

Szenarien & Strategien bis 2050

Der Energiebedarf der Welt zur Aufrechterhaltung von Wirtschaftswachstum und Entwicklung steigt unaufhörlich. Doch die Energieressourcen werden knapp, und bereits die CO₂-Emissionen aus dem heutigen Energieverbrauch bedrohen unser Klima. Welche Optionen bieten sich uns, um auf sauberere und effizientere Formen der Energieversorgung für die Zukunft umzusteigen? Wie viel wird das kosten? Und welche Politikmaßnahmen benötigen wir dazu?

In der vorliegenden zweiten Ausgabe der *Energy Technology Perspectives* (ETP), der Energietechnologischen Perspektiven, werden diese Fragen, gestützt auf die allseits anerkannte fachliche Kompetenz der Internationalen Energie-Agentur und ihres energietechnologischen Netzwerks, untersucht.

Mit dieser Publikationsreihe kommt die IEA dem Ersuchen der G8-Länder nach, Orientierungshilfen für politische Entscheidungsträger in der Frage zu liefern, wie die Kluft zwischen dem derzeitigen Stand und den erforderlichen Maßnahmen zur Sicherung einer sauberen, intelligenten und wettbewerbsfähigen Energiezukunft überbrückt werden kann.

Die Analyse der IEA zeigt, dass wir eine nachhaltigere Energiezukunft erreichen können und dass Technologien der Schlüssel dafür sind. Eine gesteigerte Energieeffizienz, CO₂-Abscheidung und -Speicherung, erneuerbare Energien und Kernkraft, alle diese Elemente werden eine wichtige Rolle spielen. Wir müssen jetzt handeln, um das Potenzial bereits existierender und zukünftiger Technologien zu erschließen und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen sowie deren Folgeeffekte für Energieversorgungssicherheit und Umwelt zu verringern.

In dieser innovativen Studie wird anhand einer Reihe ambitionierter globaler Szenarien bis 2050 verdeutlicht, wie mit Energietechnologien ein entscheidender Wandel herbeigeführt werden kann. Sie enthält technologische Aktionspläne für alle wichtigen Energiesektoren, wie Stromerzeugung, Gebäudesektor, Industrie und Verkehr. Die *Energy Technology Perspectives 2008* liefern detaillierte technologie- und politikbezogene Erkenntnisse, die für mehr Klarheit in den Diskussionen und Debatten energiewirtschaftlicher und energiepolitischer Kreise sorgen sollen.

© OECD/IEA, 2008

No reproduction, copy, transmission or translation of this publication may be made without written permission.

Applications should be sent to:

International Energy Agency (IEA),
Head of Communication and Information Office,
9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France.

ZUSAMMENFASSUNG

Einführung

Wir stehen vor schwerwiegenden Herausforderungen im Energiesektor. Die Weltwirtschaft wird im Zeitraum zwischen heute und 2050 voraussichtlich um ein Vierfaches expandieren, und in Schwellenländern wie China und Indien könnte sich die Wirtschaftsleistung fast verzehnfachen. Dies verspricht wirtschaftliche Nutzeffekte und gewaltige Verbesserungen in den Lebensbedingungen der Menschen, ist aber auch mit einem wesentlich höheren Energieverbrauch verbunden. Gelingt es nicht, den Energieverbrauch vom Wirtschaftswachstum zu entkoppeln und die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen zu reduzieren, sind untragbare Belastungen für natürliche Ressourcen und Umwelt unvermeidlich.

Die Situation verschlimmert sich. Seit der Ausgabe 2006 der *Energy Technology Perspectives* sind die weltweiten CO₂-Emissionen ebenso wie der Ölverbrauch kontinuierlich gestiegen. Die derzeitigen besten Schätzungen für unser Basisszenario bei „gleichbleibender Politik“ – d.h. falls es nicht zu einem Wandel in der Politik oder größeren Versorgungsstörungen kommt – lassen bis 2050 auf einen Anstieg des Ölverbrauchs um 70% und der CO₂-Emissionen um 130% schließen, womit sie 7% über unseren vorherigen Prognosen liegen. Laut dem Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) könnte eine Zunahme der CO₂-Emissionen dieser Größenordnung zu einem Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen um 6°C, möglicherweise sogar mehr, führen (Niveau, auf dem sich die Temperatur stabilisiert). Die Konsequenzen wären deutliche Umstellungen in allen Lebensbereichen und eine irreversible Veränderung des natürlichen Umfelds.

Die Formen der Energieversorgung und des Energieverbrauchs müssen weltweit revolutioniert werden. Eine zentrale Voraussetzung dafür ist wesentlich mehr Energieeffizienz. Erneuerbare Energien, Kernkraft und Technologien zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung (*carbon capture and storage* – CCS) müssen in großem Maßstab eingesetzt werden, und es müssen CO₂-freie Verkehrsformen entwickelt werden. **Es bedarf drastischer Umstellungen in der staatlichen Politik**, wobei es insbesondere darum geht, für mehr längerfristige Politiksicherheit hinsichtlich der künftigen Nachfrage nach CO₂-armen Technologien zu sorgen, um eine verlässliche Grundlage für die Entscheidungen der Industrie zu schaffen. Unerlässlich ist ferner **ein bislang beispielloses Maß an Kooperation zwischen allen großen Volkswirtschaften**, da nicht vergessen werden darf, dass bei gleichbleibender Politik 2050 voraussichtlich weniger als ein Drittel der weltweiten Emissionen von OECD-Ländern stammen wird.

Kurz gesagt wird **die globale Energiewirtschaft in den kommenden Jahrzehnten einen grundlegenden Wandel erfahren müssen.** Ziel der vorliegenden Veröffentlichung ist es aufzuzeigen, wie dieser Wandel herbeigeführt werden kann. Sie enthält eine eingehende Untersuchung des aktuellen Stands sowie der weiteren Aussichten für bereits bestehende und zukünftige saubere Energietechnologien und stellt anhand einer **Szenarienanalyse** dar, wie mit einer Kombination dieser Technologien ein entscheidender Effekt erzielt werden kann. Die vorliegende Ausgabe der *Energy Technology Perspectives* liefert zudem **globale Aktionspläne für die 17 Technologien**, die unserer Ansicht nach den größten Beitrag leisten können, wobei aufgezeigt wird, wann welche Maßnahmen ergriffen werden müssen, um deren Potenzial voll auszuschöpfen.

Unsere Szenarienanalyse befasst sich ausschließlich mit den energiebedingten CO₂-Emissionen, die den größten Teil der anthropogenen Treibhausgasemissionen ausmachen. Welchen Effekt die Reduktion der energiebedingten Emissionen letztlich auf die Entwicklung des Klimawandels ausüben wird, hängt in gewissem Maße jedoch auch davon ab, ob es

gelingt, andere Emissionen gleichermaßen zu senken. Daher wurde zusätzlich ein Kapitel über Methan, ein anderes wichtiges Treibhausgas, aufgenommen.

Die hier vorgestellten Analysen stützen sich auf Modellrechnungen des IEA-Sekretariats und Fachwissen des IEA-Netzwerks für internationale energietechnologische Zusammenarbeit. Bei den *Energy Technology Perspectives* handelt es sich um eine Begleitveröffentlichung des *World Energy Outlook 2007* der IEA, die sich auf dasselbe Basisszenario bis 2030 stützt und es bis 2050 verlängert. Die vorliegende Studie führt die Analyse der Ausgabe 2006 fort, unter Berücksichtigung der Erkenntnisse des im November 2007 erschienenen Vierten Sachstandsberichts des IPCC.

Verschiedene Szenarien werden vorgestellt. Mit der Reihe der „ACT-Szenarien“ der *Energy Technology Perspectives 2008* wird aufgezeigt, wie die CO₂-Emissionen bis 2050 wieder auf das heutige Niveau gesenkt werden könnten. In der Reihe der „blauen“ Szenarien, der BLUE-Szenarien, wird eine Reduktion der CO₂-Emissionen bis 2050 um 50% anvisiert. Diese Zusammenfassung befasst sich jeweils nur mit einem Szenario aus jeder Reihe, dem ACT Map und dem BLUE Map.

ACT-Szenarien

Durch bereits existierende oder in einem fortgeschrittenen Stadium der Entwicklung befindliche Technologien können die weltweiten CO₂-Emissionen bis 2050 wieder auf ihr heutiges Niveau gesenkt werden. Im diesem Fall muss die Emissionsspitze 2020-2030 erreicht werden. Das ACT-Map-Szenario beinhaltet die Einführung einer breiten Palette von Technologien, deren Grenzkosten sich bei Erreichen der vollen Marktreife auf maximal 50 USD¹ je Tonne vermiedene CO₂-Emissionen belaufen. Anstrengungen dieser Größenordnung haben tiefgreifende Auswirkungen auf bestimmte energiewirtschaftliche Aktivitäten. In Kohlekraftwerken, die nicht mit Techniken zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung ausgerüstet sind, würden sich die Stromerzeugungskosten dadurch ungefähr verdoppeln. Die Grenzkostenschätzung liegt zweimal so hoch wie die, welche vor zwei Jahren für die ETP 2006 erstellt wurde, was sich hauptsächlich aus der Beschleunigung der CO₂-Emissionstrends sowie dem Anstieg einiger Entwicklungskosten auf ungefähr das Doppelte erklärt, der u.a. auf den sinkenden Dollarkurs zurückzuführen ist.

Die Aufgabe ist schwierig und kostspielig. Der zusätzliche Investitionsbedarf im Energiesektor zwischen heute und 2050 wird auf 17 Bill. USD geschätzt. Dies sind durchschnittlich rund 400 Mrd. USD jährlich, was in etwa dem Bruttoinlandsprodukt (BIP) der Niederlande entspricht, bzw. 0,4% des jährlichen globalen BIP im Zeitraum zwischen heute und 2050.

BLUE-Szenarien

Ein Rückgang der Emissionen auf das heutige Niveau ist jedoch u.U. nicht ausreichend. Laut den Ergebnissen des IPCC müssten die Emissionen bis 2050 um 50-85% gesenkt werden, um die globale Erwärmung auf 2-2,4°C zu begrenzen. Die Staats- und Regierungschefs der G8-Länder sind auf dem Gipfel von Heiligendamm 2007 übereingekommen, das Ziel einer globalen Emissionsreduktion um 50% ernsthaft ins Auge zu fassen.

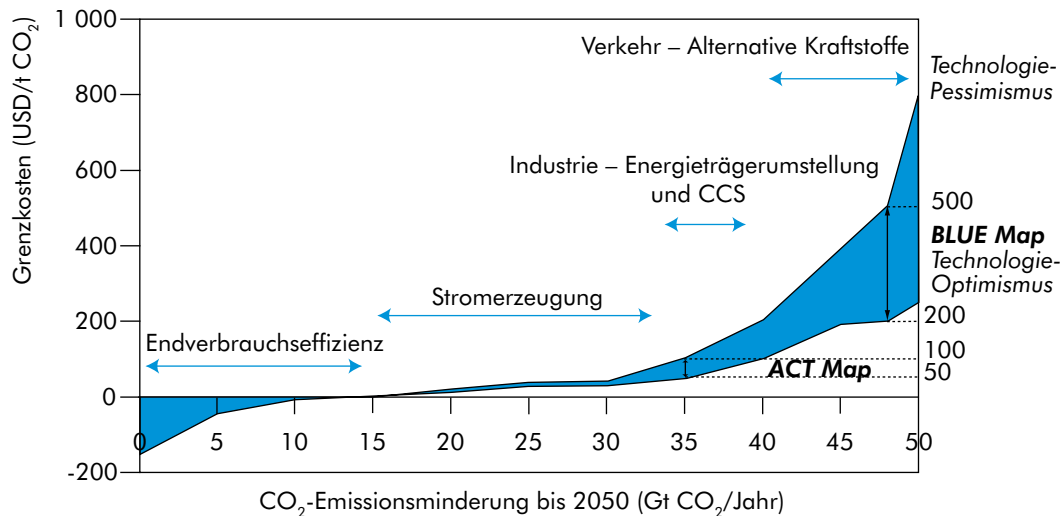
Die Verringerung der CO₂-Emissionen um 50% (gegenüber dem heutigen Niveau) stellt eine immense Herausforderung dar. Dieses Szenario impliziert einen sehr raschen Kurswechsel. Die damit verbundenen Kosten sind nicht nur deutlich höher, sondern auch wesentlich ungewisser, da die BLUE-Szenarien die Einführung von Technologien erfordern,

1. Alle Kostenposten sind in realen US-Dollarwerten von 2005 angegeben.

die sich noch in der Entwicklung befinden und bei denen sich weitere Fortschritte und der letztlich Erfolg schwer voraussagen lassen. **Während die ACT-Szenarien anspruchsvoll sind, setzen die BLUE-Szenarien die umgehende Einführung bisher beispielloser und weitreichender neuer Maßnahmen in der Energiewirtschaft voraus.**

Unter optimistischen Annahmen bezüglich der bei Schlüsseltechnologien erzielbaren Fortschritte müssen für das BLUE-Map-Szenario alle Technologien eingeführt werden, deren Kosten sich bei tatsächlicher vollständiger Markteinführung auf bis zu 200 USD je Tonne vermiedener CO₂-Emissionen belaufen. Sollten die bei diesen Technologien erzielten Fortschritte hinter den Erwartungen zurückbleiben, könnten sich die Kosten auf bis zu 500 USD/t erhöhen. Die Grenzkosten der im BLUE-Map-Szenario erforderlichen Technologien sind folglich mindestens viermal so hoch als die der teuersten Technologieoptionen des ACT-Map-Szenarios. Die durchschnittlichen Kosten der im BLUE-Map-Szenario notwendigen Technologien sind mit 38-117 USD je Tonne CO₂-Einsparung jedoch wesentlich niedriger als die Grenzkosten. In Abbildung ES.1 ist dargestellt, wie sich die Grenzkosten der CO₂-Reduktion im Jahr 2050 erhöhen, je weiter das Niveau der angestrebten CO₂-Einsparung im Vergleich zum ACT-Map-Szenario angehoben wird, um die im BLUE-Map-Szenario erforderliche stärkere Emissionsenkung zu erreichen.

Abbildung ES.1 ► Grenzkostender Emissionsreduktion für das globale Energiesystem, 2050



Der zusätzliche Investitionsbedarf im Zeitraum bis 2050 beläuft sich im BLUE-Map-Szenario auf 45 Bill. USD. Dies beinhaltet zusätzliche FuE-Ausgaben, umfangreichere Investitionen in die Einführung von Technologien, die auf dem Markt noch nicht wettbewerbsfähig sind (selbst bei Anreizen für CO₂-Reduktionen), sowie gewerbliche Investitionen in CO₂-arme Technologien (die durch Anreize für CO₂-Reduktionen gefördert werden). Pro Jahr sind insgesamt 1,1 Bill. USD notwendig. Dies entspricht ungefähr dem aktuellen BIP von Italien bzw. 10% des derzeitigen BIP der Vereinigten Staaten. Im Durchschnitt sind dies jährlich 1,1% des globalen BIP in der Zeit zwischen heute und dem Jahr 2050. In diesen Ausgaben drückt sich eine Neuausrichtung der Wirtschaftstätigkeit und der Beschäftigung aus, nicht zwangsläufig eine Verringerung des BIP. Mit Auswirkungen auf das globale BIP ist zwar zu rechnen, deren Vorhersage ist jedoch problematisch und würde den Rahmen dieser Analyse sprengen.

Nutzeffekte der Investitionen

Die Höhe der erforderlichen Investitionen in den ACT- und BLUE-Szenarien vermittelt einen Eindruck von der Größenordnung der vor uns liegenden Aufgabe, sie

entspricht jedoch nicht den Nettokosten. Technologieinvestitionen in die Erhöhung der Energieeffizienz, in zahlreiche erneuerbare Energien und in Kernkraft resultieren nämlich auch in einer deutlichen Verringerung des Brennstoffverbrauchs. **In den ACT- ebenso wie in den BLUE-Szenarien sind die nicht abgezinsten Kosteneinsparungen für Kohle, Mineralöl und Gas unseren Schätzungen zufolge im Zeitraum bis 2050 insgesamt höher als die erforderlichen zusätzlichen Technologieinvestitionen** (bei Anwendung der Brennstoffpreise des Basisszenarios). Bei einer Abzinsung mit 3% übersteigen die Brennstoffeinsparungen den zusätzlichen Investitionsbedarf im ACT-Map-Szenario, aber nicht in den BLUE-Szenarien. Bei einer Abzinsung mit 10% ist der zusätzliche Investitionsbedarf sowohl in den ACT- als auch in den BLUE-Szenarien höher als die Brennstoffeinsparungen.

Einige Investitionen, vor allem in die Energieeffizienz, sind natürlich sehr kostengünstig. Andere Investitionen, im oberen Bereich des Kostenspektrums der für die BLUE-Szenarien erforderlichen Technologien, sind demgegenüber nur dann wirtschaftlich, wenn starke Anreize für CO₂-Reduktionen bestehen. Allerdings führen nicht alle erforderlichen Investitionen zu einem Rückgang der Brennstoffkosten. Durch Investitionen in die CO₂-Abscheidung und -Speicherung *erhöht* sich auf Grund der Verringerung des Kraftwerkswirkungsgrads der insgesamt zur Erzeugung einer gegebenen Menge an Strom erforderliche Kohlebedarf.

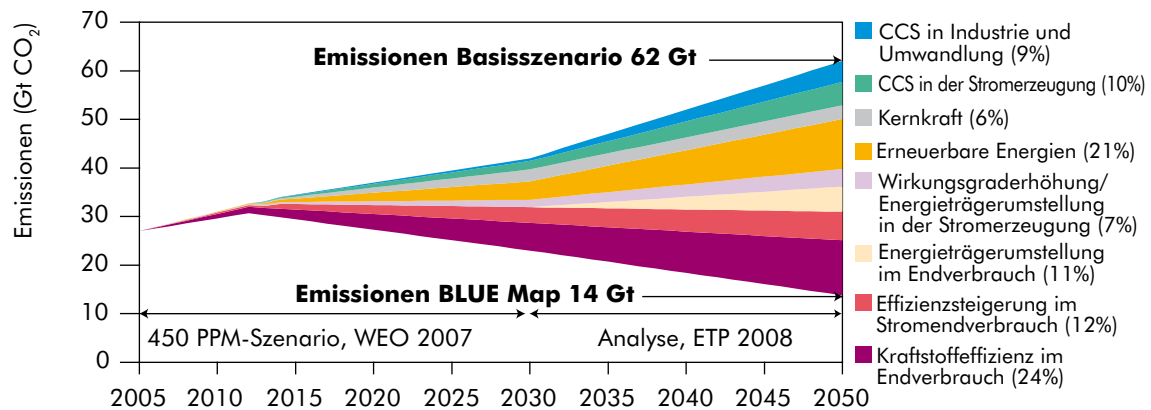
Ausgewogenere Ölmärkte

Abgesehen von ökologischen Nutzeffekten versprechen die ACT- und BLUE-Szenarien auch ein größeres Gleichgewicht an den Ölmärkten. Im ACT-Map-Szenario nimmt der Ölverbrauch weiter zu. Er erhöht sich bis 2050 gegenüber dem heutigen Niveau um 12%, wesentlich weniger als im Basisszenario. Im BLUE-Map-Szenario ist eine wesentlich deutlichere Differenz festzustellen, der Ölverbrauch ist dort 2050 effektiv 27% *geringer* als heute. In allen Szenarien sind jedoch in den kommenden Jahrzehnten massive Investitionen in die fossile Brennstoffversorgung notwendig.

Die technologische Revolution

In den ACT- ebenso wie den BLUE-Szenarien werden **die größten und kostengünstigsten Einsparungen durch Verbesserungen der Energieeffizienz von Gebäuden und Geräten, im Verkehr, in der Industrie und bei der Stromerzeugung erzielt.** An zweiter Stelle folgen Maßnahmen zur deutlichen **Reduzierung des CO₂-Ausstoßes der Stromerzeugung.** Dies kann durch die Kombination von erneuerbaren Energien, Kernkraft und CCS-Technologien in fossilen Kraftwerken erreicht werden. Unabhängig vom Endziel müssen in allen diesen Bereichen dringend Maßnahmen ergriffen werden. Besonders wichtig ist dies, um ein „Lock-in“ ineffizienter Technologien über mehrere Jahrzehnte zu verhindern. Im BLUE-Map-Szenario müssen kostenintensivere Optionen wie **CCS-Technologien in der Industrie und alternative Verkehrskraftstoffe eingeführt werden.** In Abbildung ES.2 sind die CO₂-Einsparungsquellen im BLUE-Map-Szenario im Vergleich zum Basisszenario dargestellt. Politische Entscheidungsträger dürfen nicht vergessen, dass Umstellungen häufig lange Vorlaufzeiten erfordern und dass die Prioritäten in den einzelnen Ländern je nach den nationalen Gegebenheiten variieren können. Im Rahmen einer Gesamtstrategie für den Klimaschutz ist es zudem wichtig, die Methanemissionen des Energiesektors zu senken, da sich in diesem Bereich erhebliche kosteneffektive Möglichkeiten zur Verringerung der Treibhausgasemissionen auf kurze Sicht bieten.

Abbildung ES.2 ► Vergleich 450 PPM-Stabilisierungsszenario des World Energy Outlook 2007 und BLUE-Map-Szenario, 2005-2050



Gebäude und Geräte

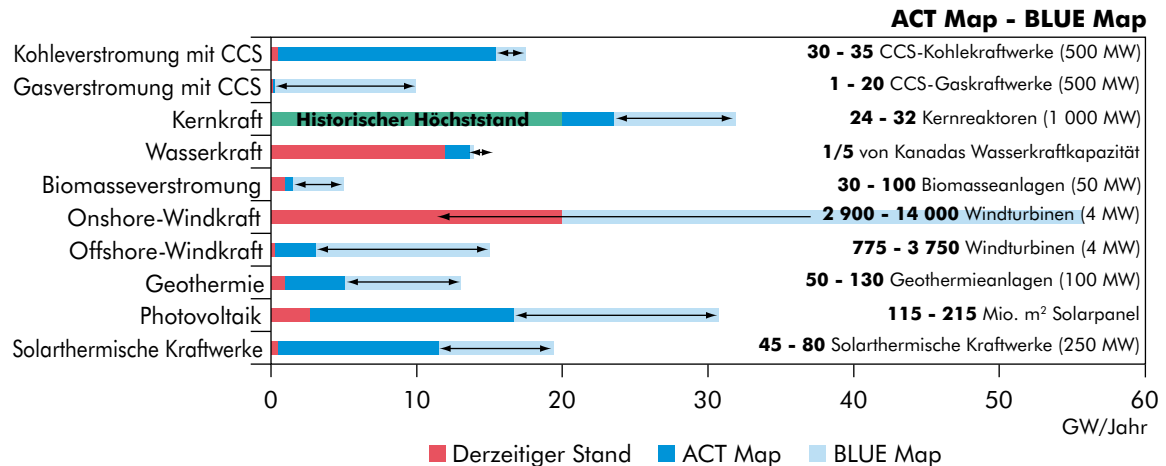
Die ACT-Szenarien können Wirklichkeit werden, wenn im Gebäude- und Gerätesektor Technologien eingesetzt werden, die bereits heute allgemein verfügbar sind und sich bei einer Lebenszyklus-Kostenrechnung auch in wirtschaftlicher Hinsicht rentieren. Die BLUE-Szenarien erfordern demgegenüber neue sowie noch in der Entwicklung befindliche Technologien; in einigen Szenarien sind Technologien notwendig, die sich nur dann rechnen, wenn die CO₂-Reduktionskosten – zumindest im Stadium der Ersteinführung – relativ hoch sind. Diese Szenarien setzen eine weitreichende Umrüstung des Gebäudebestands zur Senkung seines Energieverbrauchs auf ein sehr niedriges Niveau und sogar die Einführung von Null-Energie-Häusern voraus. **Die Politikimplikationen im Bereich Energieeffizienzstandards für Gebäude und Geräte sind gewaltig.** Durch die Kombination von Gebäudehüllen, Wärmepumpen, Solarheizungen und hoch effizienten Geräten und Beleuchtungsvorrichtungen kann der Energieverbrauch in Gebäuden verringert und eine Verschiebung im Energieträgermix zu Gunsten erneuerbarer Energien und einer CO₂-armen Stromerzeugung erzielt werden. Im BLUE-Map-Szenario sind zusätzliche Investitionen in Wohn- und Dienstleistungsgebäude in Höhe von 7,4 Bill. USD erforderlich, gegenüber 2,6 Bill. USD im ACT-Map-Szenario.

Stromerzeugung

Die CO₂-Abscheidung und -Speicherung in Stromerzeugung und Industrie ist die wichtigste neue Technologie zur Vermeidung von CO₂-Emissionen sowohl im ACT-Map- als auch im BLUE-Map-Szenario, wo auf sie jeweils 14% bzw. 19% der gesamten CO₂-Einsparung entfallen. Das BLUE-Map-Szenario sieht die Einführung kostenintensiverer CCS-Anlagen in der Industrie und in Gaskraftwerken vor. **In der Stromerzeugung erfolgt eine massive Umstellung auf erneuerbare Energien, namentlich Windkraft, Photovoltaik, solarthermische Kraftwerkstechnologie und Biomasse.** Im BLUE-Map-Szenario stammen 46% der weltweiten Stromerzeugung im Jahr 2050 aus erneuerbaren Energien. 21% der im Vergleich zum Basisszenario erzielten CO₂-Einsparung sind im BLUE-Map-Szenario der Einführung sämtlicher erneuerbarer Energietechnologien zusammengenommen in allen Sektoren zuzuschreiben. 6% der CO₂-Einsparung werden durch einen deutlichen Kurswechsel zu Gunsten von Kernenergie erzielt, unter der Annahme des Baus von 32 GW neuen Kapazitäten jährlich zwischen heute und 2050. Fast ein Viertel der Stromerzeugung entfällt im BLUE-Map-Szenario auf Kernenergie, der Anteil der Wasserkraft ist halb so hoch, wobei beide Technologien bereits im Basisszenario eine wichtige Rolle spielen. In Abbildung ES.3 sind die jährlichen

Zubauraten zur Schaffung der erforderlichen neuen Stromerzeugungskapazitäten in den verschiedenen Szenarien dargestellt.

Abbildung ES.3 ▶ **Durchschnittlicher jährlicher Investitionsbedarf in der Stromerzeugung: ACT-Map- und BLUE-Map-Szenario, 2005-2050**



Für die Stromerzeugung wird ein breites Spektrum an Szenarien untersucht, aus denen ersichtlich ist, dass **die einzelnen Länder bei der Entscheidung darüber, wie sie CCS-Technologien, erneuerbare Energien und Kerntechnologien im Einzelnen kombinieren, um den CO₂-Ausstoß der Energiewirtschaft zu verringern, über ein großes Maß an Flexibilität verfügen.** Die zusätzlichen Investitionen im Stromsektor (ohne Stromtransport und -verteilung) belaufen sich im ACT-Map-Szenario auf insgesamt 0,7 Bill. USD und im BLUE-Map-Szenario auf insgesamt 3,6 Bill. USD. Bei diesen Zahlen handelt es sich um die Nettowerte, die aus der Kombination der höheren Kapitalkosten je Kapazitätseinheit und der Reduktion der Stromerzeugung um ein Fünftel infolge von Stromeinsparungen im Endverbrauch resultieren. **In den BLUE-Szenarien werden erhebliche Erzeugungskapazitäten vorzeitig vom Netz genommen,** ein Drittel aller Kohlekraftwerke, die nicht mit CCS-Technologien ausgerüstet werden können, muss z.B. vor Ablauf ihrer technischen Lebensdauer stillgelegt werden. Es ist klar, dass dies für stark von Kohle abhängige Länder einen großen Schritt darstellt, der aber notwendig ist und eine umsichtige Steuerung erfordert.

Verkehr

Im ACT-Map-Szenario werden die Energie- und Emissionseinsparungen hauptsächlich durch weitreichende **Verbesserungen der Energieeffizienz konventioneller Fahrzeuge** und die verstärkte Markteinführung von Hybridfahrzeugen erzielt. Biokraftstoffe mit geringem CO₂-Fußabdruck spielen dabei ebenfalls eine Rolle, vor allem als Ersatz für Benzin in Personenkraftwagen. Der derzeitige Trend hin zu größeren, schwereren Kraftfahrzeugen muss unbedingt gebremst werden.

Das BLUE-Map-Szenario stellt für den Verkehrssektor eine große Herausforderung dar und verlangt eine **deutliche Reduzierung des CO₂-Ausstoßes**, was in einem Sektor, in dem der Verbrennungsmotor nach wie vor vorherrschend ist, wesentlich kostspieliger sein dürfte. Im BLUE-Map-Szenario werden CO₂-arme Biokraftstoffe voraussichtlich eine erhebliche Rolle spielen, insoweit dies im Rahmen nachhaltiger Produktions- und Anbaustrukturen möglich ist. Den stärksten Einsatz werden Biokraftstoffe wahrscheinlich im LKW-, Schiffs- und Luftverkehr finden, da die Umsetzung anderer nicht kohlenwasserstoffbasierter Optionen in diesen Verkehrsbereichen sehr kostspielig sein dürfte. Für Personenkraftwagen sind Elektrobatterien und Wasserstoffzellen die wichtigsten Alternativen. Im derzeitigen

Stadium lässt sich jedoch schwer abschätzen, welche dieser Technologien – bzw. welche Kombination dieser Technologien – sich als die wettbewerbsfähigste erweisen wird. Unter recht optimistischen Annahmen in Bezug auf technischen Fortschritt und Kostensenkungen ist damit zu rechnen, dass Fahrzeuge mit Elektro- oder Brennstoffzellenantrieb 2050 rund 6 500 USD mehr kosten werden als konventionelle Fahrzeuge. Im BLUE-Map-Szenario müssen 2050 fast eine Milliarde Fahrzeuge mit Elektro- oder Brennstoffzellenantrieb im Verkehr sein. Auf den Verkehrssektor entfallen in den betrachteten Szenarien die höchsten Investitionen. Der zusätzliche Investitionsbedarf im Verkehrssektor beläuft sich im BLUE-Map-Szenario auf 33 Bill. USD und im ACT-Map-Szenario auf 17 Bill. USD.

Industrie

Das Verarbeitende Gewerbe ist direkt oder indirekt für über ein Drittel des weltweiten Energieverbrauchs und der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich. Ungefähr die Hälfte der Emissionen des Verarbeitenden Gewerbes stammen aus der Eisen-, Stahl- und Zementindustrie; die chemische und petrochemische Industrie ist ebenfalls ein sehr großer Emissionsverursacher. Die Schwerindustrie kann bei den in den letzten Jahren erzielten Energieeffizienzsteigerungen eine gute Bilanz vorweisen, wofür die Notwendigkeit von Energiekosteneinsparungen ausschlaggebend war. Insbesondere in weniger energieeffizienten Branchen besteht jedoch erhebliches Potenzial für weitere Verbesserungen der Energieeffizienz, vor allem durch den Einsatz von Antriebssystemen mit höherem Wirkungsgrad und von Kraft-Wärme-Kopplung. Ein Potenzial besteht auch für branchenspezifische technische Fortschritte sowie für den Einsatz von CCS-Technologien.

Sehr große CO₂-Emissionssenkungen lassen sich von der Industrie schwer erzielen. Im ACT-Map-Szenario sind die energiebedingten CO₂-Emissionen der Industrie 2050 um 63% höher als 2005. Im BLUE-Map-Szenario liegen sie 22% unter dem heutigen Niveau, was größtenteils dem starken Einsatz von CCS-Technologien in großen, energieintensiven Produktionsstätten zuzuschreiben ist. Im BLUE-Map-Szenario werden erhebliche direkte und indirekte CO₂-Einsparungen im Umfang von fast 10 Gt CO₂ jährlich erzielt. In diesem Szenario sind im Vergleich zum Basisszenario zusätzliche Investitionen in die Aufrüstung von Industrieanlagen – hauptsächlich in der Stahlindustrie, dem Zementsektor sowie der Papier- und Zellstoffherstellung – sowie in den verstärkten Einsatz von CCS-Technologien in Höhe von 2,5 Bill. USD erforderlich.

Trends bei der Energieeffizienz

Im Vergleich zu den Energieeffizienztrends der jüngsten Zeit müssen große Verbesserungen erzielt werden. Die Energieeffizienz ist im OECD-Raum in der letzten Zeit um etwas weniger als 1% jährlich gestiegen. Damit hat sich diese Rate, gegenüber den in der Zeit unmittelbar nach den Ölschocks der frühen 1970er Jahre erreichten Werten, deutlich verlangsamt. Im ACT-Map-Szenario müssen dauerhafte globale Energieeffizienzsteigerungen im Umfang von 1,4% jährlich erzielt werden, die sich im BLUE-Map-Szenario auf 1,7% erhöhen. Diese prozentualen Unterschiede mögen gering wirken, die Abweichung von 0,3 Prozentpunkten zwischen dem ACT-Map- und dem BLUE-Map-Szenario resultiert 2050 jedoch in einer zusätzlichen Endenergieeinsparung in Höhe von 1 544 Mio. t RÖE, 20% des heutigen weltweiten Gesamtendenergieverbrauchs.

Forschung, Entwicklung und Demonstration

Einige der in den BLUE-Szenarien erforderlichen Technologien stehen noch nicht zur Verfügung. Viele andere müssen noch weiterentwickelt und kostengünstiger werden. Daher sind gewaltige Anstrengungen im Bereich Forschung, Entwicklung

und Demonstration (FEuD) notwendig. Die Ausgaben des öffentlichen und privaten Sektors für FEuD im Energiesektor sind im Vergleich zu den Zahlen der 1970er und 1980er Jahre jedoch gesunken und haben sich inzwischen auf relativ niedrigem Niveau stabilisiert. In vielen OECD-Ländern belaufen sie sich auf weniger als 0,03% des BIP. Eine Ausnahme bildet Japan, wo sie 0,08% des BIP ausmachen. Die energiewirtschaftlichen FEuD-Ausgaben des privaten Sektors sind mittlerweile wesentlich höher als die des öffentlichen Sektors. Es lassen sich zwar nur schwer genaue Zahlen ermitteln, Untersuchungen unabhängiger Stellen haben aber ergeben, dass die FEuD des öffentlichen Sektors um ein Zwei- bis Zehnfaches ihres derzeitigen Niveaus erhöht werden muss. Auch wenn wir kein spezifisches Ziel vorgeben, ist doch klar, dass die **FEuD-Anstrengungen beträchtlich beschleunigt werden müssen**, sowohl um neue Technologien zu entwickeln als auch um die Kosten bereits verfügbarer Technologien zu reduzieren. **In energietechnologischen Schlüsselbereichen wie Photovoltaik, fortschrittliche Kohlekraftwerke, fortschrittliche Biokraftstoffe, CO₂-Abscheidung, Elektrobatterien, Brennstoffzellen und Wasserstoffproduktion müssen weitere Fortschritte erzielt und kostengünstigere Lösungen entwickelt werden.** Selbst bei einer starken Erhöhung bleiben die FuE-Kosten vergleichsweise bescheiden, in der Regel sind sie um einen Größenordnungsfaktor geringer als die vollständiger Demonstrations- und Markteinführungsprogramme. **Gezielt ausgerichtete FuE bietet ein hervorragendes Kosten-Nutzen-Verhältnis.**

Staatliche Unterstützung ist auch für die Demonstration neuer Technologien in größerem Maßstab erforderlich, um die Risiken im ersten Stadium der Kommerzialisierung zu verringern. **Dringend notwendig ist eine großtechnische Demonstration von Kohlekraftwerken mit CCS-Technologien.**

Durch Grundlagenforschung in Gebieten wie Geologie, Physik, Chemie, Materialwissenschaft, Biochemie, Nanotechnologie und angewandte Mathematik können bahnbrechende Erkenntnisse in entscheidenden Bereichen gewonnen werden. **Es ist äußerst wichtig, die Wissenschaftsbasis auszubauen und für stärkere Verknüpfungen zwischen Forschung und Technologie zu sorgen.**

Markteinführung und technologischer Lernprozess

Die meisten neuen Technologien sind teurer als diejenigen, die bisher auf dem Markt üblich sind. Nur durch den *technologischen Lernprozess*, der mit der Markteinführung in Gang gesetzt wird, können die Kosten reduziert und die Produkte den Marktanforderungen angepasst werden. **Die Regierungen müssen ihre Markteinführungsprogramme verbessern.** Erneuerbare Energien der zweiten Generation, z.B. Sonnenenergie und Biokraftstoffe, gehören zu den Technologien mit dem größten Potenzial. Im ACT-Map-Szenario müssen unseren Schätzungen zufolge zwischen heute und 2050 2,8 Bill. USD für die zusätzlichen (über den Marktwert hinausgehenden) Kosten der Markteinführung neuer Technologien aufgewendet werden. Im BLUE-Map-Szenario beläuft sich die entsprechende Summe auf 7 Bill. USD.

Regulierung

Die Hindernisse für die Markteinführung neuer Technologien sind nicht immer wirtschaftlicher Art. Sorgfältig konzipierte Regulierungen und Standards gehören häufig zu den wirkungsvollsten Politikmaßnahmen zur Überwindung dieser anderen Hindernisse. **Strenge Energieeffizienzstandards für Gebäude, Geräte und Fahrzeuge sind unerlässlich** in allen Szenarien. Die Verbesserung der Energieeffizienzaufgaben und die Stärkung ihrer Durchsetzung sind in Industrie- ebenso wie Entwicklungsländern eine kosteneffektive Politikoption für sofortige Aktionen. Entscheidend für den Erfolg der BLUE-

Szenarien ist die öffentliche Akzeptanz der erforderlichen Standards, um zu Gebäuden mit sehr niedrigem Energieverbrauch oder Nullenergiehäusern zu gelangen und die CO₂-Intensität der Fahrzeuge auf ein Viertel zu reduzieren.

Anreize

Privatwirtschaftliche Investitionen sind und bleiben der wichtigste Faktor für die Förderung der Technologieeinführung und -verbreitung. Die IEA hat mit den Technologieverantwortlichen von 30 führenden internationalen Energieunternehmen über die Konsequenzen der BLUE- und ACT-Szenarien diskutiert. Sie unterstrichen die **dringende Notwendigkeit der Konzipierung und Umsetzung eines breiten Spektrums von Politikmaßnahmen, durch die klare, berechenbare, langfristige politische Anreize für CO₂-Reduktionen auf dem Markt geschaffen werden**. Nur unter solchen Bedingungen sind die Unternehmen in der Lage, die gewaltigen erforderlichen Investitionsprogramme anzustrengen.

In der vorliegenden Analyse wird nicht versucht, genau festzulegen, welche Mechanismen notwendig sein werden, da dies bis zu einem gewissen Grad Gegenstand der Verhandlungen im Kontext des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen ist. In den ACT-Szenarien müssen die Mechanismen laut unseren Schätzungen ausreichend sein, um Anreize für Technologien zu schaffen, deren Grenzkosten sich bei Erreichen der vollen Marktreife auf 50 USD je Tonne vermiedene CO₂-Emissionen belaufen. In den BLUE-Szenarien beträgt die entsprechende Summe mindestens 200 USD je Tonne CO₂-Einsparung und könnte sich auf 500 USD erhöhen, falls bei Schlüsseltechnologien nicht die erhofften Fortschritte erzielt werden. Die fraglichen Anreize müssen auf globaler Ebene in allen großen Volkswirtschaften durch eine Vielzahl von Politikmaßnahmen geschaffen werden.

Es muss sich dabei nicht zwangsläufig um einheitliche Anreize gleicher Höhe für alle Technologien handeln. Insbesondere in den BLUE-Szenarien **können gezielt auf die teuersten Technologien ausgerichtete Systeme sinnvoll sein**. Entsprechende Maßnahmenpakete, die verschiedenste Formen annehmen können, müssen in den OECD-Ländern bis 2020 und in den übrigen bedeutenden Ländern bis 2030 eingerichtet werden. In den BLUE-Szenarien wird von einer deutlichen weiteren Verschärfung der Maßnahmen über diese Zeithorizonte hinaus ausgegangen. Damit die Maßnahmen ihre volle Wirkung entfalten können und um einen reibungslosen Übergang zu gewährleisten, ist es äußerst wichtig, dass im Voraus klar festgelegt wird, mit welchen Zielvorgaben und Anreizen zu rechnen ist.

Öffentliche Meinung

Die Regierungen müssen die öffentliche Meinung für die Problematik mobilisieren, indem sie die Zusammenhänge zwischen der dringenden Notwendigkeit einer Bekämpfung des Klimawandels, über die allgemein Einigkeit herrscht, und den spezifischen dazu erforderlichen Projekten aufzeigen, die in der Öffentlichkeit häufig auf Widerstand stoßen. Weder die ACT- noch die BLUE-Szenarien können ohne eine deutliche Neuausrichtung der Prioritäten verwirklicht werden, wozu in den BLUE-Szenarien **ein radikaler und sofortiger Wandel notwendig ist**.

Ausbau der internationalen Zusammenarbeit

Internationale Zusammenarbeit ist unerlässlich, um die Entwicklung und weltweite Einführung nachhaltiger Energietechnologien möglichst wirkungsvoll zu beschleunigen. Netzwerke hierfür bestehen bereits. Die IEA verfügt selbst über das bei weitem umfangreichste Netzwerk, in dessen Rahmen Tausende von Technologiefachleuten

aus aller Welt ihre energietechnologischen Programme koordinieren. Weitere wichtige Beispiele sind die energietechnologischen Programme der EU, die Asiatisch-Pazifische Partnerschaft, das Führungsforum für Kohlenstoffsequestrierung (CSLF), die Biofuels Partnership, die Internationale Partnerschaft für eine Wasserstoffwirtschaft (IPHE), das Internationale Forum Generation IV und die Global Nuclear Energy Partnership. **Diese Netzwerke erfordern ein starkes internationales Führungengagement seitens politischer Entscheidungsträger auf oberster Ebene.**

In dieser Publikation wird erstmals versucht, globale Aktionspläne für wichtige Energietechnologien aufzustellen. Wir haben 17 Schlüsseltechnologien in den Bereichen Energieeffizienz, Stromerzeugung und Verkehr identifiziert. Sie sind das Herzstück der energietechnologischen Revolution. Wir beschreiben die erforderlichen Maßnahmen, um das Potenzial dieser Technologien zu erschließen. Diese Maßnahmen sind speziell auf die einzelnen Technologien ausgerichtet und hängen z.T. von deren jeweiligem Entwicklungsstand ab. Solche Aktionspläne können besonders zweckmäßig sein, um Anhaltspunkte dafür zu liefern, in welchem Umfang die Emissionen in den verschiedenen Sektoren und Technologien gesenkt werden müssen und ob der fragliche Prozess zielkonform abläuft. **Die Weiterentwicklung dieser Aktionspläne unter internationaler Anleitung, unter Einbeziehung der energietechnologischen Programme sämtlicher großer Volkswirtschaften, und im Rahmen intensiver Konsultationen mit der Industrie kann zum Dreh- und Angelpunkt für die wesentlich engere internationale Zusammenarbeit werden, die nötig ist, um eine globale energietechnologische Revolution herbeizuführen.** Die IEA steht bereit, diese Anstrengungen zu Gunsten einer nachhaltigeren Energiezukunft zu unterstützen.

Tabelle ES.1 ► Aktionspläne

Angebotsseite	Nachfrageseite
<ul style="list-style-type: none"> ■ CO₂-Abscheidung und -Speicherung in fossilen Kraftwerken ■ Kernkraftwerke ■ Onshore- und Offshore-Windkraft ■ Kraft-Wärme-Kopplung mit integrierter Biomasse-Vergasung (BIGCC) und Mitverbrennung ■ Photovoltaik ■ Solarthermische Kraftwerke ■ Kombianlagen mit integrierter Kohlevergasung (IGCC-Kraftwerke) ■ USCSC-Kohlekraftwerke (<i>Ultra Supercritical Steam Cycle</i>) ■ Biokraftstoffe der zweiten Generation 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Energieeffizienz in Gebäuden und Geräten ■ Wärmepumpen ■ Raumheizung und Wassererhitzung durch Sonnenenergie ■ Energieeffizienz im Verkehr ■ Elektro- und Plug-in-Fahrzeuge ■ Brennstoffzellenfahrzeuge ■ CO₂-Abscheidung und -Speicherung in Industrie, Wasserstoffproduktion und Energieumwandlung ■ Industrielle Antriebssysteme

Dieses Dokument wurde ursprünglich in Englisch veröffentlicht.
Die IEA hat zwar im Rahmen des Möglichen sichergestellt,
dass die deutsche Übersetzung dem englischen Original getreu ist,
kleine Abweichungen sind jedoch nicht auszuschließen.

The Online Bookshop

International Energy Agency



All IEA publications may be bought
online on the IEA website:

www.iea.org/books

You may also obtain PDFs of
all IEA books at 20% discount.

Books published before January 2007
- with the exception of the statistics publications -
can be downloaded in PDF, free of charge
from the IEA website.

IEA BOOKS

Tel: +33 (0)1 40 57 66 90
Fax: +33 (0)1 40 57 67 75
E-mail: books@iea.org

International Energy Agency
9, rue de la Fédération
75739 Paris Cedex 15, France

CUSTOMERS IN NORTH AMERICA

Turpin Distribution
The Bleachery
143 West Street, New Milford
Connecticut 06776, USA
Toll free: +1 (800) 456 6323
Fax: +1 (860) 350 0039
oecdna@turpin-distribution.com
www.turpin-distribution.com

You may also send

your order

to your nearest

OECD sales point

or use

the OECD online

services:

www.oecdbookshop.org

CUSTOMERS IN THE REST OF THE WORLD

Turpin Distribution Services Ltd
Stratton Business Park,
Pegasus Drive, Biggleswade,
Bedfordshire SG18 8QB, UK
Tel.: +44 (0) 1767 604960
Fax: +44 (0) 1767 604640
oecdrow@turpin-distribution.com
www.turpin-distribution.com

INTERNATIONALE ENERGIE-AGENTUR

Die Internationale Energie-Agentur (IEA) ist eine autonome Institution, die im November 1974 im Rahmen der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) zur Einrichtung eines internationalen Energieprogramms gegründet wurde.

Sie führt ein umfassendes Programm der Energiekooperation zwischen 27 der insgesamt 30 OECD-Mitgliedstaaten durch. Die grundlegenden Ziele der IEA sind:

- Aufrechterhaltung und Verbesserung der Systeme für die Bewältigung von Ölversorgungsstörungen;
- Förderung rationeller Maßnahmen im Energiebereich auf weltweiter Ebene durch kooperative Beziehungen zu Nichtmitgliedstaaten, zur privaten Wirtschaft und zu internationalen Organisationen;
- Unterhaltung eines ständigen Informationssystems über den internationalen Ölmarkt;
- Verbesserung der Struktur von Weltenergieangebot und -nachfrage durch Entwicklung alternativer Energieträger und eine rationellere Energieverwendung;
- Förderung internationaler Zusammenarbeit im Bereich der Energietechnologie
- Förderung der Verzahnung von Umwelt- und Energiepolitik.

Die IEA-Mitgliedstaaten sind: Australien, Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Japan, Kanada, Korea, Luxemburg, Niederlande, Neuseeland, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, die Slowakische Republik, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich, Vereinigte Staaten. Polen wird in 2008 wahrscheinlich Mitglied werden. Die Europäische Kommission beteiligt sich ebenfalls an den Arbeiten der IEA.

ORGANISATION FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG

Die OECD ist ein in seiner Art einzigartiges Forum, in dem die Regierungen von 30 demokratischen Staaten gemeinsam daran arbeiten, den globalisierungsbedingten Herausforderungen im Wirtschafts-, Sozial- und Umweltbereich zu begegnen. Die OECD steht auch in vorderster Linie bei den Bemühungen um ein besseres Verständnis der neuen Entwicklungen und der dadurch ausgelösten Befürchtungen. Sie hilft den Regierungen dabei, diesen neuen Gegebenheiten Rechnung zu tragen, indem sie Untersuchungen zu Themen wie Corporate Governance, Informationswirtschaft oder Probleme der Bevölkerungsalterung durchführt. Die Organisation bietet den Regierungen einen Rahmen, der es ihnen ermöglicht, ihre Politikerfahrungen auszutauschen, nach Lösungsansätzen für gemeinsame Probleme zu suchen, empfehlenswerte Praktiken aufzuzeigen und auf eine Koordinierung nationaler und internationaler Politiken hinzuarbeiten.

Die OECD-Mitgliedstaaten sind: Australien, Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Japan, Kanada, Korea, Luxemburg, Mexiko, Neuseeland, die Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, die Slowakische Republik, Spanien, die Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, das Vereinigte Königreich und die Vereinigten Staaten. Die Europäische Kommission nimmt an den Arbeiten der OECD teil.

© OECD/IEA, 2008

International Energy Agency (IEA)
Head of Communication and Information Office,
9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France.

Diese Publikation unterliegt bestimmten Beschränkungen in Bezug auf ihre Nutzung und Verbreitung. Die entsprechenden Bedingungen und Regelungen sind online verfügbar unter <http://www.iea.org/Textbase/about/copyright.asp>