

## **6. Die Modellergebnisse im Vergleich**

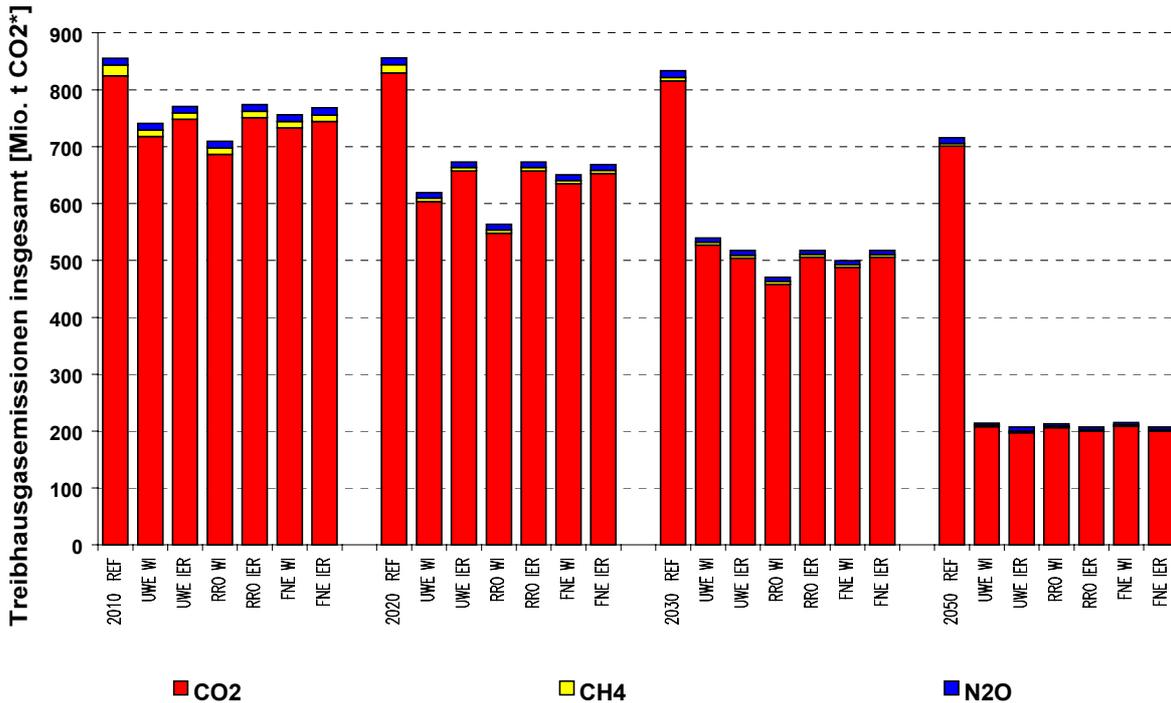
Die Modellergebnisse zeigen, dass es zur Erreichung der Reduktionsziele hinsichtlich der THG-Emissionen verschiedene Wege gibt. Den Weg über eine CO<sub>2</sub>-freie Kohlenutzung, den starken Ausbau der regenerativen Energien im Verbund mit einer Energieeinsparoffensive oder den Weg über den Wiedereinstieg in die Kernenergie.

Folgende Entwicklungslinien erweisen sich in allen Szenarien trotz der unterschiedlichen Rahmensetzungen als robust:

- Die vorgegebenen Reduktionsziele werden erreicht, zum Teil werden sie übererfüllt (Abb. 5.4-1)
- Energie wird in allen Bereichen effizienter genutzt, Energiesparen hat einen hohen Stellenwert.
- Die Nutzung fossiler Energieträger wird stark eingeschränkt.
- Die regenerativen Energiequellen gewinnen, zum Teil massiv, an Bedeutung. Langfristig erreichen Biomasse und Geothermie eine mit der Wasserkraft vergleichbare Bedeutung.
- Der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch steigt.

Zwischen den einzelnen Szenarien gibt es allerdings auch gravierende Unterschiede. So erfolgt zwar in allen Szenarien eine kräftige Verringerung des Verbrauchs an fossilen Energieträgern. Wegen der Möglichkeit zur CO<sub>2</sub>-Deponierung ist diese im Szenario Umwandlungseffizienz weniger stark ausgeprägt als in den beiden anderen Szenarien.

Abbildung 6-1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen bis 2050



Die Effizienzgewinne sind in der REG-/REN-Offensive sowohl bei WI wie auch bei IER am stärksten ausgeprägt (Abbildung 6-2 bis 6-7). Hier macht sich bemerkbar, dass kostengünstigere Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Einsparung (z.B. Stromerzeugung in Kohlekraftwerken mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung oder in Kernkraftwerken) nicht zur Verfügung stehen und deshalb z.B. durch verstärkte Forschung und Entwicklung besondere Anstrengungen unternommen werden, um die Effizienzpotenziale auszuschöpfen.

Ein deutlich anderes Bild zeigt das Szenario Fossil-nuklearer Energiemix, in dem wegen des kostengünstig und CO<sub>2</sub>-frei hergestellten Stroms aus Kernkraftwerken- die Effizienzsteigerungen bei WI nicht stärker ausgeprägt sind als in der Referenz, bei IER fallen sie sogar schwächer aus.

Für fast alle Szenarien zeigen die Modellergebnisse des WI in den Nachfragesektoren höhere Effizienzgewinne als das IER-Modell, in den meisten Fällen setzen sie zudem im Zeitverlauf früher ein. Ein Grund dafür ist in den unterschiedlichen Annahmen zur Veränderung der Sanierungsrate im Gebäudebereich zu sehen sowie in differierenden Einschätzungen der wirtschaftlichen Einsparpotenziale in den verschiedenen Sektoren. Bei WI werden signifikant höhere Sanierungsraten bereits ab 2010 realisiert, bei IER erhöhen sie sich kontinuierlich im Zeitverlauf. Hinzu kommen unterschiedliche Annahmen über die Veränderung der Auslastung im Güterverkehr. Hier geht IER von gegenüber der Referenz unveränderten Bedingungen aus, bei WI erhöht sich die Auslastung gegenüber der Referenz um 15% mit entsprechenden Folgen für den spezifischen Treibstoffverbrauch. Ein weiterer Grund für die Unterschiede ist darin zu sehen, dass WI – mit Ausnahme des Industriebereichs - die

rentablen Einsparpotenziale höher einschätzt als IER und diese dann früher ausschöpft.

Als Folge der Effizienzgewinne auf der Endenergieebene liegt der Endenergieverbrauch in allen Szenarien tiefer als in der Referenz. Zudem findet eine Verlagerung hin zu THG-ärmeren Endenergieträgern statt, also zu Strom, Fernwärme und regenerativen Energien. Unterschiede weisen die Modellergebnisse für die verbleibenden fossilen Energieträger auf. Während der Einsatz von Kohle in der Industrie sowohl bei WI als auch bei IER in den Szenarien REG-/REN-Offensive und Fossil-nuklearer Energiemix auf das technisch notwendige Maß zurück gefahren wird (Oxygenstahlerzeugung), zeigt sich bei IER über die Szenarien hinweg ein stärkerer Einsatz von Mineralöl und ein vergleichsweise niedriger Erdgaseinsatz. Das WI weist hier gegenläufige Ergebnisse aus. Grund dafür sind die unterschiedlichen Effizienzverbesserungen in den einzelnen Verbrauchssektoren. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass WI in allen Szenarien in mehr oder weniger großem Umfang Wasserstoff als Sekundärenergieträger einsetzt. Hier findet ein Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft statt, wobei davon ausgegangen wird, dass dieser CO<sub>2</sub>-freie Energieträger nach 2050 unter der Voraussetzung dann weiter gehender THG-Minderungsziele ohnehin gebraucht wird. Beim IER wird zwar in den Szenarien Umwandlungseffizienz und Fossil-nuklearer Energiemix auch Wasserstoff hergestellt. Doch wird er im Wesentlichen im Umwandlungssektor zur Erzeugung von Strom und Wärme in KWK-Anlagen (Brennstoffzellen) genutzt.

Der Stromverbrauch ist nur in den Szenarien REG-/REN-Offensive und Umwandlungseffizienz und hier nur bei WI geringer als in der Referenz. Im Szenario Fossil-nuklearer Energiemix liegt er im Jahr 2050 bei IER und WI um mehr als die Hälfte über den Referenzwerten. Bei WI ist das vor allem auf den vergleichsweise hohen Stromeinsatz zur Wasserstoffherstellung zurück zu führen, während bei IER Strom in größerem Umfang zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme genutzt wird.

Abbildung 6-2: Entwicklung des spezifischen Primärenergieverbrauchs (GJ/DM<sub>95</sub> BIP, Index, 1998=100)

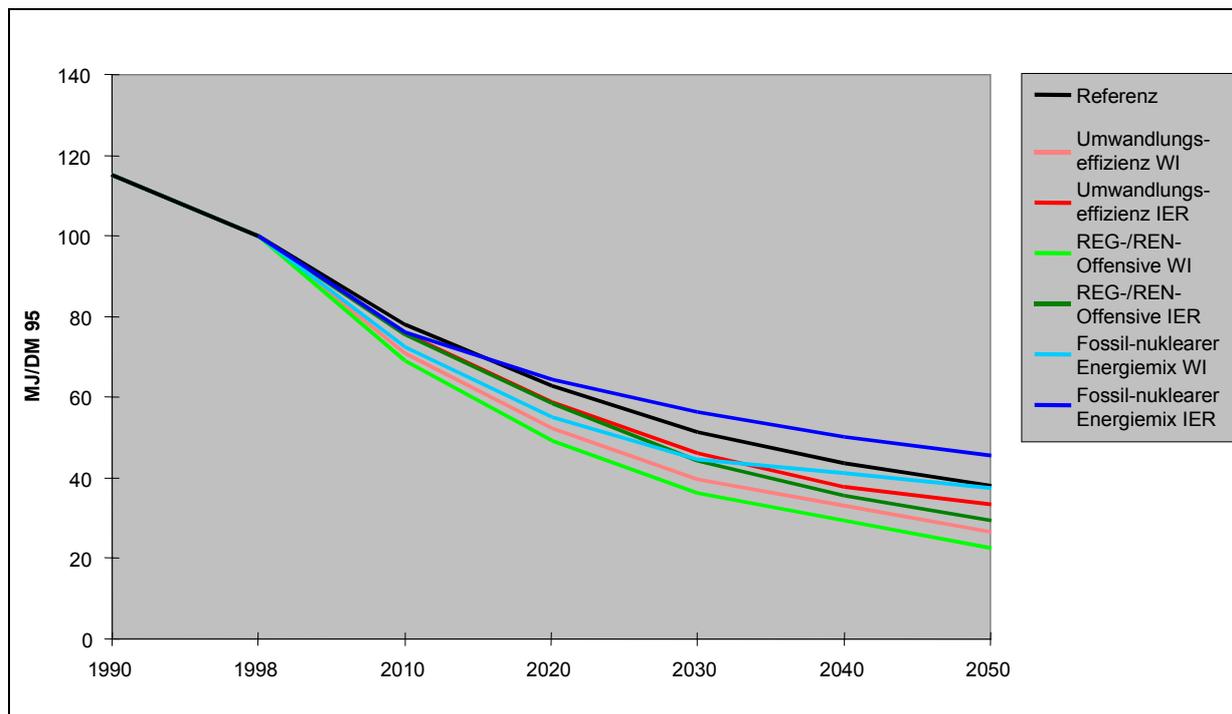


Abbildung 6-3: Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs in der Industrie (GJ/DM95 Produktion, Index, 1998=100)

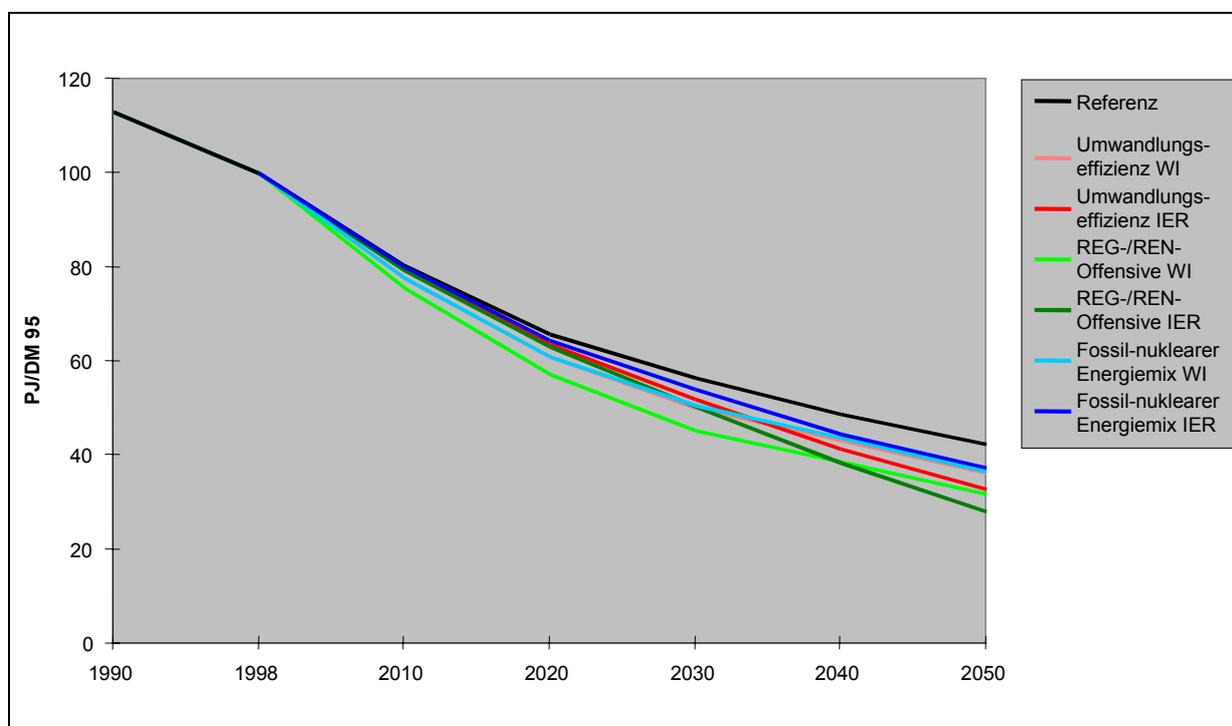


Abbildung 6-4: Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs im Sektor GHD (GJ/Beschäftigten, Index, 1998=100)

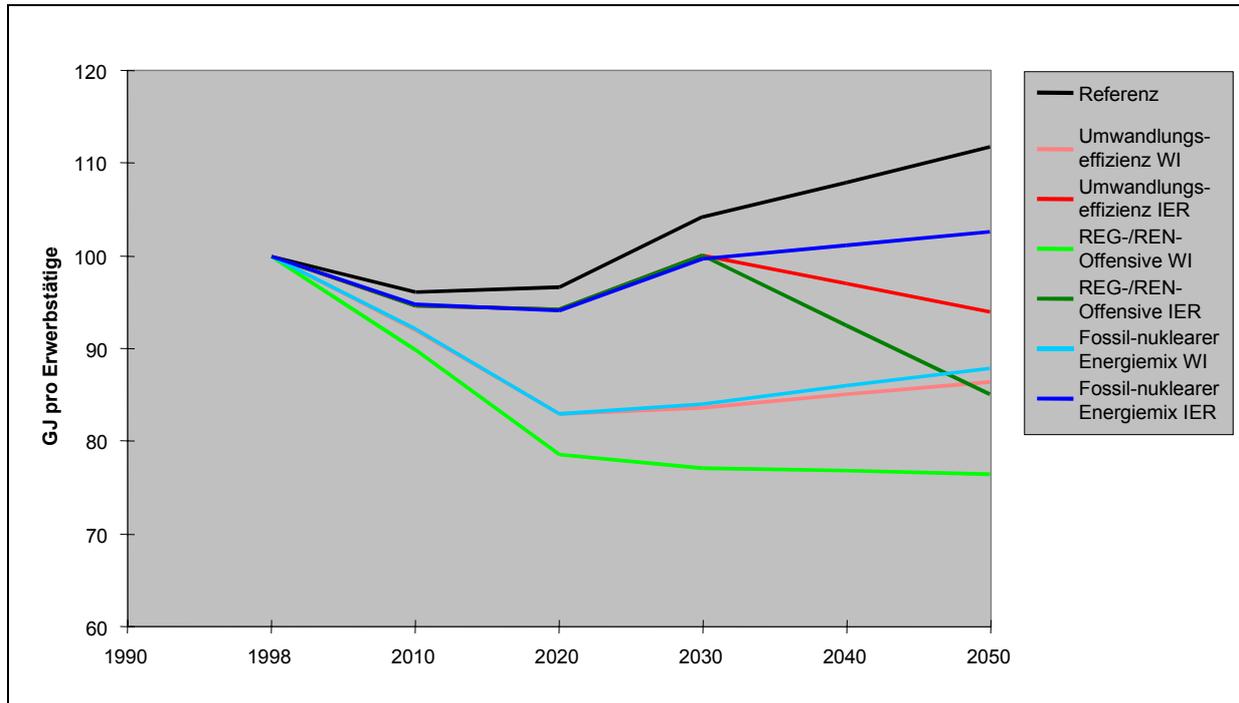


Abbildung 6-5: Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs der Privaten Haushalte (MJ/m<sup>2</sup> Wohnfläche, Index, 1998=100)

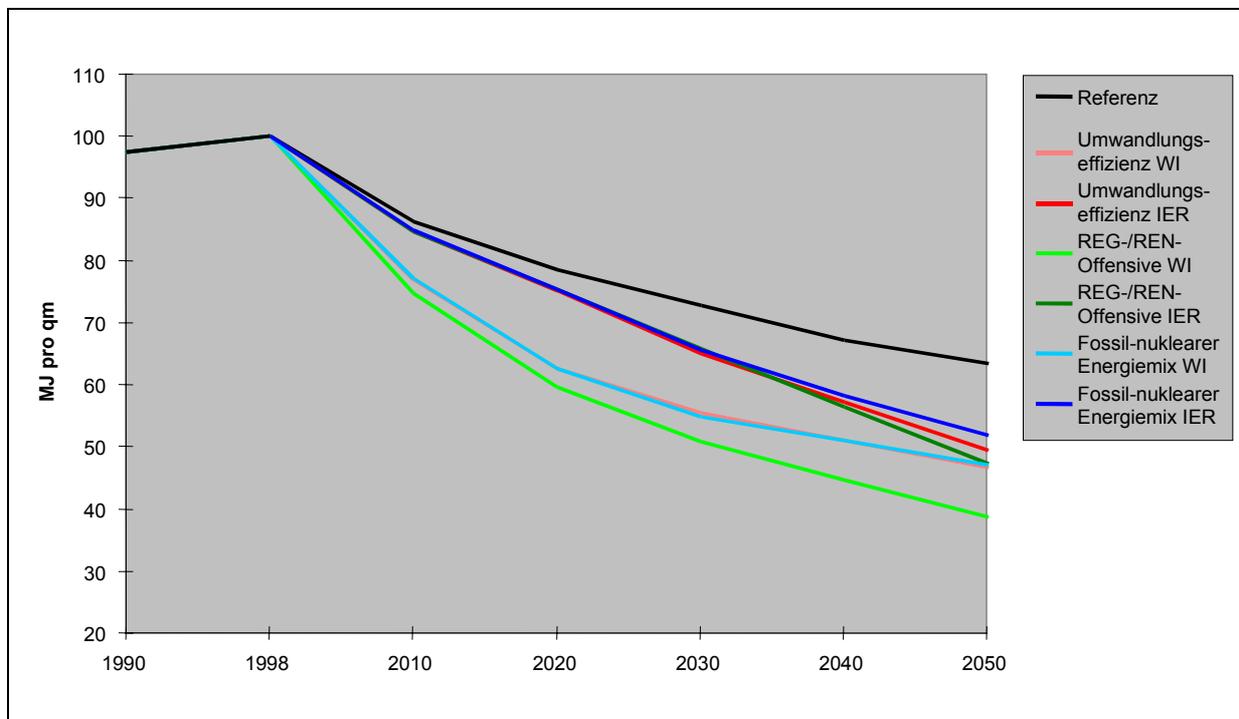


Abbildung 6-6: Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs im Personenverkehr (kJ/Pkm, Index, 1998=100)

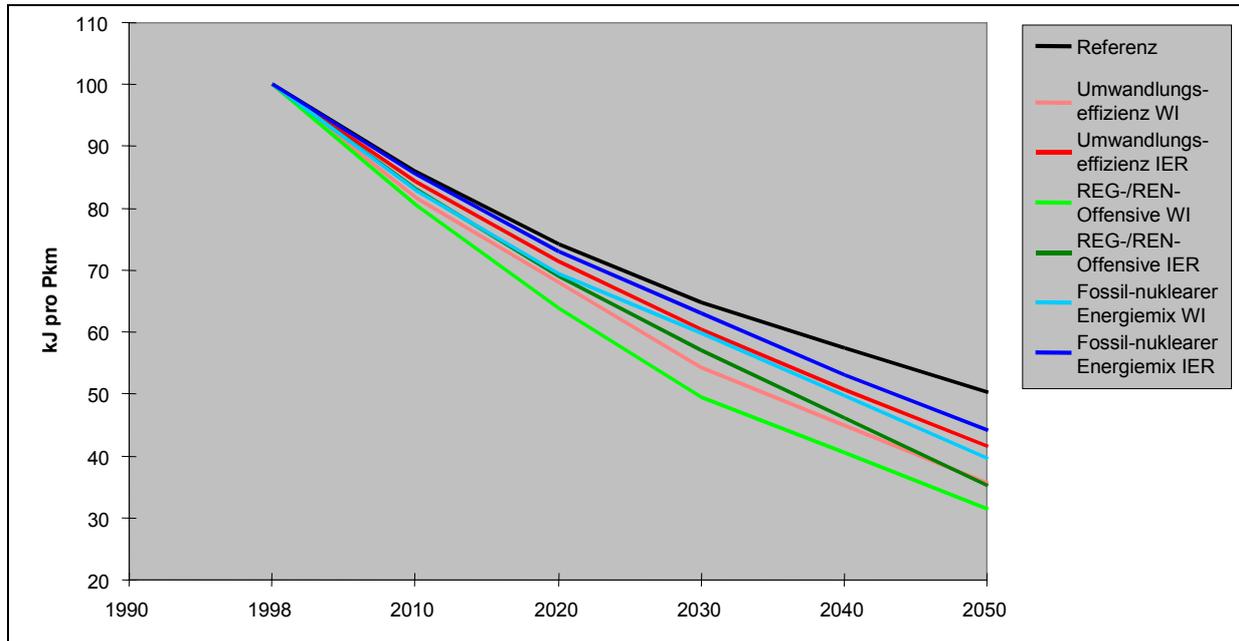
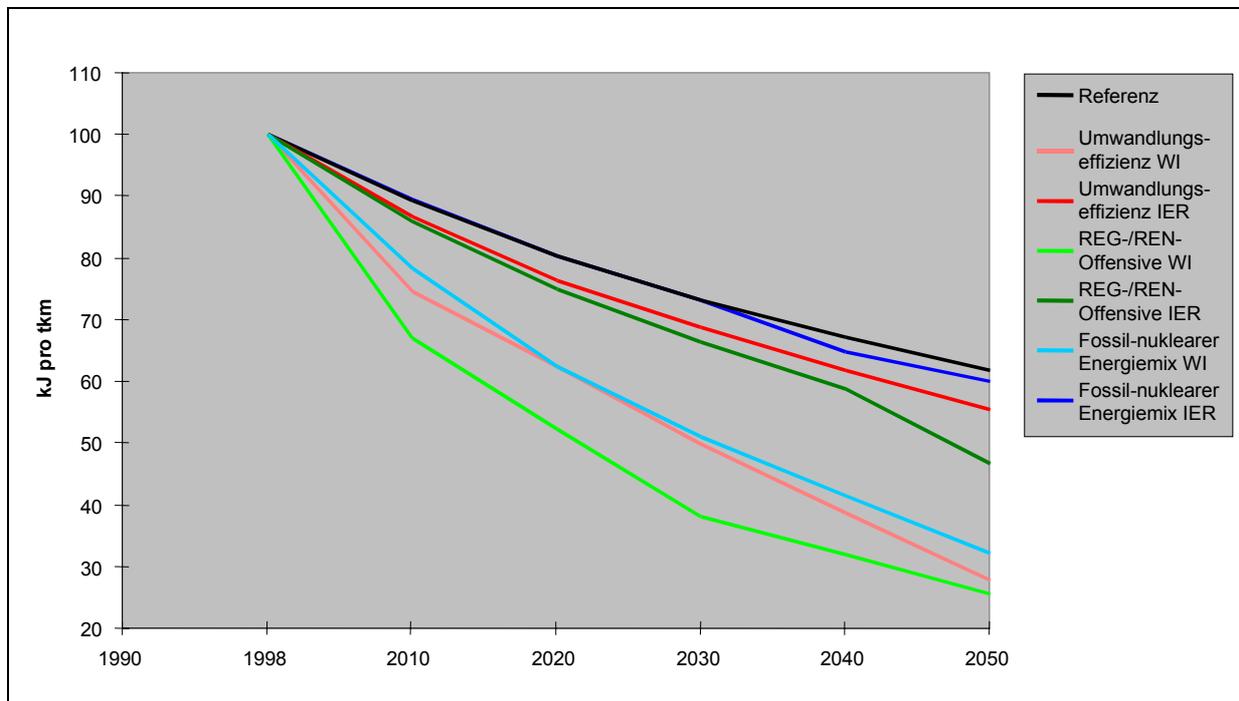


Abbildung 6-7: Entwicklung des spezifischen Endenergieverbrauchs im Güterverkehr (kJ/tkm, Index, 1998=100)



Die Strombereitstellung weist in den Szenarien zum Teil eine massiv geänderte Struktur im Vergleich zur Referenz auf (Abbildung 6-8):

- Im Szenario Umwandlungseffizienz sind die Abweichungen noch vergleichsweise gering. Im Jahr 2050 wird vom IER-Modell annähernd genauso viel Kohle zur Stromerzeugung eingesetzt wie in der Referenz, dafür spielt Erdgas keine Rolle mehr. WI fährt den Kohleeinsatz etwas zurück und setzt etwas stärker auf Erdgas. Sowohl bei IER wie bei WI gewinnen die Regenerativen an Bedeutung.
- Im Szenario REG-/REN-Offensive ist die Kohle in der Stromerzeugung bis 2050 nahezu verschwunden. Erdgas hat eine wichtige Funktion, der größte Teil des Stroms wird aber auf Basis erneuerbarer Energien im Inland erzeugt oder im Ausland hergestellt und dann importiert.
- Im Szenario Fossil-nuklearer Energiemix dominiert bei IER und WI die Kernenergie die Stromerzeugung. Im Modell des WI wird – auch aus Gründen der Energieträgerdiversifizierung - noch etwas Erdgas eingesetzt. In beiden Modellen wird gegenüber 1998 die Stromerzeugung aus REG-Quellen ausgebaut. Im Vergleich zu den anderen Szenarien bleibt der REG-Anteil an der Stromerzeugung aber gering.

Bei den regenerativen Energien wird insbesondere die Windenergie weiter ausgebaut. Auch die Biomasse legt in allen Szenarien zu und gegen Ende des Betrachtungszeitraumes kommt der Geothermie eine zunehmend größere Bedeutung zu. Die Wasserkraft kann auf Grund der vorhandenen Potenziale nur noch wenig ausgebaut werden. Die Photovoltaik bleibt von untergeordneter Bedeutung. Im Ausland regenerativ erzeugter Strom leistet – mit Ausnahme des Szenarios Fossil-nuklearer Energiemix bei IER – einen wichtigen Beitrag zur Deckung des Strombedarfs im Jahr 2050 (Abbildung 6-9).

In allen Szenarien werden – neben den THG-Emissionen - auch andere energiebedingte Emissionen massiv verringert. Die Flächeninanspruchnahme ist dann höher als in der Referenz, wenn Windkraftwerke und Photovoltaikanlagen stärker expandieren. Das ist in den Szenarien Umwandlungseffizienz und REG-/REN-Offensive der Fall.

Abbildung 6-8: Entwicklung der Nettostrombereitstellung nach Energieträgern (TWh)

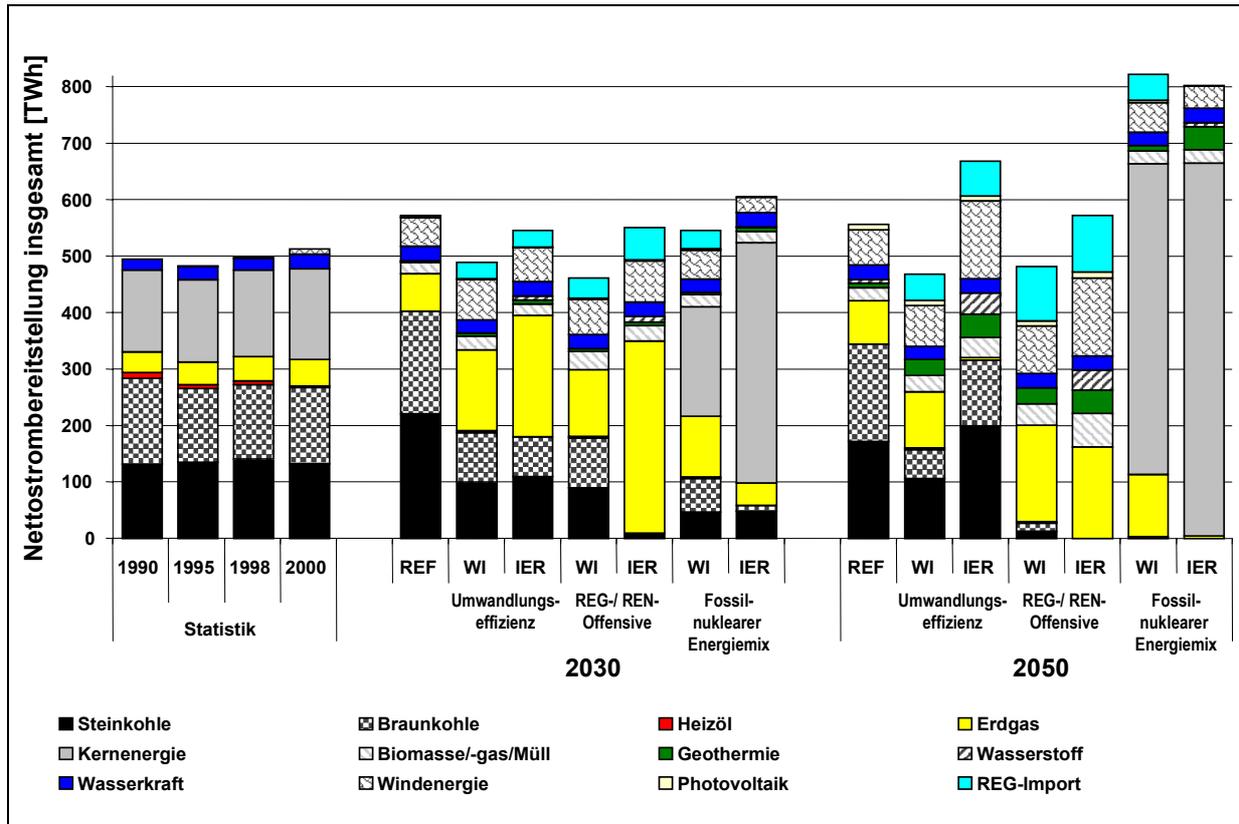
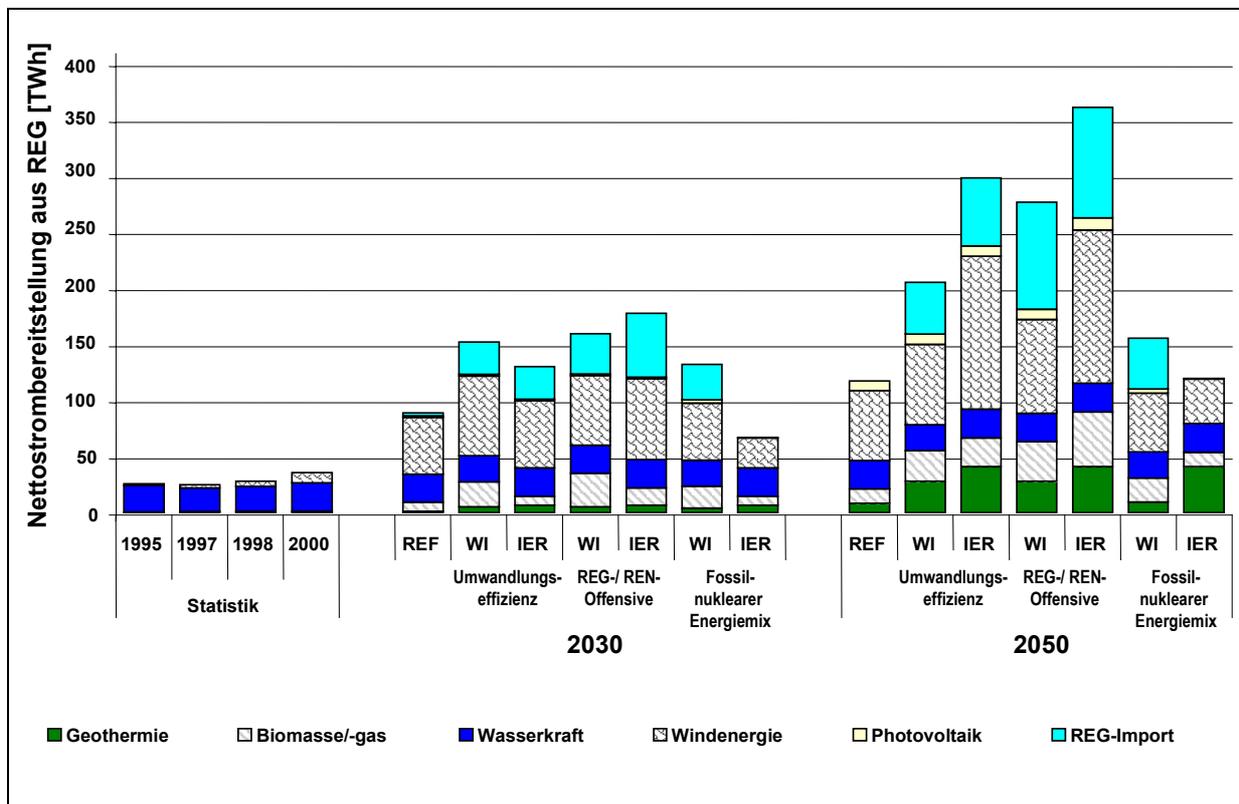


Abbildung 6-9: Entwicklung der Nettostrombereitstellung aus REG (TWh)



Mit der Absenkung der THG-Emissionen sind in den Szenarien unterschiedlich hohe Differenzkosten im Vergleich zur Referenz verbunden. Sie belaufen sich (ohne Berücksichtigung der externen Kosten sowie ohne Bewertung des Nutzenentgangs durch den Umstieg vom MIV auf den nicht motorisierten Verkehr), kumuliert und auf das Jahr 1998 abdiskontiert, auf Beträge zwischen -92 und 142 Mrd EUR. Bezieht man die externen Kosten in der Definition der Fraktion SPD/Bündnis 90/ Die Grünen mit ein, variieren die Beträge zwischen -2387 und 4915 Mrd EUR. Bezieht man die externen Kosten sowie den bewerteten Nutzenentgang durch den Umstieg vom MIV auf den nicht motorisierten Verkehr in der Definition der Fraktion CDU/CSU/FDP mit ein, ergeben sich entsprechende Werte zwischen -14 und 260 Mrd EUR.

## 7. Gesamtwirtschaftliche Einordnung der Modellergebnisse

Die energiewirtschaftlichen Veränderungen, die mit der Reduktion der THG-Emissionen verbunden sind, haben Rückwirkungen auf die Wirtschaft. Im Rahmen dieser Studie konnten diese Effekte nicht im Detail untersucht und quantifiziert werden. Auf Grund der strukturellen Veränderungen im Energiesystem lassen sich aber einige qualitative Aussagen machen, die Hinweise darauf geben, in welche Richtung die deutsche Volkswirtschaft beeinflusst werden könnte, wenn die Anstrengungen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen verstärkt werden.

Sofern die in den Reduktionsszenarien vorausgesetzten Veränderungen im Investitions- und Energieverbrauchsverhalten nicht autonom und freiwillig erfolgen, müssen sie durch den Einsatz politischer Instrumente eingeleitet werden. Dies können besondere Steuern oder Abgaben, Subventionen oder auch Informationskampagnen sein. In all diesen Fällen wird in die Präferenzstruktur der handelnden Personen eingegriffen, und sie wird in Richtung THG-Vermeidung verschoben. Damit sind Veränderungen in der Nachfrage- und Angebotsstruktur in der Wirtschaft verbunden. Es werden mehr sparsame Elektrogeräte gekauft, Gebäude werden besser gedämmt, mehr Anlagen zur Nutzung der regenerativen Energien werden produziert und verkauft, weniger konventionelle Kraftwerke abgesetzt und betrieben, weniger fossile Brenn- und Kraftstoffe verbraucht. Höhere Energiepreise können den Standort Deutschland für energieintensive Branchen unattraktiv machen. Die Förderung regenerativer Energien kann deutschen Anlagenherstellern einen Vorsprung auf den Weltmärkten verschaffen.

Diese Veränderungen in der Wirtschaftsstruktur vollziehen sich nicht reibungslos. Sie verursachen Transaktionskosten, und es kann vorübergehend zu erhöhter Arbeitslosigkeit kommen. Welches Ausmaß die Veränderungen annehmen hängt nicht zuletzt davon ab, wie sich das ökonomisch relevante Ausland verhält. Verfolgen die Staaten der EU eine ähnlich anspruchsvolle Klimaschutzstrategie? Welche politischen Maßnahmen ergreifen andere Industrieländer zum Klimaschutz? Je eher die Maßnahmen international abgestimmt sind, um so weniger ist mit negativen Konsequenzen in Deutschland zu rechnen. Eine ähnlich generelle Aussage lässt sich auch hinsichtlich des Zeitpfades treffen, auf dem die Klimaschutzmaßnahmen umgesetzt werden. Je eher die Maßnahmen im Rahmen der normalen Ersatz- und Renovierungszyklen durchgeführt werden, um so geringer sind die entstehenden Mehrkosten (bzw. um so höher die Minderkosten) und um so unwahrscheinlicher sind negative gesamtwirtschaftliche Konsequenzen.

Auf längere Sicht ist für die wirtschaftlichen Konsequenzen entscheidend, ob mit dem Einschwenken auf einen stärker Klimaschutz-orientierten Pfad volkswirtschaftliche Mehrkosten verbunden sind. Volkswirtschaftliche Mehrkosten entstehen - vereinfacht ausgedrückt - immer dann, wenn sich Inve-

stitionen für Energieeinsparmaßnahmen aus gesamtwirtschaftlicher Sicht nicht lohnen, sie also mehr kosten als die eingesparte Energie (ohne Steuern und Subventionen) wert ist. Liegt der Wert der eingesparten Energie dagegen über den Investitionskosten, resultieren gesamtwirtschaftlich Gewinne aus der Klimaschutzstrategie. Entstehen Mehrkosten bzw. Gewinne, bedeutet das letztlich, dass Teile des Einkommens für den Klimaschutz umgewidmet werden bzw. dass durch den Klimaschutz Einkommensteile für andere Verwendungszwecke frei werden. Wie sich die Mehrkosten oder die Gewinne auf die Wirtschaftssubjekte verteilen, hängt zum großen Teil von der Ausgestaltung der energie- und klimapolitischen Instrumente ab.

In einigen Punkten weisen die untersuchten THG-Minderungsszenarien hinsichtlich ihrer gesamtwirtschaftlichen Effekte Gemeinsamkeiten auf. Hierzu zählt, dass in allen Szenarien diejenigen Unternehmen (und ihre Mitarbeiter) profitieren dürften, die Produkte herstellen, die entweder der Energieeinsparung oder der Nutzung regenerativer Energiequellen dienen. Eine wichtige Rolle spielen hierbei die Bauwirtschaft (Gebäudedämmung) und ihre Zulieferer. In allen Szenarien ist zudem ein gegenüber der Referenzentwicklung verstärkter Trend hin zu den leitungsgebundenen Endenergieträgern Strom und Fernwärme zu verzeichnen. Unternehmen, die hier tätig sind, dürften ebenfalls zu den Gewinnern der Klimaschutzstrategie gehören. Zu den Verlierern gehören dagegen diejenigen Branchen, deren Geschäft an den Absatz und den Verbrauch von Erdgas, Mineralöl und Ölprodukten gekoppelt ist.

In anderen Punkten unterscheiden sich die untersuchten Reduktionsszenarien voneinander und lassen deshalb unterschiedliche gesamtwirtschaftliche Konsequenzen erwarten:

- Im Szenario Umwandlungseffizienz entstehen, über den gesamten Betrachtungszeitraum gerechnet, kumulierte gesamtwirtschaftliche Mehrkosten von 226,1 Mrd EUR (WI) bzw. 348,1 Mrd EUR (IER). Ein größerer Teil des Einkommens als in der Referenz wird demzufolge für Zwecke des Klimaschutzes benötigt und steht für andere Verwendungen nicht mehr zur Verfügung. Von den strukturellen Veränderungen in der Energiewirtschaft dürften im Szenario Umwandlungseffizienz besonders die Hersteller von innovativen Kohlekraftwerken profitieren. Dies gilt auch für die Importeure von Steinkohle.
- Im Szenario REG-/REN-Offensive entstehen, über den gesamten Betrachtungszeitraum gerechnet, kumulierte gesamtwirtschaftliche Mehrkosten von 201,1 Mrd EUR (WI) bzw. 617,4 Mrd EUR (IER). Auch in diesem Szenario wird demzufolge ein größerer Teil des Einkommens als in der Referenz für den Klimaschutz reserviert und steht für andere Verwendungen nicht mehr zur Verfügung. Von den strukturellen Veränderungen in der Energiewirtschaft dürften im Szenario REG-/REN-Offensive insbesondere die Hersteller von Anlagen zur Nutzung regenerativer Energiequellen und von Einspartechnologien profitieren. Zu den eindeutigen Verlierern zählt hier

die Kohlewirtschaft.

- Im Szenario Fossil-nuklearer Energiemix entstehen, über den gesamten Betrachtungszeitraum gerechnet, beim Modell des WI kumulierte gesamtwirtschaftliche Mehrkosten von 140,8 Mrd EUR, das IER-Modell weist dagegen zu kumulierten gesamtwirtschaftlichen Minderkosten in Höhe von 334,1 Mrd EUR aus. Auf Grund dieser unterschiedlichen Ergebnisse ist keine eindeutige Aussage hinsichtlich der ökonomischen Wirkungsrichtung der THG-Emissionsvermeidungsstrategie in diesem Szenario möglich. Die strukturellen Veränderungen dagegen weisen in beiden Modellen in eine ähnliche Richtung. Zu den Gewinnern der Umstrukturierungen zählen in beiden Fällen – neben den einleitend genannten Bereichen – die Hersteller von Kernkraftwerken sowie alle in den Brennstoffkreislauf involvierten Unternehmen. Auf der Verliererseite findet sich die Kohlewirtschaft wieder.

## 8. Welt- und Europaszenarien

Angesichts der zunehmend stärkeren außenwirtschaftlichen Verflechtungen in der Welt sowie der fortschreitenden Integration innerhalb der EU ist der Alleingang eines Landes bei einer ambitionierten Nachhaltigkeits- und Klimaschutzpolitik äußerst unwahrscheinlich. Bereits bei der Festlegung der Grunddaten für die Deutschlandszenarien müssen deshalb die Annahmen zur energiepolitischen Entwicklung mit Blick auf das internationale Umfeld getroffen werden.

In den vergangenen 10 Jahren wurden rund 20 Weltszenarien entwickelt, die grundsätzlich Eingang in die hier vorzunehmende Betrachtung finden könnten. Aufgrund vorhergehender Arbeiten<sup>1</sup> und im Rahmen dieser Untersuchung angestellten vertiefenden Betrachtungen besteht am Wuppertal Institut bereits ein umfassender Überblick. Auf der Basis dieser Erfahrungen sind zur Beantwortung der in diesem Gutachten aufgeführten Fragen Trendszenarien folgender Institutionen für den Zeitraum bis 2020 von Interesse:

- International Energy Agency (IEA)
- Department of Energy, USA (EIA/DOE)
- World Energy Council/International Institute for Applied System Analysis (WEC/IIASA)

Für den Zeitraum bis 2050 erfüllt lediglich ein Trendszenario des WEC/IIASA die Anforderungen dieser Untersuchung. Hingegen werden in Bezug auf die vergleichende Auswertung von Zielszenarien, Untersuchungen bzw. Arbeiten folgender Institutionen herangezogen:

- Johansson et al. (RIGES)
- Stockholm Environment Institute (SEI)
- World Energy Council/International Institute for Applied System Analysis (WEC/IIASA)
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (WI)

Alle der oben genannten Arbeiten haben eine ausreichende regionale Disaggregation, so dass sie ergänzend zur jeweils beschriebenen Weltentwicklung auch konsistente Untersuchungen des europäischen Raumes bereitstellen. Projektionen hingegen, die sich ausschließlich der europäischen Ebene widmen (wie IPSEP oder die der EU-DG XVII), fehlt der globale Zusammenhang. Zudem beschränken sich beide Untersuchungen auf einen Zeitraum bis zum Jahr 2020. Die Synopse der Europaszenarien greift daher auf die Weltmodelle mit entsprechender Disaggregation zurück.

Die folgende Analyse führt somit zu einem vergleichenden Überblick über vorliegende Langfrist-Energieszenarien für die globale und die europäische Ebene. Sie ermöglicht es, die Nachhaltig-

---

<sup>1</sup> Erstellung eines eigenen Weltmodells sowie Projekt im Auftrag des TAB, Berlin.

keits- und Klimaschutzoptionen für Deutschland im internationalen Kontext aufzuzeigen und zu bewerten.

Zunächst werden die ausgewählten Szenarien kurz in ihren wichtigsten Eigenschaften und Unterschieden vorgestellt. Diese Erläuterungen sind notwendig, um die unterschiedlichen Methoden, Ansätze, Untersuchungsrahmen, Zielsetzungen und Szenariophilosophien nachvollziehen zu können. Daran anschließend erfolgt eine Darstellung der Treibergrößen Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung. In einem nächsten Schritt werden die Trendprojektionen analysiert, beschrieben und einander gegenüber gestellt, so dass die jeweiligen Entwicklungen und Unterschiede schnell zu erfassen sind. Die Trenddarstellungen sind noch mal unterteilt in Welt- und in Europa-Modellierungen. Abgeschlossen wird die Darstellung mit einer entsprechenden Betrachtung der Zielszenarien (CO<sub>2</sub>-Minderungsszenarien) auf globaler und europäischer Ebene.

## **8.1 Kurze Einführung zu den ausgewählten Szenariountersuchungen**

### 8.1.1 EIA/DOE 2000

Titel: International Energy Outlook 2000 - With Projections to 2020  
Entwickler: Energy Information Administration; Department of Energy, USA (EIA/DOE)  
Verwendete Quellen: DOE/EIA 1997, DOE/EIA 1999, DOE/EIA 2000

Das verwendete Modell WEPS (World Energy Projection System) wurde vom DOE im Jahr 1997 entwickelt. Das Modell besteht aus mehreren unabhängigen externen und internen Modulen, baut auf vorhandenen nationalen Modellen auf und wird zur weltweiten Abschätzung von Zukünften bzgl. der Energieumwandlung aus Öl, Gas, Kohle und erneuerbaren Energien (Wasserkraftanlagen, Geothermie, Sonnenenergie, Wind, Biomasse u.a.) eingesetzt.

Die Submodule basieren im Wesentlichen auf in die Zukunft zielende Projektionen der Vergangenheit (Zeitreihenanalysen). Es besteht eine enge Verknüpfung zum "National Energy Modelling System" (NEMS), mit dem für das Gebiet der USA jährliche Prognosen erstellt werden. Das "International Energy Module" (IEM) ist ein externes Modell des NEMS und wird für Ölprojektionen verwendet. Das "Nuclear Model" ist ein internes Modul von WEPS und bildet die Grundlage für drei Szenarien (Referenz, hohes Wachstum und niedriges Wachstum). Das "Coal Expert Submodule" (CES) ist ein internes Modul des NEMS und wird für Gas-, Kohle-, Wasserkraft- und erneuerbare Energien-Projektionen verwendet.

Es handelt sich bei WEPS sowie bei allen Submodellen um gut zu überblickende Top-down Ansätze mit einer großen regionalen Differenzierung. Ziel der Untersuchungen ist es, Trendbeschreibungen für den Zeitraum von 1997 bis 2020 zu liefern, die möglichst robust sind. Daher werden neben einem Referenzpfad auch zwei weitere Pfade berechnet, die ökonomische Unsicherheiten

und veränderte Rahmenbedingungen ausdrücken sollen. Diese Sensitivitäten werden mit "high growth" und "low growth" bezeichnet.

Neue Technologien, Instrumente oder Strategien werden bewusst ausgeschlossen und sogar als "Spekulation" bezeichnet. Es handelt sich somit um deskriptive, Business-as-Usual Szenarien.

### 8.1.2 IEA/OECD 1998

Titel: World Energy Outlook 1998

Entwickler: IEA/OECD

Quellenangaben: IEA 1998, Birol 1999

Die Internationale Energie Agentur, Paris, gibt jedes Jahr den World Energy Outlook heraus, der einen Bericht zur weltweiten Lage der Energieversorgung mit jeweils wechselnden Schwerpunkten darstellt. Der Bericht des Jahres 1998 enthielt eine Szenariobetrachtung für die Jahre 1995 bis 2020.

Das Ziel dieser Untersuchung bestand darin, die Entwicklung der Weltenergiewirtschaft unter "Business as Usual" (BAU)-Bedingungen abzuschätzen. Es handelt sich somit um eine Trendbeschreibung, also um ein deskriptives Szenario.

Das zugrundegelegte Modell stellt eine Mischung aus Top-down und Bottom-up Ansätzen dar, die für jede Region spezifisch modifiziert worden sind. Zur Abschätzung der Energienachfrage wurde ein Top-down Modell verwendet, welches die Treibergrößen Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung mit angenommenen Preisentwicklungen für fossile Brennstoffe über spezifische Kennzahlen (Energieintensitäten und -elastizitäten) miteinander verknüpft. Besonders hervorzuheben im internationale Szenariovergleich ist gerade die Einbindung von Elastizitäten, die aus einer Reihe von Länderanalysen entstanden sind und somit für ein BAU-Szenario mit mittlerer Laufzeit realistische Ergebnisse hervorbringen kann.

Die Energieangebotsseite, also der Umwandlungssektor, ist nach Regionen getrennt Bottom-up aufgebaut. Dabei werden verschiedene voneinander unabhängige Modelle verwendet. Zusammengeführt werden die Ergebnisse im linear programmierten "Power Generation"-Modul, welches für jede Region die ‚least-cost-Technologien‘ identifiziert. Die notwendigen Daten für einzelne Umwandlungsverfahren (transformation processes: oil refineries, gas works, solid fuel preparation plants and heat-only plants) werden in eigenen Modellen abgeschätzt.

Ein detailliertes Modell für den globalen Ölmarkt berücksichtigt die Unsicherheiten der Ölmarktentwicklung, Aspekte der Reservenlage konventionellen Öls und der Produktion von konventionellem und nicht-konventionellem Öl. Der Gas- und der Kohlemarkt werden ebenfalls getrennt abgeschätzt und diskutiert, allerdings ebenso wie die Zusammenhänge zwischen Preisen und An-

geboden fossiler Brennstoffe nicht modelliert. Die IEA hat sich zudem in dieser Untersuchung erstmalig mit einem Typ der erneuerbaren Energien explizit auseinander gesetzt. So wurde eine interne Biomassestudie für Entwicklungsländer erstellt und vorgestellt.

### 8.1.3 Johansson 1993

Titel: A Renewable-Intensive Global Energy Scenario (RIGES)

Entwickler: T.B. Johansson, H. Kelly, A. Reddy, R. Williams

Quellenangaben: Johansson et al. 1993, persönliche Mitteilungen

Im Rahmen des IPCC-Prozesses hatten sich die Ersteller das Ziel gesetzt, ein Szenario zu entwickeln, welches ökologischen Restriktionen gerecht wird und gleichzeitig die Anforderung eines Ausgleichs zwischen armen und reichen Ländern beachtet. Drei der vier Autoren waren bereits an verschiedenen anderen, wegweisenden Szenarioarbeiten in den 80er Jahren beteiligt. Ihr Verdienst ist es vor allem, die energiewirtschaftliche Sichtweise vom Angebots- auf das Nachfragesystem, die bis zum Ende der 70er Jahre vorherrschte, umzukehren. Sie begannen, die Bedürfnisse der Menschen nach Raumwärme, Mobilität etc. in den Mittelpunkt der Betrachtung zu stellen und von dort aus ein Energiesystem zu beschreiben, welches in der Lage ist, diese zu decken.

Hinter dem Szenario steht für die Angebotsseite ein detailliertes Bottom-up Modell, die Nachfrageseite wird Top-down generiert. Basisjahr der Untersuchung ist 1985, der Betrachtungszeitraum reicht bis zum Jahr 2050.

### 8.1.4 SEI 1993

Titel: Fossil Free Energy Scenario (FFES)

Entwickler: Boston Center des Stockholm Environment Institute (SEI)

Quellenangaben: Lazarus 1993, Boyle 1994, Greenpeace 1994

Diese Studie wurde im Jahre 1993 vom Stockholm Environment Institute – Boston Center im Auftrag von Greenpeace International erstellt. Gegenstand dieser Studie ist die Evaluierung der technischen, wirtschaftlichen und politischen Konsequenzen einer Reduzierung des Verbrauchs fossiler Energien und eines effizienten Energiesystems, welches auf erneuerbaren Energien aufgebaut ist. Als langfristiges Ziel wurde eine Stabilisierung des globalen Klimasystems auf dem vorindustriellen Niveau festgelegt, was auf eine Reduktion der Treibhausgase auf Null hinausläuft. Somit ist FFES ein normatives Szenario mit einem, im Vergleich zu anderen Untersuchungen, sehr konsequenten und engen Zielkorridor. Betrachtet wurde ein Zeitraum zwischen 1985 und 2100.

Für die Gesamtbearbeitung der Studie wurden mehrere Modelle verwendet, die jeweils einen anderen Untersuchungsgegenstand haben. Für die Modellierung des globalen Energiesystems wurde das "Long-Range Energy Alternative Planning (LEAP)"-System vom Boston Center entwickelt

und genutzt. LEAP ist ein auf allen Ebenen konsequent bottom up-orientiertes Simulationsmodell mit einer sehr genauen, technologieorientierten Abbildung aller Sektoren. Das SEI hat sich bewusst für ein solches Modell entschieden und ausführlich begründet, warum Top-down Modelle zu fragwürdigen Ergebnissen führen müssen.

#### 8.1.5 WEC/IIASA 1998

Titel: Global Energy Perspectives

Entwickler: IIASA (Laxenburg, Österreich)

Quellenangaben: Nakicenovic 1998, persönliche Mitteilungen

Der Weltenergieerat (World Energy Council, WEC) ist eine regierungsunabhängige Organisation, die aus großen Unternehmen der Energiewirtschaft gebildet wird. Die rund 100 Komitees repräsentieren ca. 90 % der Weltenergieproduktion. Alle drei Jahre findet eine vom WEC veranstaltete Weltenergiekonferenz statt, auf der die Vertreter der Unternehmen die Energiesituation der Welt gemeinsam beraten und versuchen, Empfehlungen an Politiker abzuleiten, die aufgrund der Wirtschaftskraft seiner Mitglieder ein hohes Gewicht haben.

Auf diesen Treffen werden auch Szenarioanalysen vorgestellt und diskutiert, die seit über 20 Jahren von IIASA in Laxenburg erarbeitet werden. Das Hauptinteresse der Akteure ist naturgemäß die Entwicklung der Angebotsseite und dementsprechend ist auch das Modell von IIASA aufgebaut. Ziel der Szenariountersuchung ist die Darstellung mehrerer Pfade bis zum Jahr 2050 (mit Ausblick 2100), die sich unter verschiedenen Rahmenbedingungen ergeben. Es handelt sich um eine Mischung aus normativen und deskriptiven Szenarien. So werden drei Familien untersucht:

- High growth
- Middle course
- Ecologically driven

"Middle course" (auch mit B bezeichnet) ist mit einem BAU-Szenario zu vergleichen und spiegelt damit den Trend wider. "High growth" geht von hohen Wirtschaftswachstumsraten, hohen technischen Fortschritten und geringen Kosten aus und beschreibt aus diesem Blickwinkel drei verschiedene Energiezukünfte (A1, A2, A3). Die Szenarien A und B sind somit deskriptiv<sup>2</sup>. Der Pfad C ("Ecologically driven") hat das Ziel, ökologische Schäden zu minimieren. Konkret wird dies mit dem Ziel beziffert, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2100 auf ein Drittel des 1990er Wertes zu reduzieren. Somit handelt es sich hierbei um ein normatives Szenario.

---

<sup>2</sup> WEC/IIASA bezeichnen A als Mischung aus deskriptiv und normativ, ohne dies weiter zu erläutern. Hier wird die Trennung so vollzogen, dass normative Szenarien nur solche sind, die ein klares, wohldefiniertes und meßbares Ziel definieren. Dies ist bei keinem der drei A-Szenarien der Fall.

Erarbeitet werden die Szenarien mit einem einfachen Modell namens "Scenario Generator" (SG). Dahinter stehen jedoch zwei komplexe Modelle, die getrennt voneinander den Energiebedarf und das Energiesystem abbilden. Das Modell 11R zur Energiebedarfserrechnung ist ein Top-down Modell, welches auf Vorarbeiten anderer zurückgeht (Global 2100 von Manne und Richels). Das linear programmierte Modell MESSAGE III geht bereits auf die 70er Jahre zurück, ist Bottom-up aufgebaut und wird zur Bestimmung des Energieversorgungssystems verwendet. Es handelt sich dabei um ein Optimierungsmodell, das immer "cost minimal supply structures" (Nakicenovic 1998: 255) unter den gegebenen Randbedingungen errechnen soll.

#### 8.1.6 WI 1999

Titel: Faktor Vier-Szenario

Entwickler: S. Pfahl, C. Polenz, D. Wolters (Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie)

Quellenangaben: Lovins/Hennicke 1999, eigene Untersuchungen

Ausgangspunkt der Szenariountersuchung des Wuppertal Instituts war die Tatsache, dass auch der Ökologie- und Risikominimierungspfad des WEC (C1) nicht die erklärten Ziele der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ und ebenso nicht die Empfehlungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), also die Ziele der internationalen Gemeinschaft von Klimawissenschaftlern, zum Jahr 2050 erfüllt. C1 weist zwar für das Jahr 2100 einen Rückgang der C-Emissionen um zwei Drittel aus, im Jahr 2050 ist allerdings nur eine Minderung um weniger als 10 % erreicht worden. Szenarien, die dieses Ziel erreichten (wie SEI 1993), wurden andererseits als zu radikal und in seinen Annahmen zur technologischen Entwicklung, politischen Steuerbarkeit und zu unterstellten Marktentwicklungen als zu unsicher erachtet.

Daher wurde von 1997 bis 1999 ein eigenes Modell entwickelt, mit dem das sogenannte Faktor Vier-Szenario abgebildet werden sollte. Ziel der Szenariountersuchung sollte sein, einen technisch möglichen und ökonomisch sinnvollen Weg der Risikominimierung herauszuarbeiten. Risikominimierung bedeutete dabei zum einen die Vorgabe einer Reduktion der C-Emissionen um 50 % bis 2050 und zum anderen den Ausstieg aus der Kernenergie innerhalb des Betrachtungszeitraumes.

Entsprechend der Philosophie des Wuppertal Instituts wurde das Modell ähnlich wie bei SEI für alle Sektoren streng technologieorientiert, also bottom up aufgebaut. Damit kann das Energiesystem von den Bedürfnissen der Menschen ausgehend modelliert werden und es besteht die Möglichkeit, die möglichen Auswirkungen effizienter Nachfragetechnologien dezidiert zu eruieren. Aufbauend auf dieser Struktur sollten die sogenannten Faktor Vier-Technologien (E.U. v. Weizsäcker) integriert werden. Unterstellte Effizienzsteigerungen gehen dann nicht mehr von Zeitreihenanalysen, sondern von konkreten zur Verfügung stehenden Technologien aus. Die Szenariengenerierung selber erfolgte für die Zeit von 1995 bis 2050 mit Hilfe eines Simulationmodells.

Alle grundlegenden Daten wie Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung wurden entweder direkt von der WEC/IIASA-Untersuchung entnommen oder unmittelbar daran angelehnt. Auch erfolgte die gleiche regionale und sektorale Disaggregation.

**8.2 Demografie und Ökonomie**

In die Erarbeitung der Deutschlandszenarien sind die grundlegenden Annahmen für Bevölkerung und Wirtschaftswachstum bezüglich der globalen und europäischen Untersuchungen einzubeziehen. Aus diesem Grund werden die entsprechenden Daten in den nächsten beiden Tabellen vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 8-1: Bevölkerungsentwicklung bis 2050 im Vergleich (in Mrd.)

Region	1990	2020					2050			
		IEA	DOE	Joh.*	SEI**	WEC	Joh.	SEI	WEC	WI
Welt	5,26	7,63	7,53	7,78	7,9	7,92	9,52	10,1	10,06	9,50
OECD	0,86	0,98	1,03	0,92	0,9	0,99	0,92	0,9	1,01	0,99
Reformstaaten	0,41	0,40	0,41	0,49	0,5	0,48	0,52	0,6	0,54	0,45
Entwicklungsländer	3,99	6,25	6,09	6,37	6,5	6,45	8,08	8,6	8,51	8,06
Westeuropa	0,43	0,47	0,39	0,45	0,45	0,49	0,45	0,5	0,49	0,46

\* linear interpoliert aus den Werten für 2000 und 2025

\*\*linear interpoliert aus den Werten für 2000 und 2030

Bei den ausgewiesenen Bevölkerungsentwicklungen ist festzustellen, dass die Projektionen für die weltweite Ebene kaum voneinander abweichen (max 5 %); bei den europäischen Daten sind die Unterschiede etwas größer (bis zu 10 %), aber liegen immer noch in einem relativ engen Rahmen. Dies muss allerdings nicht bedeuten, dass die unterstellten Entwicklungen wahrscheinlich sind. Der Grund liegt vielmehr darin, dass die Entwickler auf die mittleren Prognosen von UN oder World Bank zurück gegriffen haben und somit implizit die von diesen ausgewiesenen hohen oder niedrigen Varianten als unwahrscheinlich bewerten.

Bei den angenommenen Wirtschaftsentwicklungen stellt sich die Situation hingegen anders dar. So variieren beispielsweise die Annahmen für das globale und das europäische GDP im Jahr 2050 um den Faktor 2. Allerdings handelt es sich bereits im Jahr 2020 bei den Unterstellungen im Johansson-Szenario um einen Ausreißer nach oben. Im gleichen Jahr repräsentieren die Annahmen des World Energy Council, des Stockholm Environment Institute und des Wuppertal Instituts einen Mittelwert der DOE-Projektionen des Referenz- und des Low-growth-Falles; sie gehen daher von einem moderaten Wirtschaftswachstum aus.

Tabelle 8-2: Wirtschaftsentwicklung bis 2050 im Vergleich (GDP<sub>ppp</sub>, US(1990)\$, 10<sup>12</sup>)<sup>3</sup>

Region	1990	2020					2050		
		IEA	DOE*	Joh.	SEI	WEC WI*	Joh.	SEI	WEC WI*
Welt	25,7	64,1	56,7 (44;73)	73,0	50,6	49,3 (51;57)	169,7	78,1	87,8 (91;115)
OECD	14,1	27,1	27,2 (22;34)	32,0	23,2	25,0 (23;28)	57,7	24,1	36,6 (32;45)
Reformstaaten	2,6	3,1	2,7 (2;4)	5,6	3,4	2,0 (2;2)	13,7	3,6	5,1 (5;8)
Entwicklungsländer	9,1	33,9	30,4 (19;39)	29,3	22,1	22,3 (25;27)	89,1	61,9	46,0 (54;62)
Westeuropa	5,7	11,5	10,9 (9;13)	12,7	9,5	10,1 (9;11)	23,0	10,8	15,0 (13;19)

\* Angaben sind der jeweilige Referenzfall sowie in Klammern zwei Sensitivitätsabschätzungen.

Diese Unterschiede zwischen den ökonomischen Rahmenannahmen werden auch durch die in der Tabelle 8-3 vorgenommene Darstellung der durchschnittlichen jährlichen Veränderungen unterstrichen.

Tabelle 8-3: Durchschnittliche jährliche Veränderung des GDP<sub>ppp</sub>

Region	1990 bis 2020					2020 bis 2050		
	IEA	DOE	Joh.	SEI	WEC WI	Joh.	SEI	WEC WI
Welt	3,1	2,7	3,5	2,3	2,2	2,9	1,5	1,9
OECD	2,2	2,2	2,8	1,7	1,9	2,0	0,1	1,3
Reformstaaten	0,6	0,1	2,6	0,9	-0,9	3,0	0,2	3,2
Entwicklungsländer	4,5	4,1	4,0	3,0	3,0	3,8	3,5	2,4
Westeuropa	2,4	2,2	2,7	1,7	1,9	2,0	0,4	1,3

Angaben sind nur die jeweiligen Referenzfälle.

WEC und WI unterstellen in der gesamten OECD-Region zwischen 1990 und 2020 ein Wachstum von knapp zwei Prozent jährlich, welches in der Zeit danach auf 1,3 % absinkt. Die weltweite Entwicklung liegt dabei nur leicht oberhalb der europäischen und wird vor allem durch die Region der Entwicklungsländer voran getrieben. Johansson et al. weisen hingegen deutlich höhere Werte von anfänglich 2,7 und später 2,0 % pro Jahr auf. Im Gegensatz dazu liegen die Annahmen für die

<sup>3</sup> Für DOE, Joh. und SEI mussten die in „Market Exchange Rates“ (MER) angegebenen Entwicklungen in einem mehrstufigen Verfahren in „Purchaseing Power Parities“ (PPP) umgewandelt werden. Dadurch können geringe Fehler auftreten, die jedoch im Rahmen der Gesamtaussage vernachlässigbar sind. PPPs wurden 1993 vom UNDP

OECD-Staaten bei der SEI-Untersuchung deutlich unterhalb derer aller anderen Arbeiten. Der Grund ist hier hauptsächlich in normativen Festlegungen und nicht in ökonomischen Analysen zu sehen.

Insgesamt ergibt sich damit ein relativ breites Spektrum an aufgezeigten Zukünften bezüglich der wirtschaftlichen Entwicklung der Welt sowie einzelner Regionen. Aufbauend auf diesen Treibergrößen wird die weitere Entwicklung der jeweiligen Szenarien für den Trend- wie für den Klimaschutzfall beschrieben, erläutert und miteinander verglichen.

### **8.3 Trendszenarien: Welt**

Im Folgenden werden für verschiedene Trendszenarien vergleichende Betrachtungen hinsichtlich folgender Fragestellungen vorgenommen:

- Nachfrageentwicklung gesamt und sektoral
- Effizienzsteigerung
- Entwicklung des Primärenergieverlaufs
- Anteil erneuerbarer Energien
- Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung
- Nutzung der Kernenergie

Soweit möglich und notwendig werden die Ergebnisse regional aufgegliedert dargestellt. Die Untersuchungszeitpunkte werden weitgehend auf die Basisjahre und die Zeitpunkte 2020 und 2050 beschränkt, so wie es auch durch die meisten dieser Szenarien bereits vorgegeben ist.

Nachhaltigkeitsindikatoren werden an dieser Stelle noch keine Beachtung finden, da es sich hier um deskriptive Trendszenarien handelt, die nicht das Ziel haben, eine nachhaltige Entwicklung zu modellieren, sondern lediglich einen Business-as-usual Pfad beschreiben. Insofern erfolgt diese Analyse erst im Rahmen der Zielszenarienbetrachtung.

Hinsichtlich der gesamten Fragestellungen hat sich bei der Betrachtung und Auswertung der Trendszenarien herausgestellt, dass keines der für Trendprojektionen in Frage kommenden Szenarien es erlaubt, Aussagen zur möglichen oder unterstellten Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung zu tätigen, da die KWK nicht explizit ausgewiesen wird. Aufgrund der vorliegenden Erfahrungen mit den jeweiligen Modellen kann zwar davon ausgegangen werden, dass WEC/IIASA KWK-Technologien explizit abgebildet haben. Leider wurde aber auch hier auf die Darstellung der Er-

---

eingeführt, um Vergleiche zwischen Ländern auf eine realere Basis zu stellen als die MERs suggerieren. Der Unterschied liegt vor allem in der Beachtung der landesüblichen Kaufkraft.

gebnisse verzichtet<sup>4</sup>. Die eigentlich wichtige Frage der Rolle der KWK muss daher in den Trendbetrachtungen ausgeblendet werden und kann lediglich beim Zielszenario des Wuppertal Instituts angegeben werden.

8.3.1 Energienachfrage und Effizienzsteigerung

Die Energienachfrage wird in allen hier vorliegenden Szenarien über eine Verknüpfung der Treibergrößen mit den entsprechenden Energieintensitäten bestimmt. Diese Intensitäten müssen für eine vergleichende Betrachtung einerseits auf die Wirtschaftskraft sowie andererseits auf die Bevölkerungszahl bezogen, für das Basisjahr ermittelt und anhand weiterer Analysen extrapoliert werden. Aufgrund dieser Werte lassen sich Schlussfolgerungen bezüglich der auf das Gesamtsystem bezogenen Modellergebnisse bilden.

WEC und DOE weisen die jährlichen Änderungen der auf das Gross Domestic Product (GDP) bezogenen Energieintensität als Maß für die Effizienzsteigerung in räumlicher Disaggregation gemäß folgender Tabelle aus, die IEA stellt hingegen nur den globalen Wert dar. Insgesamt liegen die unterstellten Verbesserungen zwischen 0,8 und 1 % pro Jahr, wobei sich erhebliche Unterschiede bei der Beurteilung der Reformstaaten ergeben und leichtere Differenzen bei der Gruppe der Industrieländer. Zwischen 2020 und 2050 geht das WEC nochmals von einer stärkeren Intensitätsverminderung aus.

Tabelle 8-4: Änderungen der Nutzenergieintensitäten pro US\$ GDP, Trendszenarien (in %/a)

	1990 - 2020			2020 - 2050
	IEA	WEC B	DOE	WEC B
Industrieländer		-1,22	-0,95	-1,08
Reformstaaten		-0,92	-1,80	-2,39
Entwicklungsländer		-1,04	-0,95	-2,23
Welt	-1,0	-0,80	-0,77	-1,29

Bezüglich der pro Kopf gerechneten Energieintensitäten wird ausschließlich im WEC B Szenario von Veränderungen ausgegangen, IEA und DOE geben keine Hinweise dazu (vgl. Tabelle 8-5). Daher kann unterstellt werden, dass in diesen Arbeiten von keiner Veränderung der Pro-Kopf-Intensität ausgegangen wird. Somit handelt es sich hierbei um Modelle, bei denen zwar signifikante Veränderungen der Wirtschaft prognostiziert werden, die unmittelbaren Lebensumstände der Menschen jedoch so bleiben, wie sie im Basisjahr vorzufinden sind.

<sup>4</sup> Durch unmittelbare Kontaktaufnahme wurde versucht, die Ergebnisse zu erhalten – allerdings bedeutet die Erar-

Die Gesamtintensität bzw. der globale Pro-Kopf-Nutzenergiebedarf verändert sich bis 2020 auch bei WEC B nicht, allerdings ergeben sich Verschiebungen zwischen den Regionen (von den Reformstaaten hin zu den zwei anderen Makroregionen). Ab 2020 steigt jedoch das spezifische Energieverbrauchsniveau jedes einzelnen Menschen wieder an.

Tabelle 8-5: Änderungen der Nutzenergieintensitäten pro Kopf, Trendszenarien (in %/a)

	1990 - 2020			2020 - 2050
	IEA	WEC B	DOE	WEC B
Industrieländer		0,30%		0,15%
Reformstaaten		-0,68%		0,86%
Entwicklungsländer		0,97%		1,00%
Welt	?	0,00%	?	0,47%

Bezüglich der aus den Treibergrößen resultierenden Endenergieverbräuche ergibt sich ein Bild gemäß Tabelle 8-6. Da das Department of Energy (DOE) für seine Szenarien keine Endenergieverbräuche angibt, sind in der Tabelle lediglich die Verläufe der IEA und des WEC gegenübergestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Laufzeit stellt nur das Szenario WEC B eine Trendbeschreibung bis zum Jahr 2050 dar.

Tabelle 8-6: Endenergieverbrauch nach Energieträgern, Trendszenarien (in Mtoe)

	1990	1995	2020		2050
	WEC	IEA	IEA	WEC B	WEC B
Feste Brennstoffe	1926	897	1314	2607	3202
Öl	2531	2678	4285	3526	4709
Gas	975	1019	1560	2145	3253
Strom	831	932	1938	1446	2339
Wärme	187	268	364	345	673
Welt	6450	5794	9461	10069	14176

Zu erkennen ist, dass sich die Gesamtprojektionen für das Jahr 2020 um etwa 5 % unterscheiden. Dies geht aller Wahrscheinlichkeit nach weitgehend auf unterschiedliche Bilanzgrenzen zurück und zieht sich daher vom Basisjahr bis 2020 durch. Insgesamt sind daher die Entwicklungen als relativ ähnlich anzusehen. Deutliche Unterschiede bestehen jedoch in den Projektionen der Anteile

---

beitung der Daten unverhältnismäßig viel Aufwand für die Modellierer von IIASA.

der einzelnen Energieträger - lediglich der Wärmeverbrauch liegt auf dem gleichen Niveau. Der hohe Anteil fester Brennstoffe ist bei WEC B auf die Verwendung von Biomasse zurückzuführen.

Tabelle 8-7: Sektorale Welt-Endenergienachfrage im Trendszenario WEC B (in Mtoe)

	1990	2000	2010	2020	2030	2050
Haushalte/Commercial	2600,70	2777,95	3186,32	3546,25	3901,78	4367,16
Industrie	2394,28	2694,73	3202,78	3822,59	4498,48	6007,84
Verkehr	1454,78	1848,61	2253,02	2691,70	3084,44	3799,16
Welt	6449,90	7324,40	8642,10	10069,05	11489,53	14175,82

Die sektorale Aufteilung ist nur den Arbeiten des World Energy Council zu entnehmen, IEA und DOE weisen diese nicht aus. Im Szenario WEC B nehmen die Anteile von Haushalte/Commercial<sup>5</sup> von 40 % auf 31 % ab und die der Industrie (von 37 auf 42 %) sowie des Verkehrs leicht zu (von knapp 23 auf 27 %).

Auf die drei Makroregionen aufgeteilt ergibt sich folgendes Bild:

Tabelle 8-8: Sektorale und regionale Endenergienachfrage im Trendszenario WEC B (in Mtoe)

<b>Industrielländer</b>	1990	2000	2010	2020	2030	2050
Haushalte/Commercial	918,10	1044,69	1195,92	1330,35	1439,39	1494,52
Industrie	1055,31	1023,57	976,35	942,74	894,62	785,41
Verkehr	907,75	1090,93	1154,62	1203,68	1191,92	1066,17
Total	2881,16	3159,16	3326,89	3485,32	3530,71	3347,70
<b>Reformstaaten</b>	1990	2000	2010	2020	2030	2050
Haushalte/Commercial	432,96	336,96	412,67	457,49	499,36	569,66
Industrie	599,96	473,91	500,13	590,74	656,49	788,14
Verkehr	166,96	127,71	182,35	241,17	299,52	442,85
Total	1200,00	941,71	1095,16	1289,41	1455,37	1800,66
<b>Entwicklungsländer</b>	1990	2000	2010	2020	2030	2050
Haushalte/Commercial	1249,64	1396,30	1577,73	1758,41	1963,03	2302,98
Industrie	739,01	1197,25	1726,30	2289,11	2947,37	4434,29
Verkehr	380,07	629,97	916,05	1246,85	1593,00	2290,14
Total	2368,74	3223,53	4220,05	5294,32	6503,45	9027,46

<sup>5</sup> An dieser Stelle wird bewusst der englische Begriff „Commercial“ verwechselt, da dieser Sektor etwas andere Bilanzgrenzen als der in Deutschland übliche „Kleinverbrauch“ oder „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ hat.

8.3.2 Primärenergieübersicht

Die ausgewiesenen Primärenergieverbräuche der beiden Untersuchungen, die das weltweite Energiesystem nur bis 2020 betrachten, liegen eng beieinander, obwohl das eine Bottom-up (IEA) und das andere Top-down (DOE) aufgebaut ist (s. folgende Tabelle). Die Ergebnisse im Referenzfall von WEC sind dagegen deutlich niedriger als die von IEA und DOE. Dies liegt zum einen am niedrigeren Wirtschaftswachstum und zum anderen an der Annahme höherer Effizienzsteigerungen auf der Versorgungsseite.

Tabelle 8-9: Weltprimärenergieverbrauch nach Energieträgern, Trendszenarien (in Gtoe)

	1990	1995	2020			2050
	WEC	IEA	IEA	WEC B	DOE	WEC B
Kohle	2,18	2,35	3,95	3,39	3,39	4,14
Erdöl	3,06	3,32	5,26	3,78	5,80	4,04
Erdgas	1,68	1,81	3,47	3,18	4,37	4,50
Uran	0,45	0,61	0,60	0,9	0,57	2,74
Erneuerbare	1,60	1,16	1,71	2,29	1,18	4,42
Welt	8,98	9,25	15,00	13,55	15,31	19,83

Ebenfalls wird die Rolle der erneuerbaren Energien bei WEC deutlich höher eingeschätzt als in den anderen Szenarien. Hier kommt ein weiterer Unterschied zwischen den Top-down und den Bottom-up modellierten Szenarien zum Ausdruck. Bei den modernen erneuerbaren Energien handelt es sich zum Teil um erst junge Technologien, deren Entwicklung mit Hilfe von Zeitreihenanalysen, die den Top-down Ansätzen zugrunde liegen, nur schwer bestimmt werden kann. Zeitnäher sind hier technologieorientierte Ansätze, wie sie bei WEC/IIASA angewendet werden. Die IEA verwendet zwar ebenfalls einen technologieorientierten Ansatz, modelliert aber lediglich fossile und nukleare Energieträger sowie Biomasse in dezidiert Form. Die anderen erneuerbaren Energien werden nicht explizit abgebildet und mit den dargestellten Problemen nur per Zeitreihen erfasst. Da der aus der Bottom-up modellierten Entwicklung hervorgegangene Verlauf der Biomasse sehr genau mit dem des WEC übereinstimmt, kann angenommen werden, dass der Unterschied bei den anderen erneuerbaren Energien tatsächlich auf diese methodischen Differenzen zurückzuführen ist.

Die oben dargestellten absoluten Beiträge sind zur Ermittlung des Stellenwertes der einzelnen Energieträger in der folgenden Tabelle in relativer Form noch einmal aufgeführt.

Tabelle 8-10: Relative Anteile am Weltprimärenergieverbrauch nach Energieträgern, Trendszenarien (in Mtoe/Mtoe)

	1990	1995	2020			2050
	WEC	IEA	IEA	WEC B	DOE	WEC B
Kohle	0,24	0,25	0,26	0,25	0,22	0,21
Erdöl	0,34	0,36	0,35	0,28	0,38	0,20
Erdgas	0,19	0,20	0,23	0,23	0,29	0,23
Uran	0,05	0,07	0,04	0,07	0,04	0,14
Erneuerbare	0,18	0,13	0,11	0,17	0,08	0,22
Gesamt*	1	1	1	1	1	1

\* evtl. kleine Rundungsungenauigkeiten

Anhand dieser Gegenüberstellung ist auch die unter Trendbedingungen jeweils erwartete Rolle der **Kernenergie** in den nächsten 50 Jahren abzulesen. Während die IEA und das US-amerikanische DOE davon ausgehen, dass deren Rolle prozentual abnehmen wird (sinkender Anteil von 7 auf 4 % im Jahr 2020), so erwartet das WEC eine zunächst stagnierende, ab 2020 aber steigende Rolle der Kernenergie (auf 14 % in 2050). IEA und DOE gehen dabei davon aus, dass die heute bestehenden Kernkraftwerke weitgehend weiter betrieben werden, es zu Ersatzbauten aber zu keinem sonstigen Ausbau kommen wird. Die absolute Nutzung von Uran bleibt somit bis 2020 konstant. WEC hingegen prognostiziert bis 2020 eine Steigerung der absoluten Stromerzeugung aus Uran um 50 % und danach noch mal um den Faktor 3. Diese Steigerungen werden laut WEC auf entsprechende Aktivitäten in allen Ländergruppen zurückgehen: so sind Steigerungen in Entwicklungsländern von 0,03 Gtoe im Jahr 1990 auf 1,05 Gtoe in 2050, in den Reformstaaten von 0,06 auf 0,24 Gtoe und in den Industrieländern von 0,36 auf 1,45 Gtoe verzeichnet.

Auch ist an den beiden Tabellen die Projektion des Gesamtanteils der **erneuerbaren Energien** zu erkennen. Wiederum gehen die IEA und das DOE von sinkenden Anteilen aus (von 13 % auf 11 bzw. 8 % in 2020) während das WEC eine deutliche Zunahme erwartet (auf 22 %). Absolut gesehen werden allerdings bei allen Szenarien zumindest eine Stagnation (DOE) bzw. zunehmende Beiträge ausgewiesen (von 1,16 Gtoe auf 1,71 bzw. 2,29 Gtoe in 2020 und 4,42 Gtoe im Jahr 2050). Das WEC geht dabei in der regionalen Aufteilung für das Jahr 2050 von einer Verdopplung in den Reformstaaten (von 0,11 Gtoe im Jahr 1990 auf 0,22) und den Industrieländern (von 0,40 auf 0,88) sowie von einer Verdreifachung in den Entwicklungsstaaten (von 1,09 auf 3,32) aus.

### 8.3.3 Übersicht zur Rolle der erneuerbaren Energien

Eine detailliertere Aufteilung der Beiträge einzelner erneuerbarer Energieträger stellt lediglich das WEC dar. In Ihrer zeitlichen Entwicklung sind diese in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 8-11: Beiträge erneuerbarer Energien zum Welt-Primärenergieverbrauch im Trendszenario WEC B (in Mtoe)

	1990	2000	2010	2020	2030	2050
Wasserkraft	488,68	536,39	584,92	657,44	755,76	916,73
Biomasse (kommerziell)	246,30	328,03	385,30	473,15	517,87	1122,31
Biomasse (traditionell)	848,86	842,19	856,89	857,15	873,95	859,98
Solar	0,00	10,50	22,98	65,18	138,05	432,41
Wind (Geothermie, Müll)*	16,92	43,71	106,90	237,88	458,15	1086,83
<b>Welt</b>	<b>1600,76</b>	<b>1760,82</b>	<b>1956,99</b>	<b>2290,8</b>	<b>2743,78</b>	<b>4418,26</b>

\* zu fast 100 % Wind

Bereits im Trendfall ist eine deutliche Zunahme in der Nutzung verschiedener erneuerbarer Energien zu erkennen. Während sich die weltweite Nutzung der Wasserkraft lediglich verdoppelt, steigt die kommerzielle Biomassenutzung um mehr als den Faktor 4, die Nutzung der Solarenergie steigt von Null auf den heutigen Wert der Wasserkraft an und das Wind-Primärenergieäquivalent liegt im Jahr 2050 um den Faktor 63 höher als 1990. Anhand der Darstellung der jeweiligen Anteile am Weltprimärenergieverbrauch (vgl. Tabelle 8-11) ist die zunehmende Bedeutung moderner Formen erneuerbarer Energien deutlich zu erkennen. Während die traditionelle Biomassenutzung kontinuierliche Rückgänge verzeichnet, und die Nutzung der Wasserkraft in Relation leicht abnimmt, steigen die Anteile aller anderen Energiequellen zum Teil um ein Mehrfaches an.

Tabelle 8-12: Relative Anteile erneuerbarer Energien am Weltprimärenergieverbrauch nach Energieträgern im Trendszenario WEC B (in %)

	1990	2000	2010	2020	2030	2050
Wasserkraft	5,44	5,31	4,98	4,85	4,86	4,62
Biomasse (kommerziell)	2,74	3,24	3,28	3,49	3,33	5,66
Biomasse (traditionell)	9,46	8,33	7,29	6,32	5,62	4,34
Solar	0,00	0,10	0,20	0,48	0,89	2,18
Wind (Geothermie, Müll)*	0,19	0,43	0,91	1,76	2,95	5,48
<b>Welt</b>	<b>17,83</b>	<b>17,41</b>	<b>16,66</b>	<b>16,9</b>	<b>17,65</b>	<b>22,28</b>

### 8.3.4 Regionale Aufteilung

Die Ergebnisse in den Szenarien von WEC/IIASA sind in drei Makroregionen bzw. 11 Einzelregionen differenziert worden. Der Übersicht halber werden im Folgenden lediglich die Makroregionen dargestellt, zudem erfolgt für die europäische Region eine Einzelanalyse im nächsten Kapitel.

Tabelle 8-13: Weltprimärenergieverbrauch nach Makroregionen, Trendszenario WEC B (in Gtoe)

	1990	2000	2010	2020	2030	2050
Industrieländer	4,18	4,62	4,95	5,25	5,47	5,59
Reformstaaten	1,74	1,33	1,47	1,66	1,89	2,38
Entwicklungsländer	3,06	4,16	5,33	6,65	8,18	11,86
Welt	8,98	10,11	11,75	13,55	15,55	19,83

Auffällig ist vor allem das weit überdurchschnittliche Wachstum in den Entwicklungsländern, die ihren Anteil am Gesamtverbrauch von 34 % im Jahr 1990 auf 60 % im Jahr 2050 erhöhen. Absolut gesehen handelt es sich dabei um eine Steigerung mit fast dem Faktor 4.

Die Beiträge der jeweiligen Energieträger, unterteilt nach den oben dargestellten Regionen, lassen sich aus den nächsten drei Tabellen entnehmen. Kohle wird nach dieser Untersuchung nur in den Entwicklungsländern einen deutlichen Anstieg erleben. Allerdings verbleibt die Nutzung auch in den anderen Regionen auf einem hohen Niveau. Der Verbrauch von Erdöl sinkt hingegen in den Industriestaaten deutlich, während er in den Reformstaaten leicht steigt und in den Entwicklungsländern deutlich zunimmt.

Tabelle 8-14: Primärenergieverbrauch in den Industrieländern nach Energieträgern, Trendszenario WEC B (in Mtoe)

	1990	2000	2010	2020	2030	2050
Kohle	907,55	964,43	1107,38	1244,79	1190,11	949,91
Erdöl	1722,57	1796,94	1605,02	1410,50	1134,87	926,42
Erdgas	786,13	1008,00	1256,51	1406,22	1582,55	1392,03
Uran	364,61	422,93	535,79	658,93	924,92	1446,14
Wasserkraft	253,76	260,61	266,71	272,97	279,39	292,73
Biomasse (kommerziell)	132,85	148,37	137,33	146,93	132,27	254,51
Biomasse (traditionell)	1,47	4,08	4,27	4,39	4,64	4,83
Solar	0,00	1,68	5,61	12,57	24,75	56,39
Wind (Geothermie, Müll)*	12,03	8,64	33,53	87,72	198,69	268,31
Gesamt	4180,97	4615,68	4952,15	5245,02	5472,19	5591,27

\* zu fast 100 % Wind

Die Verläufe des Erdgas- und des Uranverbrauchs stellen sich im Szenarienvergleich einheitlich dar, sie sind in allen Regionen mit einem deutlichen Anstieg verbunden. Darin kommt zum einen der heutige Trend zum Ausdruck, dass Erdgas eine zunehmend wichtigere Rolle auf dem Energiemarkt einnehmen wird.

Tabelle 8-15: Primärenergieverbrauch in den Reformstaaten nach Energieträgern, Trendszenario WEC B (in Mtoe)

	1990	2000	2010	2020	2030	2050
Kohle	444,67	300,17	307,51	371,11	338,50	370,72
Erdöl	487,25	348,01	351,34	380,95	401,52	570,98
Erdgas	638,51	523,20	630,69	697,91	912,19	968,24
Uran	60,18	54,16	68,81	83,89	115,59	244,97
Wasserkraft	65,97	69,20	72,64	79,60	87,27	105,01
Biomasse (kommerziell)	6,86	6,30	5,99	3,87	4,33	64,15
Biomasse (traditionell)	32,40	33,71	37,13	40,76	42,27	43,27
Solar	0,00	0,00	0,01	0,34	2,21	19,31
Wind (Geothermie, Müll)*	2,97	-0,02	0,00	3,35	-12,01	-9,15
Gesamt	1738,81	1334,73	1474,12	1661,78	1891,87	2377,50

\* woher die negativen Werte stammen, konnte nicht ermittelt werden

Zum anderen wird in diesem Trendszenario in allen Regionen von einer Renaissance der Kernenergie ausgegangen. Insbesondere der 40-fache Anstieg in Entwicklungsländern überrascht jedoch. Auf welchen Annahmen dieses Ergebnis beruht, ist in den Untersuchungen nicht detailliert ausgeführt.

Zudem ist den Tabellen zu entnehmen, dass in allen Regionen die Nutzung erneuerbarer Energien generell deutlich zunehmen wird. Um welche Energieträger es sich dabei im Einzelnen handelt, differiert sehr zwischen den drei Regionen. Insgesamt fällt auf, dass den erneuerbaren Quellen in den Entwicklungsländern bereits im Trendfall eine vergleichsweise hohe Bedeutung zugewiesen wird.

Tabelle 8-16: Primärenergieverbrauch in den Entwicklungsländern nach Energieträgern, Trendszenario WEC B (in Mtoe)

	1990	2000	2010	2020	2030	2050
Kohle	824,14	1173,42	1465,87	1777,96	2099,06	2815,06
Erdöl	854,02	1309,27	1673,10	1991,64	2282,60	2543,08
Erdgas	260,29	403,69	710,73	1076,68	1480,37	2138,66
Uran	25,28	45,26	82,37	161,32	340,59	1046,88
Wasserkraft	168,95	206,58	245,57	304,87	389,10	518,99
Biomasse (kommerziell)	106,59	173,36	241,98	322,35	381,27	803,65
Biomasse (traditionell)	814,99	804,40	815,49	812,00	827,04	811,88
Solar	0,00	8,82	17,36	52,27	111,09	356,71
Wind (Geothermie, Müll)*	1,92	35,09	73,37	146,81	271,47	827,67
<b>Gesamt</b>	<b>3056,18</b>	<b>4159,89</b>	<b>5325,84</b>	<b>6645,90</b>	<b>8182,59</b>	<b>11862,58</b>

\* zu fast 100 % Wind

### 8.3.5 Resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionen

Ausgehend von den zuvor dargestellten Primärenergieverbräuchen ergeben sich folgende CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Tabelle 8-17: CO<sub>2</sub>-Emissionen und relative Veränderung verschiedener Trendszenarien

<b>Entwicklung in GtC</b>	1990	1995	2010	2020	2030	2050
IEA	5,92	6,14	8,64	10,49		
DOE	5,84	6,09	8,15	10,01		
WEC B	5,93		7,37	8,26	8,89	9,57
<b>Änderung gegenüber 1990</b>	1990	1995	2010	2020	2030	2050
IEA	-	+3,7 %	+45,9 %	+77,1 %		
DOE	-	+4,3 %	+39,6 %	+71,4 %		
WEC B	-		+24,3 %	+39,3 %	+49,9 %	+61,4 %

Deutlich wird der große Unterschied zwischen den auch methodisch differierenden Untersuchungen der IEA und des DOE einerseits und von WEC/IIASA andererseits. Während im Trendfall bei den zuerst Genannten schon im Jahr 2020 eine CO<sub>2</sub>-Zunahme von über 70 % erwartet wird, stellt sich bei WEC B erst gegen 2050 eine Erhöhung um 60 % ein.

**8.4 Trendszenarien: Westeuropa**

Für die weitere Darstellung wird in den Szenarien jeweils die Region vertiefend betrachtet, in der sich Deutschland befindet. In allen Szenarien stellt dies „Western Europe“ oder „OECD Europe“ dar. Leichte Unterschiede ergeben sich dadurch, dass die Länderabgrenzungen nicht vollkommen übereinstimmen. So ist bei der IEA beispielsweise Ungarn einbezogen worden, welches beim WEC-Modell zu „Central Europe“ gehört. Andererseits hat WEC einige kleinere Staaten bilanziert, die wiederum nicht in der betreffenden Gruppe von der IEA erfasst worden sind. Die Unterschiede bleiben insgesamt aber vernachlässigbar.

**8.4.1 Energienachfrage und Effizienzsteigerung**

Zwischen 1990 und 2020 steigt die auf die Wirtschaftskraft bezogene Effizienz des Energieeinsatzes im IEA-Szenario jährlich um 0,9 %, im WEC B-Szenario hingegen um 1,1 %/a. Nach 2020 sinkt die Steigerungsrate bei WEC B auf 1,0 % pro Jahr. Die Energieintensität pro Kopf ändert sich hingegen nur wenig: sie steigt bis 2020 um 0,3 % und danach um 0,4 % jährlich.

Daraus ergeben sich die in der folgenden Tabelle dargestellten Verbräuche für Westeuropa.

Tabelle 8-18: Endenergieverbrauch Westeuropas nach Energieträgern, Trendszenarien (in Mtoe)

	1990	1995	2020		2050
	WEC	IEA	IEA	WEC B	WEC B
Feste Brennstoffe	130	109	109	43	3
Öl	518	567	768	412	286
Gas	180	225	274	428	404
Strom	174	195	329	295	410
Wärme*	14	23	48	41	121
Westeuropa	1017	1120	1529	1219	1223

\* inkl. Solarwärme

Nach Sektoren aufgeteilt ergibt sich bei WEC B folgender Verlauf. Aus den IEA-Informationen lässt sich dieses erneut nicht angeben.

Tabelle 8-19: Sektorale Endenergienachfrage für Westeuropa im Trendszenario WEC B (in Mtoe)

	1990	2000	2010	2020	2030	2050
Haushalte/Commercial	364,97	402,73	448,37	493,05	530,64	555,01
Industrie	372,18	362,33	346,50	330,90	315,48	288,87
Verkehr	279,67	342,67	366,22	388,64	378,12	342,96
Westeuropa	1016,82	1107,73	1161,09	1212,59	1224,25	1186,85

#### 8.4.2 Primärenergieübersicht

Alle untersuchten Szenarien weisen für die Primärenergie eine ausreichende regionale Differenzierung aus, so dass alle Untersuchungen hier näher betrachtet werden können. WEC B weist insgesamt ein um rund 10 % niedrigeres Gesamtniveau aus als die beiden anderen Untersuchungen. Selbst im Jahr 2050 hat WEC B noch einen geringeren Bedarf als IEA und DOE für das Jahr 2020 dargestellt haben.

Tabelle 8-20: Primärenergieverbrauch Westeuropa nach Energieträgern, Trendszenarien (in Mtoe)

	1990	1995	2020			2050
	WEC	IEA	IEA	WEC B	DOE	WEC B
Kohle	316	331	310	346	161	148
Erdöl	604	650	850	424	793	188
Erdgas	229	301	625	543	653	667
Uran	166	225	190	321	184	591
Erneuerbare	140	46	70	167	181	336
Gesamt	1455	1554	2046	1800	1976	1930

Bezüglich der zu verwendenden Energieträger finden sich für das Jahr 2020 relativ wenig Übereinstimmungen aller drei Projektionen. Die ausgewiesenen Anteile können daher gut als mögliche Bandbreiten verstanden werden. Der Kernenergie wird unter Trendbedingungen eine gleichbleibende bis steigende Rolle zugestanden, bis 2050 geht WEC sogar von einer deutlichen Zunahme aus. Die Nutzung der erneuerbaren Energien steigt bei allen Szenarien an, verbleibt allerdings bis 2020 auf einem geringen Niveau<sup>6</sup>. Erst danach steigt der zusätzliche Beitrag erneuerbarer Energien (in absoluten Größen betrachtet) signifikant an. Die größten Unterschiede ergeben sich bei Kohle und Erdöl: im ersten Fall bildet das DOE eine Ausnahme, im zweiten das WEC.

<sup>6</sup> Achtung: aufgrund unterschiedlicher Bilanzierungsmethoden sind die Ausgangswerte unterschiedlich.

8.4.3 Rolle der erneuerbaren Energien

Auch in Bezug auf die erneuerbaren Energien liefert lediglich das Szenario WEC B detaillierte Ergebnisse, wie sie in der nächsten Tabelle zu sehen sind. Dabei wird unter Trendbedingungen vor allem ein kräftiger Ausbau der Wind- und der Biomassenutzung erwartet. Die Solarenergie wird demnach auch im Jahr 2050 einen nur sehr untergeordneten Beitrag leisten.

Tabelle 8-21: Beiträge erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch Westeuropas nach Energieträgern im Trendszenario WEC B (in Mtoe)

	1990	2000	2010	2020	2030	2050
Wasserkraft	97,96	100,94	104,01	107,17	110,43	117,25
Biomasse (kommerziell)	40,43	43,56	39,39	40,54	42,25	127,34
Biomasse (traditionell)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Solar	0,00	0,00	0,00	0,00	5,87	14,30
Wind (Geothermie, Müll)*	1,80	1,05	7,38	19,14	64,51	76,71
Westeuropa	140,19	145,55	150,78	166,85	223,06	335,6

\* zu fast 100 % Wind

8.4.4 Resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die deutlichsten Unterschiede hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen zwischen der IEA-Untersuchung auf der einen Seite (die sehr pessimistische Erwartungen hat) und dem DOE und dem WEC auf der anderen Seite. Nach 2020 stellt sich demnach eine trendgemäße Verringerung der Emissionen ein, die im Jahr 2050 um knapp 30 % unter der des Jahres 1990 liegen würde.

Tabelle 8-22: CO<sub>2</sub>-Emissionen und relative Veränderung verschiedener Trendszenarien

<b>Entwicklung in GtC</b>	1990	1995	2010	2020	2030	2050
IEA	1,01	1,00	1,28	1,34		
DOE	0,93	0,91	1,02	1,09		
WEC B	0,96		1,03	1,02	0,87	0,70
<b>Änderung gegenüber 1990</b>	1990	1995	2010	2020	2030	2050
IEA	-	-1,0 %	26,7 %	32,7 %		
DOE	-	-2,2 %	9,7 %	17,2 %		
WEC B	-		7,3 %	6,3 %	-9,4 %	-27,0 %

Die Kyoto-Reduktionsziele wie auch die aus den Empfehlungen des IPCC abgeleiteten Ziele würden demnach im Trend deutlich verfehlt.

## 8.5 Zielszenarien: Welt

Wie im Rahmen der vergleichenden Darstellung der Trendszenarien werden hier ebenfalls Betrachtungen hinsichtlich folgender Fragestellungen vorgenommen:

- Nachfrageentwicklung gesamt und sektoral
- Effizienzsteigerung
- Entwicklung des Primärenergieverlaufs
- Anteil erneuerbarer Energien
- Nutzung der Kernenergie

Als quantifizierbares Ziel wird in allen Szenarien eine Obergrenze bzw., in einem Fall, ein nicht näher bestimmtes Minderungsziel der CO<sub>2</sub>-Emissionen festgelegt. Daneben existieren in einigen Szenarien weitere Ziele, oder zumindest zugrunde gelegte Paradigmen, die zum Teil unterschiedlich zu charakterisieren sind. So werden beispielsweise bei WEC/IIASA an zukünftige Energiesysteme Anforderungen wie Ressourcensicherheit und geringe interne Kosten gestellt, im Falle vom Wuppertal Institut werden diese zudem ausgeweitet auf den Einsatz risikoarmer, transparenter und demokratiefähiger Technologien unter Beachtung einer möglichst weit gehenden Annäherung der Wohlstandsniveaus in Nord und Süd. Genau dieser Punkt spielt wiederum bei der Untersuchung des Boston Centers vom Stockholm Environment Institute eine zentrale Rolle, wohingegen bei Johansson et al. keine weiteren Ziele neben der ökologischen Dimension zu erkennen sind. Abgesehen von der Grenze der CO<sub>2</sub>-Emissionen haben allerdings keine der angegebenen Indikatoren unmittelbare und, für Externe, nachvollziehbare Einflüsse auf die Szenariengestaltung. Somit handelt es sich bei allen Szenarien primär um Klimaschutz- und nicht um weiter gefasste Nachhaltigkeitsszenarien.

Da die Untersuchung von Johansson nicht explizit auf die Entwicklung der Nachfrageseite eingeht, taucht sie in der Darstellung der Energienachfrage und Effizienzsteigerung nicht auf, und wird erst ab der Primärenergieübersicht in den Vergleich einbezogen.

### 8.5.1 Energienachfrage und Effizienzsteigerung

Die unterstellten Änderungen der Nutzenergieintensitäten pro US\$ GDP spiegeln unterschiedliche Einschätzungen bezüglich der technischen Machbarkeit und ökonomischen Umsetzbarkeit von Effizienzmaßnahmen wider.

Tabelle 8-23: Änderungen der Nutzenergieintensitäten pro US\$ GDP, Zielszenarien (in %/a)

	1990 - 2050		
	SEI	WEC C1	WI
Industrieländer		-2,11	-1,88
Reformstaaten		-1,97	-2,84
Entwicklungsländer		-1,79	-2,91
Welt	-2,39	-1,44	-1,81

Während die Studie des SEI von sehr hohen Einsparungen ausgeht, bleibt WEC am unteren Ende der Möglichkeiten. Das Wuppertal Institut macht ebenfalls eher vorsichtige Abschätzungen, ist aber optimistischer als WEC<sup>7</sup>. Interessanterweise geht WEC davon aus, dass in den bereits relativ effizienten Industrieländern noch die größten Einsparpotentiale bestehen.

Die Entwicklung der Pro-Kopf-Intensitäten ist vergleichbar mit den zuvor beschriebenen Entwicklungen, wobei das Niveau der Effizienzsteigerungen deutlich geringer ist. Insofern gehen alle Untersuchungen zwar von einer zunehmenden Entkopplung von Energieverbrauch und Wirtschaftswachstum, jedoch nur von einer vergleichsweise geringen Entkopplung von Energieverbrauch und Bevölkerung aus. Im Falle der WEC-Untersuchung steigt sogar der Pro-Kopf-Verbrauch in Entwicklungsländern an, wohingegen er bei der WI-Studie geringfügig abnimmt. Dies bedeutet allerdings nicht, dass Menschen in Entwicklungsländern nach dem zuletzt genannten Szenario keinen zunehmenden Zugang zu Energiedienstleistungen hätten. Dahinter stehen, wie auch bei SEI, vor allem „leapfrogging“ Annahmen bezüglich einer Reihe von Technologien.

Tabelle 8-24: Änderungen der Nutzenergieintensitäten pro Kopf, Zielszenarien (in %/a)

	1990 - 2050		
	SEI	WEC C1	WI
Industrieländer		-1,02	-0,65
Reformstaaten		-0,35	-1,02
Entwicklungsländer		+0,53	-0,09
Welt	-0,75	-0,34	-0,62

Die oben dargestellten Änderungen der Energieintensitäten stellen somit auch den Grund für die in der folgenden Tabelle zu sehenden Entwicklungen der Endenergieverbräuche dar.

<sup>7</sup> Zur Erinnerung: SEI und WI sind Bottom-up Modelle, WEC beruft sich auf einen Top-down Ansatz.

Tabelle 8-25: Endenergieverbrauch nach Energieträgern, Zielszenarien (in Mtoe)

	1990	2020			2050		
	WEC	SEI	WEC C1	WI	SEI	WEC C1	WI
Feste Brennstoffe	1.926	1.349	2.276	1.950	1.409	1.959	1.345
Flüssige Brennstoffe	2.531	1.325	2.783	2.573	645	3.418	2.162
Gasförmige Brennstoffe	975	740	1.831	1.211	1.075	2.384	486
Strom	831	1.648	1.218	1.115	2.921	1.791	1.427
Wärme	187	501	409	319	716	733	2.868
Welt	6.450	5.563	8.608	7.169	6.766	10.286	8.289

Erwartungsgemäß liegt der Endenergieverbrauch im SEI-Szenario am niedrigsten, im WEC C1-Fall am höchsten und im Faktor Vier-Szenario des Wuppertal Instituts dazwischen. An den unterschiedlichen Verläufen wird u.a. ersichtlich, dass in den Szenarien von SEI und WEC Wasserstoff eine wichtige Rolle einnehmen wird<sup>8</sup>, wohingegen das WI-Szenario gänzlich ohne Wasserstoff auskommt. Qualitativ kommen alle Szenarien zum Ergebnis, dass Strom zunehmend wichtiger wird, wenn Klimaschutzziele angestrebt werden. Allerdings liegt die prozentuale Zunahme im SEI-Fall deutlich über den anderen Pfaden. Auffällig ist schließlich noch der deutliche Unterschied bei der Wärmenutzung. Auch wenn die Nutzung von KW(K)K im Szenario des Wuppertal Instituts zwar über denen der anderen Untersuchungen liegt (und das technisch mögliche weitgehend ausgeschöpft wird), so liegt die Hauptursache dieses Unterschieds jedoch in anderen Bilanzgrenzen. Die Auskopplung von Wärme in der Industrie verschwindet bei den Bilanzierungen des SEI und des WEC in den Werten der anderen Energieträger. Das WI wollte die Werte allerdings explizit ausweisen und hat eine andere Vorgehensweise gewählt.

### 8.5.2 Primärenergieübersicht

Die im Folgenden ausgewiesenen Primärenergieverbräuche liegen trotz unterschiedlicher Herangehensweisen und Zielkorridoren relativ eng beieinander. Gegenüber der Trendentwicklung ergibt sich ein Minderverbrauch um etwa ein Drittel. Die beiden Nachfrage orientierten Szenarien von SEI und WI haben dabei zum einen ihr Augenmerk auf mögliche Minderungen im Bereich der Kohlenutzung sowie auf einen Ausstieg aus der Kernenergienutzung gelegt. Allerdings gehen diese Untersuchungen unterschiedliche Wege bezüglich von Treibstoffen im Verkehr. Während

<sup>8</sup> Zu ersehen an den hohen Werten in der Zeile „Gasförmige Brennstoffe“.

das WI auch weiterhin Erdölderivaten den Vorzug gibt, setzt das SEI bereits sehr früh auf eine Wasserstoffstrategie<sup>9</sup>.

Tabelle 8-26: Weltprimärenergieverbrauch nach Energieträgern, Zielszenarien (in Gtoe)

	1990	1995	2050			
	WEC	IEA	Joh.	SEI	WEC C1	WI*
Kohle	2,18	2,35	1,41	0,49	1,50	0,30
Erdöl	3,06	3,32	1,54	1,01	2,67	2,52
Erdgas	1,68	1,81	2,58	1,60	3,92	1,18
Uran	0,45	0,61	0,48	0	0,52	0
Erneuerbare	1,60	1,16	7,42	10,82	5,63	9,67
<b>Welt</b>	<b>8,98</b>	<b>9,25</b>	<b>13,43</b>	<b>13,29</b>	<b>14,25</b>	<b>13,67</b>

\* Zur besseren Vergleichbarkeit auf veraltete Substitutionsmethode umgerechnet, die auch den anderen Untersuchungen zugrunde liegt. Daher unterscheiden sich diese Werte im Vergleich zu anderen Veröffentlichungen des Wuppertal Instituts.

Das WEC wiederum geht deutlich zurückhaltender bei der Senkung des Verbrauchs von Kohle und Erdöl vor, wobei im Fall von Erdgas, aber auch bei den erneuerbaren Energien, starke Zunahmen zu erkennen sind.

Die oben dargestellten absoluten Beiträge können der folgenden Tabelle noch einmal in prozentualer Form entnommen werden, wobei wegen der Vergleichbarkeit die Substitutionsmethode Verwendung fand. Wird die von der IEA mittlerweile vorgeschriebene Wirkungsgradmethode verwendet, sinkt der Anteil erneuerbarer Energien beispielsweise im Fall des Faktor-Vier Szenarios des WI um zehn Prozentpunkte, der Gesamtanteil läge demnach bei 61 %<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> Allerdings bestand hier auch das eigentliche Ziel der Studie darin, einen Pfad für eine 100-prozentige Kohlendioxidvermeidung bis zum Jahr 2100 zu rechnen. Insofern war eine Alternative zu Erdöl von vornherein anzustreben, die beim Faktor-Vier Szenario erst nach Ende des Betrachtungszeitraums zum Tragen käme.

<sup>10</sup> Die hier nur zur Herstellung der Vergleichbarkeit verwendete Substitutionsmethode suggeriert falsche Verhältnisse insbesondere bei höheren Anteilen erneuerbarer Energien und sollte daher eigentlich vermieden werden.

Tabelle 8-27: Relative Anteile am Welt-Primärenergieverbrauch nach Energieträgern, Zielszenarien (in Mtoe/Mtoe)

	1990	1995	2050			
	WEC	IEA	Joh.	SEI	WEC	WI
Kohle	0,24	0,25	0,10	0,04	0,11	0,02
Erdöl	0,34	0,36	0,11	0,08	0,19	0,18
Erdgas	0,19	0,20	0,19	0,12	0,28	0,09
Uran	0,05	0,07	0,04	0,00	0,04	0,00
Erneuerbare	0,18	0,13	0,55	0,81	0,40	0,71
Welt	1	1	1	1	1	1

\* evtl. kleine Rundungsungenauigkeiten

Die Entwicklung der erneuerbaren Energien ist in allen Szenarien ähnlich. Die Nutzung von Wasserkraft steigt nur leicht an (um max. 40 %) während Biomasse, Solarenergie und Windkraft einen Boom erfahren. Der Hauptunterschied besteht darin, dass das Johannson-Szenario RIGES eine doppelt so hohe Biomassenutzung ausweist wie die anderen Untersuchungen, die sich hier aus ökologischen und Ernährungsgesichtspunkten stärker zurückhalten.

### 8.5.3 Regionale Aufteilung

Aufgrund der starken Divergenz bei der Einteilung der Regionen werden lediglich die Arbeiten von WEC/IIASA und Wuppertal Institut miteinander verglichen<sup>11</sup>. Wie es die gezeigten Energieintensitätsänderungen und die Anteile erneuerbarer Energien bereits vermuten ließen, ergeben sich vor allem in den Reformstaaten und den Entwicklungsländern klare Unterschiede.

Tabelle 8-28: Welt-Primärenergieverbrauch nach Makroregionen, Zielszenarien (in Gtoe)

	1990	2020		2050	
	WEC	WEC C1	WI	WEC C1	WI
Industrieländer	4,18	3,73	3,58	3,02	2,90
Reformstaaten	1,74	1,68	1,00	1,67	0,82
Entwicklungsländer	3,06	6,01	5,31	9,56	6,65
Welt	8,98	11,43	9,90	14,25	10,37

In der Region der Industrieländer divergiert hingegen weniger die Gesamthöhe des Verbrauchs, sondern eher die Verteilung untereinander. Dabei fällt insbesondere der deutliche Unterschied bei

Erdgas auf. WEC sieht den Übergang auf Erdgas als eine auch langfristig wichtige Emissionsminderungsstrategie an, während das WI Erdgas nur in einer Übergangphase als Minderungsoption erkennt.

Tabelle 8-29: Primärenergieverbrauch in den Industrieländern nach Energieträgern, Zielszenarien (in Mtoe)

	1990	2020		2050	
	WEC	WEC C1	WI	WEC C1	WI
Kohle	907,55	541,67	592,57	83,93	13,88
Erdöl	1722,57	968,27	1249,39	438,98	660,66
Erdgas	786,13	1137,82	852,72	1068,83	368,02
Uran	364,61	550,11	146,26	375,15	0,00
Wasserkraft	253,76	287,68	265,96	311,82	234,15
Biomasse	134,32	145,71	202,94	273,49	659,96
Solar	0	20,44	37,48	176,81	587,29
Wind (Geothermie)	12,03	77,00	235,97	294,47	373,53
Gesamt	4180,97	3728,7	3583,28	3023,48	2897,49

Dieser Tatbestand gilt ebenfalls für die Region der Reformstaaten, wobei hier auch deutliche Differenzen in der Gesamthöhe zu erkennen sind. Zudem zeigen die Ergebnisse von WEC eine kräftige Steigerung der Stromerzeugung aus Wasserkraft um 130 %, im Fall des Faktor-Vier Szenarios steigt diese lediglich um knapp 50 %. Bei den anderen erneuerbaren Energien hingegen bleiben die Werte hinter denen des WI zurück.

<sup>11</sup> Wobei im Falle des Faktor-Vier Szenarios des WI nun wieder die von der IEA vorgeschriebene Wirkungsgradmethode verwendet wird.

Tabelle 8-30: Primärenergieverbrauch in den Reformstaaten nach Energieträgern, Zielszenarien (in Mtoe)

	1990	2020		2050	
	WEC	WEC C1	WI	WEC C1	WI
Kohle	444,67	231,74	137,75	52,72	22,10
Erdöl	487,25	400,12	243,80	382,78	224,15
Erdgas	638,51	865,33	347,18	930,57	122,31
Uran	60,18	53,82	9,09	18,23	0,00
Wasserkraft	65,97	85,04	90,62	149,56	96,91
Biomasse	39,26	44,78	151,48	110,4	211,74
Solar	0,00	0	6,10	17,18	107,29
Wind (Geothermie)	2,97	4,11	18,46	4,03	31,24
Gesamt	1738,81	1684,94	1004,47	1665,47	815,74

In der Region der Entwicklungsländer sind die deutlichsten Unterschiede bei Kohle und Erdgas zu verzeichnen. Das WI hat, wie bereits erwähnt, nachfrageseitig intensiv untersucht, wo auf Kohle verzichtet werden kann (Ersatz von Primärstahl- durch Sekundärstahlerzeugung etc.) und kam zu umfassenden Reduktionsmöglichkeiten. Zudem wird erneut der Unterschied bezüglich der Einschätzung von Erdgas und seiner strategischen Rolle deutlich. Weiterhin fällt auf, dass die absoluten Beiträge erneuerbarer Energien in fast allen Fällen bei WEC höher sind als beim WI-Szenario.

Tabelle 8-31: Primärenergieverbrauch in Entwicklungsländern nach Energieträgern, Zielszenarien (in Mtoe)

	1990	2020		2050	
	WEC	WEC C1	WI	WEC C1	WI
Kohle	824,14	1517,25	1550,57	1367,61	262,72
Erdöl	854,02	1653,06	1488,21	1846,48	1631,38
Erdgas	260,29	1054,86	642,88	1919,61	686,65
Uran	25,28	65,1	16,82	128,05	0,00
Wasserkraft	168,95	354,02	352,84	569,65	375,53
Biomasse	921,58	1224,17	1053,33	1919,18	1708,04
Solar	0,00	76,84	129,26	1358,26	1656,90
Wind (Geothermie)	1,92	66,52	65,74	448,23	297,52
Gesamt	3056,18	6011,82	5299,65	9557,07	6618,73

Abschließend sei noch auf einen Unterschied hingewiesen, der sich durch alle Regionen zieht. WEC weist zumindest bis zum Jahr 2020 eine steigende Nutzung von Kernenergie aus, die spätestens ab 2050 wieder zurückgeht und, hier nicht gezeigt, im Jahr 2100 Null erreicht. Dieser Ausstieg wird im Faktor-Vier Szenario bereits zwischen 2030 und 2040 realisiert, ohne dass zuvor von einer Steigerung ausgegangen wird.

**8.5.4 Resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Die stärkste Emissionsminderung erfolgt im Szenario des Stockholm Environment Institute mit rund 56 %, Johansson und WEC halten die Minderungsziele des IPCC nicht ein, das WI erreicht dieses knapp.

Tabelle 8-32: CO<sub>2</sub>-Emissionen und relative Veränderung verschiedener Zielszenarien

<b>Entwicklung in GtC</b>	1990	1995	2010	2020	2030	2050
Joh.	5,63			4,97		4,19
SEI	5,34		5,26	3,69	2,55	2,35
WEC C1	5,93		6,37	6,34	6,21	5,34
WI	5,93	5,90	5,98	5,62	5,01	3,05
<b>Änderung gegenüber 1990</b>	1990	1995	2010	2020	2030	2050
Joh.	-			-11,7 %		-25,6 %
SEI	-		-1,5 %	-30,9 %	-52,2 %	-56,0 %
WEC C1	-		+7,4 %	+6,9 %	+4,7 %	-9,9 %
WI	-	-0,5 %	+0,8 %	-5,2 %	-15,5 %	-48,6 %

**8.6 Zielszenarien: Westeuropa**

Der Vergleich wird unter Berücksichtigung der entsprechenden Regionen der bereits zuvor analysierten Weltszenarien vorgenommen, wodurch insgesamt einheitliche Bewertungen des europäischen und globalen Raumes sowie konsistente Ableitungen im Hinblick auf die im Gesamtprojekt erstellten Deutschland-Szenarien möglich sind. Leichte Unterschiede in den folgenden Ergebnissen ergeben sich durch unterschiedliche regionale Abgrenzungen, die jedoch schätzungsweise unterhalb von 5 % liegen.

**8.6.1 Energienachfrage und Effizienzsteigerung**

Alle Szenarien weisen im Betrachtungszeitraum einen Rückgang der Energienachfrage aus. In der Gesamthöhe sind insbesondere die Szenarien von WEC und WI sehr ähnlich, wobei deutliche Unterschiede bei den Anteilen der einzelnen Energieträger bestehen. So werden bei der WI-Studie

mehr feste Brennstoffe ausgewiesen, was vor allem auf die Nutzung von Biomasse zurückzuführen ist. Hingegen ist auch hier zu erkennen, dass Erdgas bei dem Wuppertal Institut als Übergangstrategie angesehen wird und Wasserstoff nicht zum Einsatz kommt. Die Bedeutung von Strom nimmt zwar zu, aber nicht in dem Maße, wie es vom WEC gezeigt wird. Hingegen stellt die Bereitstellung von Wärme einen wichtigen strategischen Schritt dar.

Tabelle 8-33: Endenergieverbrauch Westeuropas nach Energieträgern, Zielszenarien (in Mtoe)

	1990	2020			2050		
	WEC	SEI	WEC C1	WI	SEI	WEC C1	WI
Feste Brennstoffe	130		28	97		2	61
Flüssige Brennstoffe	518		292	400		210	216
Gasförmige Brennstoffe	180		334	195		233	21
Strom	174		243	202		299	196
Wärme	14		41	32		104	376
<b>Welt</b>	<b>1017</b>	<b>836</b>	<b>938</b>	<b>926</b>	<b>716</b>	<b>848</b>	<b>869</b>

### 8.6.2 Primärenergieübersicht

Ähnlich wie zuvor, zeigt auch die Primärenergieübersicht einen Rückgang des Gesamtverbrauchs in allen Szenarien. Der Vergleich zeigt erneut, dass sich das Faktor-Vier Szenario in einem mittleren Bereich der Zielszenarien befindet. Die Ergebnisse der anderen Pfade ranken sich um das des Wuppertal Instituts, je nachdem welche Strategie verfolgt worden ist (Wasserstoff, Methanol, Erdgas etc.).

Tabelle 8-34: Primärenergieverbrauch Westeuropas nach Energieträgern, Zielszenarien (in Mtoe)

	1990	1995	2050			
	WEC	IEA	Joh.	SEI	WEC	WI
Kohle	316	331	57,6	20,7	55,3	4,6
Erdöl	604	650	119,4	133,7	104,6	251,5
Erdgas	229	301	120,4	167,2	588,6	153,4
Uran	166	225	140,5	0	123,1	0
Erneuerbare	140	46	644,7	1027,6	422,9	722,1
<b>Welt</b>	<b>1455</b>	<b>1554</b>	<b>1082,6</b>	<b>1349,2</b>	<b>1294,4</b>	<b>1131,7</b>

### 8.6.3 Übersicht zur Rolle erneuerbarer Energien

In Bezug auf erneuerbare Energien sind die bisher herausgearbeiteten Strategien nochmals zu erkennen. Bei Johannson steht besonders die Biomassenutzung im Vordergrund, SEI setzt hauptsächlich auf Sonne und Wind, baut Wasser und Biomasse allerdings ebenfalls deutlich aus. WEC und WI hingegen haben eine vergleichsweise ausgeglichene Strategie, die sich am stärksten an den vorhandenen Potenzialen ausrichtet.

Tabelle 8-35: Beiträge erneuerbarer Energien zum Primärenergieverbrauch Westeuropas, Zielszenarien (in Mtoe)

	1990	2050			
	WEC	Joh.	SEI	WEC C1	WI
Wasserkraft	98,0	132,9	159,0 <sup>2</sup>	132,6	92,1
Biomasse	40,4	396,9	261,7	164,2	273,5
Solar	0,0	63,1	606,9 <sup>1</sup>	46,6	244,7
Wind	1,8	48,7		79,6 <sup>3</sup>	69,0
Erneuerbare	140,2	644,7	1027,6	423,0	722,1 <sup>4</sup>

<sup>1</sup> inkl. Wind <sup>2</sup> inkl. Geothermie <sup>3</sup> inkl. Geothermie u.a. <sup>4</sup> inkl. 42,8 Mtoe Geothermie

### 8.6.4 Resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionen

Bei allen Szenarien ergeben sich starke Emissionsminderungen für Westeuropa. Erneut weist SEI die größte Minderung und WEC die kleinste aus, WI liegt wieder im Mittelfeld. Bezüglich SEI und Johannson ist festzustellen, dass zwei Drittel bis 80 % dieser Minderungen bereits bis zum Jahr 2020 erreicht sein sollen – dahinter stünden demnach enorme Anstrengungen in den nächsten Jahren. WEC und WI bevorzugen dagegen eine relativ moderate Entwicklung in den nächsten 30 Jahren und erst danach einen stärkeren Rückgang der Emissionen.

Tabelle 8-36: CO<sub>2</sub>-Emissionen und relative Veränderung für Westeuropa, Zielszenarien

Entwicklung in GtC	1990	1995	2010	2020	2030	2050
Joh.	0,90			0,36		0,23
SEI	1,01		0,74	0,50	0,33	0,24
WEC C1	0,96		0,81	0,69	0,56	0,41
WI	0,96	0,90	0,86	0,78	0,67	0,31
Änderung gegenüber 1990	1990	1995	2010	2020	2030	2050
Joh.	-			-60,0%		-74,4%
SEI	-		-26,7%	-50,5%	-67,3%	-76,2%
WEC C1	-		-15,6%	-28,1%	-41,7%	-57,3%
WI	-	-6,2%	-10,4%	-18,8%	-30,2%	-67,7%

## 9. Literatur

- AGFW: Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und erneuerbarer Energien, Band 2: Wärmeversorgung des Gebäudebestandes + Technologieentwicklung und –bewertung, Frankfurt 2001
- Bauer G.: Ertüchtigung bestehender Dampfkraftwerke durch Gasturbinen, BWK, 50 (1998), 1/2
- Bechtholt: Persönliche Mitteilung, Forschungszentrum Karlsruhe, April 2002
- Birol, Fatih, Argiri, Maria 1999: World Energy Prospects to 2020. In: Energy Vol. 24. Pergamon, London: 905-918
- Boyle, Stewart 1994: A global fossil free energy scenario: towards climate stabilization? In: Energy Policy Vol. 2. Pergamon, London: 106-109
- Büro für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages (TAB): Analyse vorliegender Arbeiten zu Potentialen und Strategien der Einsparung elektrischer Energie in Deutschland; Gutachten, bearbeitet von Jochem E., Bradke H. und W. Mannsbart, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, Dezember 1999
- Cremer, C., Böde, U., Bradke, H., Walz, R., Behnke, L., Kleemann, M., Birnbaum, U., Heckler, R., Kolb, G., Markewitz, P. und K. Leubner: Systematisierung der Potenziale und Optionen, Endbericht an die Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des 14. Deutschen Bundestages, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Forschungszentrum Jülich, Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE), Karlsruhe, Jülich, 2001
- Dehli M.: Energieeinsparung in Industrie und Gewerbe, Praktische Möglichkeiten des rationellen Energieeinsatzes in Betrieben, Kontakt & Studium Band 535, herausgegeben von der Technischen Akademie Esslingen, Expert Verlag, 1998
- DOE/EIA 1997: World Energy Projection System. Model Documentation. DOE/EIA -M050(97), Washington
- DOE/EIA 1999: Energy Information Administration – Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy (1999): Annual Energy Outlook- With Projections to 2020, Washington
- DOE/EIA 2000: International Energy Outlook. U.S. Department of Energy (2000), Washington
- ESSO AG: Esso Energieprognose 2001, Hamburg 2001
- Fahl, U. und P. Schaumann: Energie und Klima als Optimierungsproblem am Beispiel Niedersachsen, Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 34, Stuttgart 1996

- Fahl, U., Blesl, M., Rath-Nagel, S. und A. Voß: Maßnahmen für den Ersatz der wegfallenden Kernenergie in Baden-Württemberg, Gutachten im Auftrag des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart 2001
- Fahl, U., Schaumann, P., Läge, E. und S. Molt: Klimaverträgliche Entwicklungen der deutschen Energieversorgung Technische Möglichkeiten und wirtschaftliche Konsequenzen, in: Hake, J.-Fr. und P. Markewitz (Hrsg.): Modellinstrumente für CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategien, Jülich 1997
- Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland (Hrsg.): Energiemodelle zum Kernenergieausstieg in Deutschland: Effekte und Wirkungen eines Verzichts auf Strom aus Kernkraftwerken, Physica-Verlag, 2002
- Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland (Hrsg.): Energiemodelle zum Klimaschutz in Deutschland: strukturelle und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen aus nationaler Sicht, Physica-Verlag, 1999
- Goldstein, G., Kanudia, A., Kram, T., Loulou, R., Remme, U., Schaumann, P., Schwarz, A., Smekens, K., Tosato, G. und D. van Regemorter: Systems Documentation, Description of MODEL Equations, URL: [www.crt.umontreal.ca/~amit/THEMODEL](http://www.crt.umontreal.ca/~amit/THEMODEL)
- Greenpeace 1994: Sonnige Zukunft: Energieversorgung jenseits von Öl und Uran, GREENPEACE Studie Energie, Hamburg
- International Energy Agency IEA 1998: World Energy Outlook, IEA Publications – 9, Paris
- Johansson, Thomas B., Kelly, Henry, Reddy, Amulya K. N., Williams, Robert H., (Edit.) (1993): Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity, Earthscan Publications Ltd, London
- Kaltschmitt, M. und A. Wiese (Hrsg.): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Springer, Berlin u. a. 1997
- Kayser, M.: Energetische Nutzung hydrothormaler Erdwärmevorkommen in Deutschland – Eine energiewirtschaftliche Analyse, Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 59, Stuttgart 1999
- Kreuzberg, M.: Spotpreise und Handelsflüsse auf dem europäischen Strommarkt – Analyse und Simulation, in: Zeitschrift für Energiewirtschaft (ZfE), 1998, 4, S. 43- 63
- Krüger, R., Fahl, U., Bagemihl, J. und D. Herrmann: Perspektiven von Wasserstoff als Kraftstoff im öffentlichen Straßenpersonenverkehr von Ballungsgebieten und von Baden-Württemberg, Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 79, Stuttgart 2001
- Läge, E., Molt, S. und A. Voß: Klimaschutzstrategien für Deutschland nach Kyoto, in: Läge, E., Schaumann P. und U. Fahl (Hrsg.): Treibhausgasminderung in Deutschland zwischen nationalen Zielen und internationalen Verpflichtungen, Jülich 1999
- Läge, E.: Entwicklung des Energiesektors im Spannungsfeld von Klimaschutz und Ökonomie – Eine modellgestützte Analyse, Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 85, Stuttgart 2001

- Lazarus, Michael (Edit.) et al 1993: Towards fossil free energy future – The next energy transition, A Technical Analysis for GREENPEACE International, Stockholm Environment Institute – Boston Center
- Leven, B., Neubarth, J. und C. Weber: Ökonomische und ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen, Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 80, Stuttgart 2001
- Lovins, Amory, Hennicke, Peter 1999: Voller Energie, Vision: Die globale Faktor Vier-Strategie für Klimaschutz und Atomausstieg, Campus Verlag, Frankfurt/Main; New York
- Lux, R., Sontow, J. und A. Voß: Systemtechnische Analyse der Auswirkungen einer windtechnischen Stromerzeugung auf den konventionellen Kraftwerkspark, Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 56, Stuttgart 1999
- Molt, S.: Entwicklung eines Instrumentes zur Lösung großer energiesystemanalytischer Optimierungsprobleme durch Dekomposition und verteilte Berechnung, Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 84, Stuttgart 2001
- Nakicenovic, Nebojsa, Grübler, Arnulf, McDonald, Alan (Edit.) 1998: Global Energy Perspectives, Cambirdge University Press, UK
- Neubarth, J. und M. Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Erneuerbare Energien in Österreich – Systemtechnik, Potenziale, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Springer, Wien u. a. 2000
- PROGNOS, EWI: Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, PROGNOS-Studie 5615302, Basel 1999
- PROGNOS, IER, WI: Basisdaten für die Szenarienerstellung, Zwischenbericht an die Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des 14. Deutschen Bundestages, Prognos AG, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH im Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen (WI), Basel, Stuttgart, Wuppertal, November 2001
- PROGNOS: Soziodemografische und ökonomische Rahmendaten, Zwischenbericht an die Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des 14. Deutschen Bundestages, Prognos AG, Basel, Februar 2001
- Rath-Nagel, S.: Strom- und Gasimportmöglichkeiten nach Deutschland mit besonderem Blick auf Bayern, Materialien zur Energieverbrauchsprognose Bayern, Stuttgart 1999
- Rouvel, L., Elsberger, M. und R. Heckler, R.: Klimaschutzpotentiale im Bereich Raumwärme. In: Stein, G. und H.-F. Wagner (Hrsg.): Das IKARUS-Projekt: Klimaschutz in Deutschland, Strategien für 2000 – 2020, Springer, Berlin 1999, S. 123 ff.
- Rüffler, W., Kühner, R. und P. Schaumann: Mathematische Beschreibung des Modellsystems E<sup>3</sup>Net, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Arbeitspapier, Stuttgart 1998

- Schaefer, C., Weber, C., Voss-Uhlenbrock, H., Schuler, A. u. a.: Effective Policy Instruments for Energy Efficiency in Residential Space Heating – an International Empirical Analysis (EPISODE), Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 71, Stuttgart 2000
- Schaumann, P. und C. Schlenzig: MESAP III ein Werkzeug für Energie und Umweltmanagement. In: Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland – Stand der Entwicklung. Proceedings des IKARUS-Workshops am 24. und 25. Januar 1996, Haus der Wirtschaft, Stuttgart, hrsg. von Molt, S. und U. Fahl, Jülich 1997
- Schaumann, P. und O. Schweike: Entwicklung eines Computermodells mit linearer Optimierung zur Abbildung eines regionalisierten Energiesystems am Beispiel Gesamtdeutschlands, Wissenschaftliche Berichte der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen (FH) Zittau/Görlitz, Nr. 1481, Heft 39, Zittau 1995
- Schlenzig, C. und A. Reuter: MESAP-III: An Information and Decision Support System for Energy and Environmental Planning. In: Carraro, C. und A. Haurie (Hrsg.): Operations Research and Environmental Management, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1996
- Schwarz, G.: Beförderung radioaktiver Stoffe im Kernbrennstoffkreislauf. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 47 (1997), 8, S. 458 ff
- Verband der Elektrizitätswirtschaft e. V.: Vorgesehene Stilllegungen von Kraftwerksleistung der Stromversorger, Stand: November 2001, VDEW, Frankfurt 2001
- Warnecke, E.: Die Entsorgung von Kernkraftwerken im internationalen Vergleich. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 43 (1993), 1/2 S. 86 ff
- WEC/IIASA 2001: Global Energy Perspectives. Interaktive Datenbank: [www.iiasa.ac.at/cgi-bin/ecs/book\\_dyn/bookcnt.py](http://www.iiasa.ac.at/cgi-bin/ecs/book_dyn/bookcnt.py)
- Weizsäcker, Lovins, Lovins 1995: Faktor Vier - Doppelter Wohlstand, halbiertes Naturverbrauch. Der neue Bericht an den Club of Rome, München.