

Zur Rolle des Schwefels in der Klimadebatte

Hans-Holger Rogner und Nebojša Nakićenović, Laxenburg/ Österreich

In dem im Frühjahr 1996 vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) vorgelegten zweiten Bewertungsbericht der wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Klimaänderung wird die Rolle schwefelhaltiger Aerosole, die den direkten Antrieb innerhalb des Klimasystems vermindern, hervorgehoben. Die geografische Verteilung der vorwiegend aus der Kohle- und Biomasseverbrennung stammenden anthropogenen Aerosole ist äußerst inhomogen, sie verweilen nur wenige Tage in der unteren Troposphäre, bevor sie als saurer Regen niedergehen. Eine naheliegende Schlußfolgerung, den globalen Temperaturanstieg durch vermehrte Aerosol-emission zu vermindern, trägt, wie im folgenden deutlich gemacht wird, auch aus anderen Gründen nicht. Allein die Umstrukturierung des Energiesystems in Richtung schwefelärmerer und CO₂-freier Prozesse macht die Erreichung lokaler Umweltschutz- und globaler Klimaschutzziele möglich.

Ausgangspunkt der Klimaproblematik ist die seit Beginn der Industriellen Revolution stattfindende anthropogene Einflußnahme auf die globale Energiebilanz der Erde. Die Erde absorbiert Sonnenenergie in Form von kurzwelliger (elektromagnetischer) Strahlung. Würde die einfallende Energie, die am äußeren Rande der Atmosphäre ungefähr 1350 Wm⁻² und an der Erdoberfläche im Weltdurchschnitt ca. 350 Wm⁻² beträgt, nicht kontinuierlich wieder in den Weltraum abgegeben, würde sich die Erde mehr und mehr aufheizen und die gegenwärtige Flora und Fauna alsbald einem „Hitzetod“ erliegen. In der Tat wird die eingestrahelte Energie, nach Absorption und Zirkulation durch die Weltmeere und die Atmosphäre sowie deren Interaktion (z. B. Verdunstung und Regen), als langwellige Strahlung im Infrarotbereich von der Erde in den Weltraum zurückgestrahlt. Für die Erde ergibt sich somit ein Energiegleichgewicht zwischen einfallender Sonnenstrahlung und abgestrahlter Erdwärme. Wird dieses Gleichgewicht zwischen Ein- und Abstrahlung gestört oder wird in den Kreislaufprozeß zwischen den Meeren, dem Festland und der Atmosphäre verändernd eingegriffen, kann dies Klimaveränderungen

bewirken. Jegliche Änderung, die die Energiebilanz zwischen Ein- und Abstrahlung, d. h. den Strahlungshaushalt der Erde, beeinträchtigt, wird als erhöhte Rückstrahlung, Strahlungsantrieb oder Störung des Strahlungsgleichgewichts („radiative forcing“) bezeichnet.

Die langwellige Erdrückstrahlung und somit die globale Durchschnittstemperatur wird vor allem von der in der Atmosphäre angesiedelten Konzentration der Treibhausgase beeinflusst. Ein Anstieg in der Konzentration verringert die Abstrahlungseffizienz durch eine höhere Absorption in der Atmosphäre bzw. Reflektion zur Erde und langwelliger Rückstrahlung in den Weltraum und führt zu einem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur. Entsprechend führt eine Verringerung der Konzentration zu einer erhöhten Durchlässigkeit und einer globalen Temperaturabsenkung. Ohne einen natürlichen Treibhauseffekt, hervorgerufen von den in der Atmosphäre befindlichen Gasen Wasserdampf, Kohlendioxid, Ozon, Methan und Stickoxide, wäre die Erddurchschnittstemperatur nicht 288 Grad Kelvin (K) sondern ca. 30 K niedriger und Leben, so wie es sich bisher darstellte, hätte sich auf der Erde nicht entfalten können.

weltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) mit dem Auftrag gegründet:

1. alle wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Thema Klimaveränderung auszuwerten,
2. die möglichen Auswirkungen einer Klimaveränderung auf Umwelt, Wirtschaft und Sozialbereiche abzuschätzen und
3. Gegenstrategien zu formulieren.

Der erste Bewertungsbericht des IPCC wurde im August 1990 unter der Mitarbeit von mehr als 170 Wissenschaftlern und 200 Begutachtern aus über 25 Ländern fertiggestellt. Dieser Bericht diente als wissenschaftliche Arbeitsgrundlage für die Verhandlungen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) sowie für die Erstellung der IPCC IS92-Emissionsszenarien. Nach einer Umorganisation der Arbeitsgruppen verpflichtete sich das IPCC dann 1992, bis 1995 einen zweiten Bewertungsbericht zu erstellen. Dabei sollte der zweite Bericht nicht nur den ersten Bericht auf den neuesten Stand bringen sondern vor allem auch die sozialwirtschaftlichen Aspekte einer Klimaveränderung beleuchten. Mittlerweile ist das IPCC zu einem der größten weltweiten wissenschaftlichen Foren nicht nur hinsichtlich der Klimaproblematik geworden. Jede der drei Arbeitsgruppen hat inzwischen eine Beteiligung von Wissenschaftlern im Umfang des gesamten ersten Bewertungsberichtes erreicht.

Dr. H.-H. Rogner, Research Scholar, Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA) und Director, Systems Analysis, Institute for Integrated Energy Systems, University of Victoria, Victoria, BC, Canada

Dr. N. Nakićenović, Projektleiter im Projekt Umweltverträgliche Energiestrategien, Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA)

Die IPCC-Bewertungsberichte

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wurde 1988 gemeinsam von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und dem Um-

Im Frühjahr dieses Jahres wurde der zweite Bewertungsbericht des IPCC (SAR) zum Klimaproblem veröffentlicht. Die wichtigste Schlußfolgerung des SAR wurde in einem lapidaren Satz zusammengefaßt: „Per Saldo scheint sich ein erkennbarer anthropogener Einfluß auf das globale Klima abzuzeichnen“. Dazu einige Daten, auf denen diese Erkenntnis beruht:

- Als Folge von fossiler Energierohstoffnutzung, Veränderung in der Bodennutzung und Landwirtschaft sind seit ca. 1750 die atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase CO_2 um 30%, CH_4 um 145% und N_2O um 15% angestiegen.
- Der Anstieg der Konzentration langlebiger Treibhausgase hat zu einer Störung des Strahlungsgleichgewichts innerhalb des Klimasystems von insgesamt $2,34 \text{ Wm}^{-2}$ geführt, wobei $1,56 \text{ Wm}^{-2}$ dem CO_2 , $0,47 \text{ Wm}^{-2}$ dem CH_4 und $0,14 \text{ Wm}^{-2}$ dem N_2O , und der restliche Teil den Fluorkohlenwasserstoffen und anderen Treibhausgasen zugerechnet wird. Im Vergleich zu der einfallenden Sonnenstrahlung von 1350 Wm^{-2} sind dies sehr geringe Veränderungen.
- Dem entgegen wirken die anthropogenen Emissionen der Aerosole (im Rauchgas enthaltene Schwebestoffe und Feststoffe), insbesondere des Schwefeldioxids und Staub, die eine Verringerung des direkten Antriebs innerhalb des Klimasystems von ca. $0,5 \text{ Wm}^{-2}$ verursachen. Die indirekten Auswirkungen der Aerosole können in derselben Größenordnung liegen. Die Einbeziehung der Aerosole in die Klimamodelle hat zu signifikanten Verbesserungen der „ex-post“-Modellrechnungen geführt.
- Die mittlere globale Erdoberflächentemperatur hat sich seit dem späten 19. Jahrhundert um ca. $0,3$ bis $0,6 \text{ K}$ erhöht.

Gegenüber dem ersten IPCC-Bericht ist insbesondere der den Antrieb innerhalb des Klimasystems mindernde Einfluß der Aerosole hervorzuheben. Zu einem überwiegenden Teil werden Treibhausgase und Aerosole von denselben anthropogenen Prozessen emittiert, d.h. vor allem durch Kohle- und Biomasseverbrennung und nur zu einem geringen Teil durch die Nutzung von Erdölprodukten. Die anthropogenen Aerosole zerstreuen und absorbie-



Minderung schwefelemissionsbedingten sauren Regens zum Beispiel in China und Minderung des globalen Treibhauseffektes sind mit gemeinsamen Strategien erreichbar
Foto: The Image Bank

ren die einfallende Sonnenstrahlung, verändern aber auch die optischen Eigenschaften und Lebenszeiten der Wolken und führen per Saldo zu einer Verringerung des Antriebs innerhalb des Klimasystems. Seit 1850 haben schwefelhaltige troposphärische Aerosole eine direkte Störung des Strahlungsgleichgewichts von $-0,5 \text{ Wm}^{-2}$ (Bandbreite $-0,25$ bis $-1,0 \text{ Wm}^{-2}$) bewirkt. Die indirekten Auswirkungen der Aerosole können in derselben Größenordnung liegen.

Schwefelhaltige Aerosole - Veränderung des globalen Temperaturanstiegs?

Im Gegensatz zu den Treibhausgasen sind die anthropogenen Aerosole in der unteren Troposphäre anzutreffen. In diesem Höhenbereich reagieren insbesondere die schwefelhaltigen Aerosole mit den Wolken, werden chemisch und physikalisch umgewandelt und mit dem Niederschlag ausgewaschen. Daher beträgt die Verweildauer der Aerosole nur wenige Tage (die meisten Treibhausgase haben Verweilzeiten von Jahrzehnten bis Jahrhunderten). Die geographische Verteilung der anthropogenen Aerosole ist äußerst inhomogen und hängt von dem Ort des Verbrennungsvorgangs ab. Die direkte Kühlwirkung ist daher geographisch begrenzt. Indirekte Auswirkungen auf das globale Klima sind jedoch gegeben.

Nun liegt der Schluß nahe, daß ein aufgrund zunehmender Konzentration der Treibhausgase verursachter globaler Temperaturanstieg durch beschleunigte Aerosolemissionen teilweise ausgeglichen werden könnte. In der Tat wurde das Versprühen von schwefelhaltigen Aerosolen in der Stratosphäre als Maßnahme gegen einen globalen Temperaturanstieg vorgeschlagen, da dort die Verweildauer nicht nur Monate bis Jahre beträgt sondern auch eine homogenere Verteilung über die gesamte Erde erfolgt. Die Schwefelemissionen als Folge der Verbrennung von Kohle, Erdölprodukten und, in geringem Maße, Erdgas, gelangen jedoch nicht in diese Höhenbereiche und verweilen wie schon erwähnt nur eine sehr kurze Zeit in der unteren Troposphäre bevor sie als saurer Regen auf die Erde niedergehen. Die Folgen des sauren Regens sind bekannt: Waldsterben, Übersäuerung von Seen und Bächen sowie Ertragseinbußen in der Landwirtschaft. Schwefelemissionen stellen eine schwerwiegende regionale Umweltbelastung dar, die auch nicht annähernd durch den kurzfristigen Kühlungseffekt ausgeglichen werden kann.

Die Nutzung der fossilen Energieressourcen trägt somit zu zwei Umweltproblemen bei: Klimaänderung und saurem Regen. Es ist daher nicht verwunderlich, daß die Probleme des sauren Regens und der Klimaveränderung sehr intensiv untersucht worden sind und weiter erforscht werden. Weniger

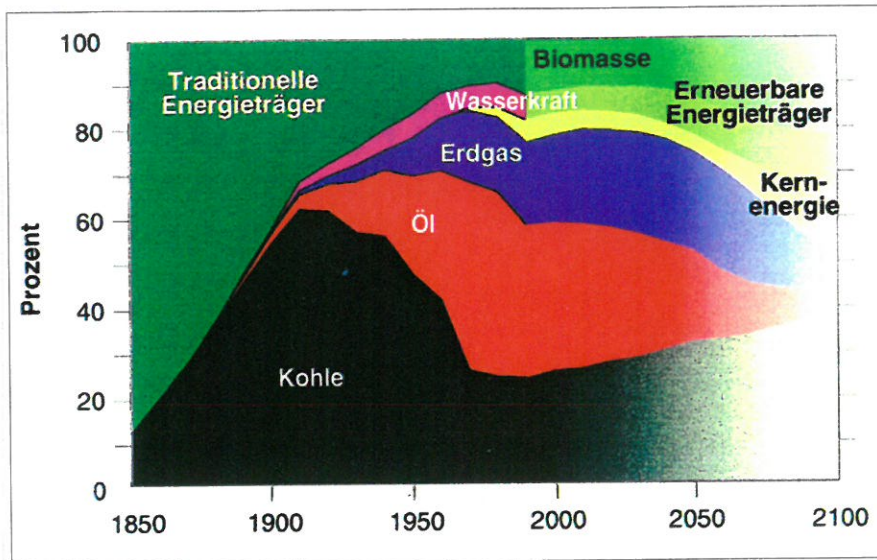


Bild 1: Entwicklung des Primärenergiemixes, 1850 bis 2100, Szenario A2

einsichtig ist, daß saurer Regen und Klima meistens nicht nur getrennt voneinander untersucht wurden, sondern daß auch Maßnahmen zur Minderung des einen oder anderen Problems getrennt analysiert und debattiert werden, obwohl es doch offensichtlich sein sollte, daß Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen, insbesondere des CO₂, auch einen sofortigen Einfluß auf die Schwefelemissionen haben. Ebenso werden Maßnahmen zur Minderung der Schwefelemissionen auch die CO₂-Emissionen beeinflussen. Woran es bisher mangelte, ist eine systematische Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Problembereichen.

Wechselwirkung von Treibhausgas- und Schwefelemissionen

Um diese Wechselwirkungen untersuchen zu können, ist eine Abschätzung dessen erforderlich, was sich ohne jegliche Maßnahmen zur Emissionseinschränkung der Treibhausgas- und Schwefelemissionen einstellen könnte. Insbesondere in den Entwicklungsländern sind einschneidende Maßnahmen nicht zu erwarten. Andererseits werden diese Länder innerhalb der nächsten zwei Jahrzehnte die industrialisierten Länder in Sachen Energieverbrauch überholen. Betrachtet man Energieresourcen und -infrastruktur in Entwicklungsländern etwas genauer, so ist es offensichtlich, daß die zukünftige Primärenergieversorgung gerade in den bevölkerungsreichsten Regionen

der Welt hauptsächlich auf Kohle beruhen wird. Und Kohle ist von allen fossilen Energieträgern derjenige mit den höchsten CO₂- und Schwefelemissionen pro Energieeinheit. China allein plant eine Verdopplung der Kohleproduktion von derzeit ca. 1 Mrd. t auf 2 Mrd. t bis zum Jahr 2010. Nach offizieller Lesart könnte die nationale Förderung im Jahr 2030 sogar knapp 3 Mrd. t betragen [1]. Die CO₂- sowie die Schwefelemissionen, unter der Annahme keinerlei Minderungsmaßnahmen, erhöhen sich zumindest proportional zur Produktion, da zunehmend minderwertige Kohle mit einem Schwefelanteil von mehr als 1% eingesetzt wird.

Das Beispiel Chinas zeigt, daß die regionale Aktualität des sauren Regens einer globalen Klimaveränderung zeitlich um Jahrzehnte zuvorkommt. Ein direkter klimawirksamer Effekt der schwefelhaltigen Aerosole kann sich vor dem Auswaschen durch Niederschlag aufgrund der kurzen Verweildauer gar nicht einstellen. Und bis die indirekten Auswirkungen zum Tragen kommen, wird der durch sauren Regen verursachte regionale Umweltschaden schon derartige Dimensionen angenommen haben, daß es, regional gesehen, auf die Klimaveränderung nicht mehr ankommt.

Maßnahmen zur Minderung der Schwefelemissionen

Die IIASA-WEC Studie [2] hat in einem der Szenarien (A2) die regionalen und globalen Auswirkungen einer lang-

fristigen kohleintensiven Energiesystementwicklung beleuchtet (siehe Bild 1). Ohne Emissionsminderungsmaßnahmen würden sich in diesem Szenario die Schwefelemissionen in Asien bis zum Jahr 2020 auf 43 Mio. t/a knapp verdreifachen. Die Schwefelablagerungen würden alle bisher beobachteten Ablagerungen, z.B. in Mittel- und Osteuropa, weit in den Schatten stellen und großräumig die ökologisch tolerierbaren Lasten bis zum Zehnfachen überschreiten (siehe Bilder 2 und 3). Aufgrund der zu erwartenden Umwelt- und Gesundheitsschäden und den damit verbundenen sozialen Kosten scheint eine längerfristige Energiezukunft Asiens ohne Teilentschwefelung der Kohle vor der Umwandlung sowie Rauchgasentschwefelung und Entstickung der Kraftwerke und Industrieanlagen aus sozioökonomischen wie ökologischen Überlegungen eher ein Gedankenexperiment und keine realistische Alternative zu sein. Andererseits sind Kohleaufbereitung, Entschwefelung, Entstickung sowie Staubrückhaltung nicht zum Nulltarif zu haben.

Die spezifischen Investitionen dafür liegen für Kraftwerke bei ungefähr 200 bis 250 US\$/kW (elektrisch) und bedeuten in den asiatischen Entwicklungsländern mit insgesamt niedrigerem spezifischen Investitionskosteniveau eine weitaus höhere relative Verteuerung als identische Maßnahmen in den Industrieländern. Eine weitreichende regionale Umweltverträglichkeit der Kohlenutzung ist im Prinzip auf zwei Wegen erreichbar: eine der Umwandlung nachgelagerte Rauchgasreinigung oder strikte Emissionskontrollmaßnahmen um den gesamten Verbrennungs- bzw. Umwandlungsprozess herum, unter Einbeziehung neuartiger und effizienter Technologien wie der integrierten Kohlenvergasung. Im Falle Asiens würde eine Schwefelemissionsreduzierung um knapp 85% allein im Jahr 2020 Kosten von ca. 90 Mrd. US\$ bzw. einen Investitionsschub im Energiesektor von mehr als 40% verursachen. Andererseits könnten die Emissionen von ca. 20 Mt Schwefel des Jahres 1990 auf knapp 8 Mt im Jahr 2020 reduziert werden.

Die regionale Schwefelsäure-Regenaktionsaktion würde die CO₂-Emissionen jedoch nur marginal beeinflussen. Die höheren Wirkungsgrade der neuen Technologien reduzieren zwar prinzipiell den CO₂-Ausstoß, dieser Vorteil wird jedoch teilweise durch den zusätzlich

durch Rauchgasreinigung verursachten Energiebedarf wieder aufgehoben.

Längerfristig kann eine drastische Entschwefelungsstrategie sogar zu einem Hemmschuh für eine CO₂-Reduktion werden, da das Energiesystem aufgrund der Investitionen in die Kohleinfrastruktur zunehmend an Flexibilität verliert und CO₂-Minderungsmaßnahmen dementsprechend teuer werden. Jede emittierte Tonne CO₂ jedoch erhöht die Gefahr einer globalen Klimaerwärmung und somit kann durchaus die Situation auftreten, daß die regionalen Vorteile einer Schwefelminderung durch negative Klimaveränderungen überschattet werden. Wie schon eingangs erwähnt, ohne Berücksichtigung der Sulphatmissionen ist die beobachtete globale Erwärmung in Relation zu dem Anstieg des atmosphärischen CO₂-Gehalts zu gering. Im folgenden wird die potentielle Beeinflussung des Klimas durch energiebedingte Schwefelemissionen an Hand dreier beispielhafter Szenarien untersucht.

Klimaänderung und langfristige Energiestrategien

Zeiträume von mehr als 100 Jahren sind für Untersuchungen möglicher Klimaerwärmungen aufgrund der langen Vorlaufzeiten und langsamen Anpassungen der globalen Treibhausgaskreisläufe unabdingbar. Die IIASA-WEC-Studie untersuchte langfristige Energiestrategien mit Blick auf langfristige Klimaerwärmungen. In dem kohleintensiven Szenario (mit und ohne Schwefelemissionskontrollmaßnahmen) steigen die jährlichen CO₂-Emissionen Asiens von 1,5 GtC (1990) auf 6 bzw. 10 GtC für die Jahre 2050 und 2100 an (siehe Tabelle 1). Damit wachsen die CO₂-Emissionen Asiens doppelt so schnell wie die globalen CO₂-Emissionen, die 6 GtC (1990) bzw. 24 GtC (2100) betragen. Über die Zeitperiode 1990 bis 2100 integriert ergeben sich vom Energiesektor verursachte CO₂-Emissionen von insgesamt 1770 GtC. Dies entspricht ungefähr dem 8fachen des kumulierten Ausstoßes von 1800 bis 1990.

Zu den CO₂-Emissionen des Energiesektors müssen noch die Emissionen hinzugezählt werden, die durch Veränderungen der Bodennutzung und Landwirtschaft und anderen anthropogenen Prozessen wie zum Beispiel

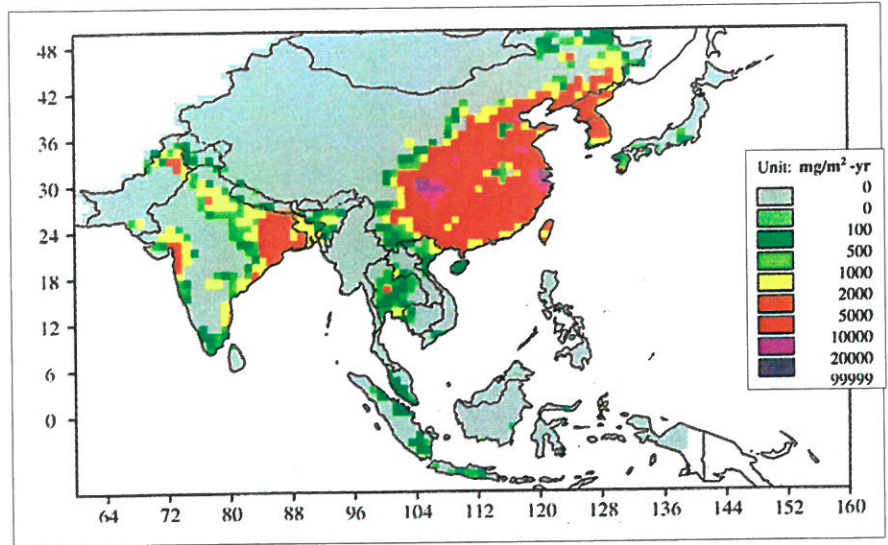


Bild 2: Schwefeldeposition über der „Kritischen Belastungsgrenze“ (critical loads) 2100, HER-Szenario (mg/m²/yr)

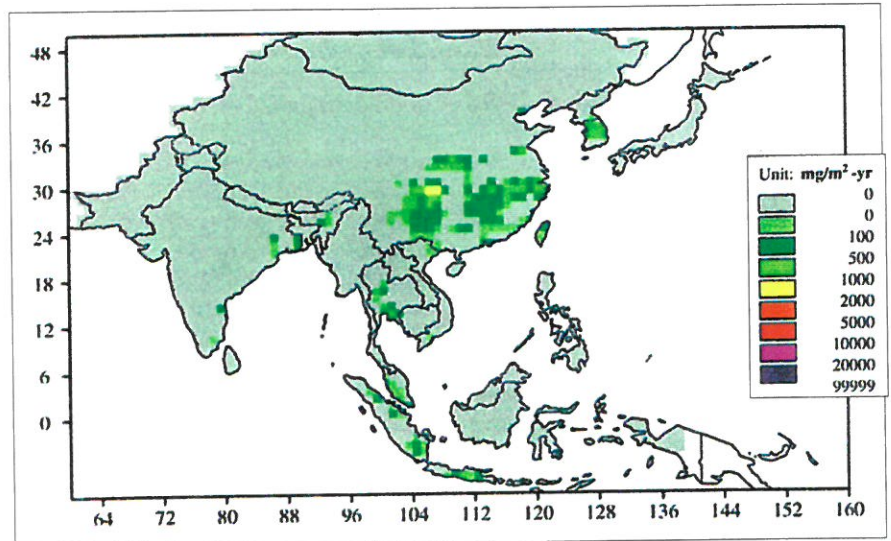


Bild 3: Schwefeldeposition über der „Kritischen Belastungsgrenze“ (critical loads) 2100, BAT-Szenario (mg/m²/yr)

	Keine Maßnahmen				Schwefelminderung bei gleichem Kohleinsatz			Umstrukturierung des Energiesystems		
	1990	2020	2050	2100	2020	2050	2100	2020	2050	2100
Asien CO ₂ GtC	1,5	3,7	6	10	3,7	6	10	2	4	6
SO ₂ MtS	18	48	63	59	8	10	7	9	8	8
Welt CO ₂ GtC	6	10	15	24	10	15	24	7	10	16
SO ₂ MtS	70	105	167	215		36	38		36	38

Tabelle 1: Vergleich der CO₂- und SO₂-Emissionen verschiedener Minderungsmaßnahmen

Zementherstellung verursacht werden. Gegenwärtig beträgt deren Anteil 20%. Langfristig wird jedoch ein relativer Rückgang der nicht-energiebezogenen CO₂-Emissionen auf 10% erwartet. Da die grundlegenden Annahmen des A2-Szenarios dem IS92a des IPCC

ziemlich nahekommen, wurden die nicht-energiebezogenen CO₂-Emissionen des IPCC-Szenarios übernommen.

Die Auswirkungen dieses Anstiegs der CO₂-Emissionen auf den atmosphärischen CO₂-Gehalt wurden mit

	Keine Maßnahmen			Schwefelminderung bei gleichem Kohleeinsatz		Umstrukturierung des Energiesystems		
	1990	2050	2100	2050	2100	2050	2100	
Welt								
Veränderung in der Erdrückstrahlung								
	CO ₂ Wm ⁻²	1,52	4,5	7,1	4,5	7,1	3,5	5,7
	SO ₂ Wm ⁻²	-0,50	-1,4	-1,9	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2
	Andere Wm ⁻²	0,41	1,2	2,1	1,2	2,1	1,3	1,9
	Total Wm ⁻²	1,43	4,3	7,3	5,6	9,0	4,7	7,4
Emissionen								
	CO ₂ GtC	6	15	24	15	24	10,4	16
	SO ₂ MtS	70	167	215	36	38	36	38
Asien								
	CO ₂ GtC	1,5	6	10	6	10	4	6
	SO ₂ MtS	18	63	59	10	7	8	8

Tabelle 2: Veränderung in der Erdrückstrahlung als Folge von CO₂- und SO₂-Emissionen

Hilfe eines simplifizierten Kohlenstoffkreislauf- und Klimamodells von Wigley und Raper [3] berechnet. Bis zum Jahr 2100 würde die atmosphärische CO₂-Konzentration von 355 ppm (1990) auf 860 ppm ansteigen. Damit übertrifft die CO₂-Konzentration dieses Szenarios die des vom IPCC bevorzugten Referenzszenarios um 15% und liegt somit im oberen Bereich der von den Klimaforschern zu ihren Berechnungen herangezogenen Konzentrationen.

Unterstellt man eine mittlere Temperatursensitivität gegenüber einer Verdopplung der CO₂-Konzentration von 2,5 K (Bandbreite 1,5 bis 4,5 K) und berücksichtigt den mittleren strahlungstreibenden Einfluß der schwefelhaltigen Aerosole mit -1,4 Wm⁻² und -1,9 Wm⁻² für die Jahre 2050 und 2100, dann ergibt dies für das Jahr 2100 eine mittlere globale Erwärmung von 2,7 K (Unsicherheitsbereich 1,8 bis 4,1 K). Falls der Weg einer drastischen Entschwefelung eingeschlagen wird, würde dies nur einen unwesentlichen Einfluß auf den atmosphärischen CO₂-Gehalt ausüben, jedoch höchstwahrscheinlich den mittleren Temperaturanstieg aufgrund des Verlustes des negativen Strahlungsantriebs der schwefelhaltigen Aerosole beeinflussen. Der Strahlungsantrieb der Sulphate erhöht sich auf ca -0,1 und -0,2 Wm⁻² mit dem Ergebnis, daß die gesamte Störung des Strahlungsgleichgewichts in dem Schwefelminderungsszenario höher ist als wenn nicht entschwefelt würde (siehe Tabelle 2). In anderen Worten, die regional verbesserten Umweltbedingungen könnten durchaus eine Zuspitzung des Klimaproblems herbeiführen.

Es muß an dieser Stelle festgestellt werden, daß große Unsicherheiten hinsichtlich der Auswirkungen solcher Kon-

zentrationserhöhungen auf mögliche globale Temperaturänderungen bestehen.

Umstrukturierung des Energiesystems

Es ist paradox, daß die enormen Kosten einer Schwefelemissionsminderung ceteris paribus langfristig eine Verschärfung des Klimaproblems erkaufen sollten. In der Tat lassen sich beide Ziele, mittelfristige Reduzierung der Schwefelemissionen und langfristige Reduzierung der CO₂-Emissionen, verwirklichen. Dies erfordert jedoch eine grundlegende Umstrukturierung des Energiesystems mit folgendem Maßnahmenkatalog:

- Wechsel von kohlenstoffreichen und schwefelhaltigen zu kohlenstoffarmen und schwefelfreien Brennstoffen wie zum Beispiel ein Wechsel von Kohle zu schwefelfreiem Erdgas;
- Einsatz von Technologien, die nicht auf der Verbrennung von fossilen Brennstoffen beruhen wie Kernenergie, Wasserkraft, Wind, Biomasse oder Sonnenkollektoren;
- Effizienzverbesserung der Energienutzung im gesamten Energiesystem speziell im Endenergiebereich und besseres Energiemanagement sowie
- Koppelproduktion und Energie-„cascading“.

Kohle kann innerhalb eines CO₂-emissionsbeschränkten Energiesystems nur dann eine gewichtige Rolle spielen, falls wirksame CO₂-Separationsverfahren und langfristige Lagerstätten gefunden werden können. Aufbauend auf dem Schwefelminderungsszenario, d.h. höhere Schwefelemissionen als in jenem Szenario sind unzulässig, sollen jetzt auch die CO₂-Emissionen ohne zu-

sätzliche Energiesystemkosten maximal reduziert werden. Im Wettbewerb um die kostengünstigste Bereitstellung von Energiedienstleistungen muß sich dann herausstellen, inwieweit eine Umstrukturierung des Energiesystems die beiden Ziele, Reduzierung von Schwefel- und CO₂-Emissionen, ohne Kostennachteile für das Energiesystem erfüllen kann. Sonstige wesentliche Szenario-Randbedingungen wie Wirtschaftswachstum oder technischer Fortschritt wurden dabei nicht modifiziert.

Das Ergebnis dieses Wettbewerbs ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Schwefelemissionen veränderten sich erwartungsgemäß nicht wesentlich, die CO₂-Emissionen jedoch werden beträchtlich reduziert. Kumuliert werden bis zum Jahr 2100 um 550 GtC weniger emittiert, eine Minderung von mehr als 30% würde die 600-ppm-Marke im Jahr 2100 knapp unterschreiten. Nach dem Jahr 2100 ist in diesem Szenario eine Stabilisierung auf diesem Niveau für Jahrzehnte nicht möglich, da im Jahr 2100 die jährlichen CO₂-Emissionen das Vierfache der heutigen Emissionen betragen.

Eine Stabilisierung des atmosphärischen CO₂-Gehalts war jedoch nicht das Ziel dieser Untersuchung sondern der prinzipielle Nachweis, daß eine drastische Minderung der Schwefelemissionen nicht im Widerspruch zu einer parallelen CO₂-Reduzierung steht und eine Emissionsminderung beider Verbrennungsprodukte ohne zusätzliche finanzielle Belastung zu Kosten der Schwefelreduzierung möglich ist.

Die Umstrukturierung des Energiesystems ändert die Art und Weise der Schwefelemissionsminderung drastisch. Anstelle der Rauchgasentschwefelung und -entstickung von Kohlekraftwerken und kohlegefeuerten Industrieanlagen wird vor allem Erdgas, Kernenergie, Biomasse und Wasserkraft eingesetzt.

Literatur

[1] Deshun, Liu and Zulin, Shi: „A Strategy to Promote the Use of Clean Coal Technologies in China“. Paper presented at the Conference on „Possible Area for Cooperation in Energy and Related Fields between Central Asia, the Caucasus and Other Asian Countries“ New Delhi, July 18-20, 1995.

[2] Eine Kurzfassung erschien in „et“, 46. Jg. (1996), Heft 5, S. 304-312.

[3] Wigley, T.M.L., M. Salmon and S.C.B. Raper: Model for the Assessment of Greenhousegas Induced Climate Change, Version 1.2, Climate Research Unit, University of East Anglia, UK, 1994.

