KOSTEN-EFFEKTIVITÄTS-ANALYSEN ALS GRUNDLAGE PRAKTISCHER UMWELTPOLITIK

Alfred Voß, Albrecht Reuter
Universität Stuttgart
Institut für Kernenergetik
und Energiesysteme (IKE)

1 Einleitung

Negative Effekte ökonomischer Aktivitäten auf die Umwelt und Natur, oder anders ausgedrückt, Probleme im Zusammenhang mit der Nutzung der öffentlichen Güter Natur und Umwelt, sind ja keineswegs neu, sondern sie haben die Entwicklung der Menschheit seit jeher begleitet. So z. B. finden sich bereits in der römischen Gesetzgebung Vorschriften zur Reinhaltung der Gewässer. Die Nutzung von Energie in ihren verschiedenen Formen war dabei immer eine der Hauptquellen der Natur- und Umweltbelastung.

Das gegenwärtig verstärkte öffentliche und politische Interesse an Umweltfragen steht zweifelsohne in einem engen Zusammenhang mit dem sogenannten Waldsterben oder besser gesagt mit den 'neuartigen' Waldschäden, die seit Ende des letzten Jahrhunderts mit großer geographischer Verbreitung und rasch fortschreitend aufgetreten sind.

Trotz einer erheblichen Verstärkung der Anstrengungen zur Erforschung der Ursachen der Waldschäden ist bis heute letztlich nicht geklärt, welche Faktoren oder Faktorkomplexe und Mechanismen die neuartigen Waldschäden verursachen. Eine Vielzahl von Schadenshypothesen wurden und werden diskutiert und wissenschaftlich untersucht. Sie reichen von den verschiedenen Luft-

schadstoffen über die Beteiligung von Viren, Bakterien, Mycoplasmen bis hin zu waldbaulichen Fehlern und Klimaeinflüssen.

Was die Luftschadstoffe angeht, so konzentrierte sich die Ursachendiskussion zunächst darauf, daß die Schadwirkungen vor allem über den Weg einer Versauerung des Bodens durch Belastung mit Schwefeldioxid über die direkten Wirkungen des Schwefeldioxids auf die Pflanzen erfolgt. In jüngster Zeit wird nun der Hypothese, daß Stickoxide und Kohlenwasserstoffe, als Ausgangssubstanzen für sekundäre Schadstoffe wie Ozon und andere Photooxidantien, ein wesentlicher verursachender Faktor für die Waldschäden sein können, verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt.

Trotz der noch bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich der Ursache-Wirkungsbeziehungen stellt der Forschungsbeirat "Waldschäden/Luftverunreinigungen" fest, daß Erklärungshypothesen, die von Luftschadstoffen völlig absehen, nicht zu belegen waren und daß Luftschadstoffe und ihre Umwandlungsprodukte eine wesentliche Ursache der neuartigen Waldschäden sind.

Bei nüchterner Betrachtung des gegenwärtigen Standes des Wissens über die Ursachen der neuartigen Waldschäden kommt man nicht umhin festzustellen, daß die Kenntnisse, die die Wissenschaft der Politik und der Wirtschaft für die Umsetzung in konkrete rationale Handlungen anbieten kann, wenig brauchbar sind. Insbesondere gibt es keine gesicherten Kenntnisse über mögliche Toleranzschwellen der Schadstoffe, die als Verursacher der neuartigen Waldschäden angesehen werden.

Auf der anderen Seite weisen die Waldschadenserhebungen auf einen dringenden Handlungsbedarf hin und die politisch Verantwortlichen sahen und sehen sich einem Handlungszwang ausgesetzt, der durch eine öffentliche Meinung verstärkt wird, die davon überzeugt ist, daß der deutsche Wald in Gefahr ist.

Deutliche Reduzierungen der Emissionen luftgetragener Schadstoffe erfordern Investitionen in Milliardenhöhe und werden über

ihre Kostenwirkungen die Wettbewerbssituation der Energieträger verändern.

In Anbetracht der bestehenden Wissenslücken, der hohen Kosten von Umweltschutzmaßnahmen und des bestehenden politischen Handlungsbedarfs sind rationale Entscheidungshilfen für die Fundierung einer effizienten Umweltschutzpolitik von besonderer Bedeutung. Im folgenden soll am Beispiel von Baden-Württemberg und der Schadstoffe SO_2 und NO_x aufgezeigt werden, welchen Beitrag Kosten-Wirksamkeits-Analysen mittels der heute verfügbaren Energiemodelle zur Identifizierung effizienter umweltpolitischer Maßnahmen leisten können. Auf die praktischen Erfahrungen der Einbindung derartiger systemanalytischer Instrumente in den umweltpolitischen Diskussions- und Entscheidungsprozeß wird am Ende kurz eingegangen.

2 Einige Methodische Anmerkungen

Ziel einer effizienten Umweltpolitik muß es sein, die gewünschten Umweltziele mit einem möglichst geringen volkswirtschaftlichen Aufwand zu erreichen. Voraussetzung hierfür wäre zum einen eine quantitative Vorgabe der Umweltziele, z.B. der gewünschten oder tolerierbaren Schäden durch oder der Immissionskonzentrationen von luftgetragenen Schadstoffen, sowie zum anderen eine genaue Kenntnis der technischen und anderen Möglichkeiten, ihre Wirkungen und Kosten, zur Erreichung der Umweltziele.

Normalerweise würde man die umweltpolitischen Entscheidungen und Maßnahmen einer effizienten Umweltschutzpolitik mittels einer umfassenden Kosten-Nutzen-Analyse ermitteln, welche den Nutzen, d. h. die Schadensreduktion den Kosten der jeweiligen Maßnahmen gegenüberstellt. Im Prinzip ließe sich dabei über eine Grenzkosten- und Grenznutzenbetrachtung auch das wirt-

schaftlich optimale Ausmaß der Reduzierung der Umweltbelastung ermitteln.

Derartig umfassende Kosten-Nutzen-Analysen sind aber derzeit nicht durchführbar, da zum einen die Dosis-Wirkungsbeziehungen der verschiedenen Schadstoffe nicht bekannt sind, und zum anderen sich die Schäden oft gar nicht oder nur unzureichend quantifizieren lassen, wie z. B. ein durch die Waldschäden zurückgehender Erholungswert des Waldes.

Anders als eine Kosten-Nutzen-Analyse ermittelt eine Kosten-Wirksamkeits-Analyse die Kosteneffektivität alternativer Maßnahmen oder Technologien zur Reduzierung der Umweltbelastung, worunter z. B. der Kostenaufwand je nicht emittierter Schadstoffeinheit zu verstehen ist. Für die später betrachteten Maßnahmen zur Minderung der SO_2 - und NO_x -Emissionen aus energietechnischen Anlagen läßt sich die Kosten-Wirksamkeit mittels der spezifischen Minderungskosten, definiert als Kosten zur Vermeidung des Ausstoßes eines kg SO_2 oder NO_x beschreiben. Ziel einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse ist es damit, aus den vielfältigen technischen und organisatorischen Möglichkeiten zur Reduzierung von Schadstoffemissionen diejenigen auszuwählen, die eine angestrebte Minderung der Emissionen mit dem geringsten Kostenaufwand erreichen. Eine Reihung alternativer Emissionsminderungsmaßnahmen nach steigenden spezifischen Minderungskosten ergibt dann eine Gesamtkostenfunktion dieses Schadstoffes. Diese beschreibt den kostenoptimalen, d. h. kosteneffizienten Weg zur Minderung des Ausstoßes dieses Schadstoffes. In der praktischen Anwendung dieser methodisch einfachen Vorgehensweise treten jedoch dann Schwierigkeiten auf, wenn die spezifischen Minderungskosten einer Maßnahme zeitvariabel sind, oder wenn eine Maßnahme simultan die Emissionen verschiedener Schadstoffe reduziert.

Um die komplexen Zusammenhänge des Energieversorgungssystems und den von ihm ausgehenden Emissionen Rechnung zu tragen, werden Kosten-Wirksamkeits-Analysen zur Emissionsminderung in der Regel mit der Hilfe von Simulations- oder Optimierungsmo-

dellen des Energiesystems durchgeführt. Simulationsmodelle erlauben dabei in der Regel eine detaillierte Abbildung des Energieversorgungssystems, während Optimierungsmodelle eine direkte Ermittlung der Gesamtkostenfunktion ermöglichen sowie die durch die Kosten der Emissionsminderung induzierten Substitutionseffekte zwischen den Energieträgern und Energietechniken mitefassen. Im folgenden werden nun die Ergebnisse einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse von Maßnahmen zur Reduzierung von SO_2 - und NO_x -Emissionen erläutert.

3 Kosteneffiziente SO_2 - und NO_x -Emissionsminderung in Baden-Württemberg

Die Landesregierung von Baden-Württemberg hat in den Jahren 1983 bis 1986 drei Kommissionen beauftragt, ein gleichermaßen die Umwelt- und ökonomischen Belange berücksichtigendes Konzept für die Reduktion der SO_2 - und NO_x -Emissionen aus energietechnischen Anlagen in Baden-Württemberg zu erarbeiten [1, 2, 3]. In den Kommissionen haben die betroffenen Ressorts der Landesregierung, die Regierungspäsidien, die Anlagenbaufirmen, die betroffenen Wirtschaftsbereiche sowie Vertreter der Wissenschaft mitgearbeitet. Gemäß Aufgabenstellung mußte es das primäre Ziel der Kommission sein, die einzelnen denkbaren Maßnahmen zur Minderung der SO_2 - und NO_x -Emissionen bei den verschiedenen Emittentengruppen systematisch zu untersuchen und entsprechend ihrer emissionsreduzierenden Wirkung und ihrer Kosten zu klassifizieren. Dabei wurden die Emissionsminderungsmaßnahmen für die großen Feuerungsanlagen (Leistung $>50 \text{ MW}_{\text{th}}$) anlagenindividuell untersucht, während für die große Zahl kleiner Anlagen typische Minderungsmaßnahmen ermittelt wurden. Neben einer detaillierten Analyse der Emissionsminderungstechniken beruhte die durchgeführte Kosten-Effektivitäts-Analyse auf einer modellgestützten Abschätzung der Wirkungen und Kosten alternativer Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen für den Zeitraum bis 1995.

Um die Wirkungen und Kosten von Maßnahmen zur Minderung der SO_2 - und NO_x -Emissionen über diesen Zeitraum sinnvoll ermitteln zu können, war eine Referenzentwicklung des Energieverbrauchs und der daraus resultierenden Emissionen als Ausgangs- und Vergleichsbasis vorzugeben. Die wesentlichen dafür zugrundegelegten Rahmenannahmen waren, daß

- das Bruttoinlandsprodukt um 2 %/a wächst,
- der Stromverbrauch in Baden-Württemberg bis zum Jahr 1995 linear mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 3 %/a zunimmt,
- die Energiepreisrelationen im wesentlichen erhalten bleiben und
- die Kohleabnahmeverpflichtungen entsprechend den Vereinbarungen mit dem deutschen Steinkohlebergbau erfüllt werden.

Die Referenzentwicklung darf dabei nicht als Prognose - also als Anspruch, die tatsächlich eintretende Entwicklung vorherzusagen - mißverstanden werden. Sie ist nur eine der notwendigen quantitativen Annahmen, um überhaupt quantitative Aussagen hinsichtlich der Kosten und Wirksamkeit machen zu können.

In Abbildung 1 ist die Ausgangssituation bezüglich der Emission der hier interessierenden Schadstoffe SO_2 und NO_x nach den verschiedenen Emittentengruppen in Baden-Württemberg dargestellt.

An den gesamten SO_2 -Emissionen von 223 kt hat die Industrie und der Kraftwerkssektor einen Anteil von 39 bzw. 35 %, während ihre Anteile am Energieverbrauch bei nur 24 bzw. 16 % liegen. Größter NO_x -Emittent ist der Verkehrssektor mit einem Anteil von 68 % an den Emissionen in Höhe von 350 kt.

Abbildung 1: Energieverbrauch und Emissionssituation in Baden-Württemberg

Kraftwerkssektor

Ausgehend von einem 3 %igen Stromverbrauchszuwachs steigt die Strombereitstellung von 43000 GWh/a in 1983 auf 63000 GWh im Jahr 1995 an.

Aufgrund auslaufender Stromimportverträge nimmt im Jahre 1985 die Stromerzeugung in Baden-Württemberg stark zu. Über den gesamten Zeitraum betrachtet wächst der Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung durch die Inbetriebnahme der Kernkraftwerke Phillipsburg II und Neckarwestheim II auf fast 60 % an.

Aber auch die Stromerzeugung aus Kohlekraftwerken nimmt, unter anderem wegen der Kohleabnahmeverpflichtungen, bis 1988 um 50 % zu.

Abbildung 2: Nettostromerzeugung der öffentlichen Kraftwerke in Baden-Württemberg

Von den Kommissionen wurden eine Vielzahl von Maßnahmen zur Reduktion der SO_2 - und NO_x -Emissionen untersucht. Da sind zunächst einmal die Brennstoffentschwefelung oder genauer gesagt, der Einsatz schwefelarmer oder schwefelärmerer Kohle und die Steuerung des Verbrennungsprozesses, die sogenannten Primärmaßnahmen zur Minderung der Stickoxidentstehung zu nennen. Dann die Rauchgasreinigung mit den verschiedenen teils erprobten oder noch in Entwicklung befindlichen Verfahren zur Minderung von SO_2 - und NO_x -Emissionen. Neben diesen sehr wirksamen Verfahren der Rauchgasreinigung lassen sich emissionsmindernde Effekte aber auch noch durch ein gezieltes Brennstoffmanagement, z. B. durch einen bevorzugten Einsatz schwefelärmerer Kohle in Kraftwerksblöcken, die noch keine Rauchgasentschwefelungsanlagen haben oder durch eine Brennstoffsubstitution (z. B. eine Erhöhung der verfeuerten Erdgasmenge zu Lasten von schwerem Heizöl), erreichen. Aber auch durch ein die Umweltbelange berücksichtigendes Kraftwerkseinsatzmanagement lassen sich begrenzte Emissionsminderungen erreichen. Zu nennen ist

hier ein bevorzugter Einsatz von Kraftwerken, die bereits mit einer Rauchgasentschwefelungsanlage ausgerüstet sind, soweit dies technisch und von der Lastverteilung her möglich ist.

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der SO_2 -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_2 -Emissionen von 80 auf 120 Tsd t/a bis 1988 resultiert dabei aus der bereits angesprochenen Zunahme der Stromerzeugung in Kohlekraftwerken.

Abbildung 3: Verschiedene Maßnahmen zur Reduktion der SO_2 -Emissionen aus Kraftwerken in Baden-Württemberg

Die Realisierung der in der Großfeuerungsanlagenverordnung vorgeschriebenen Grenzwerte für die SO_2 -Emissionen würde nach 1988 die Emissionen drastisch reduzieren und zwar auf ein Niveau von etwa 25 % der derzeitigen Emissionen, trotz eines Anstiegs der Stromerzeugung in fossilen Anlagen. Die in der

Großfeuerungsanlagenverordnung verlangten Maßnahmen können aber eine weitere Zunahme der Emissionen im Zeitraum bis 1988 nicht vermeiden.

Die emissionsmindernden Wirkungen einer Reihe von Maßnahmen, die sofort zu einer Emissionsentlastung beitragen können, und die ein vertretbares Kosten-Effektivitäts-Verhältnis aufweisen - hierauf wird später noch zurückzukommen sein - sind in dieser Abbildung auch dargestellt.

Da ist zunächst einmal der optimierte Einsatz schwefelärmerer Kohle zu nennen. Der mittlere Schwefelgehalt heimischer Vollwertkohle liegt bei ca. 0,9 bis 0,95 % Schwefel, bezogen auf SKE. Die Elektrizitätsversorgungsunternehmen in Baden-Württemberg beziehen aber teilweise deutsche Steinkohle, deren Schwefelgehalt niedriger, z. B. nur 0,8 % ist. Wird nun diese schwefelärmere Kohle, soweit dies technisch möglich ist, in Kraftwerken verfeuert, die noch keine Rauchgasentschwefelung haben, so lassen sich die SO_2 -Emissionen deutlich reduzieren, wobei sich für den Zeitraum 1984 bis 1988 Minderemissionen von etwa 35000 t ergeben. Weitere Emissionsminderungen lassen sich durch einen bevorzugten Einsatz der Kraftwerke erreichen, die mit einer Rauchgasentschwefelungsanlage - sei es auch nur einer ersten Stufe - ausgerüstet sind. Auch der verstärkte Einsatz von Gas zu Lasten von schwerem Heizöl in Kraftwerken mit Mischfeuerungen trägt im begrenzten Umfang zur Emissionsminderung bei.

Größere Effekte im Hinblick auf eine Senkung des SO_2 -Ausstoßes sind von einer früheren Inbetriebnahme der Rauchgasentschwefelungsanlagen, als von der Großfeuerungsanlagenverordnung (1.7.1988) und den Genehmigungsaufgaben gefordert, zu erwarten. Die angestrebte frühere Inbetriebnahme der rauchgasentschwefelungsanlagen bewirkt eine Minderung der SO_2 -Emissionen um 24000 t bis zum Jahr 1988.

Alle diese Maßnahmen bewirken eine kurzfristige wirksam werdende Minderung der SO_2 -Emissionen um etwa 25 % gegenüber der

Emissionsentwicklung, die sich nur bei der Durchführung der Großfeuerungsanlagenverordnung ergeben würden. Darüberhinaus wurden noch weitergehende Maßnahmen untersucht, die aber ein ungünstigeres Kosten-Effektivitäts-Verhältnis aufweisen.

In Tabelle 1 sind die Kosten-Effektivitäts-Relationen für einige der untersuchten Maßnahmen zur Minderung der SO_2 -Emissionen zusammengestellt. Die Entschwefelung der Rauchgase verursacht je nach Größe und Auslastung der Anlage Kosten in Höhe von 3-6 DM je kg nicht emittiertem SO_2 . Für die frühere Inbetriebnahme der Rauchgasentschwefelungsanlagen sowie für einen bevorzugten Einsatz von Kraftwerken, die bereits mit einer Rauchgasreinigung ausgestattet sind, fallen Kosten in Höhe von 3 bzw. 0,5 DM/kg SO_2 an.

Unterstellt man, daß ein verstärkter Einsatz von schwefelarmer Importkohle zu Lasten heimischer Steinkohle möglich wäre (unter den gegenwärtigen Bedingungen wäre dies nur möglich, wenn die Kohleabnahmeverpflichtungen nicht erfüllt werden müßten), dann würde sich beim gegenwärtigen Preisvorteil der Importkohle ein Kosten-Effektivitäts-Verhältnis von etwa -10 DM/kg SO_2 ergeben.

Im Vergleich zu den vorgenannten Maßnahmen liegen die spezifischen Kosten eines vorgezogenen Erdgaseinsatzes mit 16 DM/kg SO_2 und einer Ausrüstung von Altanlagen, die nur noch eine geringe Restnutzungsdauer haben, mit 40 DM/kg SO_2 bedeutend höher; sie sind daher wenig effektiv.

Wie bekannt, lassen sich die Stickoxidemissionen aus Kraftwerken einmal durch feuerungstechnische Maßnahmen, die sog. Primärmaßnahmen, und zum anderen durch eine Rauchgasreinigung reduzieren.

Tabelle 1: Kosten-Effektivitäts-Relationen von Maßnahmen zur Minderung von SO_2 -Emissionen aus Kraftwerken

	[DM/kg SO_2]
- 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

Abbildung 4: NO_x -Emissionen aus Kraftwerken in Baden-Württemberg

Ohne Emissionsminderungsmaßnahmen würde der NO_x -Ausstoß aus öffentlichen Kraftwerken von 55 kt im Basisjahr 1984 auf 76 kt im Jahr 1988 steigen (siehe Abbildung 4). Danach würden die Emissionen aufgrund des verstärkten Kernenergieeinsatzes und eines höheren Anteils moderner Kessel mit Trockenfeuerungen wieder absinken.

Durch Primärmaßnahmen wie der Einbau NO_x -armer Brenner, Abgasrezirkulation und optimale Brennereinstellung können die NO_x -Emissionen kurzfristig um fast 15 % reduziert werden. Weitere drastische Senkungen der NO_x -Emissionen sind dann durch Entstickungsanlagen möglich, die die Rohgasbeladungen auf etwa 200 mg/m³ reduzieren. Mit der Installation von Entstickungsanlagen werden die NO_x -Emissionen Mitte der 90er Jahre auf etwa 30 % des Wertes des Jahres 1984 reduziert.

Die Kosteneffektivitäten der verschiedenen NO_x -Minderungsmaßnahmen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Kosten-Effektivität von NO_x -Emissionsminderungsmaßnahmen in Kraftwerken

Maßnahme	Emissions- minderung [10 ³ t]	Jährliche Kosten [10 ⁶ DM]	Spezifische Minderungskosten (SMK) [DM/kg NO_x]
keine	-	-	-
Feuerungstechnische Maßnahmen			
Trockenfeuerung	4,93	0	0
Schmelzfeuerung	2,03	1,95	0,96
De NO_x -Anlagen			
Schmelzfeuerung	17,07	79,5	4,66
Trockenfeuerung	14,73	101,5	6,89

Die spezifischen NO_x -Minderungskosten der feuerungstechnischen Maßnahmen liegen unter 1 DM pro kg nicht emittiertem NO_x . Der Aufwand bei den Sekundärmaßnahmen ist erheblich höher; er liegt zwischen 3 und 8 DM pro kg nicht emittiertem NO_x je nach Kraftwerkstyp und -größe. Im Durchschnitt betragen die NO_x -Minderungskosten bei den Kraftwerken in Baden-Württemberg mit flüssigem Ascheabzug 4,6 DM/kg NO_x und 6,9 DM/kg NO_x bei Anlagen mit trockenem Ascheabzug.

In Abbildung 5 sind die Kostenfunktionen für die Minderung der SO_2 - und NO_x -Emissionen aus Kraftwerken in Baden-Württemberg dargestellt. Mitte der 90er Jahre läßt sich eine Reduzierung der SO_2 -Emissionen auf weniger als 20 kt/a und eine Reduzierung der NO_x -Emissionen auf 15 kt/a mit jährlichen Kosten von 330 bzw. 180 Mio DM erreichen. Dies bedeutet eine durchschnittliche Erhöhung der Stromerzeugungskosten in Kohlekraftwerken um ca. 3,7 Dpfg./kWh_{e1} und bezogen auf den gesamten in Baden-Württemberg erzeugten Strom entstehen Mehrkosten von 1,1 DPfg./kWh_{e1}.

Abbildung 5: Kostenfunktionen der NO_x - und SO_2 -Emissionsminderung aus Kraftwerken in Baden-Württemberg

Industrie

Die Industrie ist mit einem Anteil von 39 % (1984) der größte Emittent von SO_2 in Baden-Württemberg, und sie trägt mit etwa 12 % zu den NO_x -Emissionen bei. Der überwiegende Teil der Emissionen stammt aus Kessel- und Prozeßfeuerungsanlagen.

In Baden-Württemberg gibt es ca. 7800 Betriebe des Bergbaus und des verarbeitenden Gewerbes, die eigene Feuerungsanlagen betreiben. Für die verschiedenen Kategorien von Feuerungsanlagen wurden in Abhängigkeit von der Leistungsgröße die verschiedenen Möglichkeiten der Emissionsminderung systematisch untersucht und analog zum Kraftwerksbereich die erzielbaren SO_2 - und NO_x -Emissionsminderungen sowie die Minderungskosten ermittelt.

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Kosten-Wirksamkeits-Analyse für den Industriesektor zusammengefaßt dargestellt.

Die Realisierung der in der neuen TA-Luft 86 für Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung bis zu $50 \text{ MW}_{\text{th}}$ genannten SO_2 - und NO_x -Grenzwerte führen in Baden-Württemberg nur zu einer Reduktion dieser Emissionen um 7 bzw. 9 %. Die damit verbundenen Gesamtkosten liegen bei 30 Mio DM/a, da diese Grenzwerte durch Primärmaßnahmen bzw. die Verwendung schwefelärmerer Brennstoffe eingehalten werden können.

Eine weitergehende Minderung der Emissionen ist durch Rauchgasreinigungsmaßnahmen, Brennstoffsubstitutionen und die Entschwefelung des leichten Heizöls erreichbar. Die Minderungskosten und Wirkungen dieser Maßnahmen sind in Abbildung 6 für SO_2 und NO_x angegeben. Aus der Kostenkurve wird die Verschlechterung der Kosten-Effektivität bei den verschiedenen Maßnahmen deutlich.

Abbildung 6: Kostenfunktionen der NO_x- und SO₂-Minderung für den Industriesektor

Alle die hier aufgeführten Maßnahmen können die SO₂-Emissionen aus industriellen Feuerungsanlagen von 60 auf 22,5 kt/a bei jährlichen Kosten von 220 Mio DM reduzieren. Eine Reduktion der NO_x-Emissionen von 34 kt/a auf 21 kt/a ließe sich mit einem Kostenaufwand von 135 Mio DM/a erreichen.

Haushalts- und Kleinverbrauchssektor

Der Haushalts- und Kleinverbrauchssektor ist durch eine große Zahl kleiner Emissionsquellen gekennzeichnet. Die sinnvollsten Möglichkeiten zur Reduktion der SO₂-Emissionen bestehen in der

Entschwefelung des leichten Heizöls, in der Kohlesubstitution und in der Verbesserung der Nutzungsgrade der kleinen Kesselanlagen. NO_x -Emissionen lassen sich durch verschiedene feuerungstechnische Maßnahmen vermindern.

Auch die Emissionsminderungsmöglichkeiten in diesen Sektoren wurden systematisch untersucht, und es wurden, wie bei den zuvor besprochenen Bereichen, Gesamtkostenkurven für eine effiziente Emissionsminderung ermittelt. Hierauf soll aber nicht näher eingegangen werden.

Verkehr

Der Verkehrssektor ist die Hauptquelle der NO_x -Emissionen. Trotz einer erwarteten Zunahme der Verkehrsleistung bis 1995 werden die NO_x -Emissionen auch ohne emissionsmindernde Maßnahmen nicht weiter ansteigen, da auch weiterhin mit einer Reduktion des spezifischen Kraftstoffverbrauchs und einem weiterhin steigenden Anteil von Diesel-Fahrzeugen, die nur etwa halb soviel NO_x emittieren wie ungereinigte Otto-Motoren, zu rechnen ist.

Die wesentlichen technischen Möglichkeiten zur Minderung des NO_x -Ausstoßes von Otto-Motoren sind der geregelte und ungeregelte Drei-Wege-Katalysator, die Abgasrückführung und der Magermotor. Der geregelte Drei-Wege-Katalysator erreicht dabei Reduktionsgrade von 70 bis 90 %, der ungeregelte Katalysator etwa 50 %.

Die neuen Emissionsgrenzwerte der EG-Kommission führen bis 1995 nur zu einer Reduktion der NO_x -Emissionen um 7 %. Unterstellt man, daß die von der Bundesregierung gegebenen finanziellen Anreize für abgasgereinigte Kraftfahrzeuge bis zum Jahr 1995 dazu führen, daß 50 % der Altfahrzeuge nachgerüstet und der Anteil der Neufahrzeuge mit Katalysator bis 1988 bzw. 1993 auf

100 % zunimmt, dann würden sich die NO_x -Emissionen des Verkehrssektors bis 1995 um 66 kt/a, d. h. ca. 30 % reduzieren. Tabelle 3 listet die erzielbaren Minderungen der einzelnen Maßnahmengruppen, ihre Gesamtkosten sowie die spezifischen Minderungskosten auf.

Tabelle 3: NO_x -Reduktionen und ihre Kosten im Verkehrssektor

x

Maßnahme	NO_x -Emissions- minderung in 1995 [1000 t /a]	Minderungs- kosten [10 ⁶ DM/a]	spez. Minde- rungskosten [DM/kg NO_x]
Nachrüstung geregelter und ungeregelter 3-Wege-Katalysator in neuen PKW	7,5	90	13,2
1400 - 2000 ccm	14,1	215	15,2
>2000 ccm	44,6	740	16,6
Gesamt	66,2	1054	15,9

Nachdem in den vorangegangenen Ausführungen die Möglichkeiten und Kosten der Reduzierung der SO_2 - und NO_x -Emissionen in den verschiedenen Sektoren diskutiert wurden, ist es nun möglich, eine effiziente Gesamtstrategie der Minderung dieser luftgetragenen Schadstoffe für Baden-Württemberg zu entwickeln.

Abbildung 7 zeigt die Kostenfunktion für eine kostenoptimale Reduktion der SO_2 -Emissionen in Baden-Württemberg. Die SO_2 -Emissionen in Baden-Württemberg könnten Mitte der 90er Jahre mit jährlichen Kosten von 700 Mio DM um 70 % gegenüber 1984 reduziert werden. Die effizientesten Maßnahmen sind dabei die

Installation von Entschwefelungsanlagen in Kraftwerken und großen industriellen Feuerungsanlagen.

Abbildung 7: Gesamtkostenkurve der SO₂-Minderung in Baden-Württemberg

Ähnlich drastische Reduktionen der NO_x-Emissionen in Baden-Württemberg sind mit den gegenwärtig verfügbaren Techniken nicht erreichbar.

Abbildung 8 zeigt die mit den verschiedenen Maßnahmen erreichbaren NO_x-Minderungen und die damit verbundenen Kosten. Mit einem jährlichen Aufwand von 1 500 Mio DM wäre lediglich eine Minderung der NO_x-Emissionen um 37 % erreichbar. Die Haupt-

quellen der verbleibenden Emissionen sind die Diesel-Fahrzeuge und die Zementindustrie. Die effizientesten NO_x -Minderungsmaßnahmen sind die Primärmaßnahmen bei Feuerungsanlagen sowie die Rauchgasreinigung in Kraftwerken und großen Industrie-
anlagen.

Abbildung 8: Gesamtkostenkurve der NO_x -Minderung in Baden-Württemberg

4 Zusammenfassende Wertung

Die vorangegangenen Erläuterungen einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse von emissionsmindernden Maßnahmen sollten exemplarisch

aufzeigen, welche konkreten Informationen und Entscheidungshilfen derartige Analysen für eine effiziente Umweltschutzpolitik liefern können. Es sei noch angemerkt, daß die Ergebnisse der modellgestützten Kosten-Wirksamkeits-Analyse für Baden-Württemberg jeweils direkt in die Diskussionen und Beratungen der verschiedenen, von der Landesregierung eingesetzten Kommissionen eingebracht wurden. Sie haben zu einer Versachlichung der Diskussion zwischen den unterschiedlichen Interessengruppen beigetragen und waren die wesentliche Grundlage für die Verabschiedung einer Emissionsminderungsstrategie für das Land Baden-Württemberg, das über freiwillige Verpflichtungen der jeweiligen Emittentengruppen bereits realisiert worden ist bzw. werden wird.

Angesichts der bestehenden Unsicherheiten über die Ursachen der neuartigen Waldschäden und die Dosis-Wirkungsbeziehungen einzelner Schadstoffe, können umfassende Kosten-Wirksamkeits-Analysen wertvolle Entscheidungshilfen für eine rationale Umweltpolitik liefern, indem sie aufzeigen, wie bei gegebenem Aufwand der größte emissionsmindernde Effekt erzielt werden kann.

Ihre Aussagemöglichkeiten sind aber begrenzt, insbesondere wenn es um die Frage der energiewirtschaftlichen und gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen der Kosteneffekte der Minderungspolitiken und die Frage der Vertretbarkeit der Umweltschutzmaßnahmen geht.

In diesem Zusammenhang erscheint die Feststellung wichtig, daß es bis heute an fundierten Analysen der ökonomischen und strukturellen Konsequenzen der bereits verabschiedeten Luftreinhaltemaßnahmen für die Energieversorgung und Energiewirtschaft noch fehlt. Da es um jährliche Kosten in Milliardenhöhe geht, können sorgfältige Umweltmaßnahmenfolgeabschätzungen auch heute noch von großem Nutzen sein und zu einer effektiven, sowohl die ökonomischen wie ökologischen Belange berücksichtigenden Umwelt- und Energiepolitik beitragen.

Literaturverzeichnis

- [1] Staatsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.):
Bericht der Arbeitsgruppe 'Energiebedarf-Umwelt-Kraft-
werksbetrieb',
Stuttgart 1983
- [2] Staatsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.):
Minderung von Stickoxidemissionen aus Kohlekraftwerken in
Baden-Württemberg,
Stuttgart 1984
- [3] Staatsministeirum Baden-Württemberg (Hrsg.):
Wirtschaftliche Entwicklung - Umwelt - Industrielle Pro-
duktion,
Stuttgart 1986
- [4] Voss, A., et al.:
Kosten-Effektivitäts-Analyse von Maßnahmen zur Reduzierung
von SO₂- und NO_x-Emissionen in Ballungsräumen am Beispiel
der Stadt Stuttgart
Final Report, KFK-PEF
- [5] Voss, A.:
Cost and Effectiveness of Reducing Sulphur and Nitrogen
Emissions from Power Plants in Baden-Württemberg,
ECE-GE.85-43208, Fourth Seminar on the Control of Sulphur
and Nitrogen Oxides from Stationary Sources,
Graz, Austria, 12-16 May 1986
- [6] Friedrich, R.; Voss, A., Ruff, E.:
Fünf Vorschläge für reinere Luft,
Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 8, 34. Jg., 1984
- [7] Friedrich, R.; Mattis, M., Voss, A.:
Entstickung in sechs Schritten,
Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 1/2, 35. Jg.,
1985