die politischen Zielsetzungen mit 35 Prozent inzwischen sogar über den in der Nachhaltigkeitsstrategie festgelegten Zielwert hinaus.

Die energie- und klimapolitischen Ziele für das Jahr 2020 stellen nur einen Zwischenschritt beim Aufbau eines nachhaltigen Energiesystems dar. Aus technischer Sicht erscheinen die weitreichenden Ziele im Strombereich leichter zu erreichen als die im Vergleich dazu bescheidenen Ziele im Wärmebereich.

Die in den folgenden Abschnitten vorgestellten Maßnahmen haben sich dabei in den vergangenen Jahren als unterschiedlich erfolgreich erwiesen.

### **Erhöhung der Energieeffizienz**

Das Erreichen dieser Ziele soll durch eine Reihe unterschiedlicher Maßnahmen befördert werden. Der Erhöhung der Energieeffizienz dienen die

- Energieeinsparverordnung (EnEV) und das
- Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWK).

Die seit 2001 bereits mehrfach novellierte Energieeinsparverordnung begrenzt den Energiebedarf beheizter Wohn- und Nutzgebäude sowie Industrieanlagen auf vorgegebene flächenspezifische Maximalwerte des Primärenergieverbrauchs. 2007 wurden zusätzlich Gebäudeenergiepässe eingeführt, die Käufern und Mietern von Gebäuden quantitative Hinweise

geben, wie hoch der nutzflächenspezifische fossile Primärenergieverbrauch des Gebäudes ist. Für 2012 ist eine erneute Novellierung geplant, mit dem Ziel, bis zum Jahr 2020 im Neubaubereich Niedrigstenergie- bzw. Passivhausstandard zu erreichen. Die Energieeinsparverordnung macht dabei nicht nur Vorgaben für die bautechnische Ausführung des Gebäudes, sondern auch für die installierte Anlagentechnik zur Beheizung, Trinkwassererwärmung, Belüftung, Klimatisierung und Beleuchtung.

Die Energieeinsparverordnung gilt für neu zu errichtende beheizte Wohn- und Nichtwohngebäude sowie bei An-, Umbauten und größeren Renovierungen an Bestandsgebäuden. Da die jährliche Neubau- und Sanierungsrate zusammen nur etwa 1 Prozent des Gebäudebestands betreffen, sind die Auswirkungen dieser Maßnahme auf den fossilen Heizenergiebedarf derzeit noch gering.

Die Erhöhung der Energieeffizienz kann neben einer Modernisierung der Heiztechnik durch Kraft-Wärme-Kopplung erreicht werden. Derzeit erfolgen etwa 10 Prozent der Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung. Die so erzeugte Wärme versorgt zu 90 Prozent Fernwärmenetze überwiegend in Ostdeutschland und zu 10 Prozent Nahwärmenetze oder Einzelgebäude. Im Bereich der Fernwärmenetze erfolgt die Wärmebereitstellung durch zentrale, wärmegeführte Heizkraftwerke oder Fernwärmeauskopplungen aus stromgeführten Kraftwerken. Insgesamt werden 84 Prozent der Fernwärme in Kraft-Wärme-Kopplung produziert.

Durch das im Jahr 2002 verabschiedete Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz sollte die Modernisierung und der Ausbau von fossil befeuerten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen durch Bonuszahlungen je erzeugter Einheit KWK-Strom gefördert werden. Gleichzeitig wurde in das Erneuerbare-Energien-Gesetz ein KWK-Bonus aufgenommen.

Dadurch konnte zwar eine Modernisierung der bestehenden Fernwärmeinfrastruktur erreicht werden, jedoch blieb der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung deutlich hinter den Erwartungen zurück. Durch die Novellierung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes 2009 wurden nun auch der Neubau von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sowie der Neu- und Ausbau von Wärmenetzen, in die Wärme aus KWK-Anlagen eingespeist wird, gefördert. Ferner legt das Gesetz ein Ausbauziel von 25 Prozent KWK-Strom fest.

Inwieweit die in dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz festgelegten Fördersätze ausreichen, um das gesetzte Ausbauziel zu erreichen, wird vielfach kritisch gesehen. Im Bereich der Fern-

wärmenetze ist durch geringe Neubautätigkeit, sinkenden Wärmebedarf aufgrund erfolgter Gebäudesanierungen und insbesondere in den östlichen Bundesländern stark zurückgehender Einwohnerzahlen nur mit einer Konsolidierung, bestenfalls einem geringfügigen Ausbau der bisherigen Anlagen zu rechnen.

Die Mehrzahl neuer KWK-Anlagen ist im Bereich kleiner und mittlerer Leistung zur Versorgung von Nahwärmenetzen oder Einzelobjekten zu erwarten, die auch eine Einbindung regenerativer Energieträger ermöglichen.

### **Ausbau erneuerbarer Energien**

Der Ausbau der erneuerbaren Energien im Strom- und im Wärmebereich soll durch das

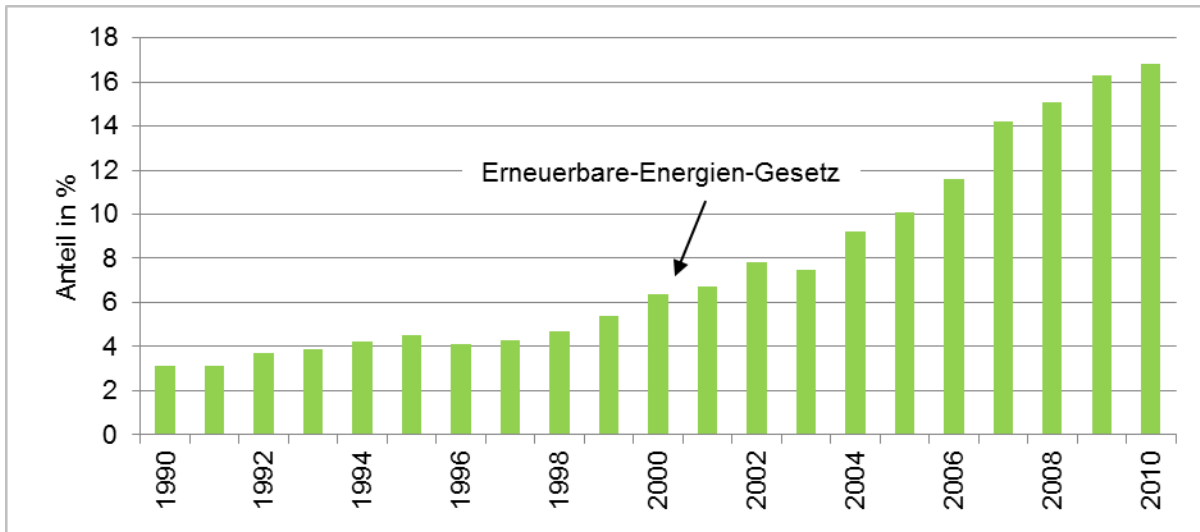
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und das
- Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG)

erreicht werden.

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz ist ein Markteinführungsprogramm für die Energieträger Photovoltaik, Wind, Biomasse, Geothermie und Wasserkraft. Kernpunkte sind der Vorrang für Erneuerbare Energien, eine umlagefinanzierte kostendeckende Einspeisevergütung sowie eine jährliche Degression (Absenkung) der Einspeisevergütung, die sich an dem technischen Fortschritt orientiert.

Mit diesen Maßnahmen konnte in den vergangenen Jahren der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromproduktion in Deutschland kontinuierlich gesteigert werden. Das wachsende Marktvolumen hatte eine stürmische Weiterentwicklung sowohl der eingesetzten Technologien als auch der Produktionsverfahren zur Folge. Das damit einhergehende Sinken der Produktionskosten wird durch die Degression der Einspeisevergütung abgeschöpft und gleichzeitig stimuliert. Dadurch nähert sich die Einspeisevergütung vergleichsweise schnell dem Marktpreisniveau, das selbst bei der Photovoltaik in Kürze erreicht sein wird.

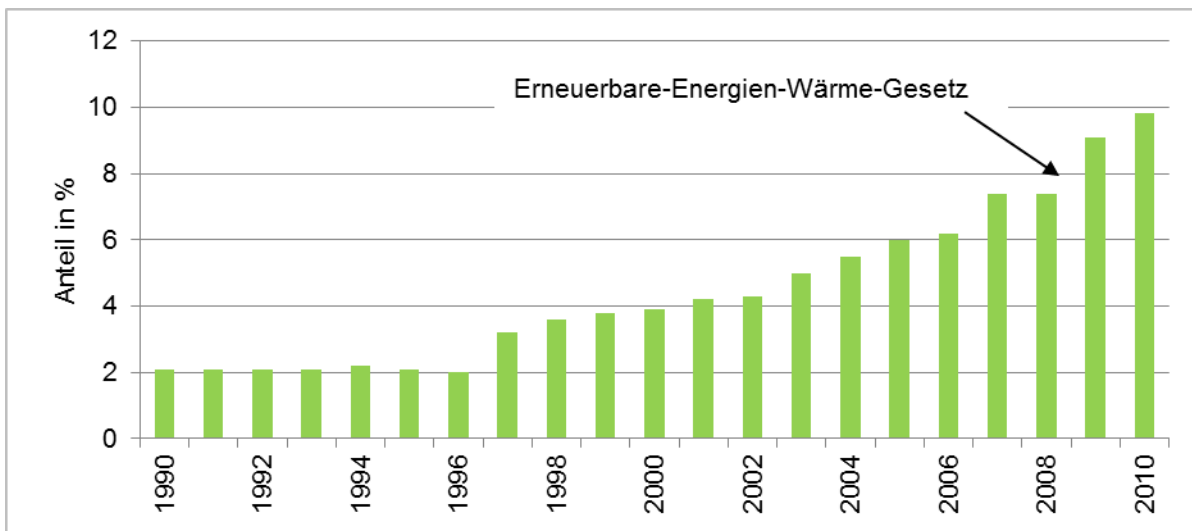
Das Erneuerbare-Energien-Gesetz ist also keine auf Dauer angelegte Subvention, sondern macht sich als Markteinführungsprogramm mittelfristig selbst überflüssig.



Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Deutschland, nach [7]

Der Ausbau erneuerbarer Energien im Wärmebereich hat bisher nicht die Dynamik erreicht, die im Strombereich durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz initiiert wurde.

Die 2008 erfolgte Verabschiedung des Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetzes soll hier als Markteinführungsprogramm dienen. Wenngleich zunächst nur das Neubausegment Gegenstand gesetzlicher Regelungen ist, werden auch für den Ausbau der Nahwärmenetze wichtige Impulse gesetzt.



Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmebereitstellung in Deutschland, nach [7]

---

Zweck des Gesetzes ist die Förderung erneuerbarer Energien mit dem Ziel, den Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergiebedarf zur Wärmebereitstellung bis zum Jahr 2020 auf 14 Prozent zu verdoppeln. Dazu sollen im Wesentlichen die folgenden Maßnahmen dienen:

- Jedes nach 2008 errichtete Gebäude muss seinen Wärmeenergiebedarf, je nach eingesetzter Technologie, zwischen 15 und 50 Prozent aus erneuerbaren Energien decken.
- Ersatzweise kann die Wärmebereitstellung durch Kraft-Wärme-Kopplung oder durch den Anschluss an ein Nah- oder Fernwärmenetz erfolgen.

Gebietskörperschaften können nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz nun einen Anschlusszwang an ein Nah- oder Fernwärmenetz aus Gründen des Klimaschutzes und der Ressourcenschonung verhängen.

### **Internalisierung externer Kosten**

Das Thema der Energiekosten hat die Einführung der erneuerbaren Energien in Deutschland lange begleitet und tut es im Bereich der Photovoltaik auch heute noch. Bei einem Vergleich unterschiedlicher Energieerzeugungsoptionen ist es daher umso wichtiger, neben der betriebswirtschaftlichen Dimension auch die volkswirtschaftliche Dimension zu betrachten.

Die Energiegestehungskosten setzen sich aus den internen und den externe Kosten zusammen.

- Zu den internen Kosten gehören die Aufwendungen für die Errichtung, den Betrieb und den Rückbau von Energieanlagen wie Kraftwerken, Leitungsnetzen oder Schutzanlagen. Ebenfalls dazu zählen die Kosten für die Gewinnung, den Transport und die Aufbereitung des Primärenergieträgers, die Entsorgung von Brennstoffrückständen und anderen Umwandlungsprodukten sowie Kapital- und Verwaltungskosten.

Die internen Kosten bilden zusammen mit Steuern, Abgaben und kalkulatorischem Gewinn den Energiepreis. Die internen Kosten sind somit zumindest theoretisch den Marktmechanismen unterworfen.

- Externe Kosten entstehen immer dann, wenn die wirtschaftliche Tätigkeit einer Gruppe von Personen sich auf eine andere Gruppe von Personen auswirkt, ohne das erstere die volle Verantwortung für diese Folgen übernimmt oder einen entsprechenden Ausgleich schafft.

Externe Kosten der Energieerzeugung treten vor allem in Form von Umwelt-, Gesundheits- und Klimafolgeschäden auf.

Sie entstehen überwiegend durch den Einsatz fossiler und nuklearer Brennstoffe und werden von der Allgemeinheit getragen. Beispiele sind eine Zunahme von Atemwegserkrankungen durch Feinstaub- und Stickoxidemissionen, die Schädigung von Ökosystemen durch sauren Regen in der Folge von Schwefeldioxidemissionen oder die Beschleunigung des Klimawandels durch die Emission von Treibhausgasen. Zu den externen Kosten zählen aber auch Arbeitsunfälle oder Berufskrankheiten in Ländern, die nur eine unzureichende gesetzliche Unfallversicherung aufweisen.

Die Abschätzung der externen Kosten der Energieerzeugung bedarf einer Reihe von Annahmen bzgl. aktueller und zukünftiger Schadenswirkungen. Einen Ansatz dazu liefert eine im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelte Methodenkonvention zur Schätzung externer Kosten [8]. Die darin berechneten Werte sind insbesondere aufgrund der Klimafolgeschäden durch Kohlendioxid-Emissionen nicht unerheblich. So verursacht jeweils eine Kilowattstunde elektrische Energie aus Braunkohle 8,7 Cent, aus Erdgas 3,9 Cent und mittels Photovoltaik 0,8 Cent externe Kosten.

Ernst Ulrich von Weizsäcker prägte den Satz „Preise müssen die ökologische Wahrheit sagen“. Auf die externen Kosten übertragen bedeutet dies, dass sie internalisiert, d.h. zu internen Kosten gemacht werden müssen. Dazu sind in der Regel staatliche Eingriffe nötig, die ordnungspolitisch oder marktbasierend erfolgen können.

Ein ordnungspolitisches Beispiel ist die Einführung strengerer Grenzwerte für die Schwefel-emissionen von Altkraftwerken in der Folge des 1985 verabschiedeten Helsinki-Protokolls. Ein marktbasierendes Beispiel ist der 2005 eingeführte Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten in der Europäischen Union. Auch das Erneuerbare-Energien-Gesetz kann als eine Maßnahme zur Internalisierung externer Kosten aufgefasst werden, da der durch die Einspeisevergütung initiierte Ausbau der regenerativen Energien zu einer Substitution von fossil oder nuklear erzeugter Energie führt. Die auf den Strompreis umgelegten Aufwendungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes führen somit zu einer Vermeidung externer Kosten.

## 5 Die Zukunft der Energieversorgung

Welchen Beitrag können nun Erneuerbare Energien zur Energieversorgung in einem hochindustrialisierten Land wie Deutschland leisten? Diese Frage führt

- einerseits auf die nutzbaren Energiepotenziale und
- andererseits auf die Geschwindigkeit ihrer Erschließung.

### Potenziale regenerativer Energieträger

Man unterscheidet u.a. zwischen dem technischen Potenzial und dem Erwartungspotential eines Energieträgers. Während sich das technische Potential auf die derzeitigen ingenieurtechnischen Grenzen und verfügbaren Standorte bezieht, beschreibt das Erwartungspotential den Anteil des technischen Potentials, der unter ökonomischen, ökologischen und produktionstechnischen Rahmenbedingungen innerhalb eines bestimmten Zeitraums umgesetzt werden kann.

In der folgenden Tabelle sind die derzeitige (2010) Nutzung, das technische Potential und die zu erwartende Potentialausschöpfung im Jahr 2050 für verschiedene regenerative Energieträger in Deutschland notiert.

	Ist in TWh/a 2010	Technisches Potential in TWh/a	Erwartungspotential 2050
<b>Strombedarf</b>	<b>608</b>		
Photovoltaik	12	150	41 %
Windkraft (onshore)	38	175	58 %
Windkraft (offshore)	0	280	57 %
Wasserkraft	21	25	100 %
Geothermie	0	90	27 %
Biomasse	33	60	100 %
<b>Wärmebedarf</b>	<b>1430</b>		
Solarthermie	5	400	24 %
Erdwärme	6	300	34 %
Biomasse	125	170	96 %
<b>Kraftstoffbedarf</b>	<b>620</b>		
Biomasse	36	90	93 %

Energiebedarf und Nutzung regenerativer Energieträger im Jahr 2010 [7], Technisches Potential regenerativer Energieträger [7] und Erwartungspotential für das Jahr 2050 [9]

Man erkennt, dass kein Energieträger alleine den Strom- oder Wärmebedarf in Deutschland decken können. Vielmehr wird ein Zusammenspiel aller regenerativen Energieträger in Verbindung mit einer effizienzgetriebenen Verringerung des Energieverbrauchs notwendig sein, um die Abhängigkeit Deutschlands von den fossilen und nuklearen Energieträgern deutlich zu verringern und einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

Auch die Nutzung des technischen Potentials der einzelnen Energieträger wird mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfolgen:

- Während bestimmte Energieträger wie beispielsweise die Wasserkraft ihr Potential bereits heute weitgehend ausgeschöpft haben,
- wird die Potentialausnutzung bei Photovoltaik oder Geothermie im Jahr 2050 aufgrund der hohen spezifischen Investitionskosten noch lange nicht abgeschlossen sein.
- Eine Sonderrolle nimmt die Windkraft ein: aufgrund der bereits heute annähernd marktgängigen Produktionskosten kommt dem raschen Ausbau der Windkraft eine wichtige kostendämpfende Funktion innerhalb der Strompreisentwicklung zu.

### **Szenarien**

Die Geschwindigkeit und Tiefe, mit der bestimmte Energiepotentiale erschlossen werden, hängt sowohl von technischen als auch politischen Randbedingungen ab. Mit Hilfe von Modellrechnungen – sogenannten Szenarien – können die Auswirkungen von Handlungsalternativen auf die Energieversorgung untersucht werden. Aus ihnen lassen sich sowohl Handlungsnotwendigkeiten, aber auch Gestaltungsspielräume ableiten.

Die den Energieszenarien zu Grunde liegenden Modelle basieren auf einer Reihe von Annahmen. Dies betrifft zum Beispiel

- die Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung,
- das Konsumverhalten,
- die technische Entwicklung von Energiewandlern oder
- die Preisentwicklung von Rohstoffen.

Zusätzlich sind Randbedingungen festzulegen. Diese können politischer Natur sein wie der Ausstieg aus der Kernenergie oder die gezielte Förderung bestimmter Energieträger. Die Randbedingungen können aber auch als Zielvorgaben formuliert sein, wie beispielsweise eine



Reduktion des Kohlendioxid-Ausstoßes um 80 Prozent. Häufig wird ein Referenzszenario parallel gerechnet, das als Randbedingung die Fortsetzung der bisherigen Energiepolitik enthält.

Eine in der energiepolitischen Diskussion Deutschlands zentrale Rolle nehmen die in der „Leitstudie“ entwickelten Langfristszenarien ein [9]. Im Auftrag des Bundesumweltministeriums wurde unter Federführung des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik ein Szenario erarbeitet, welches aufzeigt, wie Deutschland seine Treibhausgasemissionen bis 2050 auf rund 20 Prozent des Werts von 1990 senken kann. Gleichzeitig werden in diesem Szenario die Nachhaltigkeitsziele der Bundesregierung abgebildet und der dadurch erforderliche Strukturwandel der Energieversorgung dargestellt. Der Ausstieg aus der Kernenergie ist Bestandteil des Szenarios.

Wesentliche Gestaltungselemente des erstmals 2007 veröffentlichten und jährlich weiterentwickelten und aktualisierten Leitszenarios sind

- der substanzielle Ausbau der regenerativen Energien,
- eine erhöhte Effizienz in der Energienutzung im Strom-, Wärme- und Mobilitätsbereich sowie
- eine verbesserte Umwandlungseffizienz durch einen verstärkten Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung.

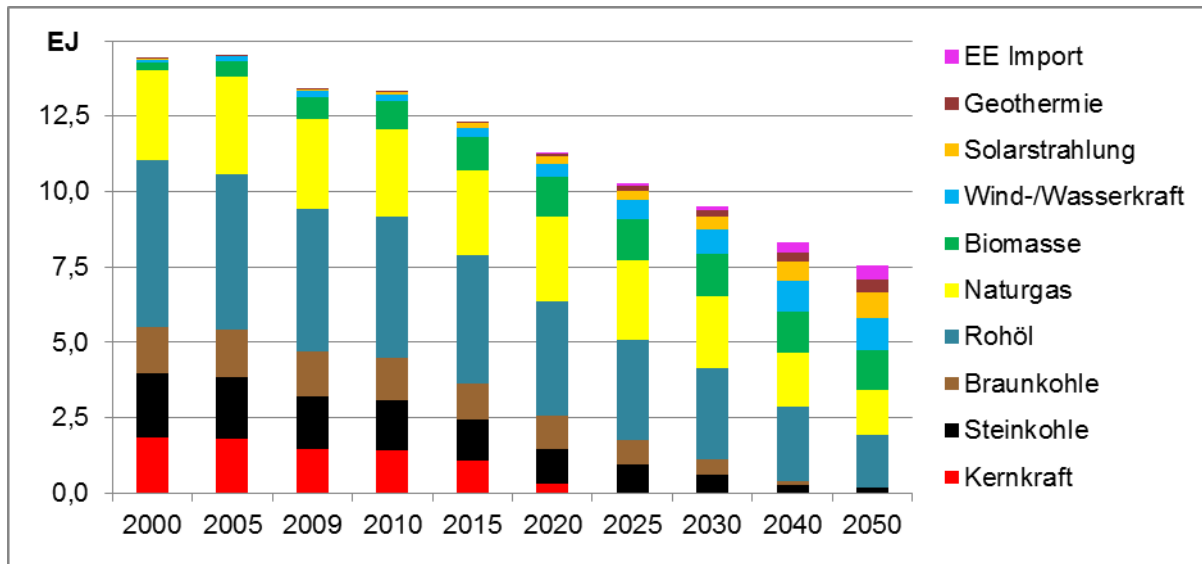
### **Energiebedarf**

Die Leitstudie zeigt, dass es durch einen Umbau des Energiesystems grundsätzlich möglich ist, die Klimaschutzziele zu erreichen. Dazu ist es insbesondere notwendig, frühzeitig eine Effizienzstrategie zu entwickeln, die das Ansteigen des Energiebedarfs wirkungsvoll dämpft.

Im Einzelnen lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Effizienzsteigerung und kontinuierlicher Ausbau der regenerativen Energien führen bis zum Jahr 2020 zu einer Verringerung des Primärenergiebedarfs um 17 Prozent im Vergleich zu 2009.
- Der Anteil regenerativer Energien steigt auf knapp 19 Prozent.

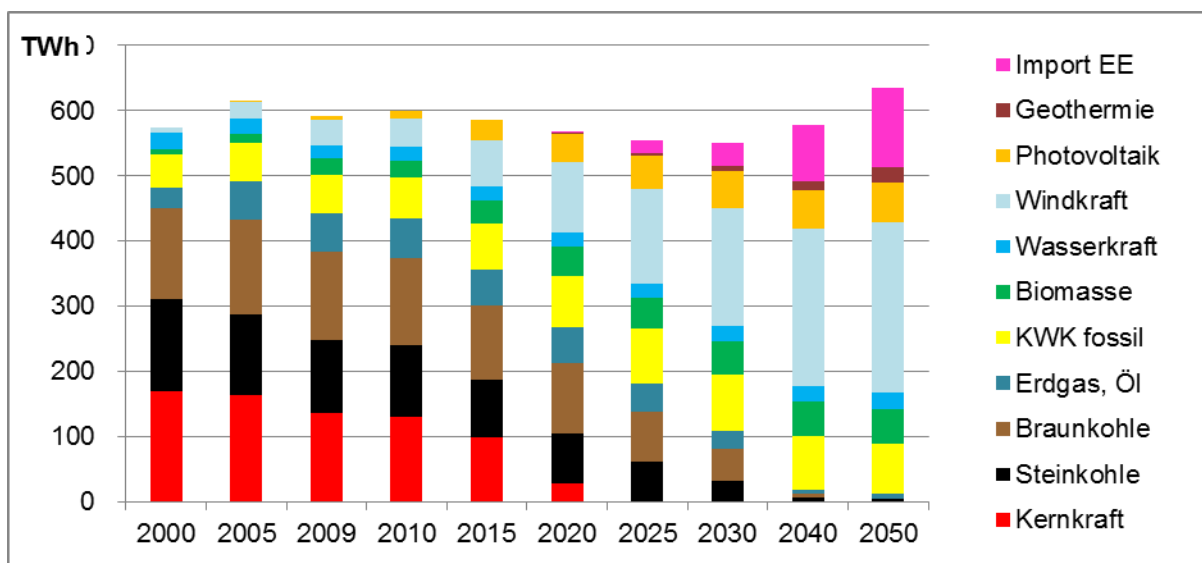
- Im Jahr 2050 liegt der Primärenergiebedarf noch bei 56 Prozent des Niveaus von 2009, wovon gut die Hälfte durch regenerative Energien gedeckt wird. Bei dem Beitrag der einzelnen Sektoren gibt es jedoch große Unterschiede.



Struktur des Primärenergieeinsatzes in Deutschland nach dem Basisszenario der Leitstudie 2010 [9]

### Stromerzeugung

Die Bruttostromerzeugung wird sich nominal nur geringfügig verändern. Jedoch wird der dazu notwendige Primärenergieaufwand durch forcierte Kraft-Wärme-Kopplung besser genutzt. Der Anteil regenerativer Energien wird bis 2020 auf 40 Prozent anwachsen und 2050 bei knapp 90 Prozent liegen.

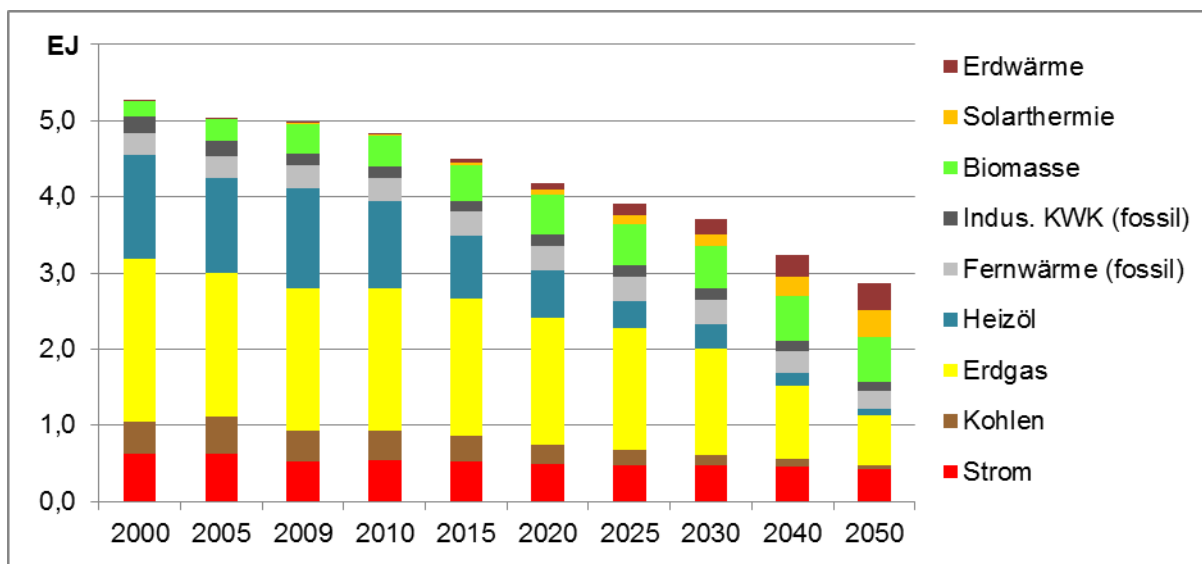


Struktur der Stromerzeugung in Deutschland nach dem Basisszenario der Leitstudie 2010 [9]

## Wärmesektor

Der Wärmesektor wird bis 2050 einen gravierenden Strukturwandel durchlaufen. Zum einen führen Effizienzmaßnahmen wie z.B. die Gebäudesanierung zu einem sinkenden Wärmebedarf. Zum anderen muss aufgrund wachsender KWK-Anlagen der Anteil der netzgebundenen Wärmeversorgung (Nah- und Fernwärme) gegenüber der Einzelheizung deutlich ansteigen.

Der Anteil regenerativer Energien wird bis 2020 auf 18 Prozent anwachsen und 2050 bei gut 50 Prozent liegen. Der darin enthaltene Anteil der Biomasse wird sich ab 2020 praktisch nicht mehr verändern, da die ökologischen Potentialgrenzen erreicht sind.

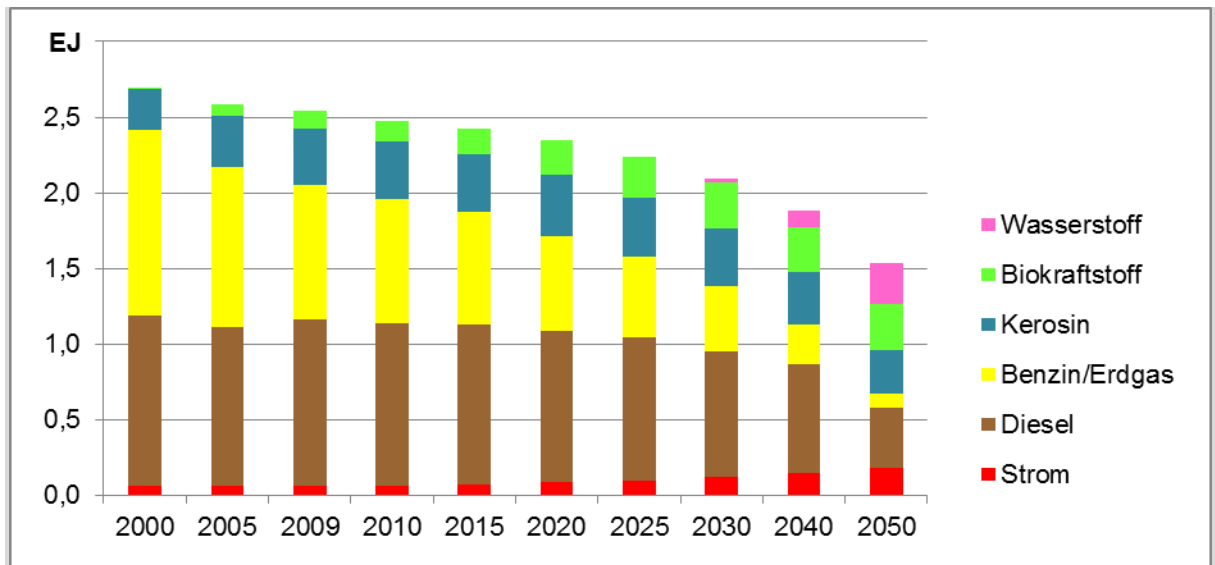


Struktur der Wärmebereitstellung in Deutschland nach dem Basisszenario der Leitstudie 2010 [9]

## Verkehrssektor

Im Verkehrssektor wird die Effizienzsteigerung z.T. durch Wachstumstendenzen im Güterverkehr aufgefangen. Insgesamt wird der Energiebedarf im Verkehrssektor bis 2050 um etwa ein Viertel sinken. Biogene Kraftstoffe („Biokraftstoffe“) werden dann einen Anteil von 17 Prozent ausmachen.

Eine grundlegende technologische Festlegung auf ein Mobilitätskonzept, das den Verbrennungsmotor ablöst (Elektrischer Speicher vs. Wasserstoffspeicher), wird bis 2050 noch nicht erwartet.



Struktur des Energieeinsatzes im Verkehrssektor in Deutschland nach dem Basisszenario der Leitstudie 2010 [9]

## Ausblick

Bis 2020 werden die meisten technologischen Optionen zur Nutzung regenerativer Energien noch einer Flankierung durch energiepolitische Maßnahmen wie beispielsweise dem EEG bedürfen. Nach 2020 kann auch aufgrund der absehbaren Preisentwicklung der fossilen Energieträger mit einem selbsttragenden Ausbau der regenerativen Energien gerechnet werden.

Textveröffentlichung in der FES OnlineAkademie: März 2012

*Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak (\*1965) studierte an der Universität Erlangen-Nürnberg Elektrotechnik. Nach seiner Promotion beschäftigte sich Viktor Wesselak gut fünf Jahre bei der Siemens AG mit regelungstechnischen Fragestellungen, bevor er im September 2003 den Ruf auf die Professur Regenerative Energiesysteme an der Fachhochschule Nordhausen annahm. Sein Schwerpunkt in Forschung und Lehre liegt insbesondere auf systemtechnischen Fragestellungen regenerativer Energiesysteme.*

*Wesselak wurde 2008 von der amtierenden Ministerpräsidentin des Freistaats Thüringen in den „Beirat zur Nachhaltigen Entwicklung“ berufen und steht diesem Gremium bis heute vor.*

## Literatur

- [1] Schabbach, Thomas; Wesselak, Viktor: Energie. Springer, Heidelberg (2012)
- [2] BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hg.): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Hannover (2010)
- [3] IEA - Internationale Energie Agentur (Hg.): Key World Energy Statistics 2010. Paris (2010)
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.): Klimaänderung 2007 - Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. New York (2007)
- [5] N.N.: Der Weg zur Energie der Zukunft - sicher, bezahlbar und umweltfreundlich. Eckpunktepapier der Bundesregierung zur Energiewende. Berlin (2011)
- [6] Statistisches Bundesamt (Hg.): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Indikatoren zu Umwelt und Ökonomie. Wiesbaden (2011)
- [7] Bundesministerium für Umwelt (Hg.): Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung. Berlin (2011)
- [8] Umweltbundesamt (Hg.): Ökonomische Bewertung von Umweltschäden. Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten. Dessau (2007)
- [9] Nitsch, Joachim; et.al.: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global – Leitstudie 2010. Berlin (2011)
- [10] Scheer, Herrmann: Solare Weltwirtschaft – Strategien für die ökologische Moderne. Kunstmann, München (1999)