

## Effiziente Strategien zur Luftreinhaltung in Baden-Württemberg

A. Voß, R. Friedrich, A. Obermeier

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

### Zusammenfassung

Neuzeitliche Waldschäden in Europa, erhöhte Ozonkonzentrationen in der Troposphäre, Ozonabbau in der Stratosphäre, Atemwegserkrankungen, Versauerung der Seen sowie andere Umweltbeeinträchtigungen haben das öffentliche Interesse auf die Luftschadstoffproblematik, als mögliche Ursache dieser Effekte, gelenkt.

Wenngleich die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Luftschadstoffemissionen und den genannten Umweltbeeinträchtigungen weder vollständig bewiesen noch in allen Einzelheiten bekannt sind, besteht vielfach Einigkeit darüber, daß Luftschadstoffe zumindest mitverantwortlich für diese Effekte sind.

Die Reduzierung der Schadgasemissionen zum Schutz der Umwelt erfordert zusätzliche Ausgaben, die sich jedes Jahr zu Milliardenbeträgen summieren. Aus diesem Grund ist eine maximale Reduzierung der Emissionen mit den geringst möglichen Zusatzkosten eine wichtige umweltpolitische Zielsetzung.

Dieser Beitrag stellt beispielhaft einige bisherige Forschungsarbeiten zusammen, deren Ergebnisse eine problemorientierte Unterstützung der politischen Entscheidungsträger im Hinblick auf die Verwirklichung effizienter Luftreinhaltestrategien in Baden-Württemberg bieten.

Darüberhinaus werden notwendige Weiterentwicklungen der methodischen Ansätze und Systemanalysen sowie künftige Aufgabengebiete diskutiert.

## Efficient Strategies for Air Pollution Control in Baden-Württemberg

A. Voß, R. Friedrich, A. Obermeier

Institute of Energy Economics and Rational Use of Energy, University of Stuttgart

### Summary

Damage to forests in Europe, increasing ozone-levels in the troposphere, ozone depletion in the stratosphere, respiratory diseases, acidification of lakes and other environmental damages have attracted public attention to the problem of air pollution as a possible cause of all these effects.

Though, the cause-effect relationship between emission of air pollutants and some of those effects has neither been proven nor is the complex mechanism of environmental impact of pollutants fully understood. However, the general consent is, that the air pollutants are at least partly responsible for the above mentioned effects.

Reduction of emissions of pollutants as a means of environmental protection results in additional expenditure, which adds up to annual costs of several billions of DM/year. Maximum reduction of emissions with least additional costs is therefore an important policy objective.

In this contribution some research activities are summarized, their results giving an important support of political decision-makers with regard to the realization of efficient air pollution control strategies in Baden-Württemberg.

Further developments of methods and systems analysis required, as well as future tasks will be discussed additionally.

## 1     Einleitung

Eine im letzten Jahr veröffentlichte Studie des EMNID-Institutes zeigt, daß ungefähr drei Viertel aller Bundesbürger umweltpolitischen Themen eine hohe Priorität zuweisen. Dies ist das Ergebnis eines Prozesses, der seinem Ausgangspunkt wohl in den 60iger Jahren hat und der wesentlich dadurch beeinflußt worden ist, daß die negativen und unerwünschten Effekte unseres Wirtschaftens mit steigendem Konsum immer deutlicher zutage traten. Schlagworte wie Saurer Regen, Waldsterben, Tschernobyl, Ozonloch und Klimakatastrophe bezeichnen diese Entwicklung.

Umweltbelastungen oder allgemeiner ausgedrückt, die Inanspruchnahme von Umwelt und Natur bewirken Schäden in der Tier- und Pflanzenwelt, an Bauwerken und Kulturdenkmälern und beeinträchtigen die menschliche Gesundheit, Schäden die in unserer volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung, also im Bruttosozialprodukt nicht erfaßt werden. Die Ökonomen sprechen in diesem Zusammenhang von externen oder sozialen Kosten, die nicht der Verursacher sondern dritte Personen oder die Allgemeinheit zu tragen haben; dies können auch die zukünftigen Generationen sein.

Die Nichtberücksichtigung der externen Kosten der Umweltnutzung führt, gerade in einem auf die Preise und den Markt setzenden Steuerungssystem, zu Fehlallokationen knapper Ressourcen und damit ggf. zu einer Verfehlung des Ziels der Maximierung der gesellschaftlichen Wohlfahrt.

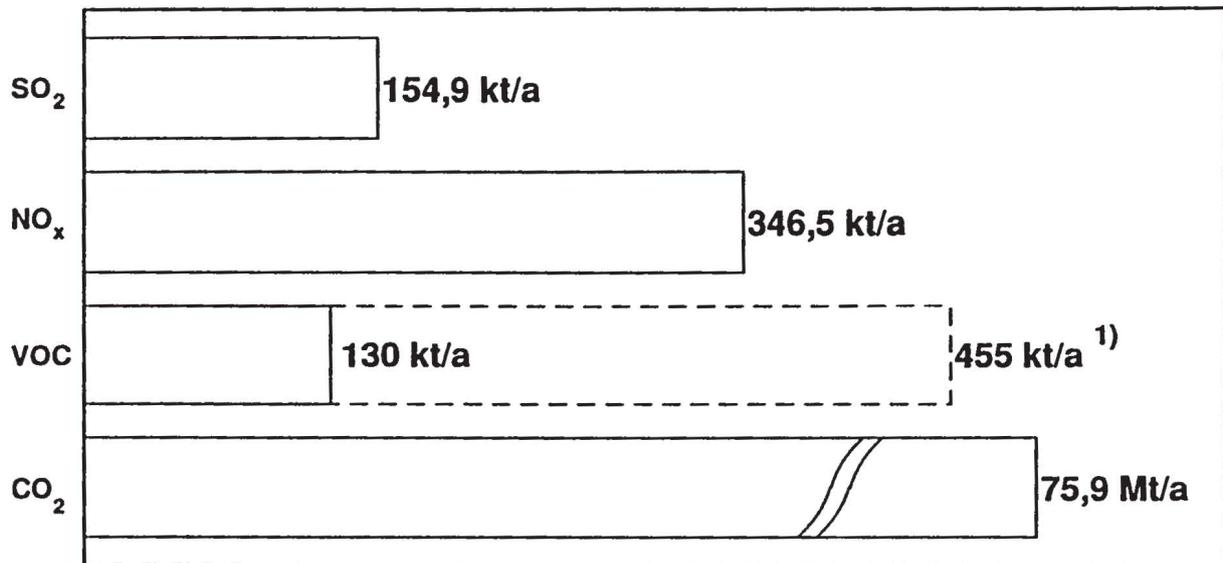
In der öffentlichen Diskussion über die Umwelt- und Luftverschmutzungsprobleme wird oft von der Notwendigkeit der Versöhnung von Ökonomie und Ökologie gesprochen und dies zum politischen Ziel erklärt. Geht man vom griechischen Ursprung beider Begriffe aus, der Ökologie als Haushaltkunde, als Wissenschaft von den Beziehungen der Lebewesen zu ihrer Umwelt und der Ökonomie als Gesetze und Regeln zur Bewirtschaftung dieses "Hauses", so geht es weniger um die Versöhnung von Ökonomie und Ökologie, als um eine Erweiterung unseres bisher sehr eingegengten Ökonomie- bzw. Wirtschaftsverständnisses. Natur und Umwelt sind in das "Hauswirtschaften" mit einzubeziehen. Die Auffassung, Natur und Umwelt seien freie Güter, die unentgeltlich in Anspruch genommen werden können, hat in diesem Ökonomieverständnis, das sich auf das gesamte "Haus" bezieht, keinen Platz mehr. Im Gegenteil, der haushälterische Umgang mit den knappen Gütern Natur und Umwelt muß wesentliches Element des Wirtschaftens werden.

Folgt man diesem erweiterten Ökonomieverständnis, dann ist es aber nur konsequent, das Grundprinzip der Ökonomie, nämlich mit gegebenen Mitteln den größten Erfolg zu erzielen, auch auf die knappe Ressource Umwelt (den Produktionsfaktor Umwelt) anzuwenden. Übertragen auf den Bereich des Umweltschutzes bzw. auf die Luftreinhaltung, bedeutet dies, Luftreinhaltemaßnahmen danach auszuwählen, daß mit jeder aufgewendeten Mark möglichst viel Umweltentlastung, möglichst viel Luftreinhaltung erreicht wird. Angesichts der begrenzten Mittel und Ressourcen, die uns als Einzelperson, als Unternehmen aber auch als Gesellschaft für Maßnahmen zur Luftreinhaltung zur Verfügung stehen, ist es gerade im Sinne des Umweltschutzes notwendig, diese Mittel effizient einzusetzen. Aus diesem Grund ist ökologische Effizienz das zentrale ökonomische Kriterium für die Ableitung von Maßnahmen und Strategien zur Luftreinhaltung.

Das es sich sowohl bei den Umweltschäden wie auch bei den Umweltschutzkosten nicht um marginale Größenordnungen handelt, mögen die folgenden Zahlen verdeutlichen. Wicke beziffert in seiner ökologischen Schadensbilanz der Bundesrepublik Deutschland die "rechenbaren" Schäden durch Luftverschmutzung für das Jahr 1984 zu rd. 48 Mrd. DM [1], und in einer kürzlich veröffentlichten Untersuchung des Umwelt- und Prognose-Instituts Heidelberg werden jährliche Kosten durch Luftverschmutzung von 63 Mrd DM genannt [2]. Bei aller berechtigten Skepsis gegenüber diesen Abschätzungen deuten sie dennoch darauf hin, daß die durch luftgetragene Schadstoffe verursachten Schäden beachtlich sind. Auch die Aufwendungen für den Umweltschutz reichen in den Milliardenbereich. So z.B. investierten allein die westdeutschen Stromversorger im Zeitraum von 1983 bis 1989 23,6 Mrd DM in den Umweltschutz. Dies war ein Viertel der gesamten Investitionen in diesem Zeitraum. 18,5 Mrd DM wurden davon in Anlagen zur Entschwefelung, Entstickung und Staubbinderung investiert.

Angesichts der Größenordnung der Schäden durch Luftverschmutzung sowie der Höhe der notwendigen Aufwendungen zur Luftreinhaltung kommt rationalen Handlungsstrategien und effizienten Maßnahmen zur Reduzierung der Luftbelastung eine besondere Bedeutung zu. Dies gilt auch vor dem Hintergrund, daß umweltpolitische Entscheidungen oft in gefühlbeladenen und emotional geprägten Situationen zu treffen sind, wo Schadenshypothesen leicht zu gesicherten Kenntnissen werden und Schuldzuweisungen ohne ausreichende Beweise vorgenommen werden.

Die Gewinnung, Umwandlung und Nutzung von Energie ist gegenwärtig eine der Hauptquellen der Luftbelastung. In Abb. 1 sind die Emissionen wichtiger Luftschadstoffe in Baden-Württemberg dargestellt. Die  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und Kohlendioxidemissionen in Baden-Württemberg entfallen nahezu ausschließlich auf die Umsetzung von Energie in stationären Anlagen und im Verkehrssektor. Von den VOC-Emissionen in Höhe von 455 kt/a sind knapp 30 % energiebedingt, wobei die Benzinverdunstung in diesen Prozentsatz nicht einbezogen ist.



**Abb. 1:** Energiebedingte Luftschadstoffemissionen in Baden-Württemberg im Jahr 1988 (<sup>1)</sup> gesamte VOC-Emissionen im Jahr 1985)

Wegen dieser zentralen Rolle der Energieversorgung für die Luftreinhaltung konzentriert sich die nachfolgende Diskussion von Luftreinhaltemaßnahmen und -strategien auf den Energiebereich. Dabei ist zunächst auf die Möglichkeiten und Grenzen zur Ableitung effizienter Luftreinhaltestrategien einzugehen. Anschließend sollen beispielhaft einige mittels systemanalytischer Methoden erarbeitete Ergebnisse von Emissionsminderungsstrategien erläutert werden. Abschließend werden notwendige Weiterentwicklungen der methodischen Ansätze sowie künftige Aufgaben diskutiert.

## 2 Effiziente Luftreinhaltestrategien

Geht man von dem zuvor angesprochenen erweiterten Ökonomieverständnis aus, welches die Umwelt und Natur als knappe Ressourcen mit einer begrenzten Belastungsfähigkeit in das gesamtwirtschaftliche Kalkül integriert, so läßt sich die Aufgabe einer rationalen Luftreinhaltepolitik allgemein dahingehend beschreiben, daß sie darauf abzielen muß, die Wirkungen von Luftschadstoffen so zu begrenzen sowie die Nutzungsrechte für Emissionen so zu verteilen, daß die gesellschaftliche Wohlfahrt maximiert wird. Dabei ist unter Wohlfahrt die Gesamtheit aller materiellen und immateriellen Güter und Werte zu verstehen. Praktische Handlungsanweisungen für die Umweltpolitik lassen sich daraus aber nicht ableiten, weil eine allgemein akzeptierte Wohlfahrtsfunktion, die die unterschiedlichen Wertvorstellungen der

Gesamtheit der Wirtschaftssubjekte repräsentiert, nicht existiert und somit quantitative Aussagen, inwieweit und in welchem Umfang Umweltverbesserungen zur Steigerung der Wohlfahrt beitragen, nicht möglich sind. Ersatzweise ließen sich Kosten-Nutzen-Analysen als Entscheidungshilfen für effiziente Luftreinhaltemaßnahmen heranziehen, die auf einem Vergleich der gesellschaftlichen Kosten der Luftbelastung und der Kosten der Emissionsminderung aufbauen. Die optimale Luftreinhaltung ergäbe sich dann, wenn die gesamtwirtschaftlichen Schäden durch Luftschadstoffe und die Kosten der Emissionsminderung zusammen ein Minimum aufweisen.

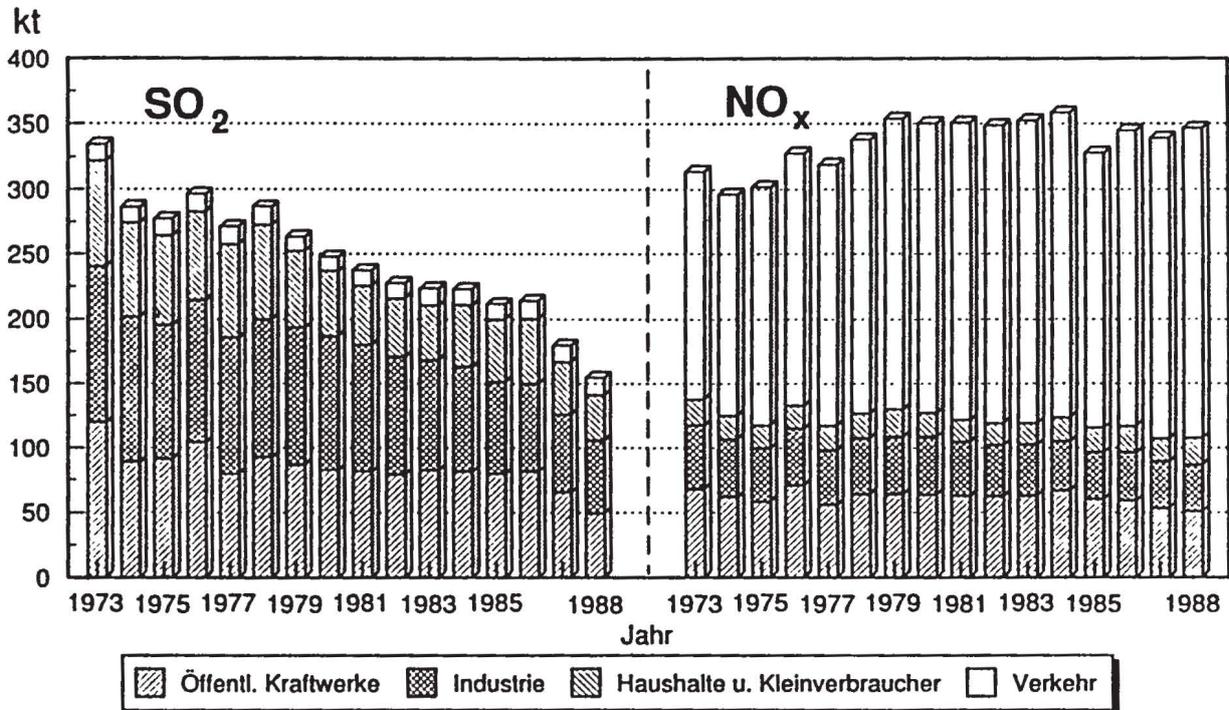
In der Realität gibt es aber eine Reihe von methodischen Schwierigkeiten und Datenproblemen, die einer Anwendung von Kosten-Nutzen-Abwägungen im Bereich der Luftreinhaltung im Wege stehen. Wesentliche Gründe dafür sind, daß Dosis-Wirkungsbeziehungen für die zu betrachtenden Schadstoffe nicht oder nur qualitativ bekannt sind und daß selbst dort, wo ein eindeutiger Zusammenhang zwischen bestimmten Schäden und den sie verursachenden Schadstoffen unterstellt werden kann, eine direkte Zuordnung der Schadenswirkungen auf einzelne Verursachergruppen bzw. Schadstoffemittenten kaum möglich ist. Desweiteren bleibt das Problem der monetären Bewertung des verursachten Schadens, die bei einigen Schadenskategorien, wie z. B. der Zerstörung von Biotopen und Lebensräumen, objektiv kaum möglich ist.

In Anbetracht der Wissenslücken und Probleme, die gegenwärtig eine Quantifizierung der Schäden, die durch die Emission von luftgetragenen Schadstoffen verursacht werden, nicht erlauben, bleibt derzeit für die Ableitung effizienter Luftreinhaltemaßnahmen nur die Möglichkeit, sich an den Kosten der Emissionsminderung zu orientieren und vorgegebene Emissionsminderungsziele mit dem geringsten Kostenaufwand für Emissionsminderungsmaßnahmen zu erreichen.

Als methodischer Ansatz zur Ermittlung kosteneffizienter Minderungsstrategien bietet sich die Kosten-Wirksamkeits- oder Kosten-Effektivitäts-Analyse an. Sie basiert auf der Untersuchung der Emissionsminderung einzelner Maßnahmen und den damit verbundenen Kosten und kombiniert sie dergestalt, daß Emissionsminderungen mit dem geringsten Kostenaufwand erreicht werden.

Wesentliches Ergebnis derartiger Kosten-Effektivitäts-Analysen sind Kostenfunktionen der Schadstoffminderung, die in Abhängigkeit von den Minderungskosten die maximal erreichbaren Emissionsminderungen effizienter Luftreinhaltestrategien beschreiben. Sie liefern wesentliche Informationen für die einzuleitenden Maßnahmen zur Luftreinhaltung in den verschiedenen Emittentenbereichen, können dem Umweltpolitiker aber nicht helfen bei der Frage nach dem notwendigen oder anzustrebenden Umfang der Emissionsminderung.

Im folgenden sei nun auf die mit Hilfe von Kosten-Effektivitäts-Analysen ermittelten Maßnahmen und Strategien zur Reduzierung der energiebedingten Schadstoffemissionen in Baden-Württemberg näher angegangen.



**Abb. 2:** Entwicklung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg

In Abb. 2 ist zunächst die Entwicklung der energiebedingten SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg seit 1973 dargestellt. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen sind in den letzten 10 Jahren nahezu konstant auf einem Niveau von 350 kt/a geblieben. Der Verkehrssektor hat mit fast 70 % den größten Anteil an der NO<sub>x</sub>-Freisetzung (1988). Minderungen der NO<sub>x</sub>-Emissionen des Verkehrs waren bis 1988 noch nicht zu verzeichnen. Die Reduktionen durch die Einführung des Katalysators wurden kompensiert durch die steigenden Fahrleistungen der Personen- und Lastkraftwagen. Die seit 1985 rückläufigen NO<sub>x</sub>-Emissionen aus den öffentlichen Kraftwerken resultieren aus den dort wirksam werdenden Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Stickoxidminderung.

Anders als bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen ist der Ausstoß an SO<sub>2</sub> seit Mitte der 70iger Jahre deutlich rückläufig. Im Jahr 1988 waren die SO<sub>2</sub>-Emissionen nur noch halb so hoch wie im Jahr 1976. Dieser Rückgang ergab sich durch einen verminderten Einsatz schwefelhaltiger Brennstoffe, insbesondere von schwerem Heizöl, die Reduktion des Schwefelgehalts beim Heizöl leicht und Dieselkraftstoff, sowie die SO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahmen im Bereich der

öffentlichen Kraftwerke. Letztere führten allein im Zeitraum von 1986 bis 1988 zu einer Reduktion der SO<sub>2</sub>-Emissionen aus Kraftwerken um 40 %.

Die Reduktion der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen der öffentlichen Kraftwerke sind Resultat einer Luftreinhaltepolitik, die zum ersten Mal auf systematischen Kosten-Effektivitäts-Analysen von Emissionsminderungsmaßnahmen aufbaute.

### 3 Ergebnisse von Kosten-Effektivitätsanalysen zur Ableitung effizienter Luftreinhaltemaßnahmen

#### 3.1 Emissionsminderungen im Kraftwerksbereich

Als zu Anfang der 80er Jahre die neuartigen Waldschäden ein immer größeres Ausmaß annahmen, hat die Landesregierung von Baden-Württemberg zwei Kommissionen mit der Aufgabe eingesetzt, ein umfassendes Konzept zur Reduzierung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen aus Kraftwerken in Baden-Württemberg zu erarbeiten [3, 4].

In Anbetracht der damals noch vielfältigen offenen Fragen hinsichtlich der Ursachen der neuartigen Waldschäden und dem Faktum, daß die Verminderung der Schadstoffemissionen mit ggf. erheblichen Kosten verbunden ist, schien es den Kommissionen zielführend, die einzelnen denkbaren Maßnahmen zur Minderung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen zunächst einmal entsprechend ihrer Effektivität, d.h. nach ihren emissionsreduzierenden Wirkungen und ihren Kosten zu klassifizieren. Um dies zu erreichen, wurden ausgehend vom Stand der Technik zunächst für jedes einzelne Kraftwerk, oder genauer gesagt für jeden Kraftwerksblock, die anlagenspezifischen Möglichkeiten zur Minderung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen untersucht und die Kosten der dazu erforderlichen Maßnahmen ermittelt oder abgeschätzt. In einer nachfolgenden systemanalytischen Modellrechnung wurden dann die Kostenwirksamkeiten alternativer Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen analysiert und in einer Projektion die Emissionsminderungen im Zeitablauf, d.h. bis Mitte der neunziger Jahre, dargestellt.

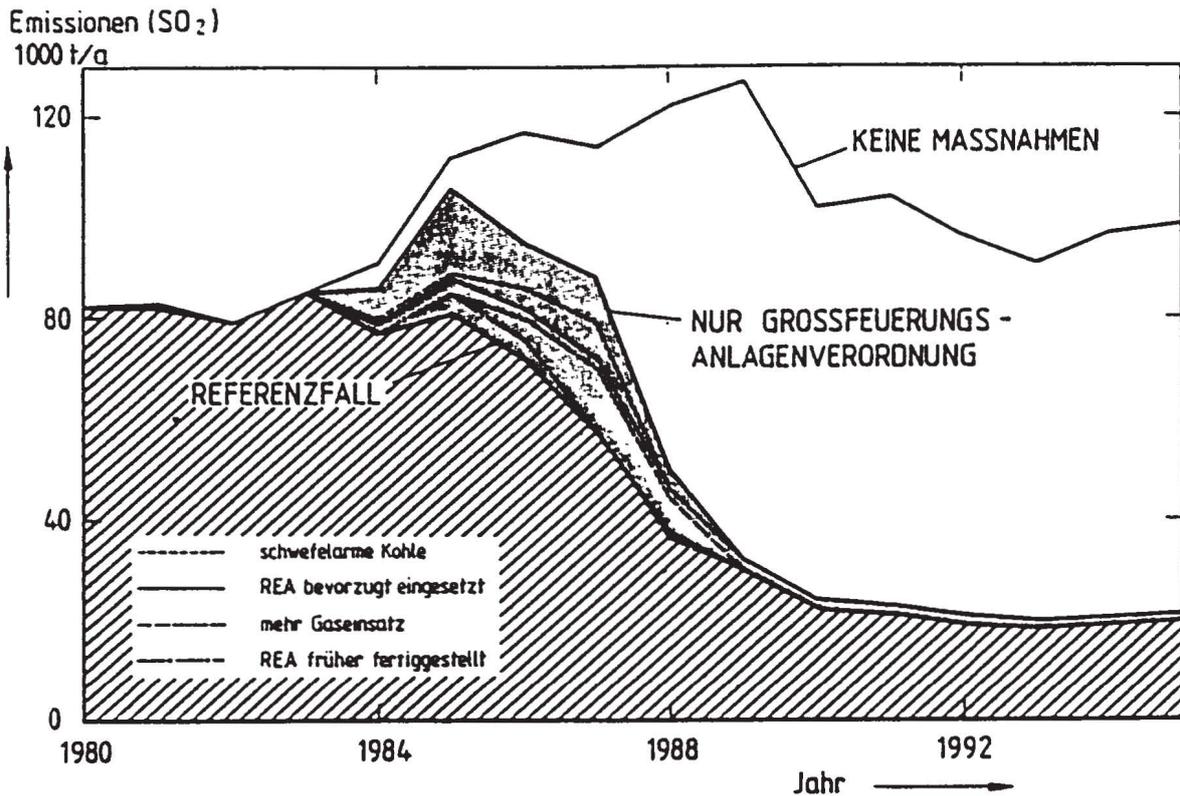
In Tab. 1 sind exemplarisch für einige SO<sub>2</sub>-Minderungsmöglichkeiten im Kraftwerksbereich die Kosten-Effektivitäts-Verhältnisse als spezifische Minderungskosten einer Maßnahme angegeben. Sie geben den Kostenaufwand für die Vermeidung einer gewissen Schadstoffemission, hier der Emission von einem kg SO<sub>2</sub> an.

**Tab. 1: Kosten-Effektivitäts-Relationen von Maßnahmen zur Minderung von SO<sub>2</sub>-Emissionen bei Kraftwerken**

	DM/kg SO <sub>2</sub>
Rauchgasentschwefelung	3-6
Frühere Inbetriebnahme der REA	3
Bevorzugter Einsatz von Kraftwerken mit REA	0,5
Verstärkter Einsatz von Importkohle (Kohleabnahmeverpflichtungen müssen nicht erfüllt werden)	-10
Vorgezogener Einsatz von Erdgas	16
Bau weiterer REA	40
Reduzierung des Schwefelgehalts beim Heizöl von 0,3% auf 0,15%	6,5

Die Entschwefelung der Rauchgase verursacht je nach Größe und Auslastung des Kraftwerks Kosten in Höhe von 3-6 DM je kg nichtemittiertem SO<sub>2</sub>. Für eine frühere Inbetriebnahme der Rauchgasentschwefelungsanlagen als gesetzlich vorgeschrieben sowie für einen bevorzugten Einsatz der Kraftwerke, die bereits mit einer Rauchgasreinigung ausgerüstet sind, fallen Kosten in Höhe von 3 bzw. 0,5 DM/kg SO<sub>2</sub> an.

Unterstellt man, daß ein verstärkter Einsatz von schwefelarmer Importkohle zu Lasten heimischer Steinkohle möglich wäre, d.h. daß die bestehenden Kohleverstromungsverpflichtungen des sog. Jahrhundertvertrages nicht erfüllt werden müßten, dann würden sich durch den Preisvorteil der Importkohle spezifische Minderungskosten von etwa -10 DM/kg SO<sub>2</sub> ergeben. Im Vergleich zu den vorgenannten Maßnahmen liegen die spezifischen Minderungskosten eines vorgezogenen Erdgaseinsatzes mit 16 DM/kg SO<sub>2</sub> und die Rauchgasreinigung von Altanlagen, die nur noch eine geringe Restlebensdauer haben, mit rd. 40 DM/kg bedeutend höher, sie sind daher wenig effizient.

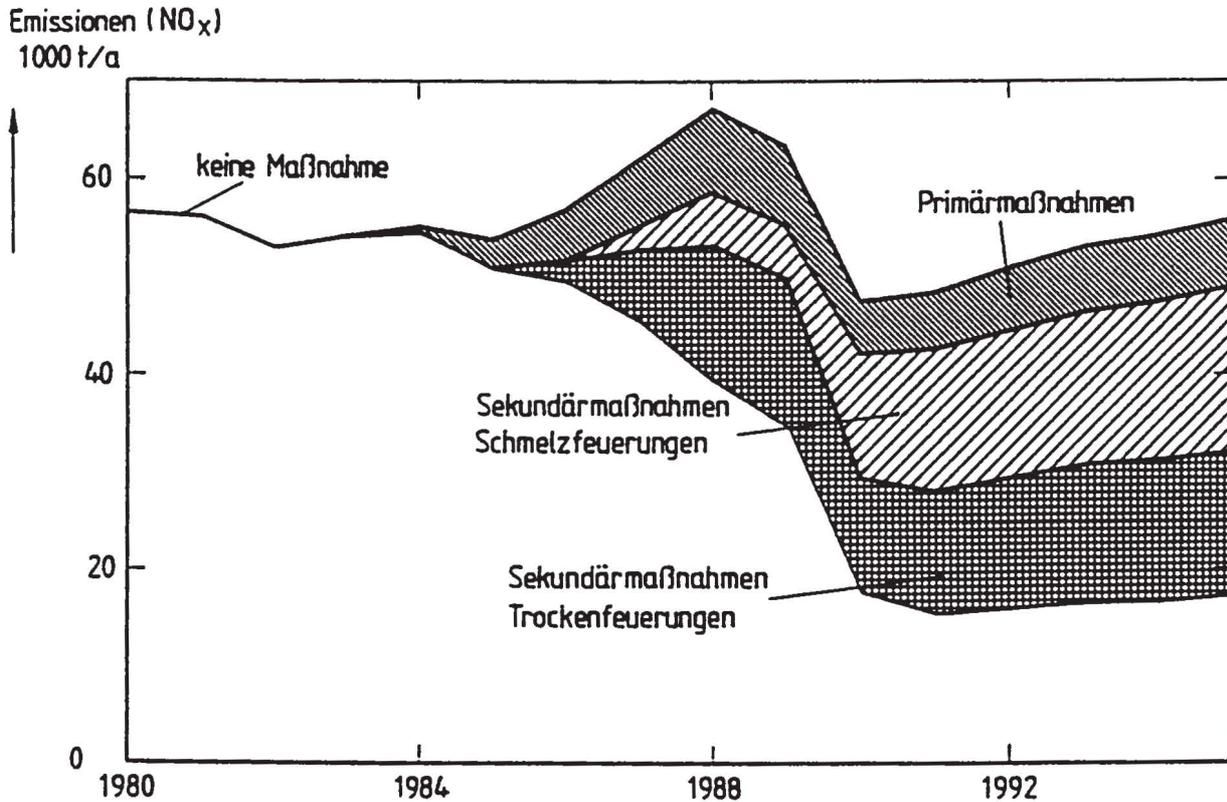


**Abb. 3:** Entwicklung der SO<sub>2</sub>-Emissionen aus öffentlichen Kraftwerken bei Durchführung verschiedener Minderungsmaßnahmen

Abb. 3 zeigt die Entwicklung der SO<sub>2</sub>-Emissionen aus öffentlichen Kraftwerken in Baden-Württemberg für alternative Annahmen über durchgeführte Minderungsmaßnahmen bis zum Jahr 1995. Die obere durchgezogene Linie beschreibt die Emissionsentwicklung, wenn keinerlei Maßnahmen eingeleitet würden. Der Anstieg der SO<sub>2</sub>-Emissionen auf 120 kt/a resultiert aus einer Zunahme der Stromerzeugung in Kohlekraftwerken. Die Nachrüstung der Kraftwerke mit Rauchgasentschwefelungsanlagen entsprechend der Großfeuerungsanlagenverordnung führt mittelfristig zu einer drastischen SO<sub>2</sub>-Emissionsminderung auf ein Niveau von etwa 25 % der Emissionen zu Beginn der 80iger Jahre. Die Großfeuerungsanlagenverordnung allein hätte aber einen Anstieg der SO<sub>2</sub>-Emissionen in den Jahren 1985 bis 1988 nicht vermeiden können. Die Arbeitsgruppe richtete deshalb ihr Augenmerk auf Maßnahmen, die kurzfristig wirksam werden können und ein vertretbares Kosten-Effektivitäts-Verhältnis aufweisen. Hierzu zählen unter anderem der verstärkte Einsatz schwefelarmer Kohle, der bevorzugte Einsatz von Kraftwerken die mit einer Rauchgasentschwefelungsanlage ausgerüstet sind, der verstärkte Einsatz von Erdgas sowie die frühere Inbetriebnahme von Rauchgasentschwefelungsanlagen als gesetzlich vorgeschrieben.

Alle diese Maßnahmen bewirken, wie aus Abb. 3 ersichtlich, eine kurzfristig wirksam werdende Minderung der SO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 25 %.

Für die NO<sub>x</sub>-Emissionen der öffentlichen Kraftwerke wurden vergleichbare, auf dem Kosten-Effektivitäts-Ansatz aufbauende Analysen zur Emissionsminderung durchgeführt. Die Abb. 4 zeigt die zeitliche Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionen aus öffentlichen Kraftwerken bei Durchführung verschiedener NO<sub>x</sub>-Minderungsmaßnahmen.



**Abb. 4:** Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionen aus öffentlichen Kraftwerken bei Durchführung verschiedener Minderungsmaßnahmen

Es sei an dieser Stelle betont, daß die auf dem Kosten-Effektivitäts-Prinzip basierenden systemanalytischen Untersuchungen der Emissionsminderungsmöglichkeiten aus Kraftwerken wesentliche Grundlage für freiwillige Vereinbarungen zwischen der Landesregierung von Baden-Württemberg und den Elektrizitätsversorgungsunternehmen waren, über die gesetzlichen Vorschriften hinausgehende Minderungsmaßnahmen durchzuführen.

### 3.2 Emissionsminderungsstrategien für industrielle Feuerungsanlagen

Quantitative Analysen der Wirkungen und Kosten von Maßnahmen zur Minderung von SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen bildeten auch die methodische Grundlage der Arbeiten der Kommission "Wirtschaftliche Entwicklung-Umwelt-Industrielle Produktion", die im Auftrag der Landesregierung die Möglichkeiten der Schadstoffminderung aus industriellen Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg untersucht hat [5].

Die industriellen Feuerungen trugen Mitte der 80iger Jahre zu etwa 34 % zu den SO<sub>2</sub>-Emissionen und zu etwa 11 % zu den NO<sub>x</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg bei. Zu diesem Zeitpunkt gab es rund 8000 industrielle Betriebsstätten, die Feuerungsanlagen sehr unterschiedlicher Leistung und Bauart sowie mit den verschiedensten Brennstoffen befeuert betrieben. Diese große Zahl an Feuerungsanlagen, die sowohl in den Geltungsbereich der Großfeuerungsanlagenverordnung und der TA Luft wie auch in die Kategorie der nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen fallen, erforderte eine umfangreiche und systematische Analyse der Möglichkeiten und Verfahren der Minderung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen in bezug auf ihre Einsatzbereiche, ihren Entwicklungsstand, ihre Entsorgungsprobleme und ihre Kosten.

Ausgehend von einer Basisentwicklung bis zum Jahr 1995, die die erwarteten Brennstoffsubstitutionen sowie die Anforderungen der Großfeuerungsanlagenverordnung bereits berücksichtigt, wurden für das Jahr 1995 weitergehende Emissionsminderungsmöglichkeiten und die damit verbundenen Kosten untersucht.

Wesentliche Ergebnisse dieser Kosten-Effektivitäts-Analysen zur Identifizierung effizienter Emissionsminderungsmaßnahmen bei industriellen Feuerungsanlagen sind in Abb. 5 in Form einer Kostenfunktion der SO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion dargestellt.

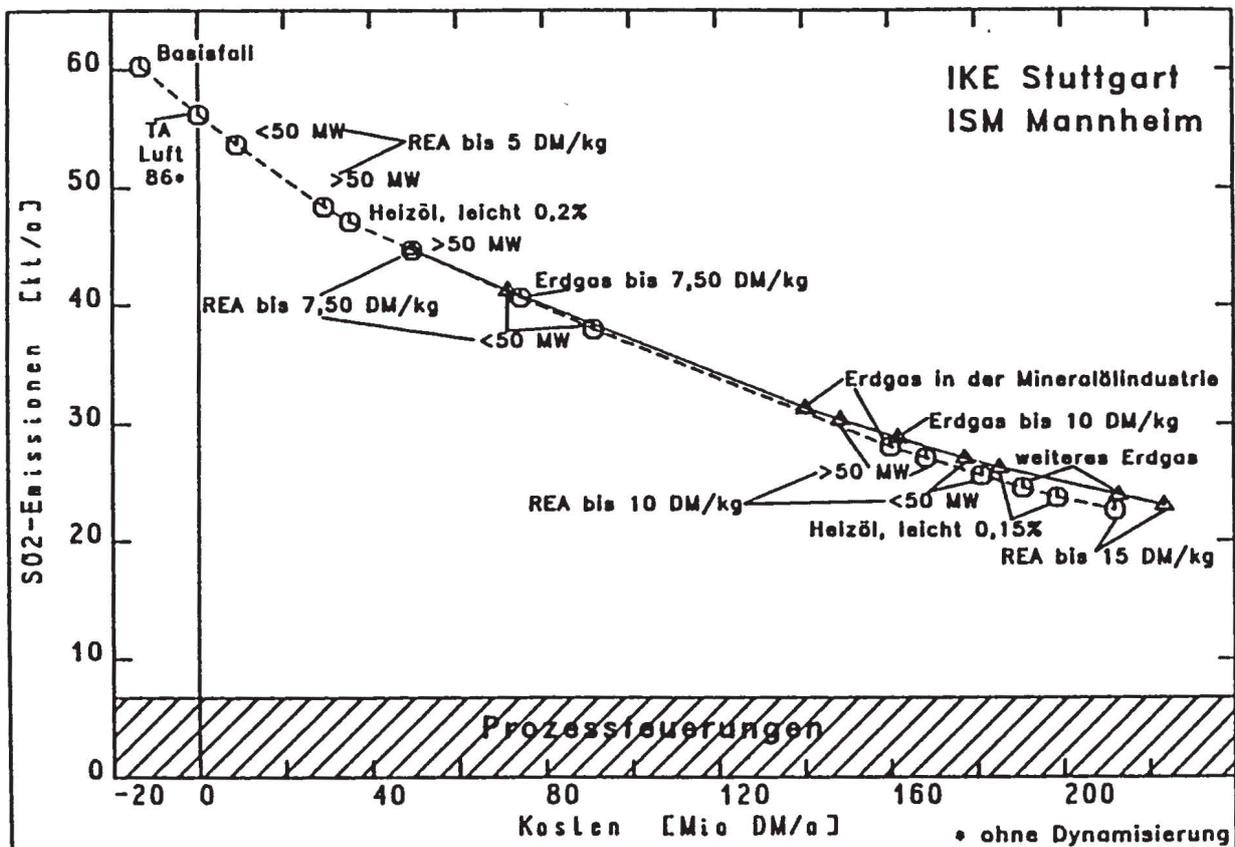


Abb. 5. Kostenkurve der Minderung von SO<sub>2</sub>-Emissionen aus industriellen Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg

Gegenüber dem Basisfall ließen sich die jährlichen SO<sub>2</sub>-Emissionen um gut 60 % reduzieren, d. h. von 60 auf rd. 23 kt/a. Dies wäre allerdings mit Mehrkosten von deutlich über 200 Mio DM/a verbunden. Die Erfüllung der in der TA-Luft 86 genannten Grenzwerte führt nur zu geringen Emissionsminderungen. Als besonders effizient stellten sich der Zubau von Rauchgasentschwefelungsanlagen bei Feuerungsanlagen mit hoher Auslastung, die Substitution von schwerem Heizöl durch Erdgas sowie eine weitergehende Entschwefelung des leichten Heizöls dar.

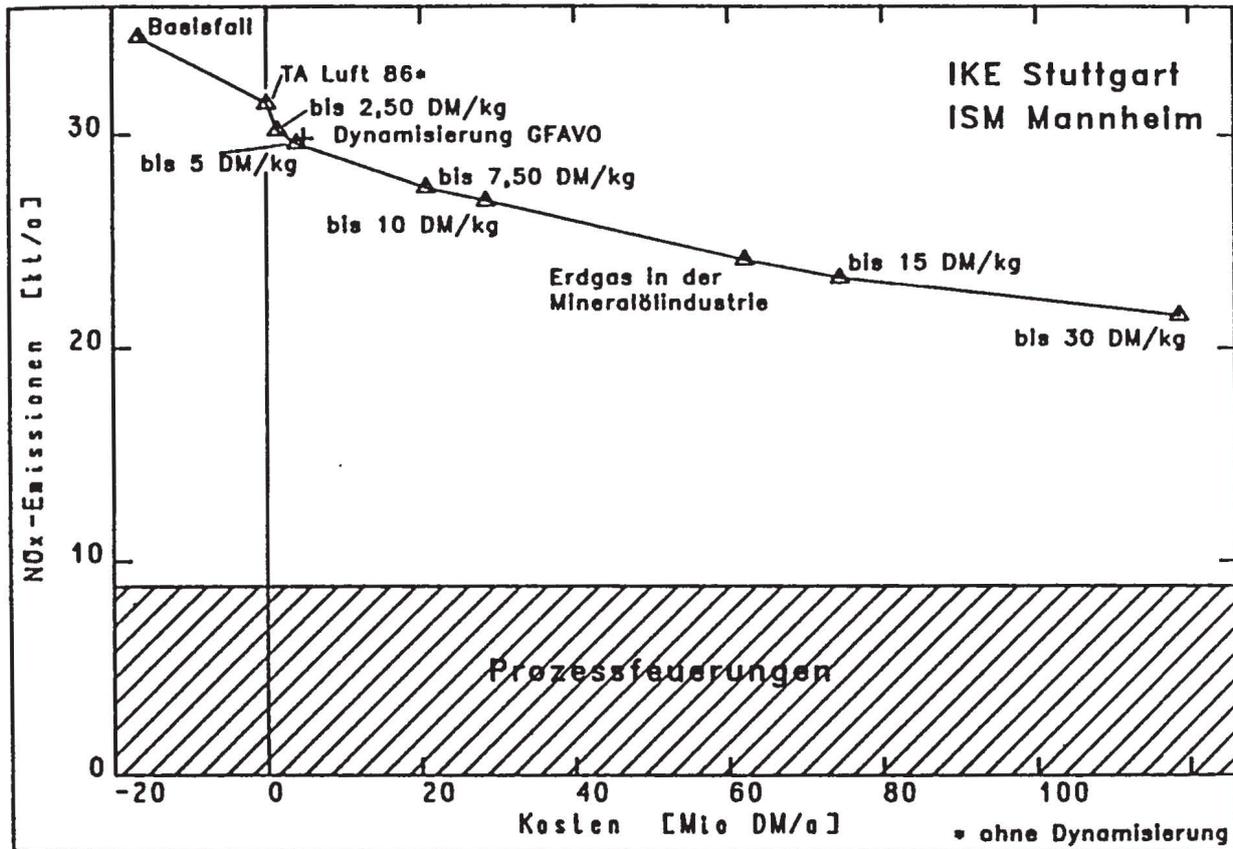


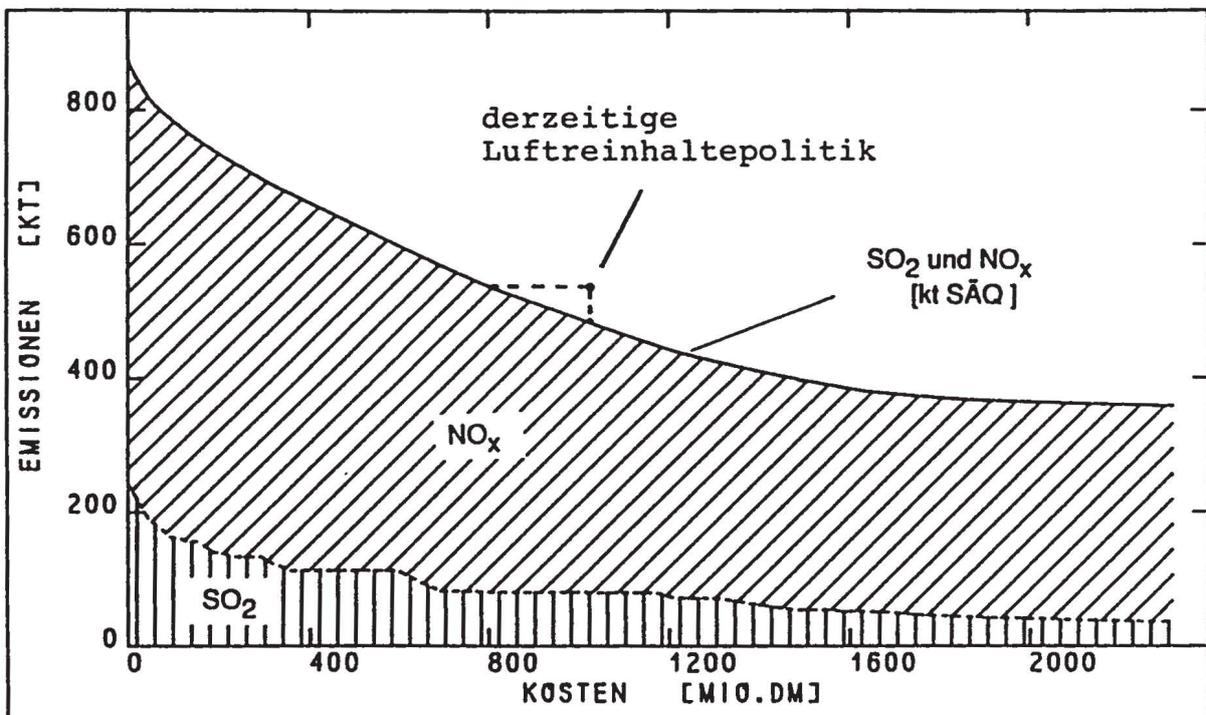
Abb. 6: Kostenkurve der Minderung von NO<sub>x</sub>-Emissionen aus industriellen Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg

Abb. 6 zeigt die Kostenfunktion der Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen aus industriellen Feuerungsanlagen. Aufgrund der vergleichsweise hohen Emissionen aus Prozessfeuerungen, z.B. in der Zementindustrie, für die ausgereifte Minderungsverfahren zum damaligen Zeitpunkt nicht existierten, sind die erzielbaren Minderungen der NO<sub>x</sub>-Emissionen mit etwa 35 % deutlich geringer als die der SO<sub>2</sub>-Emissionen. Der zunehmend flachere Verlauf der Kostenkurve deutet auch daraufhin, daß mit zunehmender NO<sub>x</sub>-Minderung die Grenzkosten erheblich ansteigen.

### 3.3 Gesamtstrategien zur Minderung der SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg

Die bisher diskutierten Beispiele haben die Frage nach der effizienten Emissionsminderung nur sektoral, nämlich für den Bereich der "Kraftwerke" einerseits und den Bereich der "Industrie" andererseits behandelt. Es liegt aber auf der Hand, daß eine rationale Luftreinhaltepolitik die verschiedenen Emittentengruppen nicht unabhängig voneinander betrachten kann, sondern sie muß das Ziel haben, die für notwendig erachteten oder gewünschten Emissionsminderungen mit einem Maßnahmenbündel zu erreichen, das über alle Emittentengebiete hinweg die kosteneffizienteste Lösung darstellt.

Daher ist es nur eine logische Folge, aufbauend auf den Analysen einzelner Sektoren, effiziente Minderungsstrategien für SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> unter Berücksichtigung aller Emittentengruppen, also von Kraftwerken, Industrie, Gewerbe, Haushalte und Verkehr, zu untersuchen. Dies erfolgte in mehreren Projekten, die vom PEF gefördert wurden [6, 7, 8].



**Abb. 7:** Kostenkurve der Minderung von SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg für das Jahr 2000, ausgehend vom Falle ohne Emissionsminderungsmaßnahmen

Abb. 7 zeigt ein zusammenfassendes Ergebnis der Analysen für alle Emittentengruppen. Dargestellt ist die Kostenkurve der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionsminderung für Baden-Württemberg. Diese stellt für das Jahr 2000 den Zusammenhang zwischen den verschiedenen möglichen Emissionsniveaus und den bei Durchführung der optimalen zugehörigen Strategie aufzuwendenden Kosten, also den mindestens aufzuwendenden Kosten dar.

Während in den vorher gezeigten sektoralen Ergebnissen SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> noch getrennt untersucht wurden, erfolgt hier eine simultane Betrachtung.

Eine getrennte Analyse von einzelnen Schadstoffen hat insofern Grenzen, als es viele Maßnahmen gibt, die simultan mehrere Schadstoffe mindern, z.B. eine Brennstoffumstellung oder ein Drei-Weg-Katalysator, und Maßnahmen zur NO<sub>x</sub>- und SO<sub>2</sub>-Minderung sich ggf. gegenseitig ausschließen können. Die Behandlung von Maßnahmen, die mehrere Schadstoffe mindern, ist zwar auch bei getrennter Schadstoffanalyse möglich, indem man jeweils Gut-schriften für die Minderungen anderer Schadstoffe in Rechnung stellt, dabei kann jedoch nicht verhindert werden, daß es zu inkonsistenten Lösungen für verschiedene Schadstoffe kommt: z. B. könnte die SO<sub>2</sub>-Analyse eine Umstellung auf Erdgas als sinnvolle Maßnahmen ergeben, die NO<sub>x</sub>-Optimierung aber den Einsatz einer SCR-Anlage ohne Brennstoffumstellung. Aus diesen Gründen ist eine simultane Betrachtung der Minderung aller Schadstoffe vorzuziehen.

Dabei müssen jedoch, um zu einem einheitlichen Bewertungsmaßstab zu kommen, die umweltseitigen Wirkungen der betrachteten Luftschadstoffe vergleichbar gemacht werden. Als Anhaltspunkt für diese Festlegung wurden hier die Langzeitgrenzwerte für Immissionen nach der TA Luft herangezogen. Dies kann sicher nur als erster Ansatz befriedigen; fundiertere Schädlichkeitsrelationen lassen sich aber leicht berücksichtigen, wenn solche vorliegen. Als Grundeinheit zur Beschreibung der Emissionen wird somit ein kg Schadstoffäquivalent (SÄQ) verwendet, dieses entspricht hier einem kg SO<sub>2</sub> oder 0,571 kg NO<sub>x</sub>.

Die Kostenfunktion stellt nun, ausgehend vom fiktiven Fall ohne Emissionsminderungsmaßnahmen dar, welches Emissionsniveau mit welchem Kostenaufwand im Jahr 2000 zu erreichen ist. Ausgangswert sind die Emissionen, die für eine Referenzentwicklung der Energieversorgung im Jahr 2000 entstehen würden, wenn nach 1985 keine Emissionsminderungsmaßnahmen mehr durchgeführt würden. Sie betragen 885 kt SÄQ im Jahr 2000 und setzen sich zusammen aus 240 kt SO<sub>2</sub> und 368 kt NO<sub>x</sub> (= 644 kt SÄQ aus NO<sub>x</sub>).

Für die Minderung der ersten 10 % der Schadstoffemissionen sind 75 Mio DM/a aufzuwenden. Eine Minderung um 20 % verursacht bereits Kosten von 266 Mio DM/a, bei 30 % sind es 530 Mio DM/a. Zur Halbierung der Emissionen bedarf es eines Betrags von 1,2 Mrd DM/a. Mit den im Rahmen dieser Untersuchungen betrachteten Minderungsmöglich-

keiten in den verschiedenen Emittentenbereichen läßt sich eine Emissionsminderung um 60 % auf ein Emissionsniveau von 360 kt SÄQ erreichen. Dabei würden Kosten von 2,2 Mrd DM/a entstehen.

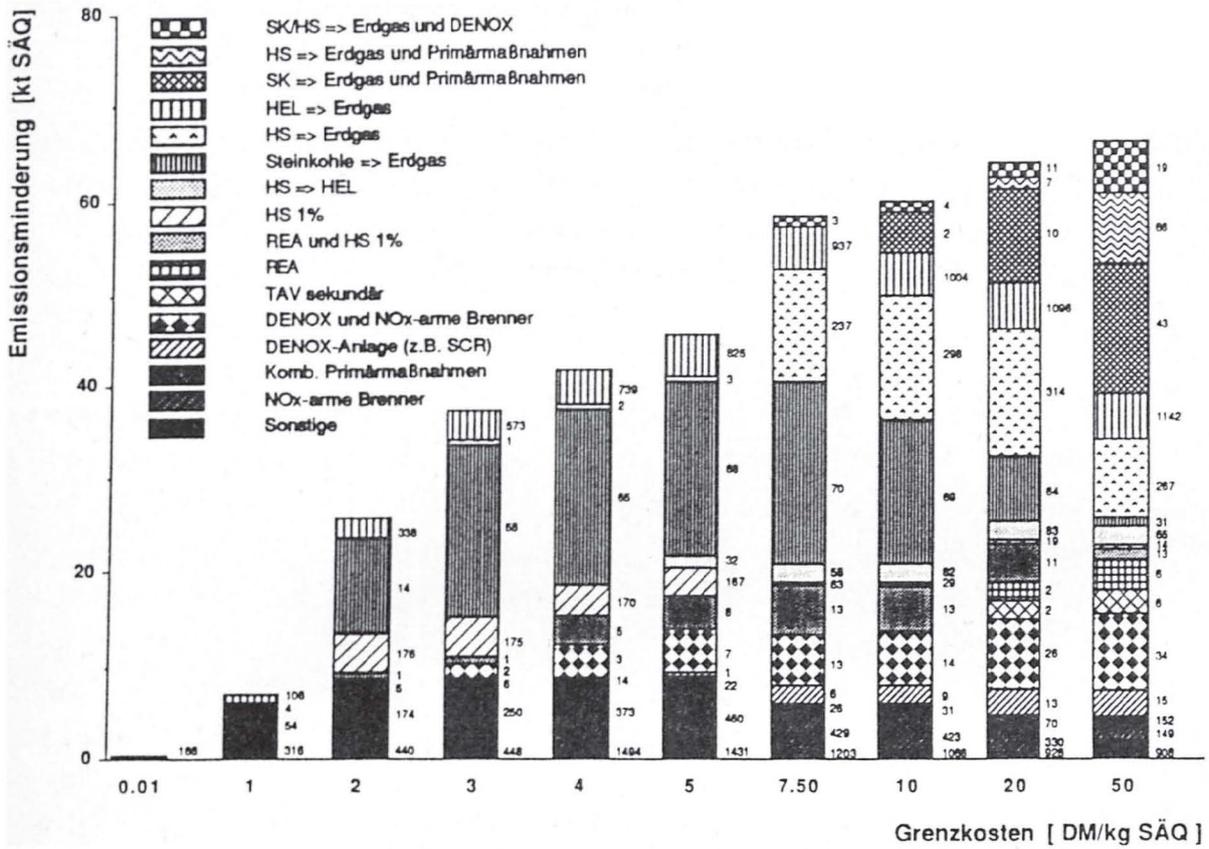
Bei maximaler Minderung werden die SO<sub>2</sub>-Emissionen um 84 %, die NO<sub>x</sub>-Emissionen dagegen nur um 51 % gemindert. Nur ganz zu Beginn der Kostenkurve werden zunächst prozentual mehr NO<sub>x</sub>- als SO<sub>2</sub>-Emissionen gemindert, da hier einige besonders kostengünstige Primärmaßnahmen zur NO<sub>x</sub>-Minderung verfügbar sind. Danach liegt die prozentuale SO<sub>2</sub>-Minderung stets weit über der NO<sub>x</sub>-Minderung. Dies hat zwei Gründe:

- Zum einen lassen sich SO<sub>2</sub>-Emissionen durch Einsatz von Erdgas, das weitgehend schwefelfrei ist, bei vertretbaren Kosten ganz vermeiden. Da aber auch Erdgasfeuerungen NO<sub>x</sub> emittieren, sind vergleichbar effektive Minderungsmaßnahmen beim NO<sub>x</sub> nicht vorhanden.
- Zweitens resultiert ein beachtlicher Teil der NO<sub>x</sub>-Emissionen aus Quellen, wie z. B. dem Diesel- Pkw und den Lastkraftwagen, für die derzeit wirkungsvolle technische Minderungsmaßnahmen nicht verfügbar sind. Beides begrenzt die Möglichkeiten zur NO<sub>x</sub>-Minderung erheblich.

Jeder Punkt auf der Kostenkurve repräsentiert eine Vielzahl von Emissionsminderungsmaßnahmen in den verschiedenen Emittentenbereichen, die in ihrer Summe das optimale Maßnahmenbündel zur Erreichung der jeweiligen Emissionsminderung bilden.

Sie können hier im einzelnen nicht diskutiert werden. Beispielhaft herausgegriffen sei die Gruppe der "sonstigen genehmigungsbedürftigen Anlagen", die alle gemäß 4. BImSchV genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen mit Ausnahme der getrennt behandelten Kraftwerke, Raffinerien und Feuerungen für die Kochereiabwasserkonzentrate in der Papierindustrie umfaßt. Für diese Gruppe werden die zur Erreichung unterschiedlicher Emissionsreduzierungen einzusetzenden kosteneffizienten Maßnahmen genauer betrachtet. Abb. 8 zeigt für steigende Grenzkosten der Schadstoffminderung die jeweils anzuwendenden Minderungsmaßnahmen bzw. -maßnahmengruppen, die jeweils betroffene Zahl von Feuerungsanlagen sowie die erreichbare Emissionsminderung. Die hier dargestellten Maßnahmenbündel sind einzelnen Punkten der Gesamtkostenfunktion direkt zugeordnet.

Die Darstellung macht deutlich, daß sich mit steigender Emissionsminderung bzw. mit steigenden Grenzkosten das optimale Maßnahmenbündel verändert.



**Abb. 8:** Emissionsminderung und eingesetzte Maßnahmen für die Emittentengruppe "Sonstige genehmigungsbedürftige Anlagen"

Der Substitution von Steinkohle und Heizöl durch Erdgas kommt eine besondere Bedeutung für die Minderung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen bei den sonstigen genehmigungsbedürftigen Anlagen zu. Rauchgasentschwefelungsanlagen gehören nur dann zum optimalen Maßnahmenkatalog, wenn hohe Emissionsminderungen erreicht werden sollen und werden nur an wenigen Feuerungsanlagen, insbesondere an Schwerölfeuerungen mit einer hohen Auslastung eingesetzt.

Die im Rahmen der Analyse effizienter SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Minderungsstrategien erarbeiteten Ergebnisse können auch zur Bewertung der derzeit verfolgten Luftreinhaltepolitik herangezogen werden, indem ihre zu erwartenden Emissionsminderungen und Kosten mit denen der optimalen Strategie verglichen werden.

Die gegenwärtig gültigen gesetzlichen Regelungen zur Minderung bzw. Begrenzung von SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen würden in Baden-Württemberg im Jahr 2000 gegenüber einem fiktiven Fall ohne weitere Minderungsmaßnahmen zu einer Emissionsreduktion von 350 kg SÄQ/a

führen, was einer Reduktion der SO<sub>2</sub>-Emissionen von 149 kt/a und der NO<sub>x</sub>-Emissionen von 115 kt/a entspricht. Der jährliche Kostenaufwand für diese Emissionsminderung der derzeitigen auflagenorientierten Luftreinhaltepolitik betrüge rd. 1 Mrd DM.

Trägt man diesen Punkt in die Abbildung der Kostenfunktion der kosteneffizienten Minderungsstrategien ein (siehe Abb. 7), so zeigt sich, daß mit einer optimalen Emissionsminderungsstrategie - die in der Praxis wohl nie ganz zu realisieren sein wird - dieselbe Minderung mit einem um 200 Mio DM/a geringeren Kostenaufwand erreicht werden könnte. Alternativ wäre bei gleichem Kostenaufwand eine um 15 % höhere Emissionsminderung zu erzielen.

Vergleicht man die Maßnahmen der kosteneffizienten Strategie mit denen der derzeitigen Auflagenpolitik, so ergeben sich wesentliche Unterschiede im Hinblick auf

- die Verwendung NO<sub>x</sub>-armer Brenner in kleineren Feuerungsanlagen z.B. in Hausheizungen,
- den Ersatz von Kohle durch leichtes Heizöl und Erdgas bei kleinen Feuerungsanlagen sowie
- den Einsatz von Rauchgasentschwefelungsanlagen bei mit Kohle oder schwerem Heizöl gefeuerten genehmigungsbedürftigen Anlagen mittlerer Leistung.

Ergänzend sei noch erwähnt, daß sich aus der Gesamtkostenfunktion der Schadstoffminderung auch die Höhe einer Abgabe oder Steuer ableiten läßt, die bei einem funktionierenden Markt notwendig wäre, um ein bestimmtes Emissionsminderungsniveau zu erreichen. Zur Erreichung der gleichen Emissionsminderung wie durch die derzeitige auflagenorientierte Luftreinhaltepolitik, wären Abgaben bzw. Steuern in Höhe von 3,50 DM/kg SO<sub>2</sub> und 6,20 DM/kg NO<sub>x</sub> zu erheben.

#### 4 Neue Aufgaben und methodische Weiterentwicklungen

In den bisherigen Ausführungen wurde versucht, deutlich zu machen, daß trotz der bestehenden Wissensdefizite hinsichtlich der Dosis-Schadensbeziehungen verschiedener luftgetragener Schadstoffe, eine auf dem Kosten-Effektivitäts-Ansatz aufbauende systematische Analyse der Emissionsminderungsmöglichkeiten wesentliche Hilfen für die Ausgestaltung einer effizienten Luftreinhaltestrategie bereitstellen kann, die auch für die Praxis von Bedeutung sind. Darüberhinaus sollten die diskutierten Beispiele und Ergebnisse einen Eindruck über die in Baden-Württemberg bestehenden Möglichkeiten der Emissionsminderung und den damit verbundenen Kosten vermitteln, ohne daß wichtige Teilaspekte ausführlich dargelegt werden oder die methodischen bzw. datenseitigen Defizite ausreichend problematisiert werden konnten. Der historischen Entwicklung in den Bemühungen zur Luftreinhaltung folgend,

konzentrierten sich die bisherigen Ausführungen auf die Schadgase  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_x$ . Diese standen unter den Gesichtspunkten der zunehmenden Boden- und Gewässerversauerung, des Auftretens neuartiger Waldschäden, und einer zunehmenden Schädigung der Bausubstanz lange Zeit im Mittelpunkt der Luftreinhaltepolitik.

Mit fortschreitendem Kenntnisstand in der Atmosphärenchemie, der Wirkungsforschung sowie in der Klimaforschung wurde jedoch deutlich, daß weitere Luftschadstoffe und anthropogene Spurengasfreisetzungen als besonders umweltrelevant einzuordnen sind.

Dazu gehören vor allem die flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) und die sog. Treibhausgase wie z. B. das Kohlendioxid. Die mit diesen Schadstoffen angesprochenen Problemfelder stellen nicht nur neue Herausforderungen für die Umweltpolitik, sondern ebenso für diejenigen dar, die sich mit der Erarbeitung rationaler Entscheidungshilfen, wie z.B. von effizienten Luftreinhaltestrategien befassen. Abschließend sollen deshalb einige künftig anstehende Aufgabengebiete kurz umrissen werden.

Der oft verwendete Sammelbegriff VOC umfaßt eine große Zahl von Substanzen die unterschiedlichste physikalische und chemische Eigenschaften aufweisen. Demzufolge kann die Freisetzung dieser Substanzen in die Atmosphäre sehr unterschiedliche Auswirkungen nach sich ziehen, so z.B.

- Gesundheitsgefährdungen durch kanzerogen wirkende Verbindungen wie z. B. Benzol,
- die Beeinflussung des Klimas z.B. durch Methan und Fluorchlorkohlenwasserstoffe,
- den Abbau der stratosphärischen Ozonschicht (Ozonloch) unter dem Einfluß langlebiger Halogenkohlenwasserstoffe sowie
- die Bildung sekundärer Luftschadstoffe wie Ozon und anderen Photooxidantien in der Troposphäre unter Mitwirkung reaktiver VOC. Hohe Photooxidantien-Konzentrationen gelten als Mitverursacher der Waldschäden und können zu Gesundheitsbeeinträchtigungen führen. Darüberhinaus ist Ozon eine klimarelevante Spurengas.

Hinzu kommt, daß die VOC-Emissionen einem weitaus größeren Spektrum von Emissionsquellen entstammen, als das bei  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_x$  der Fall ist, die im wesentlichen im Zusammenhang mit der Energienutzung entstehen.

Tab. 2 zeigt eine nach Emittentengruppen aufgeschlüsselte Abschätzung der VOC-Emissionen in Baden-Württemberg für das Jahr 1985 [9]. Für die betrachteten Emittentbereiche ergeben sich nach dieser Aufstellung Gesamtemissionen in Höhe von ca. 455 kt/a. Dabei ist der Straßenverkehr, wie im Falle der  $\text{NO}_x$ -Emissionen, als bedeutendste VOC-Quelle anzuse-

hen. Rechnet man die Verdunstungsverluste von Benzin hinzu, belaufen sich die durch den Straßenverkehr verursachten VOC-Emissionen auf rd. 170 kt/a. Ein weiterer wichtiger Sektor ist die Anwendung von Lösemitteln bzw. lösemittelhaltigen Produkten. Durch die Anwendung von Anstrichmitteln, Druckfarben, Reinigungs- und Entfettungsmitteln, Spraydosen und sonstigen lösungsmittelhaltigen Produkten wurden 1985 in Baden-Württemberg rd. 110 kt flüchtiger organischer Verbindungen emittiert. Mengenmäßig ebenfalls bedeutsam sind die Methan-Emissionen aus der Gasverteilung, aus Mülldeponien sowie aus der Tierhaltung.

**Tabelle 2:** Abgeschätzte jährliche VOC-Emissionen in Baden-Württemberg im Jahr 1985

Emissionenbereich	VOC-Emissionen	
	kt/a	%
<b>Stationäre Feuerungen</b>	<b>15.2</b>	<b>3.3</b>
- Kraftwerke, Müllverbrennung etc.	1.0	
- Industrie	2.5	
- Haushalte/Kleinverbraucher	11.7	
<b>Straßenverkehr</b>	<b>153.2</b>	<b>33.7</b>
- Abgase	115.6	
- Benzinverdunstung aus Kfz	37.6	
<b>Prozess-Emissionen (ohne Feuerung)</b>	<b>169.0</b>	<b>37.1</b>
- Lösungsmittel	113.5	
- Benzinumschlag	12.7	
- Raffinerien	4.7	
- Chemische Industrie	1.1	
- Herst. von Spanplatten	0.5	
- Herst. von Wein, Bier, Spirituosen	0.5	
- Gasverteilungsnetz	26.0	
- Mülldeponien	10.0	
<b>Sonstige (biogene) Quellen</b>	<b>118.0</b>	<b>26.0</b>
- Wiederkäuer	70.0	
- Nadel- und Laubwälder	48.0	
<b>Summe</b>	<b>ca. 455.0</b>	<b>100.0</b>

Die große Zahl von flüchtigen organischen Verbindungen mit sehr unterschiedlichen Umweltwirkungen sowie die heterogenen Emittentenbereiche stellen neue Anforderungen an die Erarbeitung effizienter Minderungsstrategien, die methodisch erweiterter Analyseansätze bedürfen. Erwähnt sei in diesem Zusammenhang nur die Ozonproblematik.

Aufgrund der komplexen und nichtlinearen Zusammenhänge zwischen der Ozonkonzentration und der Emission von Vorläufersubstanzen, zu denen auch die reaktiven VOC zählen, bedeutet eine Minderung der jährlichen Emissionen an Vorläufersubstanzen nicht gleichzeitig auch eine entsprechende Verminderung der mittleren Ozonkonzentration oder gar der Konzentrationsspitzen. Eine räumlich differenzierte Betrachtung der Emissionen sowie ihres zeitlichem Verlaufes erscheint hier notwendig. Darüber hinaus ist die Weiterentwicklung der Emissionsminderungsanalysen zu einer Immissionsminderungsbetrachtung erforderlich.

Obwohl für Teilbereiche der VOC-Emissionen bereits Emissionsminderungsvorschriften erlassen wurden bzw. seitens des Gesetzgebers dazu konkrete Absichten bestehen, fehlt es bislang an einem umfassenden Minderungskonzept für VOC.

Die Landesregierung von Baden-Württemberg hat kürzlich eine Kommission "Konzeption zur Minderung der VOC-Emissionen in Baden-Württemberg" mit dem Auftrag eingesetzt, Strategien für eine effiziente Minderung der VOC-Emissionen in Baden-Württemberg zu erarbeiten. Wie die früheren Kommissionen zur Erarbeitung von Luftreinhaltekonzepten, setzt sich auch diese aus Vertretern von Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung zusammen.

Auch über den Treibhauseffekt und das Klimaproblem ist in den letzten Monaten außerordentlich viel, man könnte den Eindruck haben, nahezu alles gesagt worden. Bei näherem Hinsehen stellt sich aber heraus, daß die Vorstellungen über die einzuleitenden Maßnahmen zur Begrenzung oder Verminderung der Treibhausgasemissionen noch wenig konkret und oft überhaupt nicht vorhanden sind. Ganz zu schweigen von einem Gesamtkonzept oder einer Gesamtstrategie, die der Dimension dieses Problems gerecht würde.

Anhand einiger Zahlenbeispiele sei im folgenden die Dimension des Problems und die Größe des Handlungsbedarfes verdeutlicht, die auf die Energie- und Umweltpolitik zukommt, wenn die im großen Konsens von den Klimaforschern vorgebrachten Warnungen ernst genommen werden.

Der Beitrag der Energieversorgung zum weltweiten anthropogenen Treibhauseffekt wird gegenwärtig auf fast 50 % geschätzt. Das wichtigste Treibhausgas ist CO<sub>2</sub>, mit einem Anteil von rd. 55 % am Treibhauseffekt in der letzten Dekade.

Um die Klimaänderungen und ihre Konsequenzen auf ein tolerierbares Maß zu begrenzen, hat die Weltkonferenz "The Changing Atmosphere" von Toronto gefordert, die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 um 20 % und bis zum Jahr 2050 um 50 % gegenüber dem Niveau des Jahres 1987 zu reduzieren, und die zweite Weltklimakonferenz von Genf wies im November letzten Jahres darauf hin, daß es notwendig wäre, die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen kontinuierlich um 1 % pro Jahr zu reduzieren, um bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts den Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration auf ein Niveau zu begrenzen, das 50 % über dem der vorindustriellen Zeit liegt. In ähnlicher Weise sind auch die Freisetzungen der anderen Treibhausgase zu vermindern.

Was aber bedeuten diese globalen Minderungsziele für die einzelnen Staaten? Welche Emissionsminderungen für Treibhausgase resultieren daraus für die Bundesrepublik Deutschland und Baden-Württemberg, damit sie ihren Beitrag zur Erreichung der globalen Ziele leisten?

Einen allgemein akzeptierten Schlüssel zur Ableitung nationaler Treibhausgasminderungsziele gibt es bisher nicht. Angesichts des Faktums, daß die energiebedingte Freisetzung von Treibhausgasen in der Vergangenheit nahezu ausschließlich durch die Industrieländer erfolgt ist, die auch heute noch für rund 75 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich sind, werden sie den Hauptbeitrag zur Emissionsminderung leisten müssen.

Eine erste Orientierung über die Größenordnung der CO<sub>2</sub>-Reduktion in unserem Land, um die zuvor genannten globalen Minderungsziele zu erreichen, mag die folgende einfache Überlegung geben. Nach der Toronto-Konferenz-Forderung wären die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Jahres 1987 in Höhe von rd. 20,5 Mrd t/a bis zum Jahr 2005 auf rd. 16,4 Mrd t/a und bis 2050 auf 10,25 Mrd t/a zu verringern. Bei einer Weltbevölkerung von rd. 6,5 Mrd. Menschen im Jahr 2005 und rd. 10 Mrd Menschen im Jahr 2050 würden diese Minderungsziele bedeuten, daß im Weltdurchschnitt jeder Erdenbürger dann 2,5 bzw. 1 t CO<sub>2</sub> pro Jahr durch die Nutzung fossiler Energieträger freisetzen dürfte.

In der Bundesrepublik Deutschland betragen die CO<sub>2</sub>-Emissionen je Einwohner im Jahr 1987 rd. 12 t, in der ehemaligen DDR rd. 21 t und in Baden-Württemberg rd. 8 t [10]. Gleiches Emissionsrecht vorausgesetzt, müßten wir also unsere CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2005 um weit mehr als 50 % und bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts um mehr als 90 % reduzieren. Diese Zahlen mögen zum einen die Dimension der notwendigen Umstrukturierung unserer vornehmlich auf fossilen Energieträgern beruhenden Energieversorgung zur Verwirklichung eines klimaverträglichen Energiesystems umreißen und zum anderen andeuten, mit welchen Reduktionsforderungen an die Industrieländer, z. B. von Seiten der Entwicklungsländer, im Rahmen der bevorstehenden internationalen Verhandlungen zur Vereinbarung einer Konvention über den Schutz der Erdatmosphäre zu rechnen ist.

Unter Berücksichtigung der berechtigten Belange der Entwicklungsländer läßt sich aber absehen, daß die von der Bundesregierung angestrebte Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 25 % bis zum Jahr 2005 bzw. die von der Enquete-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" geforderte Reduktion um 30 % nicht ausreichen werden, um die weltweiten Zielvorgaben der Toronto-Konferenz zu erreichen.

Eine zur Vermeidung nicht tolerierbarer Klimaveränderungen notwendige grundlegende Umstrukturierung der Energieversorgung wird, gerade aus der Sicht der Länder der Dritten Welt, wohl nur dann zu erreichen sein, wenn die damit verbundenen Aufwendungen und Friktionen verkraftbar sind. Aus diesem Grund gewinnen kosteneffiziente CO<sub>2</sub>-Reduktionsmaßnahmen ihre große Bedeutung.

Tab. 3 zeigt, daß die spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten verschiedener prinzipiell verfügbarer Reduktionsmaßnahmen über einen weiten Bereich streuen, was aber nichts anderes heißt, als daß mit demselben Kostenaufwand je nach durchgeführter Maßnahme nur eine geringe oder auch eine umfangreiche Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes erreicht werden kann.

**Tab. 3:** Spez. CO<sub>2</sub>-Minderungskosten verschiedener Maßnahmen

Maßnahme	[DM/t CO <sub>2</sub> ]
<b>Wärmedämmung</b>	
- Schwedenstandard	0 bis + 90
- Niedrigenergiehaus	+ 220
<b>Stromerzeugung</b>	
- Braunkohle durch Erdgas ersetzt	+ 23
- Steinkohle <sup>1)</sup> durch Erdgas ersetzt	+ 11
- Braunkohle durch Kernenergie ersetzt	- 5
- Steinkohle <sup>1)</sup> durch Kernenergie ersetzt	- 10
- Kohle durch Windenergie ersetzt	+ 40 bis + 150
- Kohle durch Photovoltaik ersetzt	+ 220 bis + 290
<b>Sonstige</b>	
- Solarkollektoren	- 90 bis + 860
- Äthanol aus Biomasse	+ 420 bis + 800
- Wasserstoff als Substitut für Kohle, Öl und Gas	+ 300 bis + 530 <sup>2)</sup>
<sup>1)</sup> ermittelt auf der Basis der Importkohlepreise	
<sup>2)</sup> ermittelt auf der Basis der Herstellkosten	

Für die bevorstehende Erarbeitung regionaler, nationaler wie internationaler Strategien zur Treibhausgasminderung wird deshalb das Kosteneffizienzkriterium ein zentraler Aspekt im Rahmen einer umfassenden Analyse und Bewertung der Vor- und Nachteile unterschiedlicher Treibhausgasminderungsmöglichkeiten sein.

Gerade die in Baden-Württemberg gemachten Erfahrungen zeigen, daß sorgfältig durchgeführte Kosten-Effektivitäts-Analysen brauchbare Entscheidungshilfen für eine rationale Luftreinhaltepolitik bereitstellen können. Die bisher verfügbaren methodischen Ansätze, die auf die Identifizierung effizienter Emissionsminderungsstrategien ausgerichtet sind, sind verbesserungs- und erweiterungsfähig. Dies erlaubt es, sie auch für die neuen Aufgaben und Herausforderungen, die sich der Umweltpolitik stellen, wie z. B. die Minderung der VOC-Emissionen und die Klimaproblematik, anzuwenden. Mit der Schließung der Wissenslücken über die Zusammenhänge von Luftschadstoffemissionen und daraus resultierenden Umweltschäden lassen sich ihre Aussagemöglichkeiten auch in Richtung auf umfassende Kosten-Nutzen-Analysen umweltrelevanter Maßnahmen erweitern.

Auch wenn es bis dahin noch ein langer Weg sein mag, bleibt festzustellen, daß die heute verfügbaren systemanalytischen Ansätze sachbezogene und fundierte Entscheidungshilfen für die Bewältigung der bevorstehenden Aufgaben bereitstellen können, um das ökologisch Notwendige zum Schutz der Umwelt und der Erdatmosphäre ökonomisch effizient zu gestalten, und damit überhaupt erst realisierbar zu machen.

#### Literatur:

- [1] L. Wicke:  
Umweltökonomie: eine praxisorientierte Einführung.  
München: Verlag Franz Vahlen GmbH, 1989
  
- [2] D. Teufel, P. Bauer, G. Beker, E. Gauch, S. Jäkel, Th. Wagner:  
Ökologische und soziale Kosten der Umweltbelastung in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1989.  
Umwelt- und Prognose-Institut Heidelberg e.V.,  
UPI-Bericht Nr. 20, Januar 1991
  
- [3] Staatsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.):  
Bericht der Arbeitsgruppe "Energiebedarf - Umwelt - Kraftwerksbetrieb" Stuttgart,  
1983

- [4] **Staatsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.):  
Bericht der Kommission "Minderung von Stickoxiden aus Kohlekraftwerken in  
Baden-Württemberg, Stuttgart, 1984**
- [5] **Staatsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.):  
Bericht der Arbeitsgruppe "Wirtschaftliche Entwicklung - Umwelt - Industrielle  
Produktion" Stuttgart, 1986**
- [6] **Voß, A. et al.:  
Kosten-Effektivitäts-Analyse von Maßnahmen zur Reduzierung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-  
Emissionen in Ballungsräumen am Beispiel der Stadt Stuttgart  
KfK-PEF 27, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1987**
- [7] **Boysen, B.; Mattis, M.; Friedrich, R.; Voß, A.:  
Kosten-Effektivitäts-Analyse von Maßnahmen zur Minderung von SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-  
Emissionen für alle Emittentengruppen unter besonderer Berücksichtigung regionaler  
Aspekte  
KfK-PEF 54, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1987**
- [8] **Friedrich, R.; Boysen, B.; Fahl, U.; Mattis, M.; Voß, A.:  
Untersuchung von umweltpolitischen Instrumenten zur Luftreinhaltung  
KfK-PEF 50, Kernforschungszentrum Karlsruhe, S. 805-815, 1989**
- [9] **Obermeier, A.; Friedrich, R.; John, C.; Voß, A.:  
Zeitlicher Verlauf und räumliche Verteilung der Emissionen von flüchtigen organi-  
schen Verbindungen und Kohlenmonoxid in Baden-Württemberg  
KfK-PEF 78, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1991**
- [10] **A. Voß:  
Energie und Klima: Ist eine klimaverträgliche Energieversorgung erreichbar?  
BWK, Bd. 43 (1991) Nr. 1/2, S. 19 - 31.**