

**Cost-optimized
Climate Stabilisation
(OPTIKS)**

**deutsche Kurzfassung /
English-language Summary**

Authors:

**Marian Leimbach, Nico Bauer, Lavinia Baumstark, Ottmar
Edenhofer**

Potsdam Institute for Climate Impact Research

This Publication is only available as Download under
<http://www.umweltbundesamt.de>

The contents of this publication do not necessarily
reflect the official opinions.

Publisher: Federal Environment Agency (Umweltbundesamt)
P.O.B. 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: +49-340-2103-0
Telefax: +49-340-2103 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Edited by: Section I 2.1
Martin Weiß, Guido Knoche

Dessau-Roßlau, November 2009

Kurzfassung

1 Einleitung

Das Ziel der Klimarahmenkonvention ist es, die atmosphärische Konzentration der Treibhausgase auf einem Niveau zu stabilisieren, das einen gefährlichen Klimawandel verhindert (Art. 2 der Klimarahmenkonvention). Dieses Ziel stellt eine wesentliche Grundlage für den internationalen Verhandlungsprozess zur Weiterentwicklung des Klimaregimes (Kyoto-Protokoll und Folgeverträge) dar. Ausgehend vom Beschluss des EU-Ministerrats, eine Erwärmung der Erdatmosphäre um mehr als 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu verhindern, bestand die Aufgabe des Forschungsvorhabens darin, die zur Erreichung eines solchen Klimazieles notwendigen Kosten zu berechnen. Es sollte die Rolle der europäischen Klimapolitik im Kontext der Globalisierung analysiert und der Einfluss der internationalen Märkte, insbesondere des internationalen Emissionshandels auf die Kosten des Klimaschutzes untersucht werden. Zentrale Zielsetzung des Forschungsvorhabens war die regionale Aufschlüsselung von Vermeidungskosten unter verschiedenen Ausgestaltungen eines Post-Kyoto-Klimaregimes.

Als zu analysierende Implementierungen eines Post-Kyoto-Klimaregimes wurden drei „Cap-and-Trade“-Ansätze ausgewählt: (i) Reduktion und Konvergenz, (ii) Intensitätsziel sowie (iii) Mehrstufenansatz. Diese verschiedenen Ansätze werden genutzt, um die für die Erreichung des ambitionierten 2°C-Klimaschutzzieles notwendigen globalen Emissionsreduktionsverpflichtungen zwischen den Regionen aufzuteilen. Die Ansätze repräsentieren alternative Möglichkeiten der Verteilung internationaler Reduktionslasten. Damit ist die Grundlage für eine vergleichende Analyse der Vermeidungskostenstrukturen unterschiedlicher Politikregime gelegt.

Als wichtigstes Analysewerkzeug wird das neuentwickelte Modell REMIND-R genutzt. REMIND-R ist ein mehrregionales Hybridmodell, welches ein ökonomisches Wachstumsmodell mit einem detaillierten Energiesystemmodell und einem einfachen Klimamodell koppelt. Die einzelnen Regionen sind mit Hilfe eines Handelsmoduls miteinander verknüpft. Die aktuelle Version von REMIND-R beinhaltet neun Weltregionen:

1. UCA - USA, Kanada und Australien,
2. EUR - EU27,
3. JAP - Japan,
4. CHN - China,
5. IND - Indien,
6. RUS - Russland,
7. AFR - Subsahara-Afrika (einschl. Republik Südafrika),
8. MEA - Mittlerer Osten und Nordafrika,
9. ROW – Lateinamerika, Südostasien, Rest von Europa.

REMIND-R ist als intertemporal optimierendes „Soziales Planer“-Modell formuliert, in dem eine globale Wohlfahrtsfunktion maximiert wird, die die regionalen Nutzenfunktionen zusammenfasst.

2 Referenzszenario

Wir starten die Präsentation von Modelergebnissen mit der Diskussion des Referenzszenarios. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass Klimawandel und Klimapolitik keine wirtschaftlich und sozial bedeutsamen Effekte haben. Dementsprechend kann ein weiterer weltweiter Anstieg der Emissionen vorausgesetzt werden. Ein Großteil des Wirtschaftswachstums basiert auf der Verwendung fossiler Energieträger. Diese Referenzentwicklung soll uns als Vergleichspunkt für Szenarien dienen, in denen durch Klimapolitik dem Klimawandel nachhaltig begegnet wird.

2.1 Technologieentwicklung und Energieerzeugung

Abb.1 zeigt die Primär- und Sekundärenergieerzeugung für das 21. Jahrhundert unterteilt nach Energieträgern.¹ Primär- und Sekundärenergieerzeugung steigen während der nächsten hundert Jahre kontinuierlich an, wobei sich die jährliche Steigerung abschwächt. Das liegt am Bevölkerungsszenario, dem nachlassenden Wachstum der Nachfrage in den entwickelten Ländern und der stetigen Verteuerung fossiler Energieträger. Die Primärenergieerzeugung steigt von knapp 470 EJ auf mehr als 1400 EJ pro Jahr.

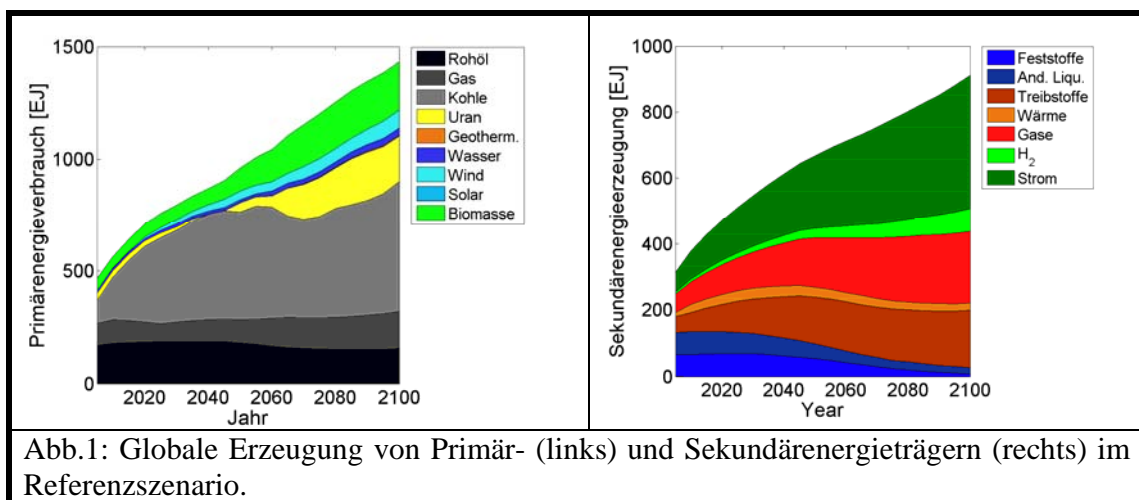


Abb.1: Globale Erzeugung von Primär- (links) und Sekundärenergieträgern (rechts) im Referenzszenario.

Der Primärenergiemix wird im Wesentlichen von fossilen Energieträgern bestimmt. Während die Nutzung von Rohöl und Gas annähernd konstant bleibt, nimmt die Nutzung der Kohle stark zu (vor allem bis zum Jahr 2030). Kohle wird hauptsächlich zur Stromerzeugung genutzt und verdrängt die Verstromung von Gas und Nuklearenergie (siehe Abb. 2). Die Stromerzeugung steigt um rund 3,6 EJ pro Jahr fast linear an und erreicht mit 400 EJ am Ende des Jahrhunderts den 6-fachen Wert im Vergleich zum Basisjahr 2005. Die ökonomische Attraktivität der Kohle liegt in ihren geringen Kosten, dem flexiblen Handel und der Annahme, dass die Kohlenutzung keinerlei Regulierungen unterliegt. Allerdings steigt der (modellendogene) Kohlepreis bis zur Mitte des Jahrhunderts auf ein Niveau, welches die Nutzung erneuerbarer Energiequellen konkurrenzfähig macht. Wasser-

¹ Die Primärenergieerzeugung der erneuerbaren Energiequellen Wind, Solar und Wasserkraft wird hier mit der entsprechenden Sekundärenergieerzeugung gleichgesetzt.

kraft und besonders Windkraft, aber auch Geothermale Energiequellen werden zunehmend zur Primärenergieerzeugung herangezogen. Auch die Biomassenutzung steigt nach 2030 an, was an der zunehmenden Verfügbarkeit liegt. Auf solare Energiequellen wird im Referenzszenario nicht zurückgegriffen. In Ergänzung zur Kohle wird die Nuklearenergie am Ende des Jahrhunderts in erheblichem Maße eingesetzt.

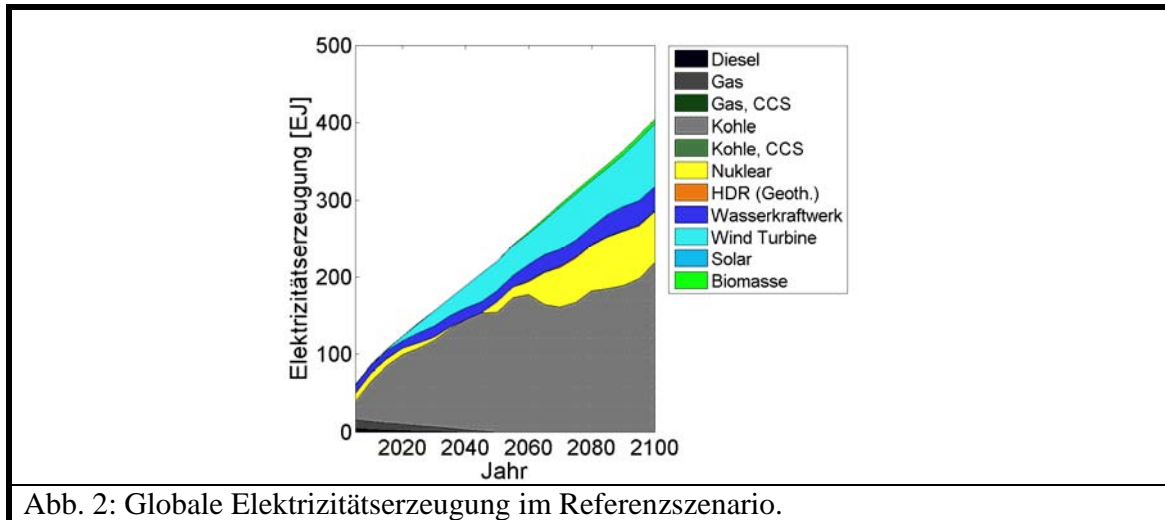


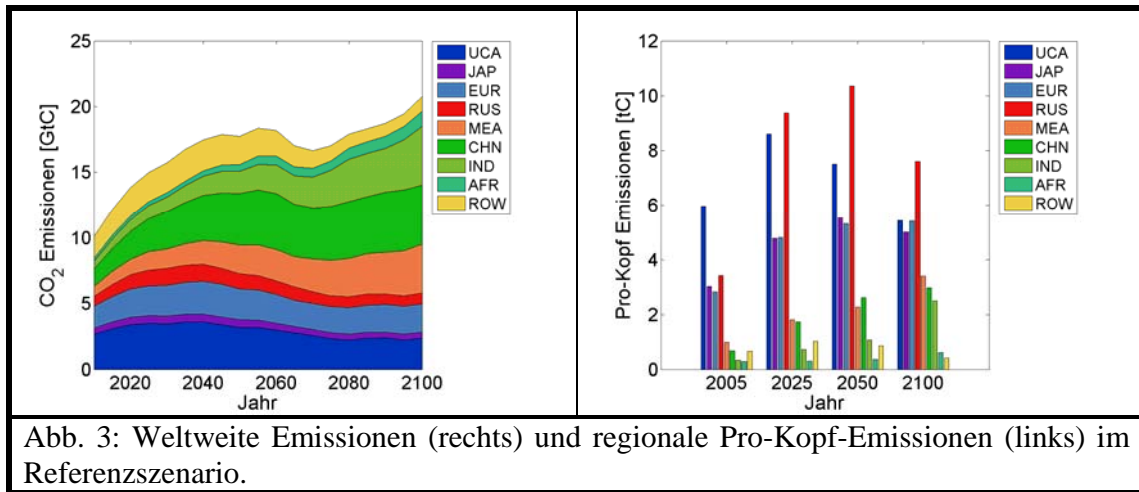
Abb. 2: Globale Elektrizitätserzeugung im Referenzszenario.

2.2 Emissionen

Im Referenzszenario kommt es zu einer deutlichen Steigerung der Emissionen, die im Wesentlichen aus der zunehmenden Kohleverstromung resultiert. Die weltweiten Emissionen betragen im Jahr 2100 etwa 21 GtC bzw. 76 Gt CO₂ (siehe Abb. 3). Der Anstieg der Emissionen ist vor allem in den anfänglichen Dekaden sehr hoch, mit einer Verdoppelung der Emissionen zwischen 2005 und 2025. Einem zeitweiligen Rückgang der Emissionen um 2060 folgt ein weiterer Anstieg.

Hinsichtlich der Pro-Kopf-Emissionen bleiben große Unterschiede bestehen (Abb. 3 rechts). Während die Industriestaaten (einschl. Russland) ihre Pro-Kopf-Emissionen steigern und auf hohem Niveau halten (5-10 tC pro Jahr), steigen diese in China, Indien und MEA auf etwa 2-3 tC bis zum Jahr 2100. Afrika und ROW verbleiben auf einem durchweg niedrigen Niveau von weniger als 1 tC bzw. 1,3 tC.

In allen Regionen ist Kohle der Hauptenergieträger, der den Anstieg der Emissionen verursacht. Auch der deutliche Rückgang der Emissionen um 2060 folgt dem Pfad der Kohlenutzung (vor allem dem in der Region UCA). Der zwischenzeitliche Rückgang der Kohlenutzung geht einher mit einem temporären Anstieg der Kernenergienutzung (vgl. Abb. 2). Im Jahr 2100 entstehen ungefähr 75% der Emissionen im Energiesektor bei der Verbrennung von Kohle.



3 Post-2012-Klimapolitikregime

Die nachfolgenden Analysen von Klimapolitikregimen basieren auf Szenarien, die die Einhaltung des 2°C-Ziels mit sehr großer Wahrscheinlichkeit gewährleisten. In REMIND-R kann nur auf die CO₂-Emissionen im Energiesektor modellendogen Einfluss genommen werden. Für die Entwicklung aller anderen Treibhausgasemissionen werden exogene Szenarien verwendet. Daraus ergeben sich in der aktuellen Konfiguration erhebliche Reduktionsanforderungen für den Energiesektor. Die globalen Emissionen müssen bis zum Jahr 2035 halbiert werden. Die atmosphärische CO₂-Konzentration erreicht ihr Maximum bei etwa 415 ppm um das Jahr 2030.

Bei der Analyse, wie und zu welchen Kosten ein solcher Reduktionspfad erreicht werden kann, untersuchen wir drei verschiedene Ausprägungen eines internationalen „Cap & Trade“-Systems. In einem solchen System werden ab 2010 den einzelnen Regionen Emissionsrechte zugeteilt. Die regionalen Anteile ergeben sich entsprechend der regime-abhängigen Verteilungsregel. Die global verfügbare Menge an Emissionsrechten wird in Rückkopplung mit dem Klimamodul endogen bestimmt und entspricht dem globalen Emissionspfad.

Konvergenz und Reduktion (PolitikszENARIO A)

In diesem PolitikszENARIO werden ab 2050 gleiche Pro-Kopf-Emissionsrechte verteilt. Bei der Festlegung der Anteile zwischen 2010 und 2050 erfolgt ein gleitender Übergang zwischen „Grandfathering“ und gleichen Pro-Kopf-Emissionen. Dabei wird als Referenzjahr für das „Grandfathering“ das Jahr 2000 angenommen.

Intensitätsziel (PolitikszENARIO B)

Auf der Grundlage eines weltweit einheitlichen Intensitätsstandards erhält jede Region die gleichen Emissionsrechte pro Einheit Bruttoinlandsprodukt (BIP). Daher bestimmen sich die Anteile der Regionen an den global verfügbaren Emissionsrechten entsprechend ihrer Anteile am weltweiten BIP. In diesem PolitikszENARIO werden offensichtlich

die Industrieregionen mit mehr Emissionsrechten ausgestattet als in den anderen beiden Politikszenarioszenarien.

Mehrstuufenansatz (Politikszenarioszenarien C und D)

Wir haben eine Form des Mehrstuufenansatzes gewählt, bei dem sich die quantitativen Reduktionsverpflichtungen der einzelnen Regionen in Abhängigkeit von ihrem Pro-Kopf-Einkommen ergeben.

Regionen in der ersten Stufe (bis 2000 \$US pro Kopf) werden praktisch zu keinen Reduktionen verpflichtet. Sie können trotzdem am Emissionshandel teilnehmen und werden mit Zertifikaten in Höhe ihrer Referenzemissionen (die im Referenzszenario berechnet werden) ausgestattet.

Regionen in der zweiten Stufe (bis 4000 \$US pro Kopf) werden mit Emissionsrechten in Höhe von 0,15 GtC pro 1 Billion \$US Bruttoinlandsprodukt ausgestattet. Da i.d.R. von einem Zuwachs an BIP auszugehen ist, beinhaltet diese Stufe einen absoluten Zuwachs an Emissionsrechten für die entsprechenden Regionen.

Regionen in der dritten Stufe (bis 8000\$US pro Kopf) sind verpflichtet, ihre Emissionen zu stabilisieren, d.h. die zuletzt in Stufe 2 zugeteilte Zertifikatmenge wird auf ihrem Niveau eingefroren.

Regionen in der vierten Stufe (über 10000\$US pro Kopf und Jahr) müssen maßgeblich zur Emissionsreduktion beitragen. Der für diese Regionen verbleibende Anteil an den globalen Emissionsrechten ergibt sich nach Abzug der für die Regionen in Stufe 1 bis 3 verwendeten Zertifikate. Die interne Allokation zwischen den Regionen in Stufe 4 folgt wiederum dem oben beschriebenen Reduktion & Konvergenz - Ansatz.

Als zusätzliche Variante des Mehrstuufenansatzes haben wir ein Szenario (D) formuliert, bei dem nur die Regionen am internationalen Emissionshandel teilnehmen, die sich entweder in Stufe 2, 3 oder 4 befinden.

4 Modellergebnisse

4.1 Politikszenarioszenario A: Reduktion & Konvergenz

Vermeidungskosten

Wir definieren die Vermeidungskosten als prozentuale Konsumdifferenz zwischen Politikszenarioszenario und Referenzszenario. Im Politikszenarioszenario A liegen die globalen Vermeidungskosten bei durchschnittlich 1,5%, wobei die höheren Vermeidungskosten in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auftreten. Um diese globalen Werte sind die regionalen Kosten weit gestreut. Die höchsten Kosten von fast 10% im zeitlichen Durchschnitt muss MEA bewältigen. Russland und Indien liegen ebenfalls über dem weltweiten Mittel. Gleichzeitig gewinnen einige Regionen, wie Afrika und ROW. Afrika profitiert mit durchschnittlichen Gewinnen von knapp 5,2% am meisten.

Technologieentwicklung und Energieerzeugung

Durch die Einführung einer Klimapolitik werden drastische Veränderungen im Energiesystem induziert. Die wesentlichen Änderungen lassen sich in fünf Handlungsoptionen zusammenfassen:

1. Minderung des Gesamtenergieverbrauchs.
2. Sofortige Ausweitung der erneuerbaren Energietechniken für die Produktion hochwertiger Energieträger; Ausbau der Nuklearenergie.
3. Anwendung von CO₂-Abscheidung und –Einlagerung (CCS) für die Gas- und Kohleverstromung sowie die Umwandlung von Biomasse in Wasserstoff.
4. Minderung der Produktion von Treibstoffen und Gasen, da es hier nur weniger effiziente Vermeidungsoptionen gibt.
5. Minderung der Produktion der geringwertigen Energieträger Feststoffe und “Andere Liquide“ (z.B. Heizöl), so dass mehr Rohöl und Biomasse für die Produktion höherwertiger Energieträger zur Verfügung stehen:

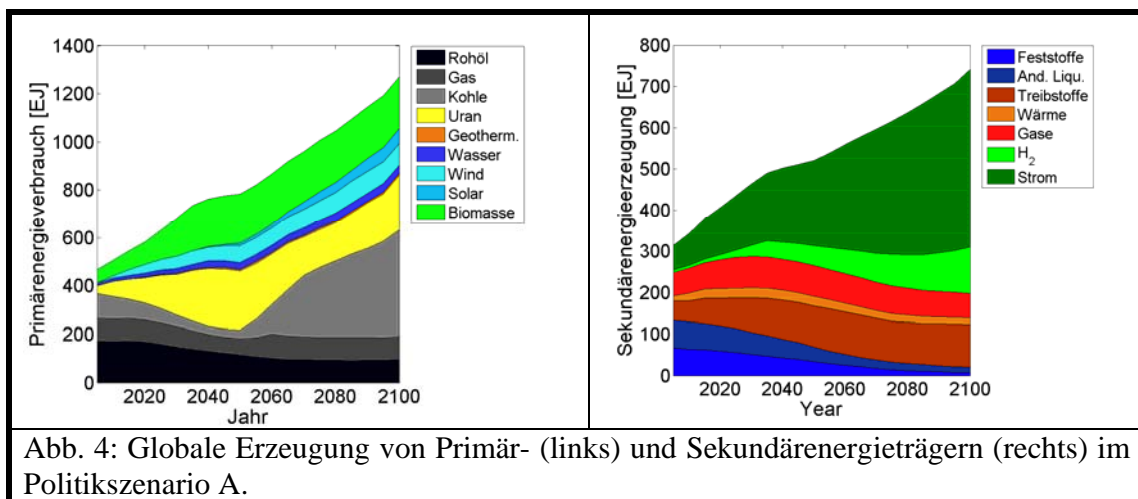


Abb. 4: Globale Erzeugung von Primär- (links) und Sekundärenergieträgern (rechts) im PolitikszENARIO A.

Die Ergebnisse werden im Folgenden immer im Vergleich zum Referenzszenario diskutiert. Die Gesamtenergieerzeugung – primär als auch sekundär – wird reduziert. Die Primärenergieerzeugung erreicht etwa 1250 EJ am Ende des Jahrhunderts, wohingegen im Referenzszenario 1430 EJ erreicht wurden. Auf die kurze Sicht steigt die Primärenergieerzeugung zunächst weniger, um dann ab Mitte des Jahrhunderts ihr Wachstum wieder zu beschleunigen; im Referenzszenario war das andersherum. Bei der Sekundärenergieerzeugung wird im Jahr 2100 lediglich ein Output von etwa 770 EJ erreicht, während im Referenzszenario etwa 910 EJ produziert wurden. Diese drastische Reduzierung erklärt sich durch die Zusammensetzung der Primärenergie und die Bilanzierung nach der direkten Verbrauchsmethode.²

Die offensichtlichste Veränderung im Primärenergieträgermix ist der starke Rückgang der Nutzung fossiler Ressourcen sowie die frühzeitigere und stärkere Ausdehnung von

² Dabei ist der Verbrauch von erneuerbaren Primärenergieträgern für die Elektrizitätserzeugung gleich dem Output. Bei den fossilen Energieträgern werden hingegen Effizienzverluste berücksichtigt.

erneuerbaren Energiequellen sowie der Kernenergie. Ab 2040 spielt auch die Solarenergie eine Rolle.

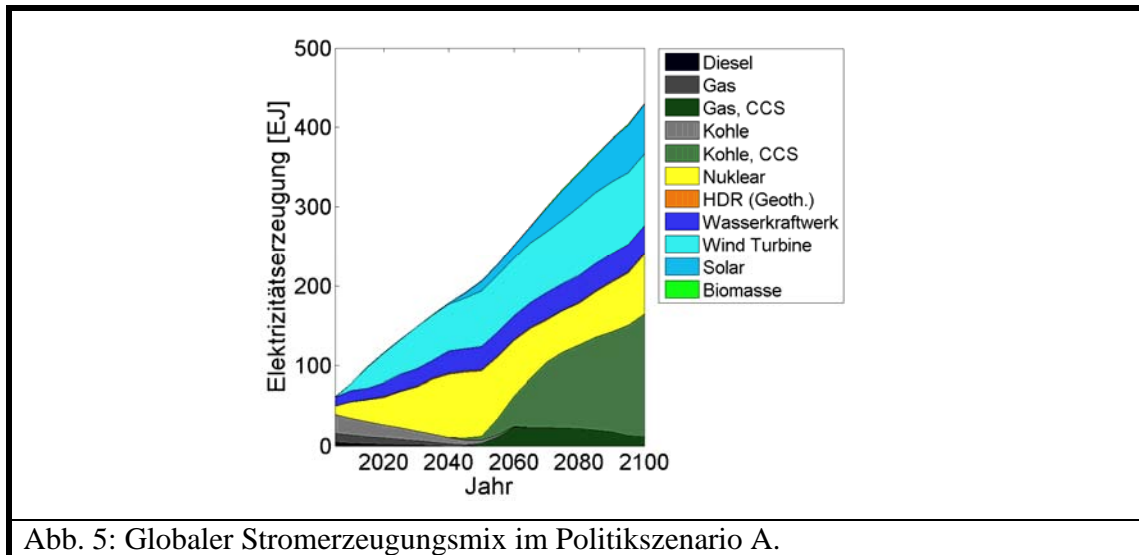


Abb. 5: Globaler Stromerzeugungsmix im Politikscenario A.

Wie zu erwarten macht sich besonders im Stromerzeugungsmix die Nutzung von Wind, Solar und Wasserkraft bemerkbar (siehe Abb. 5). Auffallend ist insbesondere die frühzeitige Ausdehnung dieser Optionen. Am Ende des Jahrhunderts beträgt der Anteil der erneuerbaren Energien 56% an einer Stromproduktion von 480 EJ. Genauso wie die Wasserstoffproduktion steigt damit die Gesamtstromproduktion gegenüber dem Referenzszenario. Im Bereich der fossilen Energieträger ist zu beobachten, dass nun Gas für die Stromerzeugung zum Zuge kommt; die Emissionsbeschränkung verlangt jedoch die CO₂-Abscheidung. Die Kohle wird auf Grund des Einsatzes von CCS auch langfristig nicht aus dem Erzeugungsmix gedrängt: sie wird in Kraftwerken nach dem sogenannten Oxyfuel-Verfahren verfeuert, wobei nur ein knappes Prozent des erzeugten CO₂ in die Atmosphäre gelangt.

Emissionen

Das zugrundeliegende Stabilisierungsszenario erfordert einen schnellen und drastischen Rückgang der Emissionen in allen Regionen (siehe Abb. 6). Zwischen 2025 und 2050 ist der Rückgang am stärksten. Die globalen Emissionen müssen bis 2050 auf 73% bzw. 78% gegenüber 1990 bzw. 2005 gesenkt werden. Gleichzeitig steigt der relative Anteil der Entwicklungsländer und ROWs an den global verteilten Emissionsrechten deutlich an. Ohne globalen Emissionshandelsmarkt müssten die Industrieregionen bis 2050 ihre Pro-Kopf-Emissionen auf 5% des heutigen Niveaus senken. MEA, China und ROW müssten ihre Pro-Kopf-Emissionen auf 20-25% senken, während Indien und Afrika ihre Pro-Kopf-Emissionen noch steigern könnten. Für beide Regionen ist es aber offensichtlich vorteilhafter, die eigenen Emissionen nicht steigen zu lassen und stattdessen die Emissionsrechte gewinnbringend zu verkaufen (siehe Abb.7). Durch den internationalen Emissionshandel fallen die Reduktionen in den Industriestaaten geringer aus. Abb. 6 rechts zeigt, dass bezogen auf das Basisjahr 2005 die Pro-Kopf-Emissionen im Jahr 2025 um etwa 20-35% und um 70-80% im Jahr 2050 reduziert werden müssen. Darüber hinaus

wird deutlich, dass alle Regionen Pro-Kopf-Emissionen von weniger als 1,2 tC pro Jahr, in 2100 sogar weniger als 0,2 tC erreichen müssen.

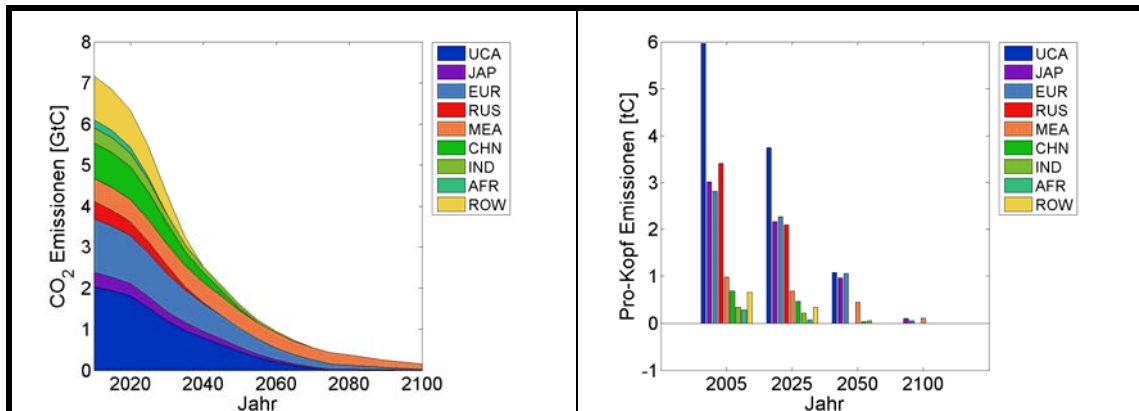


Abb. 6: Emissionen differenziert nach Regionen (links) und Pro-Kopf-Emissionen (rechts) im PolitikszENARIO A.

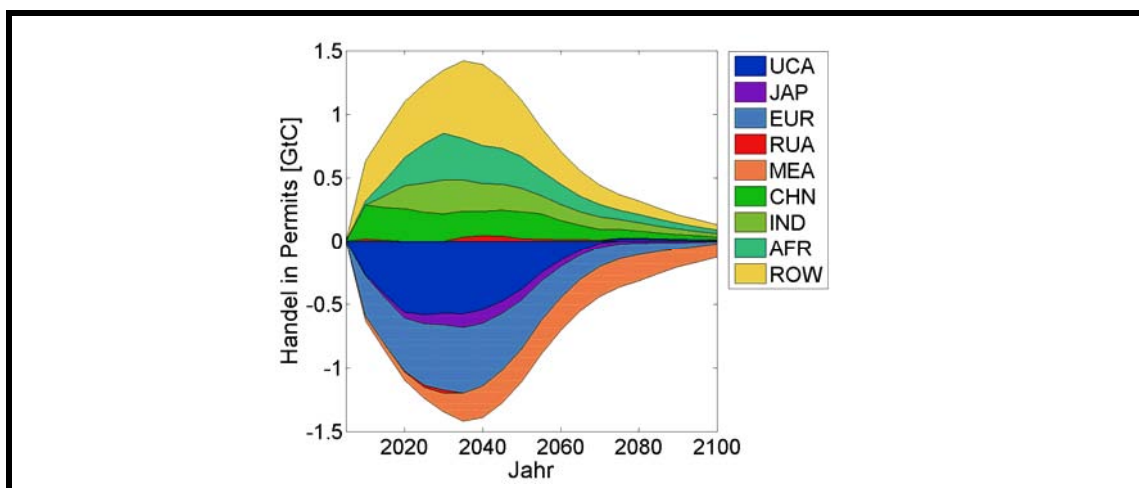


Abb. 7: Emissionshandel im PolitikszENARIO A (Handel mit positivem Vorzeichen meint den Verkauf, negative Vorzeichen den Kauf von Zertifikaten).

4.2 PolitikszENARIO B: Intensitätsziel

Vermeidungskosten

Das PolitikszENARIO B führt zu einer grundsätzlich anderen Verteilung der Vermeidungskosten als PolitikszENARIO A, obwohl der globale durchschnittliche Konsumverlust gleich ist. Vor allem fällt auf, dass Afrika nicht mehr so deutlich profitiert. Zumindest kurzfristig verzeichnen auch eine Reihe anderer Regionen (insbesondere Japan and ROW) negative Vermeidungskosten. Die Konsumverluste von UCA, EUR und China sind etwas geringer als der globale Durchschnitt. Darüber hinaus ergeben sich im Politik-

szenario B für alle Industrieregionen geringere Vermeidungskosten als in Politikscenario A. Dagegen tragen MEA und Russland weiterhin die höchsten Kosten, aber auch für Indien entstehen nun sehr hohe Kosten.

Technologieentwicklung und Energieerzeugung

Die technologische Entwicklung im Politikscenario B ist die gleiche wie im Politikscenario A. Dies ist bedingt durch die Effizienzeigenschaften des Emissionsmarktes, infolge derer sich unabhängig von der Anfangsverteilung der Emissionsrechte durch den Handel von Emissionsrechten gleichartige technologische Entwicklungsmuster ergeben.

Emissionen

Die globalen Emissionen entwickeln sich wie im Politikscenario A. Dagegen fällt die Verteilung der Emissionsrechte zwischen Politikscenario A und B sehr unterschiedlich aus. Im Politikscenario B werden die Industriestaaten zunächst mit einem höheren Anteil an Emissionsrechten ausgestattet. Bis zum Jahr 2050, verbleibt diesen Staaten ein Anteil von mehr als 50% an den globalen Emissionsrechten. In dieser Periode wird zudem der Großteil der über das Jahrhundert kumuliert zur Verfügung stehenden Emissionsrechte verteilt, was den Industriestaaten zusätzlich zu Gute kommt. Kurzfristig werden sie damit sogar zu Verkäufern auf dem CO₂-Zertifikatemarkt (siehe Abb. 8).

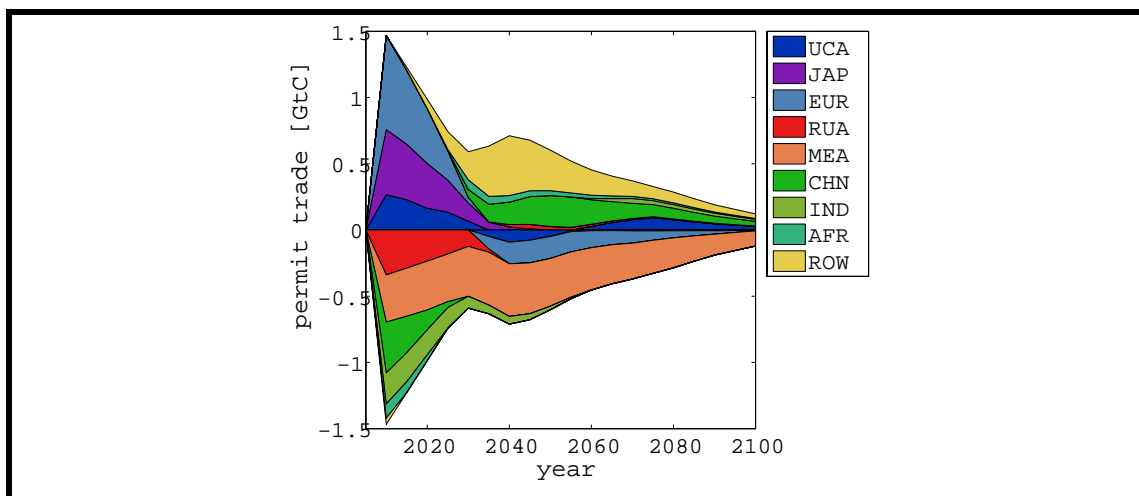


Abb. 8: Emissionshandel im Politikscenario B (Handel mit positivem Vorzeichen meint den Verkauf, negative Vorzeichen den Kauf von Zertifikaten).

Trotz der Unterschiede in der Emissionsrechteverteilung ergibt sich durch den Emissionshandel die gleiche regionale Struktur des globalen Emissionspfades (siehe Abb. 7).

4.3 Politikscenario C und D: Mehrstufenansatz

Vermeidungskosten

Die Regionen MEA und Russland tragen wiederum die höchsten Vermeidungskosten. Im Unterschied zum Politikscenario A gewinnt Afrika noch stärker bei einer Verteilung

der Emissionsrechte nach einem Mehrstufenansatz. Dies liegt daran, dass Afrika die Region mit dem geringsten Pro-Kopf-Einkommen ist, und somit noch mehr Emissionsrechte als im PolitikszENARIO A erhält. Da Afrika relativ leicht die fossile Energieproduktion, die sich in das Referenzszenario ergibt, ersetzen kann, können überschüssige Emissionsrechte gewinnbringend verkauft werden. Das gilt auch für Indien.

Technologieentwicklung und Energieerzeugung

Im PolitikszENARIO C werden kurzfristig bis zu 30 EJ weniger Öl und Gas genutzt als im PolitikszENARIO A oder B. Dafür wird der Einsatz von Biomasse und Kernenergie erhöht. Diese Entwicklung kehrt sich in der zweiten Jahrhunderthälfte um: es wird mehr Öl, Gas, und Kohle und weniger Uranium eingesetzt.

Während sich beim Öl nur eine zeitliche Verschiebung ergibt, lässt sich beim Gas auch eine regionale Verschiebung erkennen. Im Vergleich zu den PolitikszENARIO A und B reduziert China seinen Gasverbrauch zugunsten aller anderen Regionen. Gleichzeitig erhöht China seinen Kohleverbrauch. Die Nutzung von Uran zeigt im Wesentlichen eine zeitliche Verschiebung, allerdings ist ein überproportionaler Rückgang der Urannutzung in der zweiten Jahrhunderthälfte in Indien und Europa zu beobachten.

Emissionen

Das Mehrstufen-Szenario ist charakterisiert durch einen raschen Anstieg des Anteils der Entwicklungsländer an den globalen Emissionsrechten. Bereits im Jahr 2030 erhalten UCA, EUR und Japan weniger als 10% aller Emissionsrechte, während es 2010 noch 50% sind. Im Gegensatz zu den Beobachtungen im PolitikszENARIO B ergibt sich im PolitikszENARIO C ein von PolitikszENARIO A verschiedenes Emissionsprofil (siehe Abb. 9 links). Weltweit wird in den Anfangsperioden weniger emittiert, dafür ist das Emissionsniveau später etwas höher. Die anspruchvollste Reduktionsphase, in den PolitikszENARIO A und B zwischen 2025 und 2040, verschiebt sich zeitlich nach vorn auf den Zeitraum zwischen 2015 und 2030. Im PolitikszENARIO D, charakterisiert durch zusätzliche Einschränkungen im Emissionshandel, verschiebt sich diese Phase sogar auf den Zeitraum zwischen 2010 und 2025 (siehe Abb. 9 rechts).

Während die PolitikszENARIO A und B volle zeitliche Flexibilität in der Verteilung der globalen Emissionsrechte erlauben, wird in den Mehrstufen-Szenarien für die Regionen in Stufe 1-3 eine vordefinierte Menge an Zertifikaten ausgegeben. Daraus ergeben sich einerseits ein diskontinuierlicher Verlauf des Emissionspfades und andererseits eine höhere Emissionsmenge in der zweiten Jahrhunderthälfte. Um das Klimaziel dennoch zu erreichen, muss diese Menge durch weniger Emissionen in den Anfangsperioden kompensiert werden.

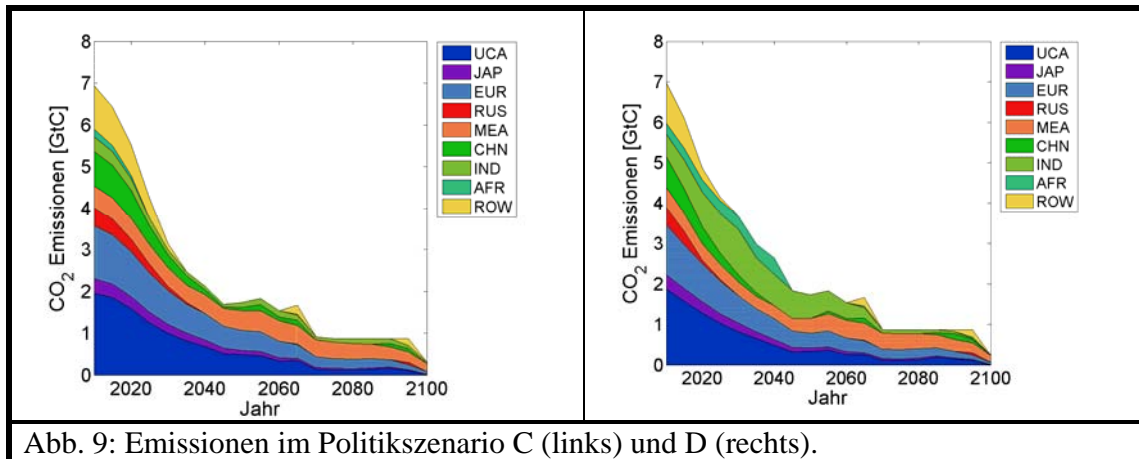


Abb. 9: Emissionen im Politikscenario C (links) und D (rechts).

4.4 Vergleich der Politikregime

Alle Politikscenarioen verfolgen das gleiche Stabilisierungsziel. Aus Sicht der ökologischen Effizienz (d.h. ihrem Beitrag zur Klimastabilisierung) sind sie nahezu gleichwertig. Trotz des gleichen Temperaturziels ist der globale Emissionsverlauf der verschiedenen Politikscenarioen jedoch nicht identisch. Dies weist auf Ineffizienzen bei der Verteilung der Emissionsrechte hin und trifft auf die Mehrstufen-Szenarien zu. Die ökonomischen Auswirkungen davon sind aber gering. Die durchschnittlichen globalen Vermeidungskosten liegen zwischen 1,4% und 1,5% für die Politikscenarioen A, B und C. Politikscenario D ist mit 1,6% am teuersten.

Abb. 10 zeigt eine Übersicht der durchschnittlichen regionalen Vermeidungskosten für die vier betrachteten Szenarien. Die Politikscenarioen A und C haben eine ähnliche Kostenstruktur für UCA, JAP, EUR, MEA und ROW. Während das „Reduktion & Konvergenz“-Szenario günstiger für China und Russland ist, profitieren Afrika und Indien stärker vom Mehrstufen-Szenario. Im Intensitätsziel-Szenario ist die Spannbreite der regionalen Vermeidungskosten am geringsten. Gleichzeitig ist es aber auch ein Szenario der Gegensätze. Für viele Regionen ist es entweder das günstigste oder das teuerste Szenario. Die Industriestaaten werden kostenseitig entlastet. Die Kehrseite davon ist, dass die Entwicklungsregionen signifikante Vermeidungskosten tragen müssen. Angesichts der Verteilung der historischen Verantwortung für das Klimaproblem könnte dies eine schwere Hypothek in zukünftigen Klimaverhandlungen sein. Politikscenario D ist zwar für einige Regionen akzeptabel, für mehr als die Hälfte ist es aber das teuerste Szenario. Die Einschränkung des globalen Emissionshandelssystems hat ihren Preis.

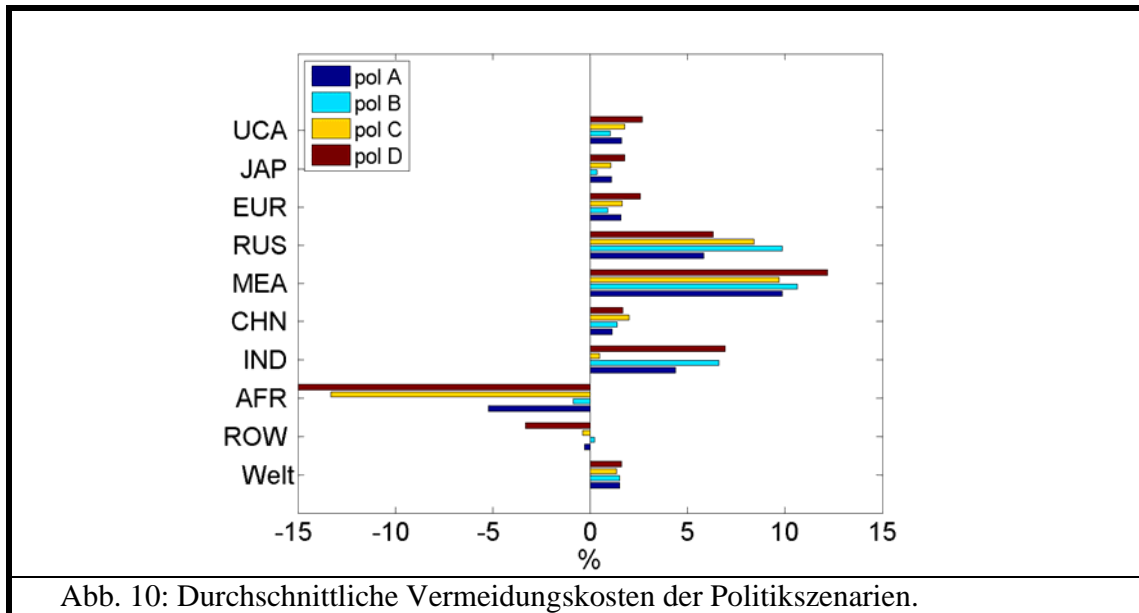


Abb. 10: Durchschnittliche Vermeidungskosten der Politiksszenarien.

Als robustes Ergebnis zeigt sich, dass die Varianz der Vermeidungskosten zwischen den Regionen höher ist als zwischen den Politiksszenarien. Aus regionaler Sicht ist festzuhalten, dass MEA in allen Politiksszenarien die höchsten Vermeidungskosten aufweist (9% und mehr). Der Umbau des globalen Energiesystems reduziert einen Großteil der möglichen Einkommen, welche diese Region aus dem Verkauf fossiler Ressourcen erzielen könnte. Das gilt in abgeschwächter Form auch für Russland, welches Vermeidungskosten von über 5% aufweist. Für die drei Industrieregionen UCA, Japan und EUR folgen die Vermeidungskosten einem festen Muster. Die höchsten Kosten sind in UCA zu finden. Nur unwesentlich geringer sind sie in EUR und am geringsten in Japan. Neben den Unterschieden in der Ausgangsbasis (höhere Pro-Kopf-Emissionen in UCA) spiegelt diese Relation auch die ungleichen Wachstumspfade wider, da UCA eine höhere Wachstumsrate ausweist. Mit Vermeidungskosten kleiner als 1% ist Politiksszenario B für alle drei Regionen das günstigste. Für China ergeben sich die geringsten Kosten in Politiksszenario A (1,1%), die Varianz der Kosten zwischen den Politiksszenarien ist allerdings erstaunlich gering. Das Gegenteil gilt für Indien, das nur im Mehrstufen-Szenario C sehr geringe Kosten hat (0,5%). Afrika gewinnt in allen Politiksszenarien, am stärksten in beiden Mehrstufen-Szenarien (negative Vermeidungskosten von mehr als 10%).

4.5 Analyse von Vermeidungsoptionen

Hinsichtlich der technologischen Entwicklung im Energiesektor wurden im Rahmen der Analyse der Politiksszenarien sechs Handlungsoptionen zur Vermeidung des Klimawandels identifiziert (siehe Abschnitt 4.1). REMIND-R simuliert relativ hohe Anteile der Kernenergie und der CCS-basierten Kohlenutzung am Energiemix. Risikoaversion und fehlende soziale Akzeptanz könnten den beschränkten Einsatz beider Vermeidungsoptionen nahe legen. Basierend auf dem „Reduktion & Konvergenz“-Szenario wurden zwei

zusätzliche Szenarien definiert, welche auf den Einsatz von CCS-Technologien bzw. von Nukleartechnologien verzichten.

Im „NoCCS“-Szenario wird auf die Verwendung von CCS-Technologien bei der Nutzung von Kohle und Gas, aber auch in Kombination mit der Biomassenutzung verzichtet. Dies führt in erster Konsequenz zu einer deutlichen Reduktion des Energieverbrauchs. Dies gilt vor allem langfristig. Im Jahr 2100 reduziert sich der Primärenergieträgereinsatz um fast 30% gegenüber Politikscenario A, was allerdings zum Teil an der Zusammensetzung des Primärenergieträgermixes liegt (ein geringerer Anteil an fossilen Energieträgern bedeutet, dass der Sekundärenergieverbrauch deutlich weniger reduziert wird). Die Differenz in der Stromproduktion beträgt im Jahr 2100 weniger als 10% (siehe Abb. 11). Die durch das Fehlen der CCS-Option entstandene Vermeidungslücke wird im Wesentlichen durch den Einsatz von Solarenergie und Kernenergie geschlossen. Während im Stromsektor Ausweichmöglichkeiten existieren, hat der Ausfall der CCS-Technologie wesentlich stärkere Auswirkungen im Transportsektor (Biofuels sind weniger attraktiv) und bei der Wasserstoffproduktion.

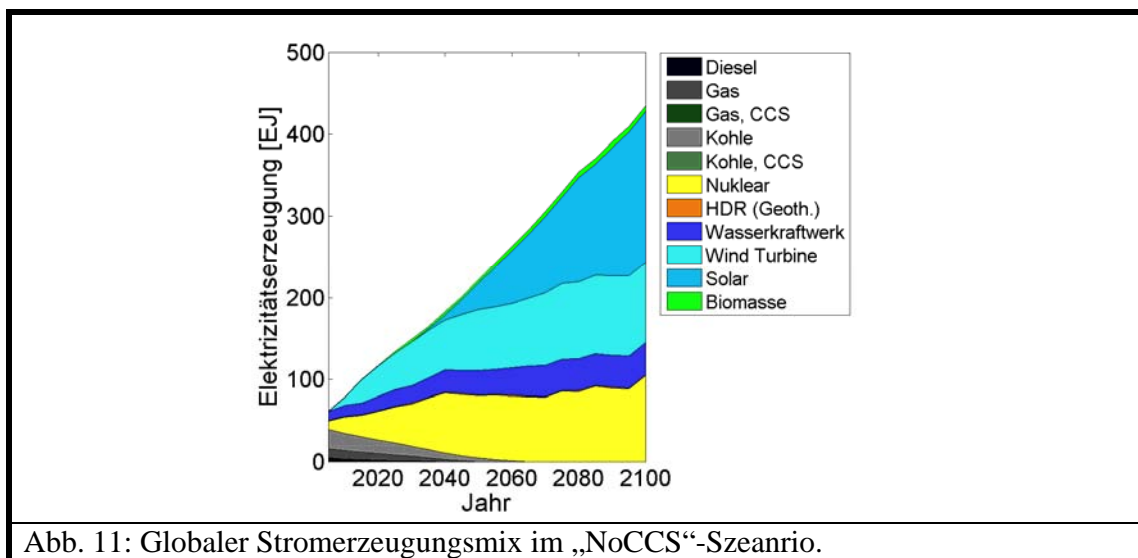


Abb. 11: Globaler Stromerzeugungsmix im „NoCCS“-Szenario.

Der Optionswert der CCS-Technologie ist sehr hoch. Die Vermeidungskosten steigen auf mehr als 2% im globalen Durchschnitt (siehe Abb. 13). UCA, EUR, Japan, Russland und MEA weisen die höchsten zusätzlichen Kosten aus, während Afrika und ROW gewinnen. Beide profitieren von einem steigenden CO₂-Preis, welcher die Handelsbilanz dieser beiden Verkäufer von Emissionsrechten deutlich verbessert.

Im eingeschränkten Nuklearszenario („NucFix“-Szenario) wird die Menge der eingesetzten Kernenergie auf das Niveau beschränkt, welches sich im Referenzszenario ergab. Damit wird der Beitrag der Kernenergie zur Emissionsreduktion völlig ausgeschaltet. Die Einschränkung des Energieverbrauchs ist im Ergebnis dieses Szenarios wesentlich geringer als im „NoCCS“-Szenario. Die Höhe der Stromproduktion ist ähnlich der im Politikscenario A (siehe Abb. 12). Investitionen in CCS-Technologien (Gas, Kohle und Biomasse) und in die Solartechnologie werden vorgezogen, um den Ausfall der Nuklearoption auszugleichen. Die kurzfristig verbleibende Lücke wird durch andere erneuerbare Energietechnologien (Windkraft und Wasserkraft) geschlossen. Zusätzlich vergrößern CCS-

Technologien mittelfristig (2030-2060) ihre Anteile. Insgesamt ist der Verzicht auf die Nuklearoption nicht sehr teuer (siehe Abb. 13). Der Optionswert ist gering. Die zusätzlichen Vermeidungskosten betragen 0,2% im globalen Durchschnitt. Die Nuklearoption ist etwas wichtiger für Russland, das sich den höchsten zusätzlichen Kosten gegenüber sieht.

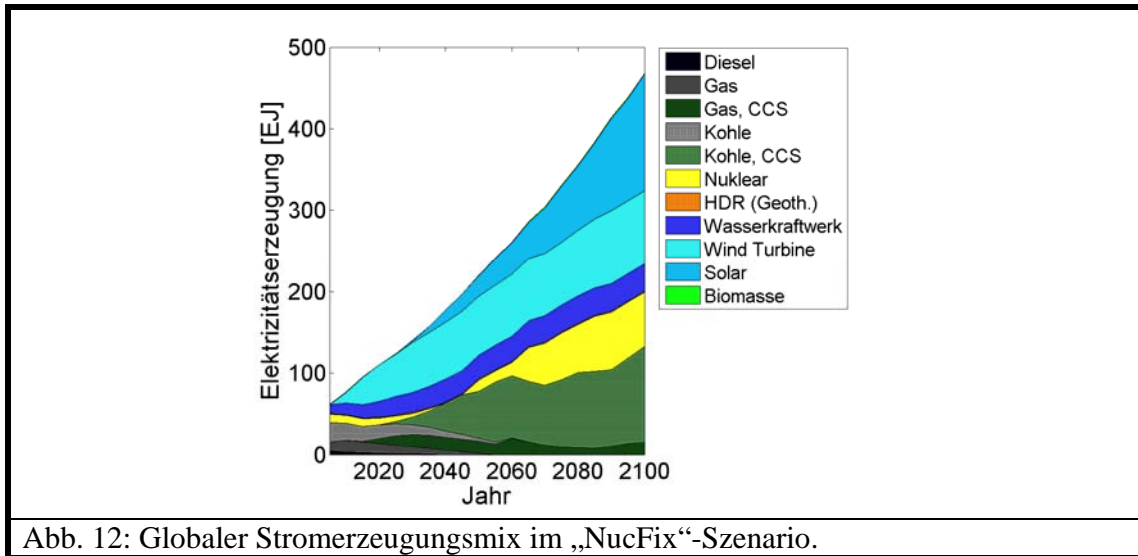


Abb. 12: Globaler Stromerzeugungsmix im „NucFix“-Szenario.

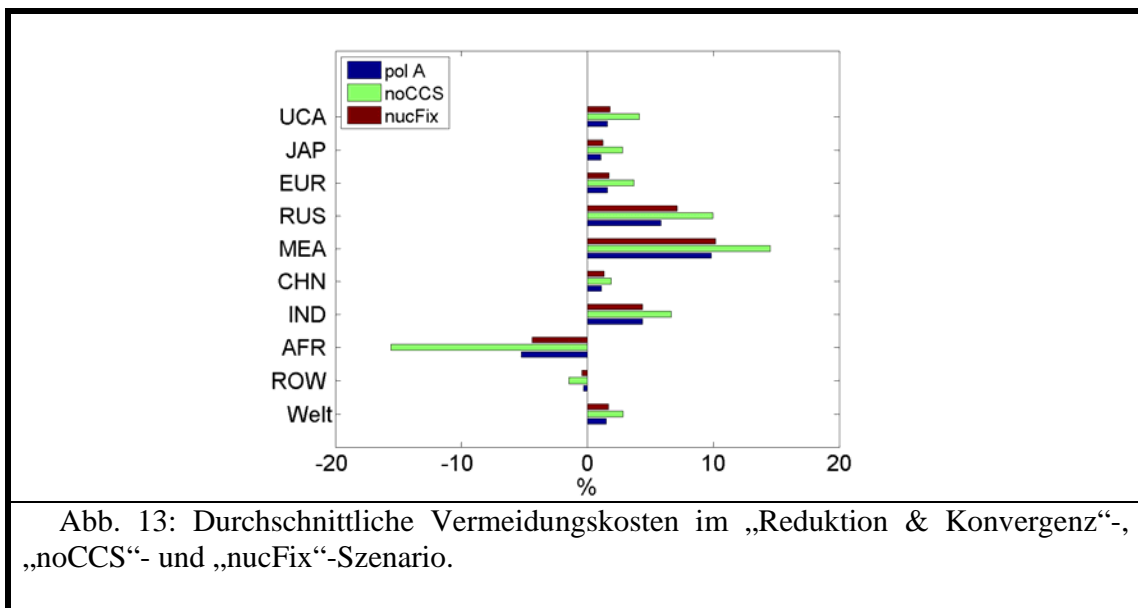


Abb. 13: Durchschnittliche Vermeidungskosten im „Reduktion & Konvergenz“- ,noCCS“- und „nucFix“-Szenario.

5 Schlussfolgerungen

Der vorliegende Bericht analysiert auf der Basis von Modellergebnissen die Implikationen von Vorschlägen zur Gestaltung von Post-2012-Klimapolitikregimen. Als Analyserwerkzeug dient dabei das Modell REMIND-R, mit dessen Hilfe sowohl makroökonomische Verteilungs- bzw. Einkommenseffekte als auch technologische Entwicklungen im Energiesektor beleuchtet werden können. Die im Zentrum der Analyse stehende Bestimmung regionaler Vermeidungskosten berücksichtigt dabei auch Rückkopplungen zwischen Investitions- und Handelsentscheidungen der über verschiedene globale Märkte (Emissionsmarkt, Gütermarkt, Ressourcenmarkt) verbundenen Regionen.

Die untersuchten Regime unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Allokation der Emissionsrechte. Sie stellen darüber hinaus alternative Ausgestaltungen eines internationalen „Cap and Trade“-Systems dar, das auf die Einhaltung des 2°C-Klimaziels ausgerichtet ist. Anhand der Verteilung der Vermeidungskosten lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Ambitionierte Klimaziele, die das Klimaziel von 2°C mit hoher Wahrscheinlichkeit einhalten, sind mit Kosten von ca. 1,5% des globalen Bruttoninlandsproduktes zu erreichen; Kostenabschätzungen für Niedrigstabilisierungsszenarien aus vorangegangenen Studien werden damit bestätigt.
- Die regionalen Reduktionslasten variieren mit der speziellen Ausgestaltung eines Post-2012-Klimapolitikregimes erheblich; jedoch ist die Varianz der regionalen Vermeidungskosten zwischen den Regionen wesentlich höher als zwischen den Politikalternativen.
- Die durchschnittlichen globalen Vermeidungskosten sind für Politikregime mit unterschiedlicher Anfangsverteilung von Emissionsrechten annähernd gleich.
- Auf einem BIP-Intensitätsziel basierende „Cap & Trade“-Systeme sind für die Industriestaaten vorteilhafter, für die Entwicklungsländer eher der „Reduktion & Konvergenz“-Ansatz bzw. der Mehrstufenansatz.
- Afrika kann durch die Einbindung in ein globales Emissionshandelssystem erheblich profitieren.
- Regionen mit einem hohen Anteil am Handel mit fossilen Rohstoffen (MEA und Russland) tragen die höchsten Vermeidungskosten.
- Der Verzicht auf die Nuklearkostenoption kann durch alternative Technologien kostengünstig kompensiert werden, während der Verzicht auf CCS-Technologien die Vermeidungskosten um mehr als einen Prozentpunkt erhöht.

Die hier analysierten Klimastabilisierungsszenarien erfordern drastische Emissionsreduktionen von 60-80% weltweit bis zum Jahr 2050. Sofortige und multilaterale Aktionen sind in solchen Szenarien notwendig. Angesichts der geringen Varianz der Vermeidungskosten in Schlüsselregionen wie UCA, Europa, MEA und China, sollte bei der Entscheidung für ein künftiges Klimapolitikregime dessen Anreizwirkung auf die verbleibenden Regionen berücksichtigt werden. Aus dieser Perspektive sind von den untersuchten Politikalternativen der „Reduktion & Konvergenz“-Ansatz (vorteilhaft für Russland) oder der Mehrstufenansatz (vorteilhaft für Afrika und Indien) zu bevorzugen.

Summary

1 Introduction

It is the objective of the UN Framework Convention on Climate Change to stabilise the concentration of greenhouse gases on such a level that "would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system" (article 2 of the Framework Convention on Climate Change). This objective is an essential basis for the international negotiation process to further develop the climate regime (Kyoto Protocol and follow-up agreements). Based on the EU target to avoid a warming of the Earth's atmosphere by more than 2°C compared to the pre-industrial level, it has been the mission of the research project to identify the magnitude of costs to attain such a climate protection target under different designs of the post-2012 climate regime. The regional specification of mitigation costs is analysed in the context of globalisation where regions are linked by different global markets for emission permits, goods and resources. Three alternative scenarios of climate policy regimes, based on a different initial allocation of emission rights, has been investigated: (I) contraction & convergence, (II) intensity target, (II) multi-stage approach.

The newly-developed model REMIND-R serves as the basic tool. REMIND-R is a multi-regional hybrid model which couples an economic growth model with a detailed energy system model (see Figure 1) and a simple climate model. The individual regions are coupled by means of a trade module.

The current version of REMIND-R includes nine world regions:

1. UCA - USA, Canada, Australia
2. EUR - EU27
3. JAP - Japan
4. CHN - China
5. IND - India
6. RUS - Russia
7. AFR - Sub-Saharan Africa (incl. Republic of South Africa)
8. MEA - Middle East and North Africa
9. ROW - Rest of the World (including Latin America, Pacific Asia and Rest of Europe).

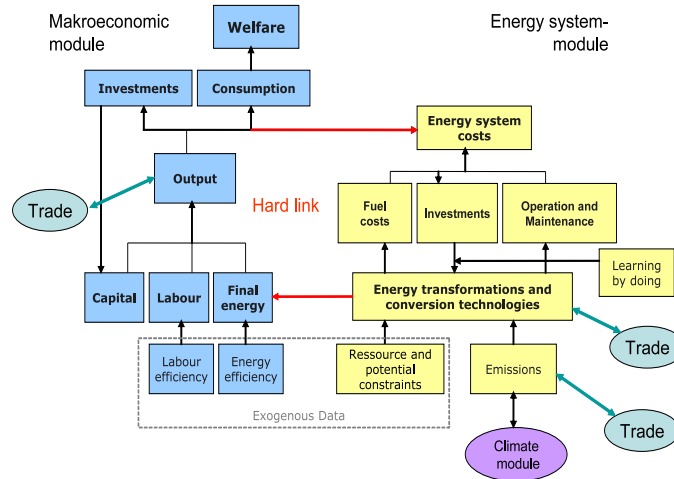


Figure 1: Structure of REMIND-R

Each region is modelled as a representative household with a utility function that depends upon the per capita consumption. REMIND-R is formulated as an intertemporally optimising Social Planner model. It maximises a global welfare function that results as a weighted sum of the regional utility functions. REMIND-R is run in the cost-effectiveness mode when it is used for climate policy simulations, i.e. climate policy targets are integrated into the model by an additional constraint.

2 Reference scenario

We start the presentation of the results of the model runs with REMIND-R with a discussion of the reference development (“business-as-usual”-scenario). In this scenario, it is assumed that climate change has no economically and socially important effects. Thus, a further world-wide increase of emissions can be assumed. A large part of the economic growth is based on the use of fossil energy sources. This reference development shall serve as a benchmark for scenarios in which climate change is sustainably confronted by climate policy.

2.1 Technology development and energy production

The development of the energy system is presented in the following. Figure 2 shows the primary and secondary energy production for the 21st century, differentiated by the energy sources¹. Both, the primary and secondary energy production are increasing continuously in the next hundred years with a weakening annual increase. This is due to the population scenario, the decreasing growth of demand in the developed countries and the increasing rise in cost of fossil energy sources. The primary energy production will increase from almost 470 EJ to more than 1400 EJ per year.

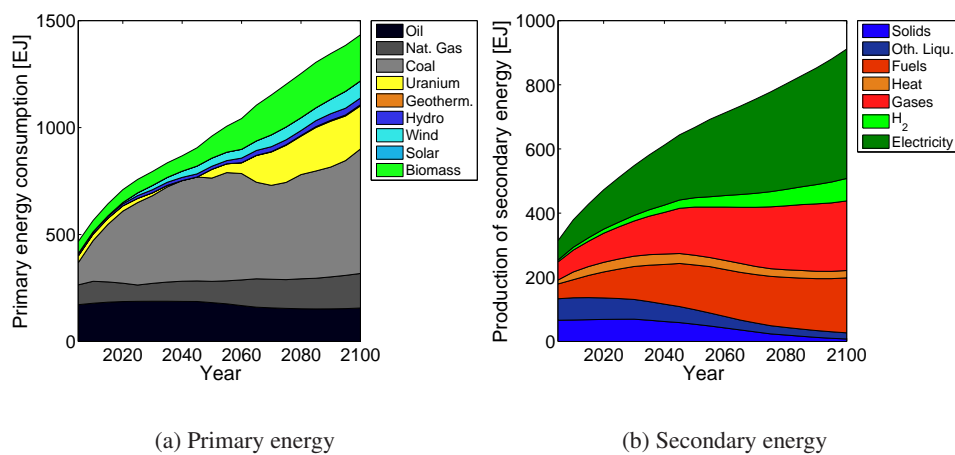


Figure 2: Global production of primary and secondary energy sources in the reference scenario

The primary energy mix remains mostly based on fossil energy sources. Whereas the use of oil and gas is nearly constant, the use of coal is strongly increasing (particularly until 2030). Coal is here particularly used to produce electricity (see Figure 3) and replaces the conversion of gas and nuclear energy into electricity. Power generation will increase almost linearly by approximately 3.6 EJ per year to around 400 EJ at the end of the century, it is sixfold higher compared to the base year. The economic attractiveness of coal is due to its lower costs, the flexible trade and the assumption that the use of coal is not subject to any regulations. However, there will be a price increase for coal around the middle of the century that makes the use of renewable energy sources competitive. Hydro energy and especially wind en-

¹The primary energy production of the renewable energy sources wind, solar and hydro energy is put on the same level as the related secondary energy production.

ergy will increasingly be used for primary energy production. The use of biomass will also increase after 2030 which is due to its increasing availability. Nuclear energy will be used as a considerable supplement for coal at the end of the century.

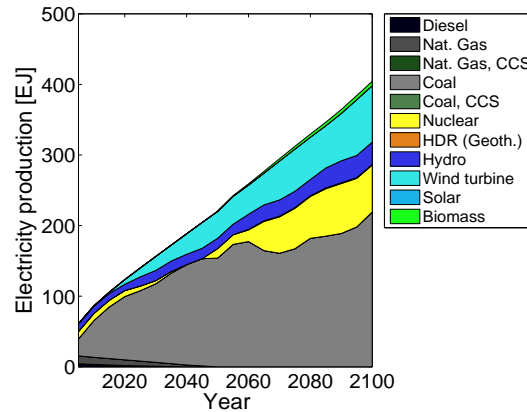


Figure 3: Global power generation in the reference scenario

2.2 Emissions

From the analysis so far it inevitably results that there will be an increase of emissions. This is mostly due to the conversion of coal into electricity. The world-wide emissions amount to approximately 21 GtC (76 Gt CO₂) in 2100 (see Figure 4(a)). The increase of emissions is mainly quite high in the early decades - with a doubling of the emissions between 2005 and 2025. The temporary decrease of the emissions around 2060 is due to a cost-driven decrease of coal production and an increased use of nuclear energy. As of 2070, emissions increase again.

There still remain large differences in per capita emissions (Figure 4(b)). While the industrial countries increase their per capita emissions until 2025 and keep them on a high level (5-9 tC per year) thereafter, they rise to approx. 2-3 tC in China, India and MEA until 2100. The per capita emissions rise to more than 10 tC until the middle of the century in Russia and stay above 7 tC until the end of the century. Africa remains on a consistently low level with less than 1 tC per capita.

While the emissions reach their maximum around 2040 in EUR and UCA, emissions are continuously increasing in India and China. The increase will be interrupted in China in the second half of the century when oil consumption declines. Coal is the main energy source in all regions which causes an increase of the emissions. But also the distinct reduction of the emissions around 2060 is linked to the

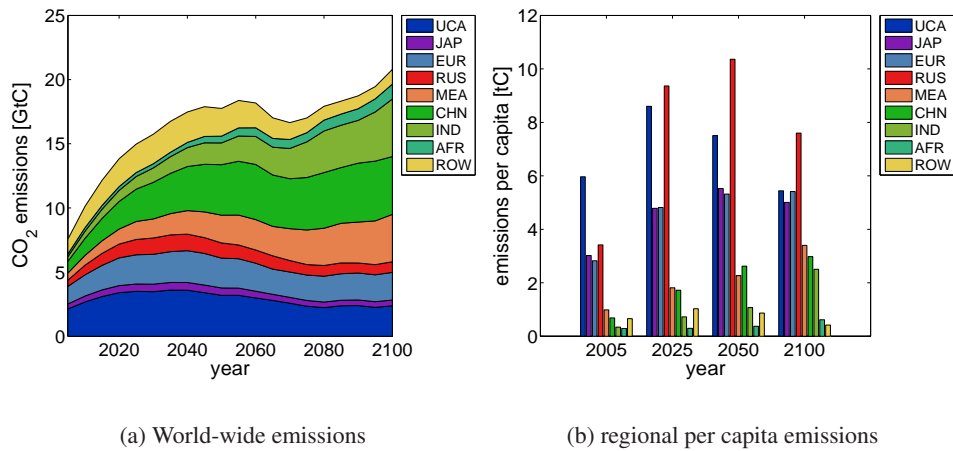


Figure 4: Emissions in the reference scenario

use of coal (especially to the sharp decline in UCA).

3 Post-2012 climate policy regimes

The following analyses are based on the 2°C target. Within each policy scenario, a global emission path has to be determined which meet the 2°C target with high certainty. However, within REMIND-R the energy-related CO₂ emissions are under the control of the decision-maker only. Exogenous scenarios are applied for the development of other anthropogenic greenhouse gas emissions. In the current model setting, drastic emission reductions have been provided by the energy sector. Global energy-related CO₂ emissions have to be reduced by 50% until 2035. The atmospheric CO₂ concentration reaches its maximum at around 415ppm in 2030.

In the analysis of how and at what costs such a reduction path can be achieved, we investigate three different designs of an international cap & trade system. In such a system, emission rights according to their reduction obligations will be allocated to the individual regions as of 2010. The endogenously determined global emission reduction path represents the world-wide available amount of emission rights.

Contraction & convergence (policy scenario A)

As of 2050, emission permits are allocated to the regions on an equal per capita basis. By determining these allocations between 2010 and 2050, there is a smooth transition of the regional shares between grandfathering and same per capita emis-

sions. 2000 is assumed to become the reference year for grandfathering.

Intensity target (policy scenario B)

In this policy scenario, the shares of the regions are determined by the globally available emission rights according to their shares in the world-wide gross product, i. e. each region receives the same emission rights per unit gross domestic product (GDP). In this policy scenario, the industrial countries are apparently provided with more emission rights than in the other two policy scenarios.

Multi-stage approach (policy scenarios C and D)

We selected a form of multi-stage approach in which the quantitative reduction obligations of the individual regions depend upon their per capita incomes. We distinguish four stages. Regions of the first stage are practically not obliged for any reductions. They can, however, participate in the emission trade and will be provided with certificates to the amount of their reference emissions. Regions of the second stage will be provided with emission rights to the amount of 0.15 GtC per 1 trillion \$US gross national product (GDP). Since a growth of the GDP can be expected as a rule, this stage comprehends an increase of emission rights for the respective regions. Regions of the third stage are obliged to stabilise their emissions, while regions of the fourth stage have to significantly contribute to the emissions reduction. The share of global emission rights for these regions arises from deducting the number of certificates used for the regions of stage 1 to 3. The internal allocation between the regions of stage 4 follows again the above-described contraction & convergence approach.

As an additional variant of the multi-stage approach, we formulated a scenario in which only those regions participate in the emission trade which are either in stage 2, stage 3 or in stage 4.

4 Model results

4.1 Policy scenario A: Contraction & Convergence

Mitigation costs We define mitigation costs as the difference of consumption between the policy scenario and the reference scenario. In policy scenario A, the average global mitigation costs are at 1.5%, at maximum approx. 2.5% with higher mitigation costs arising in the second half of the century. The regional costs are widespread around these global values. MEA needs to deal with the highest costs – nearly 10% in average. Russia and India are also above the world-wide average. At the same time, some regions like Africa and ROW benefit in policy scenario A. Africa benefits most with an average gain of almost 5.2%.

Technology development and energy production Drastic changes in the energy system are induced by introducing climate policy. This can be seen in many different ways in all areas. The fundamental changes can be summarised in five options for action:

1. Reduction of the entire energy consumption.
2. Immediate expansion of renewable energy technologies for the production of high-value energy sources; expansion of nuclear energy.
3. Application of CO₂ capturing and sequestration (CCS) for the conversion of gas and coal into electricity as well as biomass into hydrogen.
4. Reducing the production of fuels and gases, since technical avoidance options are less efficient here.
5. Reducing the production of the low-value energy sources solids and other liquids so that more oil and biomass is available for the production of higher-value energy sources.

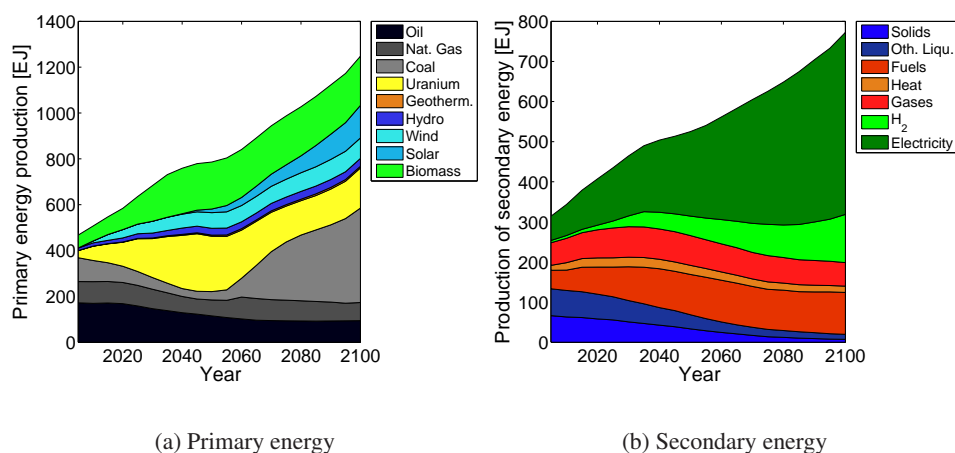


Figure 5: Global production of primary and secondary energy sources in the policy scenario A

The results are mainly discussed in comparison with the developments in the reference scenario. The entire energy production - primary as well as secondary - will be reduced. The primary energy generation reaches now approx. 1250EJ at the end of the century (see Figure 5), whereas 1430EJ were reached in the reference scenario. In the short run, primary energy generation is increasing less first and

accelerates its growth then again; this was vice versa in the reference scenario. An output of only roughly 770EJ will be reached in secondary energy production in 2100, while roughly 910EJ are produced in the reference scenario. This drastic reduction is due to the composition of primary energy and the balancing according to the direct method of consumption. The most obvious change in the primary energy mix (compared to the reference scenario) is the strong restriction in the use of fossil energy sources and the stronger and earlier expansion in the use of renewable energy sources and nuclear energy. As of 2040, solar energy will also play a role now. Solids and other liquids will already earlier be taken out of the system in secondary energy production. Gas, heat and fuels will be produced to a minor degree. The production of hydrogen and electricity, however, will even increase compared to the reference scenario. Electricity generation (see Figure 6) is going to reach 480EJ.

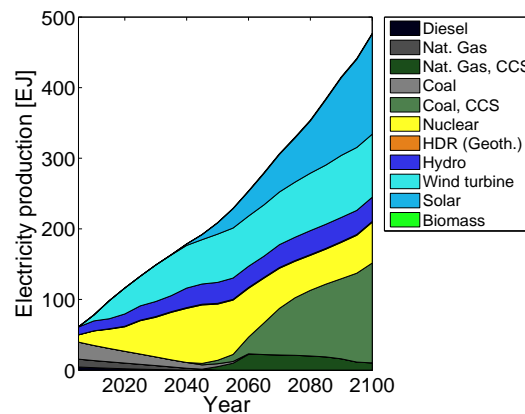


Figure 6: Global power generation in the policy scenario A

Expectedly, the use of wind, solar energy and water power is especially noticeable in the power generation mix. The expanse of these alternatives is especially remarkable. By the end of the 21st century the share of renewable energy production will be 56%. In the area of fossil energy sources, it can be observed that now gas is used for power generation; the emission restriction, however, demands CO₂ capturing. Coal will even on the long-term not be excluded from the generation mix. It is burnt in power plants applying the so-called oxyfuel method. This technology actually provides the most thorough capture technology, since only roughly one percent of the produced CO₂ will be released into the atmosphere.

It is to be summarised that the energy production, compared to the reference scenario, is much lower and that the structure will be modernised in a speedy man-

ner. The low-value energy sources quickly lose their shares, while power generation will maintain its absolute share and hydrogen is gaining importance.

Emissions The pursued stabilisation scenario requires a fast and drastic decrease of emissions of all regions. Reductions are most drastic between 2025 and 2050 (see Figure 7(a)). Global emissions have to be reduced in 2050 by almost 73% and 78% related to the year 1990 and 2005, respectively. At the same time, the permit share of the developing world regions and ROW increases drastically. In the case of a missing emissions trading market, the industrial regions would need to decrease their per capita emissions to around 5% of today's level by 2050, in MEA, China and ROW to 20-25%, while India and Africa could still increase their per capita emissions. For both regions it is however obviously more favorable not to increase their own emissions and to sell the allocated emission rights profitably. Taking emissions trade into consideration (see Figure 8), the reductions are lower in the industrial countries. Figure 7(b) shows that the respective per capita emissions would need to be reduced by approx. 20-35% in 2025 and by approx. 70-80% in 2050. Moreover, all regions need to reach per capita emissions of less than 1.2 tC in 2050, in 2100 even less than 0.2 tC.

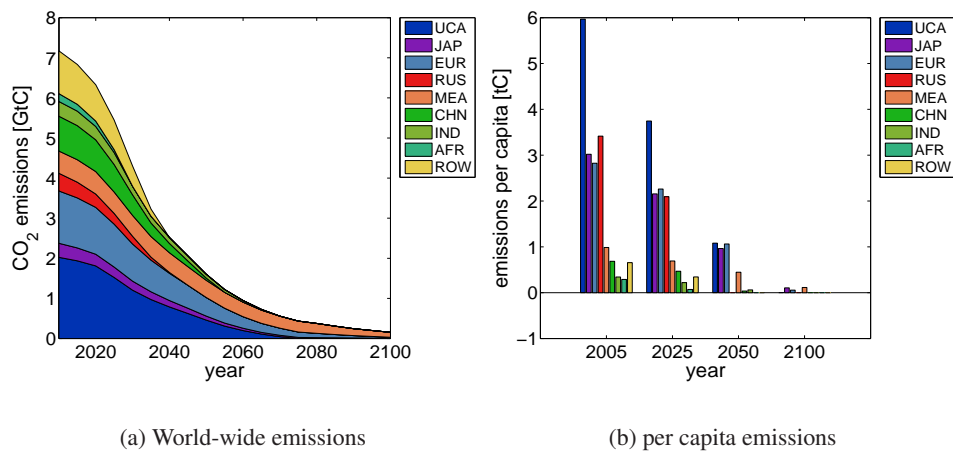


Figure 7: Emissions in the policy scenario A

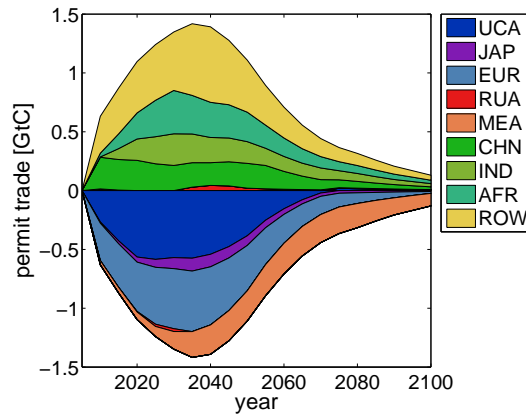


Figure 8: Emission trade in policy scenario A

4.2 Policy scenario B: Intensity target

Mitigation costs Policy scenario B produces in principle a different picture for mitigation costs than policy scenario A. Although the global average loss in consumption is the same, the regional distribution of costs is quite different. First, it can be noticed that Africa is not so clearly the only region to still benefit from the policy scenario. At least for the short term, negative mitigation costs can also be found in other regions (in particular in Japan and ROW). The consumption losses of UCA, EUR and China are slightly lower than the global average. Moreover, all industrialized regions have lower costs in policy scenario B than in policy scenario A. The regions MEA and Russia have further on higher costs than the world average, but also India bears high costs.

Technology development and energy production The technological development in policy scenario B is the same like in the policy scenario A. This is due to the properties of an efficient market that generates the same allocation of scarce goods independent of the distribution of the emission permits among regions.

Emissions The permit allocation is quite different between policy scenario A and policy scenario B. The latter allocates permits proportional to the regions' share on global GDP. Until 2050, the share of permits allocated to the developed world regions amounts to more than 50%. In this period, the bigger part of cumulated emission permits is allocated, which additionally favours the developed regions. Despite the differences in the permit allocation and based on a different structure of

emissions trade (see Figure 9), the emission trajectory and the regional structure of actual emissions is nearly the same (see Figure 7(a)).

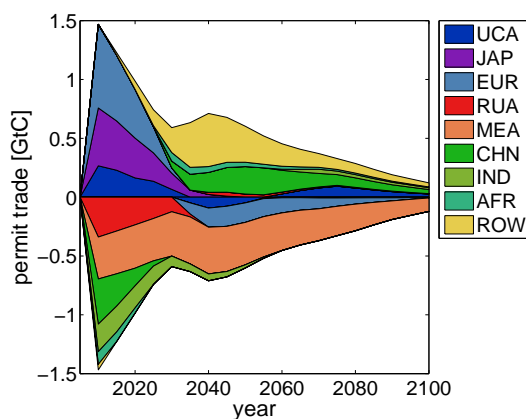


Figure 9: Emission trade in policy scenario B

4.3 Policy scenarios C and D: Multi-stage approach

Mitigation costs Again, MEA and Russia need to bear the highest mitigation costs. As distinct from policy scenario A and especially from policy scenario B, Africa benefits even stronger from a distribution of emission rights with a multi-stage approach. This is due to the fact that Africa is the region with the lowest per capita income and thus by the assumed allocation rule gets even more emission rights than in policy scenario A. As Africa can substitute easily away from the baseline use of fossil resources, an excess of permits results which can be sold profitably. In policy scenario C, this also applies to India which faces quite low consumption losses.

Technology development and energy production Policy scenario C differs from scenarios A and B. In the short run up to 30 EJ (per year) less oil and gas is used in policy scenario C, that is substituted by an increase in the use of biomass and uranium. During the second half of the 21st century the development twists to the opposite: more oil, gas and coal is employed, but uranium use is reduced.

While oil shows a clear pattern of reallocation in time, for gas we observe also a different distribution between the regions: in the 2nd half of the century China reduces its gas consumption favouring all other regions. At the same time, China increases its consumption of coal. The use of uranium shows mainly a temporal

redistribution, but the reduction of uranium use is most emphasised in India and Europe.

Emissions The permit allocation in the multi-stage scenario is featured by a fast increase of the developing regions' permit share. Already in 2030, UCA, EUR and JAP are allocated with less than 10% of global permits (while provided with 50% in 2010). Moreover, in contrast to policy scenario B, which despite different regional caps, comes up with the same regional emission reduction paths like policy scenario A, policy scenario C (see Figure 10(a)) results in different paths. Globally, less emissions are produced in the short term, but more in the long term. The most demanding reduction phase, which is between 2025 and 2040, in policy scenario A and B is brought forward (between 2015 and 2030; in policy scenario D, characterised by emissions permit trade restrictions, even between 2010 and 2025 - see Figure 10(b)). The most demanding reduction phase, which is between 2025 and 2040 in policy scenario A and B, is brought forward (between 2015 and 2030; in policy scenario D (see Figure 10(b)) even between 2010 and 2025).

Whereas policy scenario A and B imply full flexibility in allocating global emission permits over time, policy scenario C and D imply predefined amounts of permits for the stages 1 to 3. This, on the one hand, results in a rather discontinuous profile of global emissions, and on the other hand, yield a higher amount of permits to be allocated in the second half of the century. In order to meet the climate target, the latter has, obviously, to be compensated by a lower level of emission permits in the first half of the century.

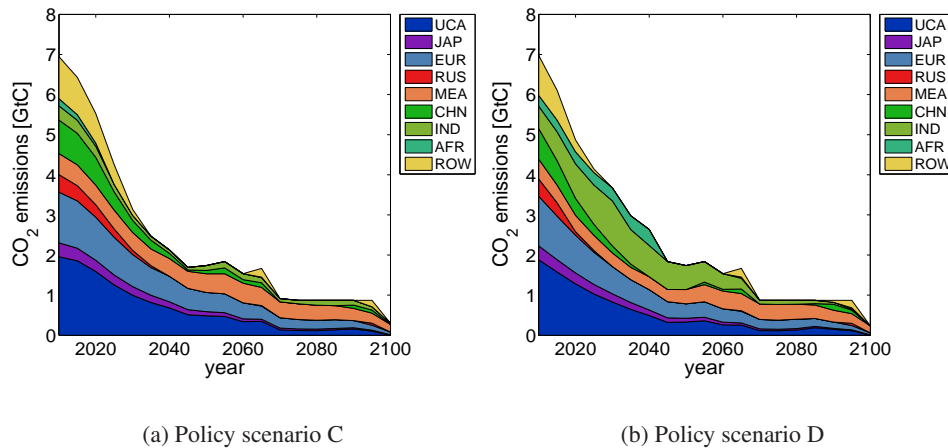


Figure 10: World-wide emissions in the policy scenario C and D

4.4 Comparison of policy regimes

All policy scenarios pursue the same stabilisation target. Regarding ecological efficiency (i.e. its contribution to climate stabilisation), they are almost equal. Despite the same amount of global emission rights, the global emission course of the different policy scenarios is however not identical. This indicates inefficiencies in the distribution of emission rights. This effect, which applies to the multi-stage scenario, is however marginal here. Global average mitigation costs are between 1.4% and 1.5% for the policy scenarios A, B and C. Policy scenario D is most expensive with 1.6%.

Figure 11 provides an overview of the average regional mitigation costs for the four investigated scenarios. Policy scenario A and C have a similar cost level for UCA, JAP, EUR, MEA and ROW. While the policy scenario A is more beneficial for Russia and China, Africa and India benefit significantly from the multi-stage scenario. Policy scenario B has the smallest range of regional mitigation costs. But at the same time, it is also a scenario of extremes. For many regions, it is either the most favourable or the worst scenario. It is most favourable for industrialized countries (except for Russia). The developing regions, on the other hand, need to bear significant mitigation costs. In the light of the distribution of the historical responsibility for the climate problem, this could be a heavy burden in future climate negotiations. Policy scenario D is acceptable for few regions, but for most it is not. Altogether, the restriction made to the global emission trade system has a relatively high price.

As a robust result it turns out that the variance of mitigation costs is higher between the different regions than between the different policy scenarios. From the regional point of view, it should be noted that the region MEA has to bear the highest costs in all scenarios (always more than 9%). The reconstruction of the global energy system reduces part of the possible rents of this region whose revenues are to a large part derived from selling fossil resources. This is in a slightly milder form also true for Russia (always more than 5%). For the three developed regions UCA, Japan and EUR, the costs over the different scenarios develop according to a fixed pattern. The highest mitigation costs among this group can be found in UCA, they are slightly lower in Europe and they are lowest in Japan. Beside the different base level (highest per capita emissions in UCA), the growth pattern is also reflected in this relation according to which the region UCA will grow most rapidly among these three regions. For all three regions, policy scenario B is the most favourable one (mitigation costs amount to 1% or less). For China, the lowest costs arise in policy scenario A, however, variance of costs between the scenarios is contained. The contrary holds for India, where all scenarios but the multi-stage scenario are quite expensive. Africa benefits in all policy scenarios, most remarkably in the

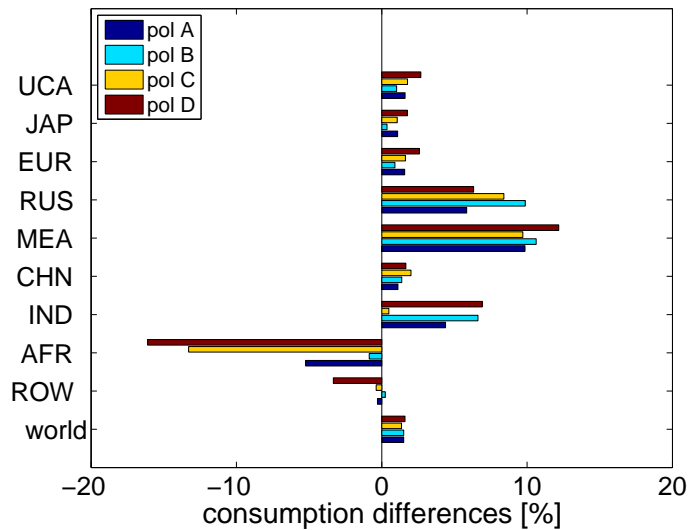


Figure 11: Average mitigation costs

multi-stage scenarios (more than 10% consumption gains).

4.5 Analysis of mitigation options

Within the policy analyses (cf. section 4.1) different mitigation options have been identified. REMIND-R simulates relatively high shares of nuclear energy and use of coal based on CCS technologies. Risk aversion and a lack of social acceptance may restrict the use of both technologies. Based on the contraction & convergence scenario we defined two additional scenarios which restrict the use of the CCS technologies and of nuclear energy technologies.

No-CCS scenario In this scenario, the application of CCS technologies either in combination with the use of coal and gas or in combination with the use of biomass is completely switched off. In consequence of switching off CCS, the energy consumption will be reduced significantly. This, above all, applies for the long-term. In 2100 primary energy consumption in the No-CCS scenario is almost 30% lower than in the C&C scenario which however is partly due to the different composition of the primary energy (a lower share of fossils means that in terms of secondary energy the energy consumption is reduced to a smaller degree). The remaining gap is filled mostly by solar energy and nuclear energy (see Figure 12). There is a reduction of global electricity production compared to the C&C scenario

in the last 20 years of the century only. It amounts to less than 10%. While for the electricity production alternatives exist, the drop out of CCS technologies have a more drastic impact on the transport fuel sector and on the production of hydrogen.

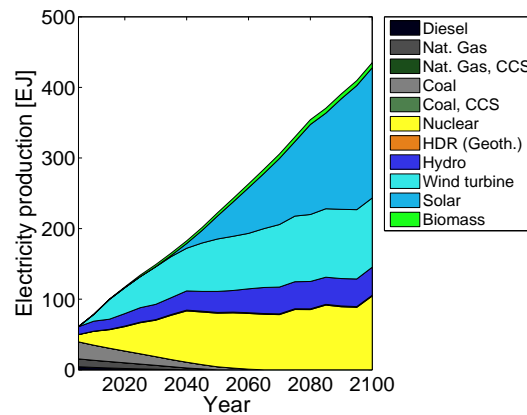


Figure 12: Global power generation in the No-CCS scenario

The option value of the CCS technology is quite high. Mitigation costs increase to more than 2% globally (see Figure 13). UCA, EUR, Japan, Russia and MEA face highest additional mitigation costs, while AFR and ROW benefit. The drop out of CCS technologies increases the permit prices significantly. This improves the terms of trade of Africa and ROW.

Fixed nuclear scenario In this scenario, the use of nuclear energy is fixed to the amount of the reference scenario. The reduction in energy consumption is less drastic than in the No-CCS scenario. The electricity production is quite similar (see Figure 14). Investments in CCS technologies (gas, coal, biomass) and solar technologies are brought forward, but can not completely compensate for the missing nuclear option. Other renewable energy technologies (Wind and Hydro) fill the gap in the short term. In the mid term (2030-2060) coal with CCS gains additional shares. Altogether, doing with restricted nuclear energy is not at all very costly (see Figure 13). The option value of nuclear energy is quite low; the incremental mitigation costs are in the order of 0.2% globally. The nuclear option is slightly more important for Russia that faces highest additional costs compared to the C&C scenario.

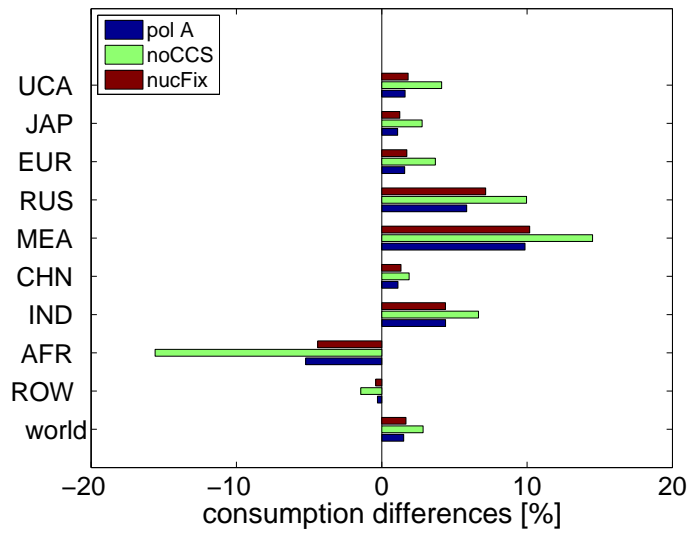


Figure 13: Average mitigation costs options

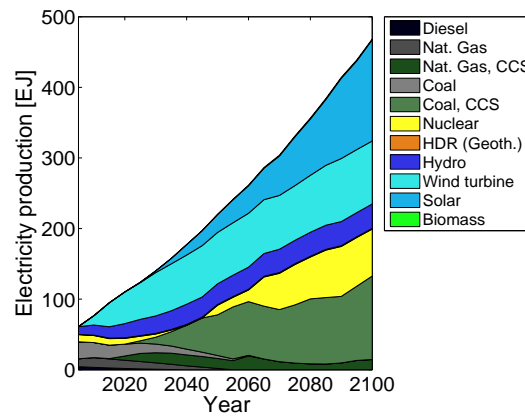


Figure 14: Global power generation in the fixed nuclear scenario

5 Conclusion

This study analyses the implications of suggestions for the design of post-2012 climate policy regimes on the basis of model simulations. The focus of the analysis, the determination of regional mitigation costs and the technological development in

the energy sector, also considers the feedbacks of investment and trade decisions of the regions that are linked by different global markets for emission permits, goods and resources. The analysed policy regimes are primarily differentiated by their allocation of emission rights. Moreover, they represent alternative designs of an international cap & trade system that is geared to meet the 2°C climate target. The following conclusions can be drawn:

- Ambitious climate targets that meet the 2°C climate target with high likelihood can be reached with costs amounting to approx. 1.5% of the global gross product; this roughly confirms cost estimates of low stabilisation scenarios from earlier studies based on global models (IMCP study).
- The global average mitigation costs are nearly the same for alternative policy regimes which differ by the allocation of emission permits.
- The regional burden of emission reductions considerably varies with the particular designs of a post-2012 climate policy regime; however, the variance of mitigation costs between the regions is higher than between the policy regimes
- Cap & trade systems based on a GDP-intensity target are more favourable for industrial countries (except for Russia), the contraction & convergence approach and/or the multi-stage approach are more favourable for developing countries.
- Africa can considerably benefit from an integration into a global emissions trading system.
- Regions with high shares in trade of fossil resources (MEA and Russia) bear highest cost
- Doing without the nuclear energy option is not costly, but forgoing the CCS option will increase the global mitigation costs by more than percentage point.

The present study analyses ambitious climate protection scenarios that require drastic reduction policies (reductions of 60%-80% globally until 2050). Immediate and multilateral action is needed in such scenarios. Given the rather small variance of mitigation costs in major regions like UCA, Europe, MEA and China, a policy regime should be chosen that provides high incentives to join an international agreement for the remaining regions. From this perspective either the C&C scenario (incentive for Russia) is preferable or the multi-stage approach (incentive for Africa and India).