



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG

Programmgruppe
Systemforschung und Technologische Entwicklung

Umweltauswirkungen alternativer Energieversorgungsmöglichkeiten

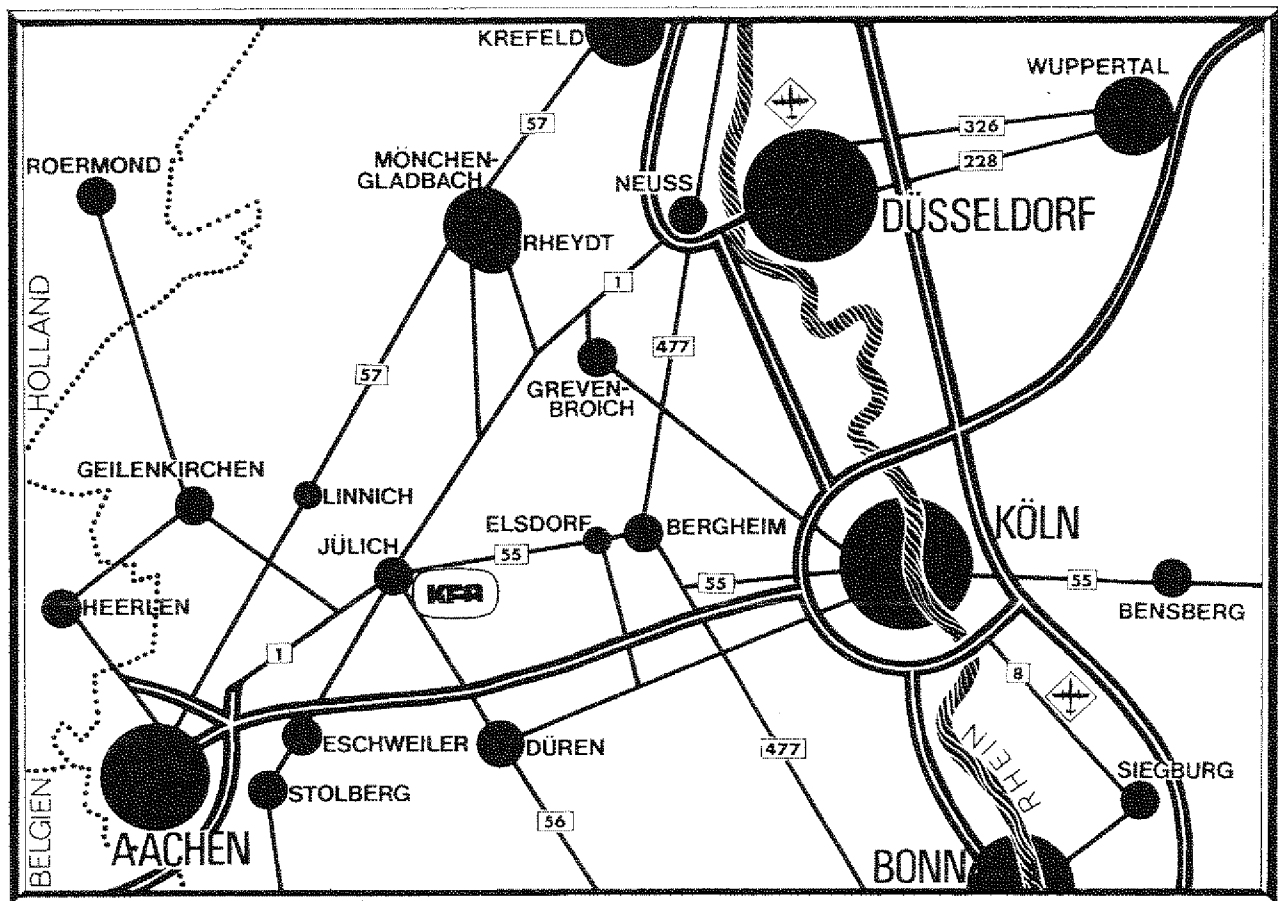
**Eine Simulationsstudie mit besonderer Berücksichtigung
gesellschaftlicher Einflußgrößen**

von

D. Elsinghorst

JÜI - 1213
Juni 1975

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 1213

Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung Jül – 1213

Dok.: Alternative Energy Policies - Environmental Effect
Alternative Energy Policies - System Dynamics Model

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Umweltauswirkungen alternativer Energieversorgungsmöglichkeiten

**Eine Simulationsstudie mit besonderer Berücksichtigung
gesellschaftlicher Einflußgrößen**

von

D. Elsinghorst

D 82 (Diss. T. H. Aachen)

ENVIRONMENTAL EFFECTS OF ALTERNATIVE ENERGY POLICIES
A MODELL STUDY WITH CONSIDERATION OF SOCIOLOGICAL
INFLUENCES

by

D. Elsinghorst

Abstract:

The exponentiell ascent of the energy consumption has reduced the possibility to pollute air and land in such a hard way, that the detrimental external effects of economic activities must be regarded in energy modelling. That means to analyse the interdependent connections between the economic system and the environment and to picture the structure of the real system on a mathematical model. To do this System Dynamics models were developed.

Beside the relevant technical variables also sociological variables such as "public pressure" or "lobby pressure" were regarded. So it was possible to break open the "ceteris paribus" assumption of the constant sociological and political influences.

The environmental effect of various policies to meet the energy demand were critically examined in simulation runs. It was demonstrated that the pollution of the atmosphere will decrease in the beginning of the 80th. This is based on the implementation of a new energy technology with a lower pollution and on the other side on the increasing amount of pollution control.

UMWELTAUSWIRKUNGEN ALTERNATIVER ENERGIEVERSORGUNGS-MÖGLICHKEITEN
EINE SIMULATIONSSTUDIE MIT BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG
GESELLSCHAFTLICHER EINFLUSSGRÖSSEN

von

D. Elsinghorst

Kurzfassung:

Das exponentielle Ansteigen des Energieverbrauchs hat die Ablagerungsmedien wie Luft und Land so stark verringert, daß die nachteiligen externen Effekte von volkswirtschaftlichen Aktivitäten nicht mehr unberücksichtigt bleiben dürfen.

Im Rahmen der Erstellung von Energiemodellen ergab sich daraus die Forderung, die Interdependenzen zwischen Wirtschaftssystem und Umweltsystem zu analysieren und modellhaft nachzubilden. Dazu wurde das System-Dynamics Modell als eigener Modellmodul konzipiert.

Neben den relevanten technischen Einflußgrößen wurden auch gesellschaftliche Einflußgrößen wie "Öffentlicher Druck" oder "Lobby-Druck" in die Betrachtung miteinbezogen. Damit war es möglich, die als "ceteris paribus-Annahmen" geltenden sozialen und politischen Größen aufzubrechen.

In Simulationsläufen wurden die Umweltauswirkungen verschiedener Energieversorgungsmöglichkeiten untersucht. Es konnte festgestellt werden, daß die Umweltbelastung ab Anfang der achtziger Jahren einmal wegen des verstärkten Einsatzes umweltfreundlicher Energien, zum anderen wegen der dann zum Tragen kommenden Schutzmaßnahmen stetig abnimmt.

INHALT	<u>Seite</u>
1. EINLEITUNG	1
2. ZIELE DER UNTERSUCHUNG	6
3. GESELLSCHAFTLICHE WIRKUNGSZUSAMMENHÄNGE DES UMWELTPROBLEMS	9
3.1 Der gesamtwirtschaftliche Hintergrund der Umwelt- schutzmaßnahmen	9
3.1.1 Die sozialen Kosten der Umweltverschmutzung	9
3.1.2 Das Problem der Verteilungseffekte der Umwelt- schäden	10
3.1.3 Das Problem der Meßbarkeit der durch die Umwelt- zerstörung verursachten Sozialkosten	11
3.2 Wachstumsumlenkung und Umweltkrise	14
3.2.1 Umweltschutz und technischer Fortschritt	14
3.2.2 Umweltschutz und Wirtschaftspolitik - Umweltpolitik	19
3.2.3 Alternative Lösungsansätze zu einer umweltorien- tierten Energiepolitik	21
4. DIE BEWERTUNG VON SCHADSTOFFEN	24
4.1 Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Mensch, Tier, Pflanzen und Sachgüter	24
4.2 Möglichkeiten einer ganzheitlichen Bewertung ver- schiedener Schadstoffe	26
4.2.1 PINDEX, ein kombinierter Luftverschmutzungsindex	28
4.2.2 Oak Ridge Air Quality Index (ORAQI)	30
4.2.3 Index auf der Basis eines errechneten Konzen- trationswertes	32
4.3 Die Bestimmung der Schädlichkeit eines Schadstoffes und eines Gesamt-Schadens-Index für atmosphärische Schadstoffbelastung	34

	<u>Seite</u>
5. METHODISCHE ANSÄTZE ZUR ANALYSE VON UMWELTSYSTEMEN	38
5.1 Input-Output-Modelle	38
5.2 Mathematische Programmierung oder Optimierungsmodelle	40
5.3 Simulations-Modell	42
5.3.1 Abgrenzung der Simulation von mathematisch analytischen Verfahren	42
5.3.2 Die Leistungsfähigkeit der Systemsimulation	44
5.3.3 Die Simulationsmethode System Dynamics	45
6. MODELLBESCHREIBUNG	48
6.1 Die Grundstruktur des Modells	48
6.1.1 Die Systemgrenzen	49
6.1.2 Die Wirkungszusammenhänge der Modellvariablen	51
6.2 Die sozialen Indikatoren	59
6.2.1 Die Entwicklung des Umweltinteresses in der Bevölkerung	60
6.2.2 Die gesellschaftliche Zielgröße "Annehmbarer Schaden"	65
6.2.3 Der Sozialindikator - Lobby-Druck	66
6.3 Beschreibung des Modellteils: Verkehrssektor	67
6.3.1 Die gegenwärtige Situation des Kraftfahrzeugverkehrs in der Bundesrepublik	67
6.3.2 Atmosphärische Schadstoffbelastung durch den Kraftfahrzeugverkehr	69
6.3.2.1 Die spezifischen Emissionsfaktoren von Verbrennungskraftmaschinen	70
6.3.2.2 Die Schadstoffmengen der Vergangenheit	72
6.3.3 Maßnahmen zur Verringerung des Umweltschadens im Verkehrsbereich	74

III

	<u>Seite</u>
6.3.3.1 Stand der Technik und Entwicklungsmöglichkeiten zur Herabsetzung der Schadstoffemission beim konventionellen Verbrennungsmotor	75
6.3.3.2 Entwicklung neuartiger Antriebssysteme	77
6.3.4 Kosten umweltschützender Maßnahmen beim Auto	78
6.4 Beschreibung des Modellteils: Kraftwerks- und Industriesektor	81
6.4.1 Die gegenwärtige Situation der industriellen und öffentlichen Kraftwirtschaft	81
6.4.2 Atmosphärische Schadstoffbelastung durch fossil beheizte Kraftwerke	82
6.4.2.1 Spezifische Emissionsfaktoren fossil beheizter Feuerungsanlagen in Industrie und Kraftwerken	82
6.4.2.2 Die Schadstoffmengen der Vergangenheit	87
6.4.3 Möglichkeiten des Umweltschutzes im Sektor: Öffentliche und Industriekraftwerke	88
6.4.3.1 Stand der Technik und Entwicklungsmöglichkeiten der Rauchgasentschwefelung	89
6.4.3.2 Möglichkeiten der Reduzierung von nitrosen Gasen in Kraftwerken	91
6.4.3.3 Reduzierung des Umweltschadens durch neuartige umweltfreundliche Energieversorgungssysteme	92
6.4.4 Die Kosten der Emissionsreduzierung bei brennstoffgefeuerten Kraftwerken	95
6.5 Beschreibung des Modellsektors: Haushalte und Kleinverbraucher	97
6.5.1 Die atmosphärische Schadstoffbelastung durch Feuerungen der Haushalte und Kleinverbraucher	98
6.5.2 Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen aus Feuerungen der Haushalte und Kleinverbraucher	100
6.5.3 Kosten der Brennstoffentschwefelung	101

	<u>Seite</u>
7. DIE ÜBERPRÜFUNG DES MODELLS	103
7.1 Überprüfung einer hinreichenden Realitätsnähe zur vergangenen Wirklichkeit	104
7.2 Das generelle Verhalten des Modells	106
7.3 Sensitivitätsanalysen	110
8. SIMULATIONSLÄUFE	113
8.1 Die Simulation verschiedener Strukturen der Primärenergieversorgung	113
8.1.1 Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe in der BRD	113
8.1.2 Aussichten der Kernenergie in der Energiewirtschaft der Bundesrepublik Deutschland	115
8.1.3 Die Simulation verschiedener Entwicklungsverläufe der Kernenergie	118
8.1.3.1 Standardlauf: Simulation einer schnellen Reaktor- entwicklung	121
8.1.3.2 Szenario-Läufe: Auswirkung von Verzögerungen in der Reaktorentwicklung	127
8.2 Strategielauf: Umweltauswirkung elektrogetriebener Kraftfahrzeuge	129
8.3 Strategielauf: Umweltauswirkungen durch Methanol als Alternativkraftwerk für Kraftfahrzeuge	134
8.4 Strategielauf: Ersatz brennstoffgefeuerter Raum- heizungssysteme durch elektrische Speicherheizung	138
9. WEITERENTWICKLUNG DES MODELLANSATZES	143
10. LITERATUR	

1. EINLEITUNG

Der Mensch ist auf dem besten Wege, die gesamte Ökologie der Erde, das heißt die dynamischen, ausbalancierten Wechselwirkungen, die zwischen den Organismen selbst und zwischen ihnen und ihrer Umwelt bestehen, gründlich durcheinander zu bringen, obwohl er sich der Tatsache bewußt ist, daß er selbst auf das ökologische Gleichgewicht innerhalb der Umwelt, in der er lebt und wirkt, angewiesen ist /1/. Der Mensch muß begreifen, was Ökologie bedeutet, und sich selbst mit seiner Umwelt und den mit ihm lebenden Geschöpfen ins Gleichgewicht bringen. Gelingt das dem Menschen nicht, dann dürften ihn die ökologischen Kräfte vernichten.

Die Umweltzerstörung kann mit Sicherheit als Folge der technischen Entwicklung angesehen werden. Aber den "Technokraten" deshalb als Popanz, dem die zeitgenössische Gesellschaftskritik die Schuld für beinahe alle Mißstände dieser Erde aufbürdet, aufzubauen, bedeutet eine ungerechtfertigte Denunziation /2/. Technik ist im Gegenteil zur Forschung, die den Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung aufzudecken hat, ein Mittel, das bewußt zum Erreichen eines Zieles eingesetzt wird. Wo also Technik ihrem Zweck, das Wohlbefinden der gesamten Menschheit zu gewährleisten, nicht gerecht werden kann, da muß sie kontrolliert, verändert oder eingestellt werden. Die Verwirklichung von Kontrolle und Veränderung liegt in der Hand der Menschen. Als Instrument dazu ist aber die Technik unabdingbar.

Es gibt viele Bereiche, in denen das Mittel Technik mit ihrem Zweck Sicherung der menschlichen Existenz kollidiert. Verkehr, Automatisierung, Massenkommunikation, Welternährung, Unwirtlichkeit unserer Städte, Umweltzerstörung und Entfremdung des Menschen von seiner Arbeit /2/.

Eine besonders wichtige und folgenschwere Kollision ist die Umweltzerstörung. Gerade hier wird deutlich, wo die Anwendung der Technik ihrem Zweck entgegenhandelt. Kleine, vom individuellen Standpunkt aus nutzbringende technische Eingriffe in den Kreislauf der Natur können eine ganze Kette von umweltzerstörenden Reaktionen hervorrufen. Verschärfend kommt noch dazu, daß verschiedene Arten der Verschmutzung von Wasser, Luft und Land aus verschiedenen Quellen untereinander im Zusammenhang stehen. Damit können sie in ihren kombinierten Reaktionen untereinander zu einer Schadensgrenze führen, jenseits derer durch Vermehrung der Eingriffe überproportionale Schäden entstehen /3/.

Alle technischen Prozesse benötigen zu ihrer Ausführung Energie. Die Energie in all ihren Erscheinungsformen ist es auch wohl, die den Menschen in die Lage versetzt hat, seine Umwelt mit einer so hohen Bedürfnisbefriedigung zu nutzen. Der gewaltig gesteigerte Verbrauch an Energie bewirkt aber - neben dem Verbrauch an Gütern - den größten Anteil an der Umweltverschmutzung.

Die Deckungsstruktur des Energieverbrauchs hat sich seit Beginn dieses Jahrhunderts tiefgreifend geändert. Die Kohle wurde von den flüssigen fossilen Energieträgern verdrängt, so daß sie heute weltweit weniger als ein Drittel des Gesamtbedarfs deckt. Mit dem Vordringen der Kernenergie öffnet sich ein völlig neues Szenario. Die Verteilung des Gesamtbedarfs auf die einzelnen Primärenergieträger wird sich nach heutigen Vorstellungen, wie in Abb. 1 dargestellt, einstellen /4/. Die nicht fossilen, nichtnuklearen Energieträger sind noch nicht berücksichtigt worden. Doch seit der vergangenen Ölverknappung ist auf diesem Gebiet eine rege Forschungstätigkeit zu verzeichnen. Zum Beispiel kann die Sonnenenergie eine echte Alternative zu anderen Energieträgern darstellen.

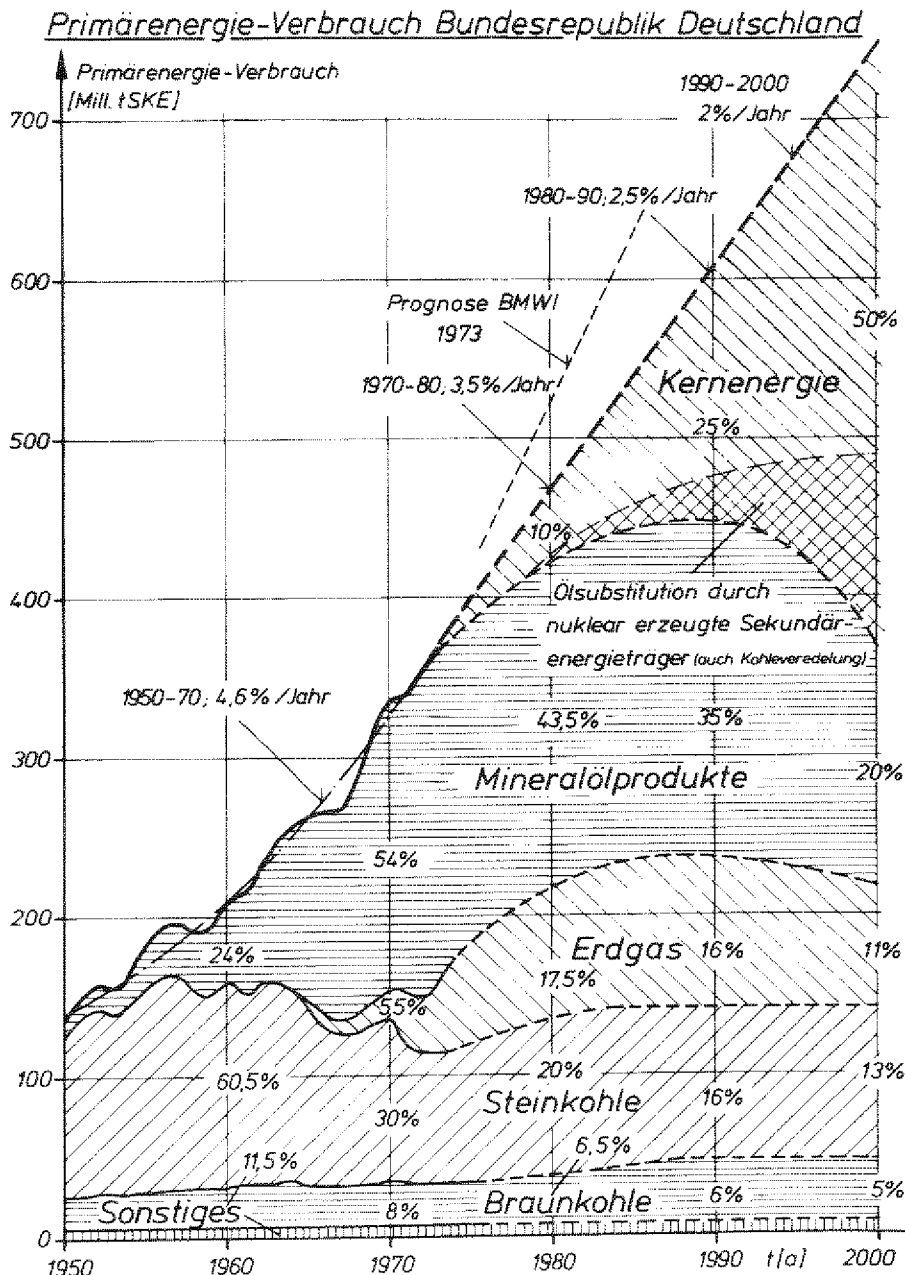


Abb. 1: Primärenergieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland
/nach 4/

Jede Art von Energieverwendung bedeutet einen Eingriff in die natürliche Ökologie der Erde. Nach der augenblicklichen Deckungsstruktur und nach der in den nächsten 50 Jahren zu erwartenden Deckungsstruktur ist die Luftverunreinigung der gewichtigste Faktor. Die Energieerzeugung erfolgt vornehmlich durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, deren Verbrennungsprodukte die Atmosphäre belasten. Grundsätzlich ließe sich die Luftverschmutzung durch Energieverwendung

einmal durch technische Maßnahmen, zum anderen durch Einschränkung des Energieverbrauchs bzw. durch Substitution stark umweltbelastender Energiearten durch wenige oder gar nicht belastende vermeiden. Es sind viele Konzepte in der Diskussion, wie von einem Zerstörungsprogramm der Umwelt zu einer Wiederherstellungsstrategie übergewechselt werden kann. Abb. 2 zeigt einen grundsätzlichen Umweltkontroll-Regelkreis. Zunehmender Energiebedarf erzeugt einen zunehmenden Bedarf nach Brennstoffen, was wiederum die Luftverschmutzung erhöht. Die steigende Umweltverschmutzung induziert Maßnahmen von regulierenden Instanzen. Diese bewirken bestimmte Umweltkontrollen, welche wieder Rückwirkungen auf die Deckungsstruktur haben. Es wird sehr wichtig sein, die möglichen Umweltregulierungen und die möglichen Umweltkontrollmaßnahmen zu analysieren, da die Primärenergiestruktur einen erheblichen Einfluß auf die Luftverschmutzung und auf den Energieverbrauch hat.

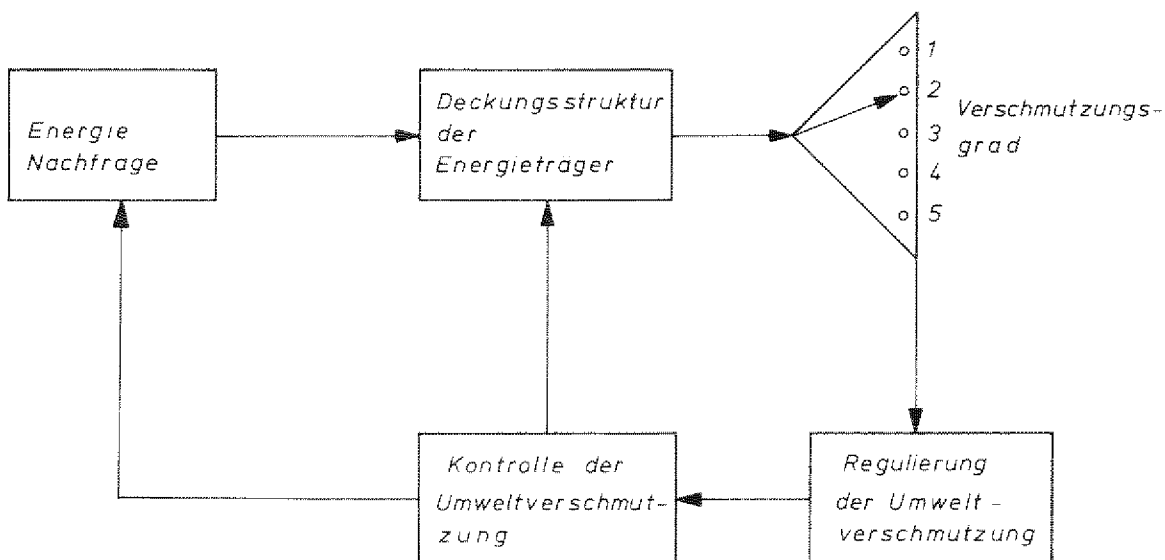


Abb. 2: Umweltkontrollregelkreis /nach 5/

Ein anderes Problem kommt hinzu. Die menschliche Fähigkeit, Entscheidungen bewußt auszuwählen, ist immer stärker eingeschränkt worden. Das liegt zum Teil an den beschleunigten technischen Entwicklungen, deren

langfristige Auswirkungen immer schwerer abschätzbar werden. Hinzu kommt die Komplexität unserer Gesellschaft und die unübersehbare weltweite Interdependenz. Ein ganzheitliches Verständnis dieser Zusammenhänge, geschweige denn eine Kontrolle, ist kaum noch möglich. Einen Ausweg aus diesem Dilemma bieten die Methoden der Systemanalyse und der Computerwissenschaft. Damit kann es möglich werden, die komplexe Technostruktur zu beherrschen.

Über eins muß man sich aber immer im klaren sein: Auch mit Systemanalyse und Computerwissenschaft werden wir kaum in der Lage sein, den "Mechanismus der Geschichte" zu durchschauen. Das gilt auch für die hier zur Anwendung gelangende systemanalytische Methode.

2. ZIELE DER UNTERSUCHUNG

Die gezeigte Problemstellung macht deutlich, daß die Umweltverschmutzung nicht als kurzfristiges Problem, auf das mit ad hoc Entscheidungen reagiert wird, betrachtet werden kann. Vielmehr wird die Früherkennung sich entwickelnder gesellschaftlicher Bedürfnisse und zukünftiger Konfliktbereiche angesichts der zunehmenden Komplexität und höherer Störanfälligkeit unserer Gesellschaft immer wichtiger. Umweltnormen dürfen also keine politische Zufallsgröße sein, sondern es müssen Entscheidungen auf der Basis langfristiger Problemvorhersagen getroffen werden. Derartige langfristige Problemvorhersagen werden heute in langfristigen Modellrechnungen gewonnen. Die Ergebnisse müssen aber angefochten werden, wenn sie allein aus der Betrachtung physischer Systemvariablen hervorgehen. Werden ökonomische, soziale und politische Faktoren nicht in das Modell einbezogen, dann bedeutet das die stillschweigende Annahme, daß sich die ökonomischen, sozialen und politischen Verhältnisse nicht ändern. Mit dieser Annahme aber lassen sich sicher keine realistischen Aussagen weder über das Systemverhalten über Zukunftszeiträume von mehr als 100 Jahren machen. In dieser Arbeit wird daher der Versuch unternommen, ökonomische, soziale und politische Systemvariablen in das zu entwickelnde Modell einzubeziehen. Das Hauptziel dieser Modelluntersuchung ist damit darauf ausgerichtet, die dynamischen Wechselwirkungen zwischen ökonomischen, sozialen und politischen Faktoren zu erfassen und deren Einfluß auf die physischen Faktoren, die durch technische und ökologische Variablen repräsentiert werden, zu quantifizieren.

Um die Reaktion der Gesellschaft auf die Umweltzerstörung quantifizieren zu können, muß der Umweltschaden bestimmt werden. Dies kann nur über eine Schadensfunktion, in der der Schaden in Abhängigkeit von Emissions- oder Immissionswerten dargestellt ist, geschehen. In dieser Arbeit muß daher ein Bewertungsalgorithmus für Schadstoffe entwickelt werden, damit

der Wirkungszusammenhang der sozialen und technischen Größen quantifiziert werden kann.

Das zu entwickelnde Umweltmodell muß als Modellmodul eines größeren Modellkomplexes (vergl. Abb. 3) betrachtet werden, denn daraus ergeben sich noch eine Reihe weiterer Untersuchungsziele. Durch Einkopplung des Umweltmodells in ein Gesamt-Energiemodell lassen sich die Rückwirkungen der Umweltsituation auf den Wirtschaftsprozess, den Energieverbrauch und die Energieverbrauchsstruktur erfassen.

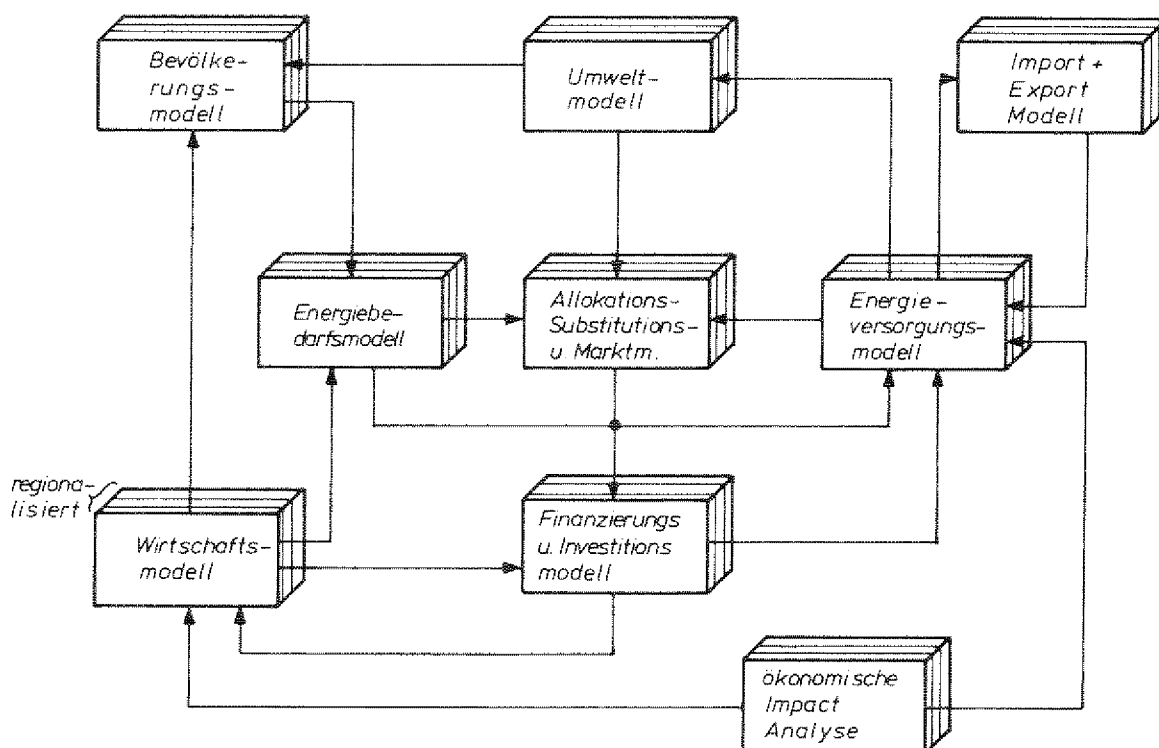


Abb. 3: Das Umweltmodell mit seinen Umgebungsmodellen

Neben der Untersuchung der Struktur und normalen Systemverhaltens soll das Systemverhalten in Abhängigkeit von verschiedenen technologischen Szenarios analysiert werden. Damit sollen die Umweltauswirkungen z.B. verschiedener Umweltschutzmaßnahmen erkannt werden, so daß unter Umständen eine optimale Umweltschutzstrategie gefunden werden kann.

Die von der Gesellschaft über die politischen Instanzen bewirkten Umweltschutzmaßnahmen verursachen neben einem Umweltnutzen auch Umweltschutzkosten. Um nun die Entwicklung der Umweltverhältnisse analysieren zu können, müssen die in Abb. 4 dargestellten Systemgrößen untersucht werden.

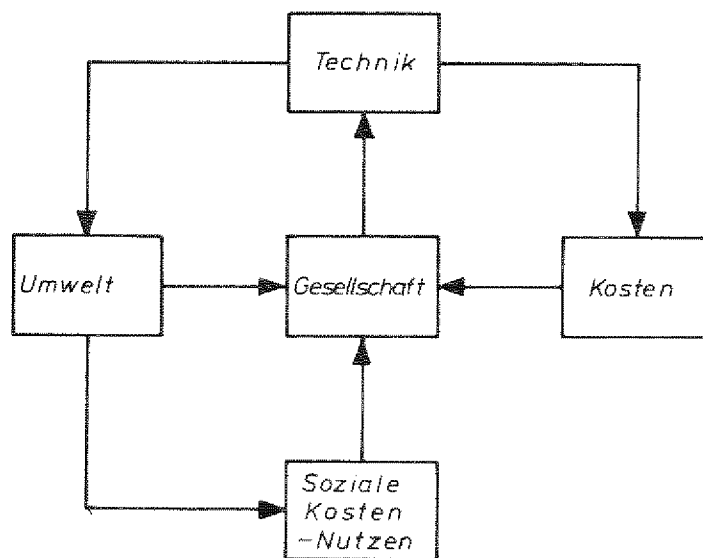


Abb. 4: Grundstruktur eines umweltorientierten Gesellschaftssystems

Die Gesellschaft wird langfristig ein volkswirtschaftlich optimales Verhältnis von Umweltschutzkosten und Umweltnutzen anstreben. Da nun die Gesellschaft die Kosten-Nutzen-Abwägung durchführt, erscheint es sinnvoll, den gesamtwirtschaftlichen Hintergrund umweltschützender Maßnahmen zu durchleuchten. Dazu ist zunächst das Problem der sozialen Kosten bzw. des sozialen Nutzens und insbesondere deren Bewertungsprobleme zu lösen. Zum anderen ist der Zusammenhang von Technik bzw. technischem Fortschritt und das damit verbundene wirtschaftliche Wachstum mit den Möglichkeiten der Umweltverbesserung zu erforschen. Nicht zuletzt müssen die politischen Einflußmöglichkeiten auf ihre Eignung im Hinblick auf eine gesamtwirtschaftlich optimale Lösung untersucht werden. Da die in Abb. 4 aufgezeigten Systemkomponenten in das hier zu entwickelnde Modell eingebaut werden sollen, werden die genannten Probleme im folgenden kurz erläutert.

3. GESELLSCHAFTLICHE WIRKUNGSZUSAMMENHÄNGE DES UMWELTPROBLEMS

3.1 Der gesamtwirtschaftliche Hintergrund der Umweltschutzmaßnahmen

Um die zunehmende Übernahme der sozialen Kosten, die durch die Umweltverschmutzung infolge des Produktionsprozesses verursacht werden, durch die Allgemeinheit zu verhindern (m.a.W. die Sozialisierung der Verluste zu bremsen), sind staatliche Instanzen gezwungen, auf allen Ebenen Vorschriften zur Bekämpfung der Umweltverschmutzung zu erlassen.

3.1.1 Die sozialen Kosten der Umweltverschmutzung

Ohne näher auf die mit dem Begriff der sozialen Kosten zusammenhängenden Theorien (externe Effekte, Pareto Optimalität) einzugehen, sei die Definition von sozialen Kosten vorangestellt. Die sozialen Kosten sind ein Teil der im Zuge des Produktions- und Verteilungsprozesses anfallenden Aufwendungen, die nicht in die Kalkulation der Unternehmen eingehen und daher keine privatwirtschaftlichen Kosten sind, sondern auf Dritte oder auf die Gesellschaft als Ganzes übergewälzt werden. Die ökonomische Theorie hat bisher den sozialen Kosten nur wenig Beachtung geschenkt. Der Grund dafür ist in zwei klassischen Auffassungen zu finden, die heute im Anblick einer zunehmenden Umweltgefährdung in Frage gestellt werden müssen. Die Behandlung der natürlichen Boden- und Rohstoffe einschließlich der Luft und des Wassers als freie Güter ("free gifts of nature") und die Doktrin der unbeabsichtigten positiven Nebenwirkung menschlichen Handelns /6/. Die wohl schon immer problematisch gewesene These der positiven Nebenwirkungen menschlichen Handelns führte zu der Annahme, daß es möglich sei, ein gesellschaftliches Optimum über ein freies Spiel der Kräfte auf dem Wege privatwirtschaftlicher Entscheidungen zu erreichen. Daß dieses gesellschaftliche Optimum heute ohne staatliche Eingriffe nicht mehr erreicht werden kann, bezweifelt wohl niemand mehr.

Kapp kommt nach einer Analyse der ökonomischen Verursachungs- und Wirkungstendenzen zur These der überproportional zunehmenden Umweltgefährdung und der steigenden Sozialkosten unter der Voraussetzung, daß wirksame Umweltschutzmaßnahmen nicht zur Anwendung gelangen /7/. Betrachtet man den zu erwartenden Anstieg der Bevölkerung, die Zunahme der Produktion und damit des Volumens der Abfallproduktion, die Zunahme der Schad- und Giftstoffe und ihre Abführung in die Luft und die Gewässer und zuletzt die zunehmende Konzentration von Produktion und Bevölkerung in Ballungsgebieten, dann muß man entweder eine progressiv steigende Umweltgefährdung oder progressiv steigende Aufwendungen für notwendige Verhütungs- bzw. Reinigungsmaßnahmen erwarten.

3.1.2 Das Problem der Verteilungseffekte der Umweltschäden

Zunächst soll kurz der Unterschied zwischen Markt- und Umweltbeziehungen erläutert werden. Marktbeziehungen sind in der Regel mehr oder weniger freiwillige, reziproke Vertragsbeziehungen, bei denen ein Abwägen von Aufwand und Erfolg eine Rolle spielt. Umweltbeziehungen dagegen, d.h. Auswirkungen des Produktionsprozesses auf die soziale und natürliche Umgebung des Menschen und die Beziehungen zwischen Umwelt und Mensch sind weder freiwillig noch reziprok /7/.

Die negativen Auswirkungen der Umweltgefährdung in modernen Industriegesellschaften stellen nun kein globales Problem dar, vielmehr wird die Gesundheit und das Leben von Menschen nur einer bestimmten Region bedroht, in der die Menschen der Umweltgefährdung mehr oder weniger schutzlos ausgeliefert sind. Aus der ungleichen Verteilung der Umweltbelastung und der ungleichen Mobilität verschiedener Einkommensgruppen ergibt sich ein Verteilungsproblem: höhere Einkommensgruppen können dem Zwang der Umweltbeziehungen entfliehen, indem sie ihren Wohnsitz in Randzonen von Ballungsgebieten verlegen, Wochenendhäuser im Grünen

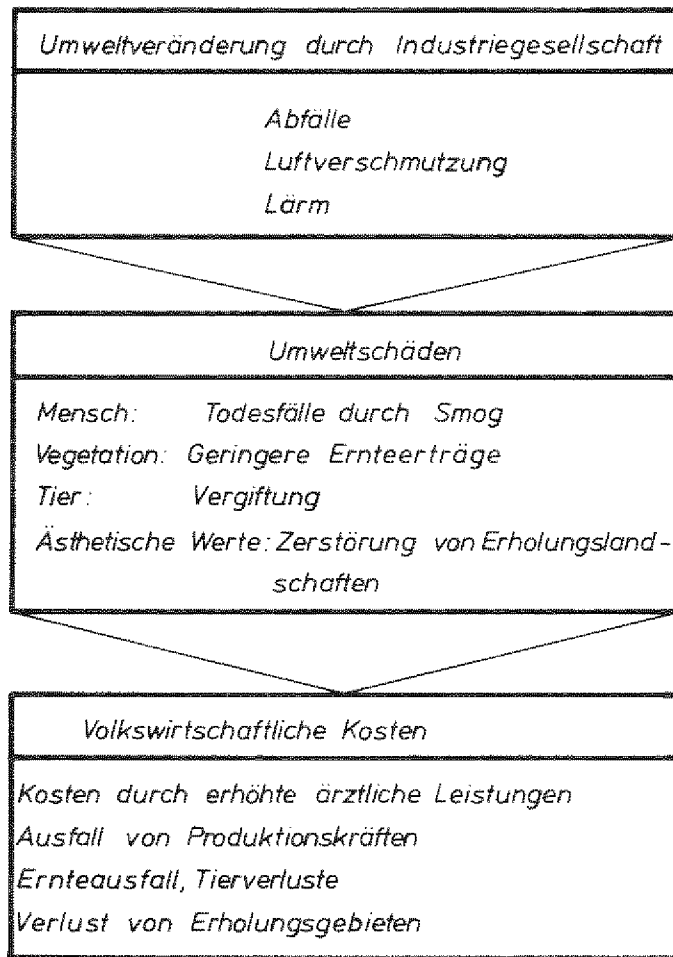
zulegen, ihren Arbeitsplatz in weniger umweltgefährdete Regionen verlegen /8/.

Weitere Verteilungsprobleme entstehen, wenn wir unter Umweltgefährdung auch die frühzeitige Erschöpfung sich nicht erneuernder Rohstoffreserven verstehen /7/. Die hochentwickelten Industrieländer, in denen ein relativ geringer Anteil der Weltbevölkerung lebt, beziehen ihre Rohstoffe zum größten Teil aus weniger entwickelten Ländern, deren Reserven auf diese Weise abgebaut und erschöpft werden. Auch hier handelt es sich um einen Teil ungleicher Verteilung, worüber auch nicht das Argument hinwegtäuschen kann, daß die Ausnutzung der Bodenschätze und Rohstoffquellen zumindest einen Beitrag zur Entwicklung der weniger entwickelten Länder darstellt.

3.1.3 Das Problem der Meßbarkeit der durch die Umweltzerstörung verursachten Sozialkosten

Die sozialen Kosten zeigen sich mit Abstufungen, oft kaum spürbar, oft unmittelbar ins Auge fallend, in Form einer erhöhten Nachfrage nach ärztlichen Leistungen, einer Entwertung von Eigentum, Verlusten von produktiven Arbeitskräften pro Stunde, geringeren Ernteerträgen, einer kürzeren Lebensdauer von durch den Menschen errichteten Bauwerken, von Verlusten an Tierleben, von Kosten für die Bodenerhaltung sowie im Bereich ästhetischer Aspekte und der Fragen, die sich auf den Wert des Lebens erstrecken (vgl. Abb. 5).

Während die Kosten für die Installierung von Anlagen zur Verbesserung oder Erhaltung einer bestimmten Umweltqualität wertmäßig erfaßt werden können, lassen sich die durch die Umweltschädigung verursachten volkswirtschaftlichen Kosten nur schwer bzw. überhaupt nicht bestimmen. Dieses Problem stellt sich in ähnlicher Weise auch bei der Ermittlung



Entstehung volkswirtschaftlicher Kosten durch Umweltveränderung

Abb. 5: Entstehung volkswirtschaftlicher Kosten durch Umweltveränderung

des Benefits im Rahmen von Nutzen-Kosten-Analysen umweltschützender Maßnahmen /9/.

Das entscheidende Problem bei der Ermittlung der sozialen Kosten besteht darin, daß die Umwelt als öffentliches Gut interpretiert wird; Umwelt kann nach traditioneller Meinung von allen Individuen in gleicher Menge genutzt werden und das "Ausschlußprinzip des Marktmechanismus" kann für sie nicht angewandt werden. Folglich existieren keine Marktpreise, damit können die sozialen Kosten nicht exakt quantifiziert werden.

Trotzdem findet man in der Literatur Schätzungen über die volkswirtschaftlichen Verluste in Geldeinheiten quantifiziert /9/. Zum Beispiel zeigen eingehende Studien in den USA, daß die volkswirtschaftlichen Verluste am Materialwert, die durch Abgase und Stäube verursacht werden, seit 1950 um mehr als das Fünzfache gestiegen sind (Abb. 6). Waren es 1950 noch etwa 2 Mrd. US-Dollar, so stiegen die Kosten bis 1963 schon auf 11 Mrd. Dollar und bis 1967 sogar auf 30 Mrd. Dollar an.

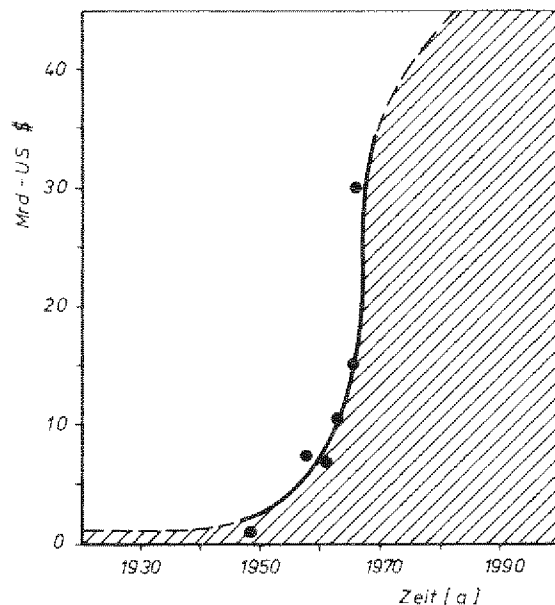


Abb. 6: Volkswirtschaftliche Verluste am Materialwert in den USA
/nach 10/

Trotz vorliegender Zahlen für die durch Umweltzerstörung verursachten Sozialkosten sollte man sich nicht über das Problem der Meßbarkeit hinwegtäuschen lassen.

Ein Ansatz zur Ermittlung der sozialen Kosten geht über die Aufstellung einer Schadensfunktion, die einen Zusammenhang zwischen Schadstoffen wie z.B. Partikel, Kohlenmonoxyd und dem Schaden herzustellen versucht. Schadensfunktionen enthalten eine Reihe bisher nicht gelöster Probleme. Es muß unterschieden werden, ob die Schadstoffe abbaubar sind oder ob sie sich in der Zeit akkumulieren.

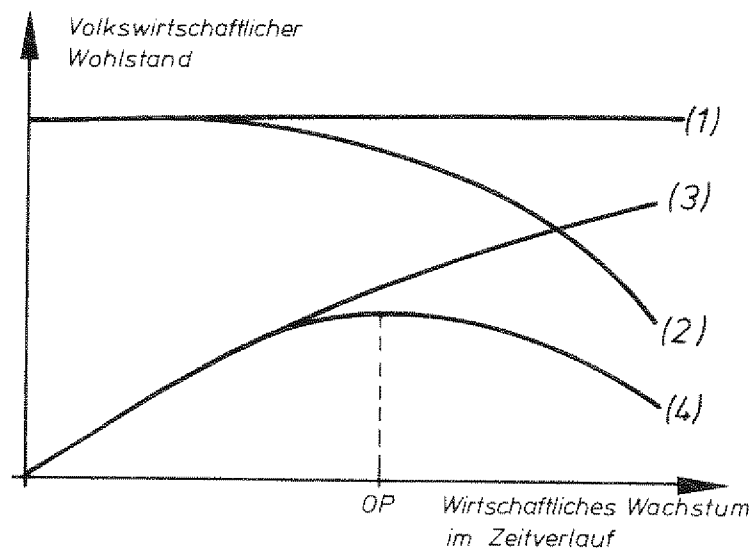
Ferner muß die Schadensfunktion die Assimilationskapazität der Umwelt berücksichtigen. Weiter ist zu klären, ob die räumliche Dichte der ökonomischen Aktivität und die Intensität der Nachfrage nach einem Umweltdienst den Schaden beeinflusst und inwieweit die Schadensfunktion Diskontinuitäten aufweist /8/. Auf die Problematik der Schadensfunktion soll in einem gesonderten Kapitel eingegangen werden, da sie für die vorliegende Arbeit von besonderer Bedeutung ist.

Eine Auslegung des Begriffs der "opportunity costs" - (Kostenbegriff, demzufolge Kosten einem entgangenen Nutzen gleich sind; Nutzenentgang ist gebunden an das Vorhandensein konkurrierender Verwendungsmöglichkeiten für knappe Mittel /11/) - führt zu einem weiteren Ansatz zur Bestimmung von durch Umweltzerstörung verursachten Sozialkosten. In diesem Ansatz wird versucht, z.B. die Kosten der Verschmutzung eines Sees, eines Strandes oder anderer Erholungsgebiete durch die entgangenen Einnahmen oder durch die höheren oder zusätzlichen Transportkosten (von Erholungssuchenden) zum nächsten noch nicht verschmutzten Erholungsgebiet zu messen.

3.2 Wachstumsumlenkung und Umweltkrise

3.2.1 Umweltschutz und technischer Fortschritt

Auch wenn die Wertänderung infolge einer Verringerung der Nutzungsmöglichkeiten der natürlichen Umwelt sich nicht exakt rechnerisch angeben läßt, so kann man doch ganz klar darstellen, daß dadurch eine Verringerung des Volksvermögens hervorgerufen wird. Diese Verringerung des Volksvermögens wird besonders deutlich, wenn früher mögliche Nutzungen der Umwelt nicht mehr als "freie, unbepreiste Güter" zur Verfügung stehen. Dieser Verlust wird etwa deutlich, wenn ein natürliches Flußschwimmbad aufgrund der Wasserverschmutzung durch eine künstliche Badeanstalt ersetzt werden muß /12/.



- (1) Der mit dem ursprünglich vorhandenen Vorrat an Umweltleistungen verbundene maximale Wohlstand.
- (2) Der mit den jeweils vorhandenen Umweltleistungen verbundene Wohlstand.
- (3) Der mit dem jeweiligen Realeinkommen verbundene Wohlstand
- (4) Der gesamte Wohlstand

Abb. 7: Der Wohlstand in Abhängigkeit vom wirtschaftlichen Wachstum /nach 13/

Noch deutlicher wird die Verringerung des realen Volkseinkommens, wenn man die Theorie vom Grenznutzen betrachtet. Als zu Beginn des wirtschaftlichen Wachstums der Vorrat an Umweltleistungen noch sehr groß war, entsprach das Sozialprodukt noch dem tatsächlichen volkswirtschaftlichen Wohlstand (vgl. Abb. 7). Je stärker der Umweltvorrat jedoch schrumpft und je mehr gleichzeitig der einzelne seine Bedürfnisse befriedigt, d.h. je kleiner der Grenznutzen wird, um so fühlbarer wird der Verlust und um so geringer der zusätzliche Nutzen des Realeinkommens /13/. Das bedeutet, daß der allein monetäre Maßstab zur Messung des Wohlstandes keine Gültigkeit mehr haben kann, d.h. die "Wohlstandsminderung" durch Umweltveränderung kann in dem gebräuchlichsten Indikator des wirtschaftlichen Fortschritts, dem Sozialprodukt, nicht zum

Ausdruck kommen /12/. Das Nettosozialprodukt wird zu hoch ausgewiesen, da die Sozialproduktrechnung - anders als Bilanz bzw. Gewinn- und Verlustrechnung eines Unternehmens - keine Ermittlung des Volksvermögens enthält; Verringerungen des Volksvermögens, die durch die Beeinträchtigung der Nutzungsmöglichkeiten der natürlichen Umwelt hervorgerufen werden, können also im Gegensatz zum Anlagenverschleiß in Form von Abschreibungen nicht berücksichtigt werden.

Wie aus diesen Überlegungen deutlich wird, muß es ein optimales wirtschaftliches Wachstum geben, bei dem der Zuwachs an Wohlstand durch die Erhöhung des Realeinkommens gerade gleich groß ist wie die Minderung des Wohlstandes durch den Umweltverlust. Abb. 7 verdeutlicht schematisch die Lage des Optimalpunktes.

Aus dieser Abbildung muß man den Schluß ziehen, daß das wirtschaftliche Wachstum gebremst werden muß, um eine Volkswirtschaft nicht über den Optimalzustand hinausschießen zu lassen. Gegen diesen einfachen Schluß muß aber zweierlei angeführt werden: Erstens läßt sich ein Optimalzustand nicht eindeutig definieren. Das liegt einmal daran, daß der Mensch sich über seine Gesamtsituation im unklaren ist. Er freut sich ebenso über die Bequemlichkeit eines eigenen PKW's wie er sich über Verkehrsstauungen und Autoabgase ärgert. Zum anderen begegnet jeder Mensch dem wirtschaftlichen Wachstum in anderer Weise. Zweitens wird bei der Forderung nach einer Bremsung des wirtschaftlichen Wachstums der mögliche technische Fortschritt nicht berücksichtigt. Wachstum muß nicht nur Verringerung der vorhandenen Umweltleistungen bedeuten. Im Gegenteil kann gerade wirtschaftliches Wachstum in Form von technischem Fortschritt dazu beitragen, einmal verbrauchte Umweltleistungen wieder zu gewinnen. Auch wenn die Nutzenenergie zugunsten der Umweltenergie (notwendige Energie zur Vermeidung von Umweltverschmutzung) in Zukunft weiter zurücktreten muß, muß es nicht, wie nach Rechnung von Binswanger und Lederberger, zu einem Zusammenbruch der Wirtschaft führen /14/.

Binswanger und Lederberger gehen unter Zugrundelegung einer 10-jährigen Verdoppelungsrate des Energieverbrauchs davon aus, daß bei Konstanzhaltung eines Niveaus der Umweltverschmutzung nach 40 Jahren ein Leerlaufzustand erreicht wird (vgl. Abbildung 8). Dagegen muß eingewandt werden, daß wesentliche Annahmen mit der Realität nicht übereinstimmen.

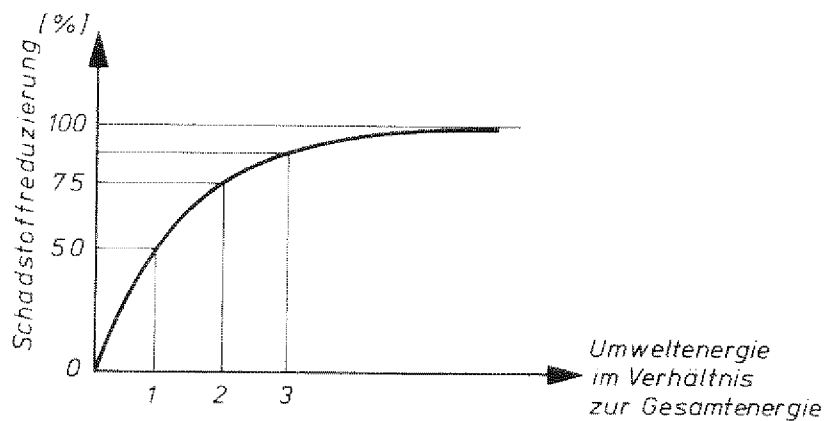


Abb. 8: Zunahme der Umweltenergie in Abhängigkeit von Schadstoffreduzierung

Der Faktor "Technischer Fortschritt" wird nicht berücksichtigt, damit ist der Ansatz, daß die Gesamtbelastung indexmäßig den wirtschaftlichen Aktivitäten entspricht und nur durch technologische Umweltmaßnahmen beeinflusst werden kann, nicht realistisch. Es wird übersehen, daß zur Entwicklung effizienter Umweltschutzanlagen auch technischer Fortschritt notwendig ist bzw. durch technischen Fortschritt gar nicht erst die Umwelt belastet wird.

Voraussetzung für einen Beitrag der Technik zum Umweltschutz ist natürlich die Bereitschaft des Menschen, die Technik als Instrument zur Umweltgestaltung und nicht als Instrument zur Umweltzerstörung einzusetzen. Der Mensch muß also die Technik als Instrument einsetzen, nicht nur um der schon vorhandenen Umweltgefährdung Herr zu werden, sondern

auch um existentiell gewordene Bedürfnisse auch weiterhin befriedigen zu können. Die Möglichkeiten der Technik sind dabei vielfältig (vgl. Abb. 9). Einmal läßt sich eine Erhöhung des Wirkungsgrades erzielen, das verursacht entweder einen geringeren Energieverbrauch und damit geringere Emission oder geringere Emissionen pro verbrauchte Nutzenergie.

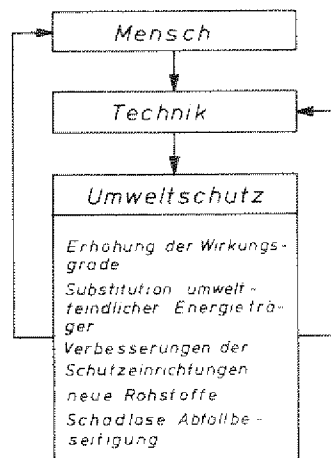


Abb. 9: Wirkungszusammenhang Mensch, Technik, Umweltschutz

Zum anderen können durch neue technologische Entwicklungen Energieträger gefunden werden, die umweltfeindliche Energieträger ersetzen können. Einen weiteren umweltverbessernden Effekt kann die Entwicklung neuartiger Rohstoffquellen haben. Durch Rohstoffrückgewinnung werden die natürlichen Ressourcen geschont, damit wird die Umwelt weniger belastet. Auch eine schadlose Abfallbeseitigung, die durch zu entwickelnde Technologien gewährleistet werden kann, bedeutet eine Entlastung der Umwelt. Eine letzte Aufgabe der Technik ist es, Schutzeinrichtungen zur Verfügung zu stellen, mit denen nicht vermeidbare Umweltbelastungen auf ein Minimum reduziert werden. Abbildung 10 zeigt als Beispiel die Möglichkeit der Erhöhung technischer Wirkungsgrade.

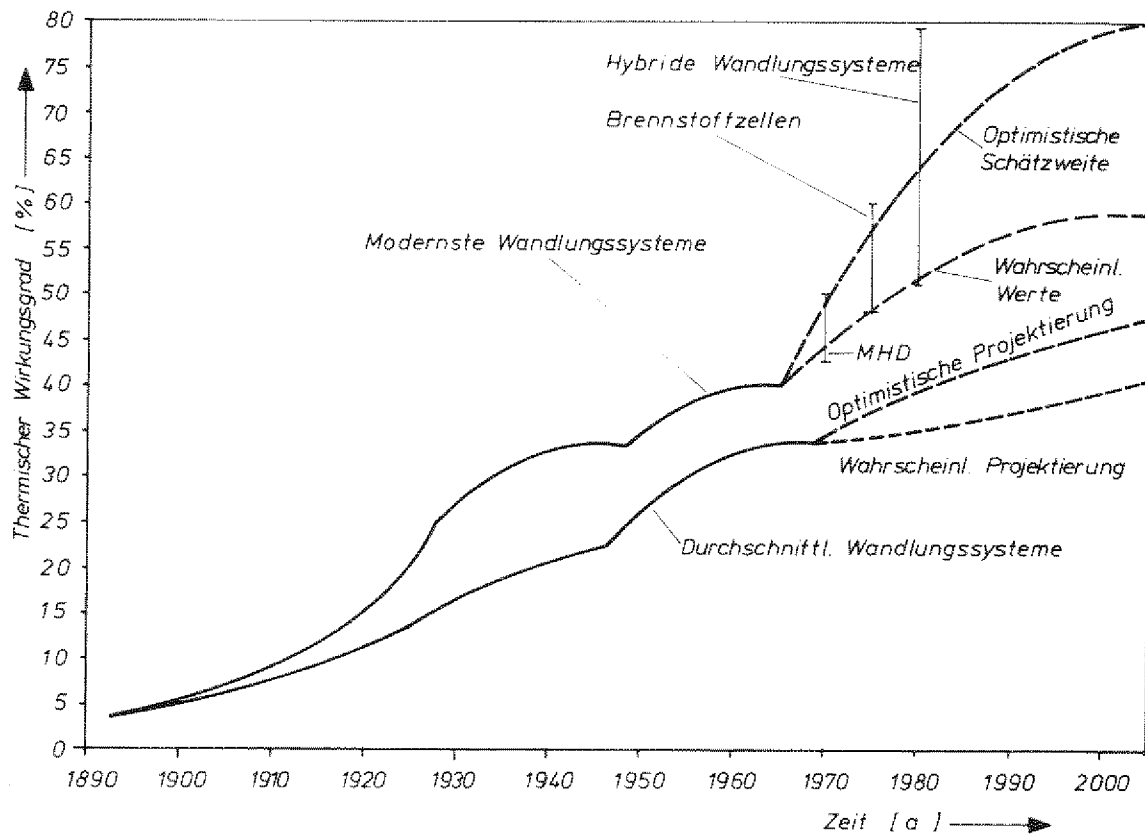


Abb. 10: Entwicklung der Energiewandlungswirkungsgrade

3.2.2 Umweltschutz und Wirtschaftspolitik - Umweltpolitik

In der Realität liegen unterschiedliche Interessen der Umweltgüternutzung vor, d.h. die Ansprüche an die Umweltverwertung sind heterogener Natur. Die Frage nach dem Verursacher der durch die Umweltverwertung entstandenen Kosten ist schon angeschnitten worden und soll nun an einem aktuellen Beispiel erläutert werden: die Schwefelbelastung in einer bestimmten Region soll auf die natürliche Belastung mit Hilfe eines freiwilligen Begrenzungsprozesses zurückgedrängt werden; damit entstehen gleichzeitig für die Industrie wie auch für die Haushalte Umstellungskosten, die in dieser Situation als Umweltkosten definiert werden sollen. In diesem Fall ist im Prinzip jedes Wirtschaftssubjekt bestrebt, eine

sog. "free rider Position" anzustreben. Unterstellt man, daß sich ein Wirtschaftssubjekt (bzw. eine kleinere Gruppe von Wirtschaftssubjekten) findet, das (bzw. die) die Umstellungskosten übernimmt, so können die übrigen Wirtschaftssubjekte kostenlos an der besseren Umweltleistung partizipieren. Wer verursacht aber die Umweltkosten: nur derjenige, der aktiv wird oder auch diejenigen, die in den Genuß einer gewünschten Leistung kommen? /14/. Aufgabe jeder durch Wirtschaftspolitik implizierten Energiewirtschaft und Energiepolitik sollte es nun sein, diejenigen Funktionsbedingungen in einer Volkswirtschaft herzustellen, mit denen einem gewünschten Bedarf an Energie zu den geringstmöglichen volkswirtschaftlichen Kosten ein Angebot entgegengestellt wird.

Der Realität der Marktwirtschaft entspricht es, alle gesellschaftlich akzeptierten Möglichkeiten der Kostensenkung zu nutzen. Ein wesentlicher Kostensenkungsfaktor bedeutet die Vermeidung eigener (privater) Kosten durch Belastung der Allgemeinheit mit "Abfall", was damit eine Wertminderung der natürlichen Umwelt hervorruft. Unternehmen wälzen also durch die Produktion verursachte Teilkosten auf die Allgemeinheit ab, wenn eine technisch mögliche Reinigung von Abgasen und Abwässer zur Einsparung von betrieblichen Kosten unterbleibt; m.a.W. private Kosten werden sozialisiert. Dem marktwirtschaftsgerechten Verhalten entsprechend zwingt der Druck des Wettbewerbers die einzelne Wirtschaftseinheit dazu, die Kosten auf diese Art abzuwälzen und eine free-rider-Position einzunehmen.

Die Mängel der Kostenzurechnung nach diesen marktwirtschaftlichen Prinzipien bedeuten auch, daß kein Lenkungsmechanismus zur Vermeidung von Umweltbelastung besteht /12/. Es besteht also kein Druck, umweltfreundliche Produkte und Produktionsprozesse zu entwickeln. Hinzu kommt noch das Fehlen von Vorschaumöglichkeiten auf die Auswirkungen unternehmerischen Handelns im Hinblick auf die Umweltbelastungen.

Aus allem diesen muß nicht unbedingt auf ein Versagen des Marktsystems geschlossen werden. Der Fehler ist vielmehr in der Funktionsunfähigkeit des Marktes aufgrund fehlender staatlicher Lenkungsmechanismen zu suchen. Den Forschungen der neoliberalen Schule, den Markt als Instrument zu betrachten und ihn durch Rahmenordnungen zu unterstützen, wird nicht widersprochen. Es wird nur allgemein die Forderung erhoben, langfristig zu einer Umlegung der externen Kosten nach dem Verursachungsprinzip auf den Verursacher zu gelangen. Diese Forderung scheint aber mit den bestehenden marktwirtschaftlichen Lenkungsmechanismen nur schwer erfüllbar.

3.2.3 Alternative Lösungsansätze zu einer umweltorientierten Energiepolitik

In einer qualitativen Problemanalyse untersucht Schürmann /14/ die Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Strategien für die volkswirtschaftlich optimale Energieversorgung. Ausgegangen wird von einer zweistufigen volkswirtschaftlichen Steuerung. In der ersten Stufe werden die Umweltstandards, die sich aus der politischen Willensbildung ergeben, festgelegt. In der zweiten Stufe sollen die festgesetzten Normen entsprechend dem Verursachungsprinzip durchgesetzt werden. Die beiden Stufen der volkswirtschaftlichen Steuerung sind miteinander gekoppelt, denn die Umweltstandards kommen als soziale Daten vor dem Hintergrund wirtschaftlicher Zielverzichtes und von Umstrukturierungen zustande, die sowohl durch Umweltschutzziele der ersten Steuerungsstufe als auch durch wirtschaftspolitische Maßnahmen der zweiten Steuerungsstufe bedingt sind /14/.

Die Strategien der zweiten Steuerungsstufe basieren auf drei Konzepten:

1. spezifische Umweltverwendungsaufgaben
2. extern vorgegebene Kostenfaktoren: Gebühren bzw. Steuern
3. Lizenzen und Ausgabe an regionalen Umweltbörsen.

Mit Auflagen als Umweltrationierungsmechanismus im volkswirtschaftlichen Energiefluß können die politisch gewünschten Immissionsstandards garantiert werden. Nur treten die Auflagen über exakt definierten Produktions- und Verbrauchsaktivitäten des Energieflusses an die Stelle marktkonformer Umweltverteilungsmaßnahmen in der Weise, daß die Umweltbelastung genau vorgeschrieben und kontrolliert wird. Dieser Lösung steht generell das Fehlen "ökonomischer Verteilerschlüssel", die die Umweltinanspruchnahme durch energiewirtschaftliche Aktivitäten regeln, entgegen.

Durch die Einführung einer "Umweltschutzsteuer" oder "Umweltabgabe" soll eine "optimale Ausnutzung der politisch gesetzten Umweltkapazitäten durch die einzelnen wirtschaftlichen Aktivitäten" durchgesetzt und "dadurch ein umweltoptimaler Nutzungsgrad von Energie in einer Volkswirtschaft" erreicht werden. Drei Varianten des Gebührenprinzips müssen unterschieden werden:

1. sog. Baumol-Dates-Ansatz
2. sog. Solow-Lösung
3. Proportionalitätskostenprinzip bzw. Durchschnittskostenprinzip und Verursachergemeinschaft als Lösungsansatz.

Beim Baumol-Dates-Ansatz entsprechen die Gebühren den betriebswirtschaftlichen Kosten für die mögliche Vermeidung der Umweltbelastung. Die Solow-Lösung verlangt eine Rohstoffverwertungsgebühr, die bei Installierung von Umweltschutzmaßnahmen rückerstattet wird. Beim letzten Ansatz werden die durchschnittlich verursachten Sozialkosten bei den einzelnen Energieträgern berechnet und als Bewertungsmaßstab für die Gebühren eingeführt. Eine Rückerstattung ist hier nicht vorgesehen. Als letzte Lösung wird der Vorschlag der "Lizenzlösung" vorgestellt. Mit der Lizenzlösung sollen die knappen, aber bislang freien Umweltgüter in marktfähige Umweltgüter transformiert werden. Ausgehend von den politisch festgelegten Immissionsstandards werden vom Staat für

die einzelnen ökologischen Systeme - Gewässersysteme oder regionale, nach ökologischen Kriterien gebildete Luftregionen - Umweltnutzungs-lizenzen an Umweltbörsen zur Versteigerung angeboten. Die Lizenzen werden differenziert nach Schadstoffart, Schadstoffmenge pro Lizenz, Geltungsdauer der Lizenz, Art (z.B. Schornsteinhöhe) und Zeitpunkt (immer während des Tages oder nur zu bestimmten Zeitpunkten) der Nutzung.

4. DIE BEWERTUNG VON SCHADSTOFFEN

4.1 Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Mensch, Tier, Pflanzen und Sachgüter

Um die Auswirkungen von Luftschadstoffen objektiv beurteilen zu können, ist eine klare Trennung zwischen erwiesenen und vermuteten Effekten erforderlich. Der Einfluß der Luftverunreinigungen auf den Menschen und die Langzeiteffekte werden heute mit epidemiologischen Untersuchungen ermittelt. Damit wird auch versucht die Kombinationswirkungen verschiedener Schadstoffe (synergistische Effekte) zu erfassen. Bisher konnte eindeutig die Schädigung von lebenden Zellen durch atmosphärische Schwebestäube nachgewiesen werden /15/. Ferner konnte gezeigt werden, daß verschiedene chemische Verbindungen genetische Wirkungen auf den Menschen haben /16/. Neben epidemiologischen Untersuchungen wurden auch statistische Erfassungen durchgeführt. Aus den statistischen Befunden konnte gefolgert werden:

Staubniederschläge aus der Luft sind an Mortalitätssteigerungen nicht beteiligt. Dagegen ist die Mortalität in Bereichen hoher Verkehrsdichte und geringen Abtransports der Kfz-Abgase durch große Bauhöhe oder Baudichte erhöht /17/. Eine andere Studie, in der in 117 Städten der USA der Zusammenhang zwischen Luftverschmutzung und Sterblichkeit untersucht wurde, ergab folgendes Ergebnis: Die Annahme, daß eine 50 %ige Reduzierung von Luftverschmutzung die Lebenserwartung von Neugeborenen um 3 bis 5 Jahre erhöht, könnte in verschiedenen statistischen Modellen bestätigt werden /18/. Die an Intensität und Umfang zunehmende Vegetationsbeeinträchtigung in der Umgebung von Ballungszentren und Industrieanlagen und damit auch die nachteilige Auswirkung in der Fleisch- und Milchwirtschaft soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Im Immissionsbereich der Blei- und Zinkhütte Nordenham erkrankten nach Weideaustrieb im Frühjahr 1972 rund 140 Rinder an Vergiftungserscheinungen und starben oder mußten notgeschlachtet werden /19/. Die gehäuften Tierverluste standen mit einem

Abgasfilterschaden im Zusammenhang, der offenbar mehrere Monate bestanden hat und erst bemerkt wurde, als die ersten Todesfälle unter den Kühen eintraten. Bleibestimmungen, die in der Folgezeit im Muskelfleisch, Niere und Leber gesund geschlachteter Rinder in verschiedenen Entfernungen vom Werk vorgenommen wurden, hatten das in Abbildung 11 dargestellte Ergebnis. Die deutlich erhöhten Bleigehalte in Leber und Niere machten einen Ausschluß dieser Organe vom menschlichen Genuß erforderlich.

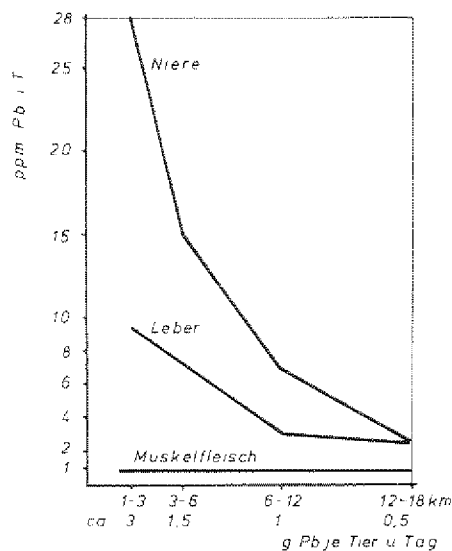


Abb. 11: Bleigehalt in Rindern aus der Umgebung einer Bleihütte
/nach 19/

Unter den Schadenswirkungen von Luftverunreinigungen auf Sachgüter fällt besonders die schädigende Einwirkung auf bauliche Kunstwerke ins Auge. Aufgrund jüngster Forschungen weiß man, daß diese Schäden sehr jungen Datums sind (10 bis 20 Jahre). Eindeutig ist dieser Schaden bei Kunstwerken der Glasmalerei auf die Luftverunreinigung zurückzuführen /20/. Im Zusammenhang mit Feuchtigkeit kommt es zur Bildung von Schwefelsäure, die auf dem Glasgemälde einen Ätzprozeß bewirkt. Das Glas wird an der Außenseite in den sog. Wetterstein, eine harte Kruste aus verschiedenen Sulfaten umgewandelt, die Staub und Rußablagerungen umschließt.

Die beispielhafte Aufzählung der verschiedenen Schadenswirkung macht schon deutlich, wie schwer es ist, eine gesamte Beurteilung ganz verschiedener Umweltbelastungen durch ein Projekt oder eine zivilisatorische Handlung vorzulegen. Doch wegen der Überlagerung von Umweltbelastungen und wegen der möglichen Umlagerung einer Belastungsart auf eine andere (bei vermeintlicher Behebung einer Umweltbelastung tritt oft die Belastung in anderer Form wieder auf) kann eine Betrachtung separater Schadenswirkungen nicht mehr genügen. Die oft komplexen Zusammenhänge und die manchmal nicht direkt erkennbaren Querbeziehungen verschiedener Umweltbelastungen lassen sich fast an beliebig vielen Beispielen illustrieren, von denen hier nur einige typische aufgeführt werden sollen /21/:

- Überlagerung von thermischer Belastung eines Flusses und der Wasserverschmutzung anderen Ursprungs;
- Umlagerung von Luftverschmutzung durch abgelehnte Autobusse auf Umweltbelastung durch Elektrizitätserzeugung, welche für den entsprechenden Betrieb von Elektrobussen erforderlich wird;
- Verlagerung der Elektrizitätserzeuger außerhalb von Ballungszentren und damit Verlagerung der Umweltbelastung.

Die Forderung nach einer Gesamtschau schließt aber die Forderung nach Maßzahlen und Wertmaßstäben, die mindestens eine relative Wertung der verschiedenen Arten der Umweltbelastung erlauben, mit ein.

4.2 Möglichkeiten einer ganzheitlichen Bewertung verschiedener Schadstoffe

Die im vorherigen Kapitel aufgezeigten Schäden werden durch die in der Atmosphäre verteilten Schadstoffe verursacht. Die Höhe des Schadens hängt über eine bestimmte Schadensfunktion von der Immissionskonzentration der Schadstoffe ab. Will man den Schaden in eine operationale, vergleichbare

Größe transformieren, so besteht einmal die Möglichkeit, den verursachten Schaden in einem monetären Maßstab (DM) zu quantifizieren. Die darin enthaltenen Schwierigkeiten sind in Kapitel 3 erläutert. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Immissionswerte mit maximalen Immissionskonzentrationen zu vergleichen und daraus einen Schadensindex zu ermitteln. Als maximale Immissions-Konzentration und maximale Immissions-Raten werden diejenigen Konzentrationen und Raten aller festen, flüssigen und gasförmigen Luftverunreinigungen bezeichnet, unterhalb derer nach dem heutigen Wissensstand Mensch, Tier, Pflanze und Sachgüter gegen Schäden geschützt sind /22/.

	Halb- stunden	24- Stunden	Jahres- stunden
Kohlenmonoxid	50	10	10
Blei	0,010	0,002	0,001
Schwefeldioxid	1,0	0,3	0,1
Schwefelsäure	0,2	0,1	0,05
Stickstoffdioxid	0,2	0,1	0,05
Stickstoffmonoxid	1,0	0,5	0,1
Salpetersäure	0,2	0,1	0,05
Ammoniak	2,0	1,0	0,5
Fluorwasserstoff	0,1	0,1	0,05
Natriumfluorid	0,3	0,2	0,1
Aluminiumfluorid	0,5	0,3	0,1
Cryolith	0,5	0,3	0,1
Kalziumfluorid	1,0	0,5	0,2
Ozon	0,15	0,05	0,01
Schwebstaub < 10 µm	0,3	0,1	0,05
Zink	0,5	0,1	0,05
Cadmium			0,00005
Tetrahydrofuran	180	60	30
Trichloräthylen	16	5	2
Methylenchlorid	150	50	20

Tabelle 1: Maximale Immissions-Konzentration
Mittelwerte (mg/m³)

Diese Werte sind wissenschaftlich begründete Schwellenwerte aus medizinischer oder naturwissenschaftlicher Indikation und somit eine fundierte Bewertungsgrundlage. Die neuesten zur Verfügung stehenden Werte sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Eine Gesamtbewertung verschiedener Schadstoffe kann nur grundsätzlich mittels eines Indexwertes, der durch die Relation der effektiven Belastung zu gegebenen Grenzwerten gebildet wird, erfolgen.

Bisher sind nur wenige Versuche unternommen worden, einen Index zur Gesamtbewertung der Umweltbelastung durch Luftverschmutzung zu entwickeln. Die wenigen existierenden Indizes sind hauptsächlich auf bestimmte Regionen zugeschnitten. Im folgenden sollen zwei Indizes, die auf gemessenen Immissionskonzentrationen basieren, und ein Index, der mit aus einem Absorptionsmodell gewonnenen Konzentrationswerten arbeitet, auf ihre Eignung untersucht werden.

4.2.1 PINDEX, ein kombinierter Luftverschmutzungsindex

Der "Pollution Index", kurz PINDEX, hat den Zweck, die Schadensbeiträge der Hauptemissionen: Stäube, Schwefeloxyde, Kohlenmonoxyd und Kohlenwasserstoffe zusammenzufassen /23/. Zusätzlich werden Oxydanten und der synergistische Effekt von Stäuben und Schwefeloxyden berücksichtigt. Die Berechnung des PINDEX ist schematisch in Abb. 12 gezeigt.

Eingangsgrößen sind die Immissionswerte der betrachteten Schadstoffkomponenten. Sonnenstrahlung beeinflusst die Menge von Kohlenwasserstoffen und Stichoxyden, die zu Oxydation umgewandelt werden. Aus diesen Werten werden mit Hilfe von Toleranzfaktoren gewichtete Größen bestimmt. Die Summe dieser Größen ergibt dann den PINDEX. Die einzelnen Toleranzfaktoren sind aus Abb. 12 ersichtlich. Sie werden aus maximalen Immissions-

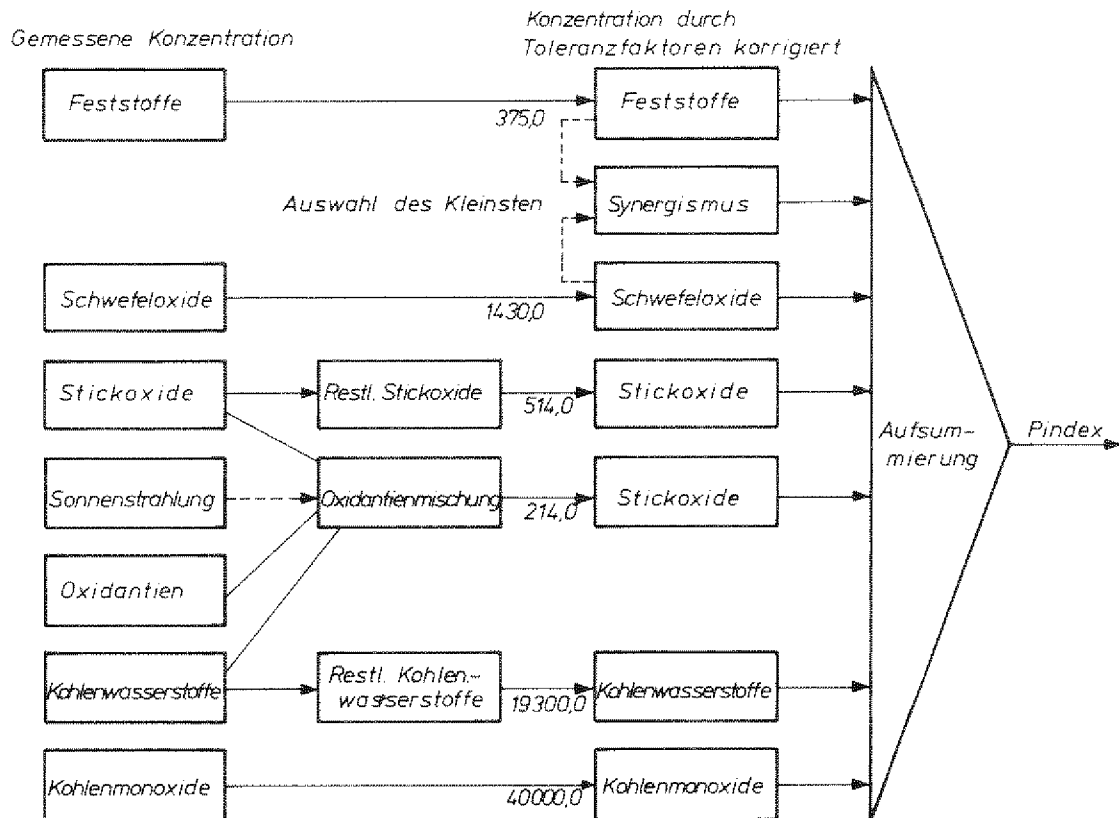


Abb. 12: Berechnung des Luftverschmutzungsindex "PINDEX"

konzentrationswerten (California Standard), die sich auf eine Stunde beziehen, gebildet. So gibt der California-Standard für Schwefeloxide einen Wert von 0,5 ppm an. Das entspricht in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ einem Faktor von 1430,0, der in den PINDEX als Toleranzfaktor eingeht. Der synergistische Effekt von Stäuben und SO_2 wird berücksichtigt, indem der kleinere von beiden noch einmal hinzuaddiert wird.

4.2.2 Oak Ridge Air Quality Index (ORAQI)

Der ORAQI gewichtet und addiert die Anteile von fünf Schadstoffen /24/:

Kohlenmonoxyd	Stick-Oxyde
Schwefeldioxyd	Oxidantien
Stäube	

Die Funktionsweise des ORAQI wird in der mathematischen Formulierung deutlich:

$$\text{ORAQI} = (5.7 \sum_{i=1}^{i=5} (C_i/S_i))^{1.37}$$

C_i = Konzentration des Schadstoffes i

S_i = Immissionsstandard für den Schadstoff i

Der Koeffizient und der Exponent sind notwendig, um den ORAQI so zu skalieren, daß die Background-Verschmutzung einen Index von 10, und eine höchste denkbare Schadstoffbelastung einen Index von 100 ergibt. Das wesentliche am ORAQI-System ist der leicht zu handhabende Nomograph (Abb. 13).

In den ersten fünf Skalierungssäulen werden die gemessenen Schadstoffkonzentrationen zu den Standards in Relation gesetzt. Zu den jeweiligen Schadstoffkonzentrationen können auf der linken Skalierung der Säule (6) normierte Einheiten abgelesen werden. Mit den aus den fünf Säulen aufaddierten Einheiten geht man in Säule (6). Der Schnittpunkt der Geraden von der Einheitensumme in (6) bis zum Fußpunkt der Säule (18) mit der Säule (7) ergibt den ORAQI. Die Säule (8) erlaubt eine Berücksichtigung nicht gemessener Werte. Fehlen z.B. Meßwerte für SO_x , so wird die Gerade zwischen der Einheitensumme auf (6) und SO_x Skalierung auf (8) gezogen.

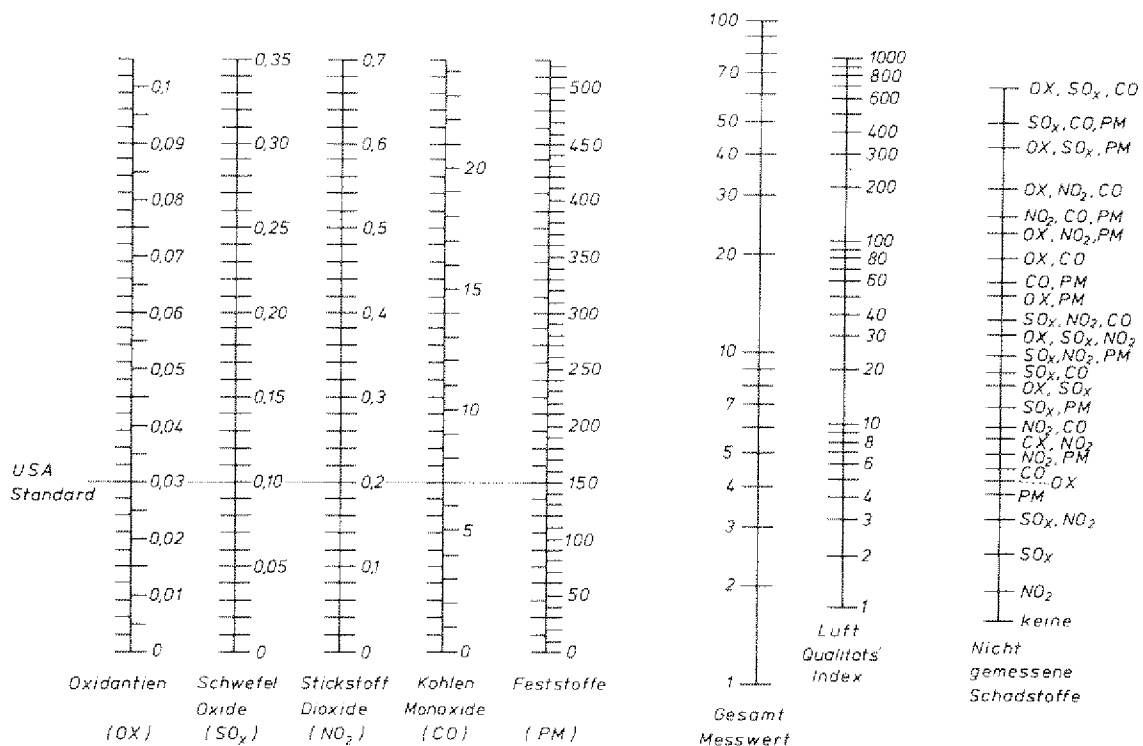


Abb. 13: Nomograph des ORAQI-Systems /nach 24/

Die bisher vorgestellten Luftbelastungsindex-Systeme werden in den USA mit Erfolg angewandt. Sie basieren auf Immissionskonzentrationswerten, die für verschiedene Städte in den USA vorliegen und auf Meßwerten beruhen. In der Bundesrepublik Deutschland existieren nur wenige Meßsysteme mit denen Immissionskonzentrationen festgestellt werden können und die Möglichkeiten der Berechnung von Immissionskonzentration aus Emissionen mit Hilfe von Ausbreitungsmodellen sind sehr beschränkt. Es soll jedoch im folgenden auf einen möglichen einfachen Modellansatz für die Transformation von Emissions- in Immissionswerte hingewiesen werden.

4.2.3 Index auf der Basis eines errechneten Konzentrationswertes

Der Prozeß der Ansammlung von Schadstoffen in einem begrenzten Luftraum aufgrund von Schadstoffemission wird durch eine Vielzahl von natürlichen und technischen Gegebenheiten gesteuert. Die klimatischen Bedingungen wie Windrichtung, Windstärke, Niederschlag und Temperaturprofil, die geographischen Bedingungen, wie z.B. Höhe der umgebenden Berge, sind wohl die entscheidenden Einflußfaktoren. Aber auch technische Gegebenheiten wie Form und Höhe der Emissionsquelle üben einen Einfluß auf die Konzentrationsbildung aus. Dies wird in der Forderung nach höheren Abgaskaminen deutlich. Ferner liefern auch die von außen in den betrachteten Luftraum eingebrachten Schadstoffe bzw. die abtransportierten Schadstoffe einen Beitrag. Für die Massenbilanz der einzelnen Schadstoffe ist folgende Gleichung gültig:

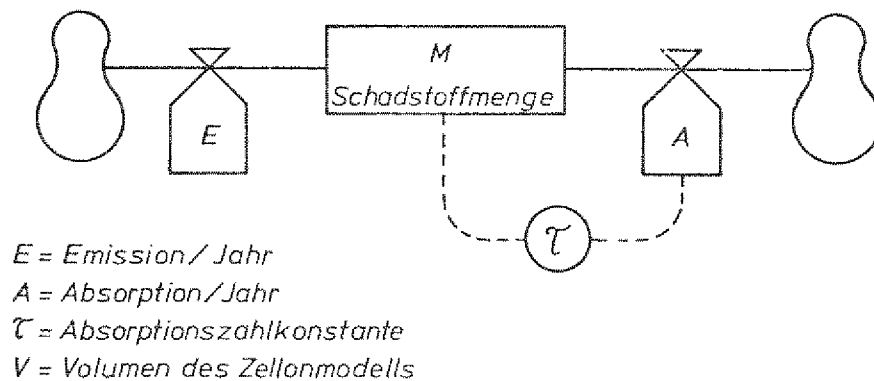
$$\frac{dM}{dt} = E - A + Z - B$$

Darin ist M die Menge von Schadstoffen in der Atmosphäre, E die Emissionsrate, A die Absorptionsrate, Z der Schadstoffeintrag von außen und B der Abgang nach außen. Vernachlässigt man Zu- und Abgang, dann ergibt sich für die Änderung der Schadstoffkonzentration in einem begrenzten Luftraum mit dem Volumen V die Gleichung

$$\frac{dI}{dt} = (E(t) - A(t)) \cdot \frac{1}{V}$$

Die Emissionswerte lassen sich über spezifische Emissionsfaktoren und die Produktionsaktivität der Emittenten verhältnismäßig leicht ermitteln. Das Volumen muß festgelegt werden. Schikarski et.al. /25/ begrenzen den Luftraum durch die Fläche der BRD und eine Höhe von 2 km. Die Absorptionsrate hängt von dem Absorptionsmechanismus ab. Dieser Mechanismus ist, wie schon oben angedeutet, von sehr komplexer Natur und noch weitgehend unbekannt.

Nimmt man einen proportionalen Zusammenhang der Art $A = \lambda M$ zwischen Schadstoffmenge und Immissionskonzentration, so erhält man das in Abb. 14 dargestellte einfache Immissionsmodell.



$$\frac{dI(t)}{dt} = (E(t) - A(t)) \frac{1}{V}$$

$$A(t) = \lambda M(t)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \left(E(t) - \frac{I(t)}{\tau} \right) \frac{1}{V}$$

$$I = \left(\frac{E(t)}{\lambda} - \frac{E - I_0}{\lambda} e^{-\lambda t} \right) \frac{1}{V}$$

Abb. 14: Emission-Immissionsmodell

Mit diesem Modell lassen sich nun die Immissionskonzentrationen bestimmen, wenn die Absorptionszeitkonstanten I bekannt sind. Doch die in den Angaben der Literatur für die Zeitkonstanten bzw. Aufenthaltsdauern der einzelnen Schadstoffe angegebenen Werte weichen erheblich voneinander ab. Junge /26/ schätzt die Lebensdauer von SO_2 auf nur vier bis sieben Tage für die Vereinigten Staaten und Methan /27/ gibt für Zentral-England im Jahre 1950 einen Wert von 10 Stunden an. Schikarski et.al. /25/ geben für τ bei SO_2 4 bis 21 Tage und Partikel 6 bis 30 Tage an. Der Ansatz mit variabler Zeitkonstanten in Abhängigkeit von der Schadstoffkonzentration scheint zu besseren Ergebnissen zu führen. Nord /28/ gibt folgende Halbwertszeiten für die Lebensdauer von SO_2 an:

Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1	10	100	1000	4000
Reduktionszeit auf 50 % $T_{1/2}$	8 Tg.	3 Tg.	10 St.	1 St.	15 min.

Grundsätzlich ist es also möglich, einen Index für die Luftverschmutzung auf der Basis von Immissionswerten, die mit Hilfe dieses Modells rechnerisch gewonnen wurden, zu ermitteln. Man muß sich aber im Klaren sein, daß diese Immissionswerte nur Maßzahlen darstellen, die nicht auf realistische Immissionskonzentrationen schließen lassen. Das liegt einmal an dem willkürlich festlegbaren Luftraum, dann an der hohen Ungenauigkeit der Absorptionszeitkonstanten und zuletzt an der Annahme der homogenen Verteilung der Schadstoffe in dem betrachteten Luftraum. Es erscheint daher sinnvoller, die Emissionsdaten ohne Umrechnung in eine Immissionskennzahl als Basis für einen Index zu verwenden. In dieser Untersuchung soll daher ein aussagefähiger Indexansatz entwickelt werden, der mit Emissionswerten als Basis arbeitet.

4.3 Die Bestimmung der Schädlichkeit eines Schadstoffes und eines Gesamt-Schadens-Index für atmosphärische Schadstoffbelastung

Wie aus den obigen Überlegungen deutlich wurde, besteht im Gleichgewichtszustand ($t \rightarrow \infty$) über die Absorptionszeitkonstante ein einfacher funktionaler Zusammenhang zwischen Emissions- und Immissionswerten, so daß bei Annahme homogener Schadstoffverteilung beide Werte zur Indexbildung herangezogen werden können. Die Emission-Immission-Relation wird sich nicht ändern, wenn Klima und geographische Verhältnisse einer Region sich nicht ändern. Um mit dem Emissionsansatz in einer langfristigen Modellbetrachtung arbeiten zu können, muß noch eine Voraussetzung erfüllt sein: Es darf keine Sättigungsgrenze für die Absorption erreicht werden. Diese Voraussetzung ist erfüllt, da in der Literatur gezeigt werden konnte, daß Absorptionsprozesse einen kontinuierlichen und sättigungslosen Verlauf aufweisen /29, 30/.

Die einzelnen Schadstoffe unterscheiden sich in ihrer Schädlichkeit, und sind damit von unterschiedlicher Bedeutung bei Betrachtung ihrer Schadenswirkung, bei der Entwicklung von Rückhalteeinrichtungen und auch bei der Festlegung von Emissionsreduzierungsstandards. Da diese unterschiedliche Schädlichkeit auch unterschiedliche Wirkungen auf andere Systemgrößen hat, muß die Schädlichkeit für eine systemanalytische Modellbetrachtung in eine operationale Größe transformiert werden. Die Schädlichkeit eines Schadstoffes kommt einmal in den maximalen Immissionskonzentrationen (MIK-Wert) zum Ausdruck. Je niedriger der MIK-Wert, um so schädlicher der Schadstoff /31/. Zum anderen wird aber ein Schadstoff um so gefährlicher, je mehr von ihm in die Atmosphäre emittiert wird. Eine Schadenswertigkeit bzw. eine Schädlichkeit kann dann mit folgender Formel ausgedrückt werden:

$$W_{ij} = \frac{\frac{E_{ij}}{MIK_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_{ij}}{MIK_i}} \cdot 100 \quad [\%]$$

W_{ij} = Schädlichkeit des Schadstoffes i im Sektor j

E_{ij} = Emission des Schadstoffes i im Sektor j

MIK_i = Maximale Immissionskonzentration des Schadstoffes i

Da die Schadstoffe in den einzelnen Wirtschaftssektoren j in unterschiedlicher Höhe anfallen, muß auch bei der Schädlichkeitsbestimmung nach Sektoren unterteilt werden. Das gleiche gilt auch für die Bestimmung eines Gesamtschadensindex. Dieser muß sich auch aus sektoralen Indizes zusammensetzen, der sich wiederum aus Indizes der einzelnen Schadstoffe bildet. Als Index für einen einzelnen Schadstoff kann die Relation der Emissionsmenge im Betrachtungsjahr zur Emissionsmenge im Anfangsjahr genommen werden. Die Steigung der jährlichen Emissionen kann als Maß für die Zunahme der Luftverschmutzung gelten. Verknüpft man diesen Schadstoffindex mit seiner Schadenswertigkeit (Schädlichkeit), dann kann man für den sektoralen Schadensindex schreiben:

$$I_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} W_{ij} \cdot EI_{ij}}{n_j}$$

In dieser Gleichung ist EI_{ij} der Schadstoffindex des Schadstoffes i im Sektor j und n_j die Anzahl der Schadstoffe im Sektor j .

Der bisher beschriebene Ansatz gilt nur für ideale Verhältnisse, d.h. für homogene Raumverteilung der Emissionsquellen. Weiterhin wurde unterstellt, daß diese Quellenverteilung in allen Wirtschaftssektoren wie Verkehr, Haushalte, Industrie und öffentl. Kraftwerke gleichartig ist. In der Realität hat man es aber für die verschiedenen Sektoren mit unterschiedlichen Quellformen und einer ungleichmäßigen Quellverteilung zu tun. Der Verkehr z.B. stellt eine linien- bzw. punktförmige Emissionsquelle in unmittelbarer Nähe des Menschen dar. Wegen der schlechten Verteilung der Emissionen gerade in Häuserschluchten, ist die Schadstoffkonzentration infolge des Straßenverkehrs mit Sicherheit höher als bei der Punktquelle Kraftwerk. Hier sorgt der hohe Abgaskamin für eine gleichmäßige Verteilung. Sollen die Belastungen in den einzelnen Sektoren in einem Gesamt-Schadensindex zusammengefaßt werden, muß der Tatsache der unterschiedlichen Emissionsquellen Rechnung getragen werden.

Die Nordrheinwestfälische Landesanstalt für Immissions- und Bodennutzungsschutz in Essen hat aufgrund von Meß- und Rechenergebnissen für verschiedene Emittentengruppen Faktoren angegeben, mit denen die typischen Emission-Immissions-Prozesse in den einzelnen Sektoren erfaßt werden können /32/. Mit diesen Faktoren ist eine Aussage über den Anteil eines Sektors an der Luftverschmutzung möglich. In Tabelle 2 sind die Relationsfaktoren, die Immission zu Emission in Relation setzen, und die daraus abgeleitet Beteiligungsschlüssel zusammengefaßt.

	Relationsfaktor	Beteiligungsschlüssel
Verkehr	8,5	61,8 %
Haushalt	7,2	31,5 %
Industrie	3,4	5,4 %
Kraftwerke	1	1,3 %

Tabelle 2: Relationsfaktoren und Beteiligungsschlüssel verschiedener Wirtschaftssektoren

Verwendet man diese Relationsfaktoren als Gewichtungsgößen, können die sektoralen Schadensindizes zu einem Gesamtschadensindex zusammengefaßt werden:

$$GI = \sum_{j=1}^{j=4} R_j \cdot I_j$$

oder:

$$GI = \sum_{j=1}^{j=4} R_j \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n_j} W_{ij} \cdot EI_{ij}}{n_j}$$

Dieser Gesamtschadensindex stellt nun einen guten Maßstab für die Luftverschmutzung dar und kann als operationale Größe in eine systemanalytische Modellbetrachtung einbezogen werden.

5. METHODISCHE ANSÄTZE ZUR ANALYSE VON UMWELTSYSTEMEN

Da Umweltprobleme fast alle Bereiche menschlicher Aktivitäten berühren, erscheint es nicht mehr möglich, sie allein mit verbalen Betrachtungen zu durchdringen. Zu diesem Schluß kommt auch der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen der BRD. Der Rat vertritt die Überzeugung, daß ein integriertes ökonomisch-ökologisches Gesamtmodell, mit dessen Hilfe alle wesentlichen auf unsere Umwelt einwirkenden Faktoren erfaßt und in ihrer Wechselwirkung dargestellt werden können, als methodisches Ziel verfolgt werden sollte /33/. Für den Aufbau solcher integrierten Gesamtmodelle lassen sich heute drei methodologisch grundsätzlich unterschiedliche Ansätze unterscheiden:

1. Input-Output-Modelle
2. Mathematische Programmierung oder Optimierungs-Modelle
3. System Dynamics Modelle

Diese drei Ansätze sollen im folgenden kurz skizziert und auf ihre Eignung überprüft werden.

5.1 Input-Output-Modelle

Die Input-Output-Rechnung wurde zunächst nur zur Abbildung der Verflechtung des volkswirtschaftlichen Produktionsprozesses herangezogen. Die Input-Output-Matrix ist in vier Quadranten aufgegliedert. Die Spalten des ersten und dritten Quadranten geben an, welcher Aufwand an Vorleistungen, Importgütern, Abschreibungen, Kostensteuern, Löhnen, Gehältern, Zinsen und Gewinnen zur Erzeugung der Güter eines jeden Produktionssektors innerhalb des betrachteten Jahres notwendig war. Die Zeilen der Quadranten I und II geben an, wo die erzeugten Güter verbraucht werden: zur Weiterverarbeitung im Produktionsbereich oder zur Verwendung als

Investitionsgut bzw. Konsumgut oder zum Export. Der vierte Quadrant dient zur Verbuchung der unmittelbaren Nachfrage an primären Inputs und Importen durch die Endnachfragesektoren. Damit wird die Volkswirtschaft in einem System linearer Mengengleichung dargestellt.

W. Leontief, auf den die Entwicklung der Input-Output-Rechnung zurückzuführen ist, hat nun auch gezeigt, daß man den Zusammenhang zwischen der emittierten Menge eines Schadstoffes und den verursachenden wirtschaftlichen Aktivitäten analog zu den Input-Beziehungen in einem Input-Output-Modell behandeln kann /34/. Als Beispiel für diesen Ansatz sei das von Thoss entwickelte Konzept genannt /35/. Hier werden Schadstoffbilanzen und Input-Output-Tabellen zu einem umfassenden, zusammenhängenden Umweltschutz-Modell integriert. Die klassischen Umweltbereiche Abfälle, Abwässer, Abgase etc. werden je für sich bearbeitet.

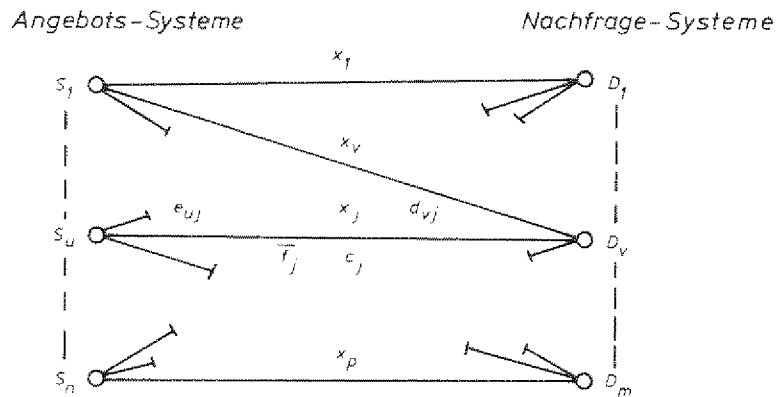
Damit lassen sich Änderungen der Verschmutzung nach Umfang und Zusammensetzung berechnen: wenn z.B. die Endnachfrage oder die Produktionsbedingungen variiert werden, so daß alternative Nachfragestrukturen oder Produktionsverfahren simuliert werden können. Allerdings sind die Rechnungen nur über exogen durchzuführende Variationen der Produktionskoeffizienten möglich. Ferner unterstellen sie lineare konstante Beziehungen zwischen Verschmutzung und Produktionsmenge, was der Realität mit Sicherheit nicht entspricht.

Die Input-Output-Methode ist also wohl auf geschlossene technisch-ökonomische Systeme anwendbar; auf sozioökonomische Systeme ist sie nicht ohne weiteres übertragbar.

5.2 Mathematische Programmierung oder Optimierungsmodelle

Die mathematische Programmierung (mathematische Planungsrechnung) unterteilt sich in die Teildisziplinen lineare Planungsrechnung (lineare Programmierung, lineare Optimierung) die ganzzahlige und die statistische Planungsrechnung. Die dynamische Planungsrechnung zählt nicht dazu; sie hat auch bisher für die Behandlung von Umweltproblemen keine Bedeutung. In der Praxis hat die lineare Planungsrechnung ein weites Anwendungsbereich gefunden; sie ist wohl zu dem bedeutendsten der unter dem Oberbegriff des Operations Research entwickelten Planungsinstrumente geworden /36/. Die Modelle der linearen, mathematischen Programmierung sind dadurch gekennzeichnet, daß sie nur aus linearen Gleichungen bzw. Ungleichungen bestehen. Eine von ihnen bildet die sog. Zielfunktion, die anderen die Restriktionen.

Lineare Umweltmodelle konnten in der Literatur nicht gefunden werden. Doch unter der Vielzahl von Energiemodellen, die mit Hilfe linearer mathematischer Programmierung arbeiten, berücksichtigen einige durch Restriktionsgleichungen die Umweltbelastung /37/. Als Beispiel sei das von K.C. Hoffman entwickelte Rahmenmodell eines nationalen Energiesystems kurz erläutert /38/. In diesem Modell werden n alternative Kategorien von Energieangeboten und m Nachfragekategorien kombiniert, so daß $n \times m$ mögliche Angebots-Nachfrage Kombinationen entstehen. Als Lösung erhält man die optimale Angebots-Nachfrage-Konfiguration unter den Restriktionen der Ressourcenverfügbarkeit, des Bedarfs und der Auswirkungen auf die Umwelt, die exogen vorgegeben werden. Abb. 15 zeigt die graphische Darstellung des linearen Programmierungsmodells. Die Umweltverschmutzung wird durch die Luftschadstoffe CO_2 , CO , SO_2 , NO_x , Feststoffe und langlebige Radionuklide berücksichtigt. Auch das Abwärmeproblem ist eingearbeitet. Als "Umwelt-Output" erhält man die Schattenpreise der Schadstoffemissionen.



Definitionen

- S_u Randbedingung Angebot $u = 1, n$
- D_v Randbedingung Nachfrage $v = 1, m$
- x_j Energiemenge des Energieträgers j von S_u nach D_v ,
 $j = 1, p$ wobei $p = n \cdot m$
- e_{uj} Umwandlungswirkungsgrad für Energieart x_j
- d_{vj} Verbraucherwirkungsgrad für Energieart x_j
- $\bar{f}_j$ Koeffizienten der Restriktionsgleichung für x_j ;
begrenzt durch $\bar{B}$, $\bar{f}_j$ und $\bar{B}$ sind Spalten-Vektoren
der Dimension l
- c_j Kosten pro Energieeinheit der Energie x_j

Abb. 15: Grobstruktur eines nationalen Energiesystems /nach 38/

Die Vertreter des Input-Output-Ansatzes und des mathematischen Programmierungsansatzes verfolgen ähnliche Interessen. Doch während der eine im wesentlichen einen beschreibenden und vorhersagenden Charakter hat, versucht der andere zu bestimmen, wie sich ein System verändern sollte.

Die bisher genannten Methoden konnten durch Computerunterstützung zum Teil erst ermöglicht und ihre Effektivität vervielfacht werden. Trotzdem können ausgedehnte Computerprogramme über ihre Unvollkommenheit nicht hinwegtäuschen, zumal noch viel sozioökologische Quantitäten und Relationen nicht berücksichtigt werden konnten.

5.3 Simulations-Modell

Wesentliche Verbesserungen bei der Analyse des Umweltsystems versprechen Verfahren zur Simulation sozio-ökonomischer dynamischer Systeme /33/.

Unter Simulation ist die Konstruktion und Auswertung dynamischer Modelle, die die Struktur realer Systeme mit beliebig vielen Elementen und Relationen abbilden und für beliebig viele Perioden numerischer Zeitreihen der Variablen erzeugen, zu verstehen /39/.

5.3.1 Abgrenzung der Simulation von mathematisch analytischen Verfahren

Die gegebene Definition von Simulation könnte auch für das Durchrechnen mathematischer Modellansätze gelten. Die Erzeugung von Zeitreihen der Variablen kann in diesem Falle in mehreren Arbeitsgängen mit jeweils variierenden Parametern erfolgen. Diese Systemanalyse ist aber eher mit dem Begriff "Komperativ-statische Modellauswertung" zu umschreiben. Wenn also die Zuordnung von Parametern zu bestimmten Zeitpunkten von außen erfolgt, der Anwender also in dem jeweils betrachteten Zeitpunkt einen kompletten Satz von Parametern bereitstellen muß, sollte nicht von Systemsimulation gesprochen werden. Von Systemsimulation soll erst dann gesprochen werden, wenn Systemabläufe analog im Rechner dargestellt werden, d.h., wenn die Zustandsänderung der zu simulierenden Systeme durch einen Zeit- und Ereignismechanismus über eine gewisse Zeitstrecke hinweg automatisch gesteuert werden. Dabei entwickeln sich die Zustandsänderungen endogen aus dem Ablaufgeschehen.

Ein weiteres Abgrenzungskriterium ergibt sich aus der Modellbildung und der Modellauswertung. Bei der mathematisch analytischen Modellauswertung werden die Systemzustände durch mathematische Funktionen dargestellt. Bei

der Systemsimulation ist neben der Darstellung durch mathematische Funktionen auch die Darstellung logischer Verknüpfungen von Systemkomponenten möglich. Hier übernehmen mathematische Funktionen nur noch die Beschreibung von Eigenschaften und interaktiven Wirkungszusammenhängen. Gesteuert werden die Zustandsänderungen durch einen zeitabhängigen Ereignisstrom.

Ein wesentlicher Faktor bei der Simulation im Gegensatz zu mathematisch analytischen Verfahren besteht in der automatischen Beobachtung oder Messung der Systemzustände zu bestimmten Zeitpunkten und der statistischen Aufbereitung der damit gewonnenen Werte.

Als Vorteile der Systemsimulation gegenüber den mathematisch analytischen Verfahren sind die folgenden zu nennen:

- Simulationsmodelle gestatten die Abbildung von Systemen mit einem Grad von Komplexität und Wirklichkeitsnähe wie er mit mathematischen Modellen nicht erreichbar ist. Insbesondere gestatten Simulationsmodelle die gleichzeitige Betrachtung qualitativer und quantitativer sowie deterministischer und stochastischer Variablen, wodurch eine nahezu vollkommene Approximation der simulierten Experimente an die entsprechenden Realexperimente erreicht werden kann.
- Simulationsmodelle sind in der Regel wesentlich anschaulicher als mathematische Modelle, denn sie gestatten die unmittelbare Beobachtung des Systemverhaltens im Zeitverlauf. Man kann also unmittelbar verfolgen, wie sich die einzelnen Zustandsvariablen entwickeln, wie die Systemkomponenten aufeinander einwirken und wie sich daraus das gesamte Systemverhalten ergibt.
- Systemsimulation erfordert im allgemeinen keinen großen mathematischen Aufwand, da sich das Verhalten der einzelnen Komponenten und ihre Abhängigkeiten zumeist unmittelbar aus dem Systemaufbau ergeben.

5.3.2 Die Leistungsfähigkeit der Systemsimulation

Grundsätzlich besteht mit der Simulation im Sinne der gegebenen Definition die Möglichkeit, Strukturen realer Systeme abzubilden. Dabei muß eine genügend genaue Abbildung der Wirklichkeit angestrebt werden, d.h. zwischen dem formalen Modell und dem zu simulierenden System soll Isomorphie bestehen.

Die Übertragung des Begriffs Isomorphie aus der formalen Logik und der Mathematik auf die systemtechnische Modellbetrachtung heißt nichts anderes, als daß sämtliche Elemente eines Systems und aller Umgebungssysteme, mit denen es in wechselseitigen Beziehungen steht, sowie sämtliche dazugehörige Relationen vollständig in das Simulationsmodell eingehen. Würde man der Isomorphieforderung gerecht, erreicht das Modell die gleiche Komplexität wie das zu simulierende System selbst. Ein wesentlicher Erkenntnisprozeß zur Erfassung komplexer Systeme kann aber nur eine Reduzierung auf der für das Betrachtungsziel relevanten Merkmale liefern. Die Systemelemente müssen also auf ihre Einflußwirksamkeit untersucht werden; Wirkungsfaktoren, die das Systemverhalten nur unwesentlich beeinflussen, können vernachlässigt werden. Das Risiko, aus dem abzubildenden System beachtliche Elemente und Relationen zu vernachlässigen, kann nicht völlig ausgeschlossen werden.

Experimente mit sozio-ökonomisch-ökologischen Systemen sind als Realexperiment kaum durchführbar. Das liegt daran, daß sich wichtige Einflußfaktoren dynamischer Systeme nicht isolieren lassen und eine beliebige identische Wiederholung bestimmter Prozesse nicht möglich ist. Mit der Modellsimulation ist die Möglichkeit gegeben, sich an ein Realexperiment anzunähern, indem durch die Abbildung des Verhaltens nichtlinearer evolutionärer Systeme mit einer großen Zahl von Relationen mit einem dem Untersuchungszweck angemessenen Grad an Realitätsnähe und Komplexität eine Pseudo-Realität aufgebaut wird, an der ein Pseudoexperiment durch-

geführt werden kann. Die Pseudo-Realität stellt eine Hypothese dar, die auf der Grundlage empirischer Information entstanden ist. Diese Hypothese hat nur für bestimmte Systeme und für besondere Bedingungen Gültigkeit. Durch systematische Änderung der exogenen Variablen und Vergleich der Modellreaktionen mit der Realität läßt sich die Modellhypothese überprüfen. In einer Sensitivitätsanalyse läßt sich die Einflußwirksamkeit der Modellkomponenten, besonders der schwer quantifizierbaren imponierbaren Komponenten, näher bestimmen. Werden Parameter festgelegt, deren kleine Veränderungen erhebliche Modellreaktionen hervorrufen, so müssen durch eingehende empirische Studien die tatsächlichen Parameter gefunden werden.

Existiert ein Simulationsmodell, das den gegenwärtigen Zustand eines Systems mit hinreichender Genauigkeit beschreibt, dann kann die Simulationemethode aufgrund ihrer Fähigkeit, Zeitreihen für die endogenen Variablen zu erzeugen, für praktische Aufgaben eingesetzt werden. Hier können Simulationsmodelle als experimentelle Instrumente für die strategische Systemplanung eingesetzt werden. Gerade bei komplexen Systemen, wo der Mensch nicht mehr in der Lage ist, die Wirkung seiner Entscheidungen im einzelnen zu verfolgen, können mit Hilfe der Simulation die Konsequenzen von Entscheidungen abgelesen werden. Durch Variation von Entscheidungen lassen sich alternative Zeitreihen endogener Variablen erzeugen, woraus die günstigste Alternative ausgewählt werden kann.

5.3.3 Die Simulationemethode System Dynamics

Ein Simulationssystem scheint besonders geeignet, das durch Rückkopplungen bestimmte dynamische Verhalten sozio-technischer-ökonomischer Systeme nachzubilden. Auf diese Rückkopplungsstruktur hat Jay. W. Forrester das Methodengebäude System Dynamics zugeschnitten, das in der Lage ist, die Struktur und das Verhalten von komplexen Systemen sehr realitätsnah zu analysieren und simulieren /40, 41, 42/.

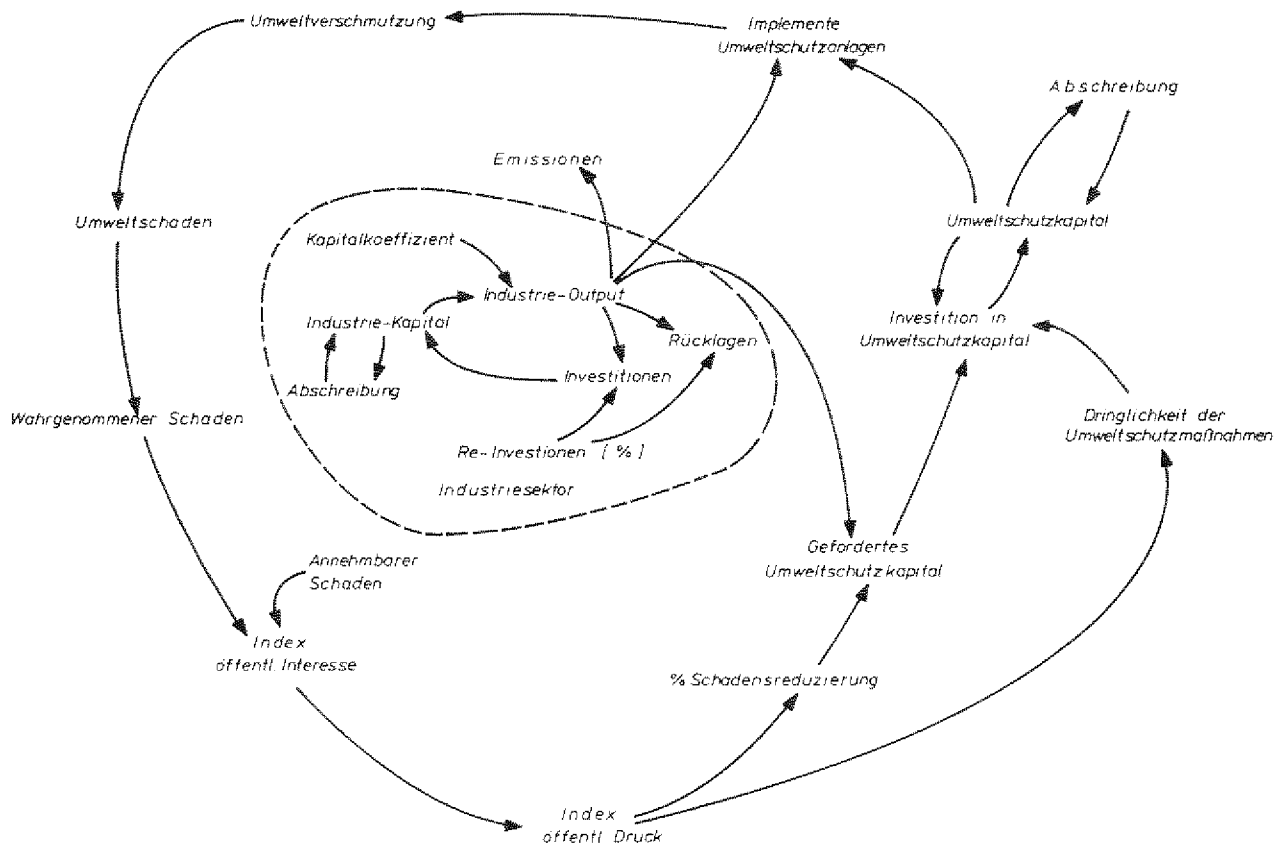


Abb. 16: Wirkungsbeziehungen eines Umweltmodells

Damit kann es auf unser gesellschaftliches System, das zur Klasse von vermaschten-nichtlinearen Rückkopplungssystemen gehört, angewandt werden. Einzelne Rückkopplungsschleifen sind miteinander verknüpft, so daß eine Änderung irgendeiner Einflußgröße innerhalb einer Schleife eine Reihe von Ereignissen auch in anderen Schleifen nach sich zieht. Diese haben evtl. zu einem späteren Zeitpunkt Rückwirkungen auf die Variable, von der die Änderung ursprünglich ausging. Rückkopplungssysteme werden also von ihrer eigenen Vergangenheit beeinflusst.

Als ein System-Dynamics-Beispiel sei das Umweltmodell von A. Ford erwähnt, mit dem der Versuch unternommen wird, zu untersuchen, wie sich starkes Wirtschaftswachstum auf Umweltschutzmaßnahmen auswirkt /43/. In Abb. 16 sind die zugrundegelegten Wirkungsbeziehungen dargestellt. In Rück-

kopplungskreisen sind Systemgrößen wie wirtschaftliches Wachstum, Umweltschutzkosten, Industriekapital und öffentlicher Druck eingebaut, deren Verhalten unter verschiedenen von außen aufgeschalteten Bedingungen simuliert werden kann.

6. MODELLBESCHREIBUNG

6.1 Die Grundstruktur des Modells

Die bestehenden Ansätze zur Analyse des Problems der Umweltverschmutzung versuchen die Wirkungszusammenhänge allein mit physikalischen Variablen zu erklären. In der Hauptsache beschränken sie sich auf die Grundvariablen wirtschaftliche Aktivität, Emission-Immission und Reduzierungskosten der Umweltbelastung. In Wirklichkeit werden diese Beziehungen aber erst durch soziale und politische Faktoren aktiviert. Ein Fortlassen derartiger Faktoren bedeutet die stillschweigende Ceteris-Paribus-Annahme unveränderter ökonomischer, sozialer und politischer Verhältnisse. Diese Annahme ist offensichtlich unrealistisch, wenn man einen langfristigen Zeitraum untersuchen will /44/.

Ferner muß man sich immer wieder vor Augen halten, wie empfindlich und labil die Zivilisation der Menschen durch die enge Vermaschung der Einzelsysteme geworden ist. Jeder Eingriff des Menschen in seine natürliche Umwelt wirkt heute, lediglich mit unterschiedlicher Verzögerung auf ihn selbst zurück. Dies ist eine Folge des Regelkreisprinzips, des Prinzips der Selbstregulation, welches auf der einen Seite im biologischen Bereich das Funktionieren des gesamten Lebens seit einigen Milliarden Jahren ermöglicht hat - also eine ganz beachtliche Garantiezeit aufzuweisen hat - und dessen immer häufigere Mißachtung uns nun auf der anderen Seite vor fast unüberwindliche finanzielle und organisatorische Schwierigkeiten stellt /45/.

Die menschlichen Aktivitäten, die sich in sozialen und politischen Faktoren widerspiegeln, stellen also den Angelpunkt des Umweltproblems dar. Aus diesem Grunde dürfen sie auf keinen Fall in einer Modellbetrachtung vernachlässigt werden. In dem im folgenden zu erläuternden Modell wird der Versuch unternommen, solche, bisher nicht berücksichtigte Variablen mit einem quantitativen Modell in Verbindung zu bringen.

6.1.1 Die Systemgrenzen

Bevor das Umweltmodell entwickelt werden kann, muß das zu simulierende System definiert und abgegrenzt werden. Wie schon in der Zielformulierung für diese Arbeit gesagt, soll in diesem Ansatz nur die Luftverschmutzung untersucht werden. Die anderen Bereiche der Umweltverschmutzung (Wasserverschmutzung, Abfälle u.ä.) stellen daher zunächst die Systemumgebung dar. Solange noch keine Ausbreitungsrechnung zur Bestimmung der Immissionskonzentration durchgeführt werden, sind auch Einflüsse auf die Umweltverschmutzung wie Klima, Wetter und geographische Verhältnisse als Systemumgebung zu betrachten.

In Abb. 17 sind die Systemgrenzen dargestellt. Schon hier werden in graphischer Form einige grundlegende Annahmen, die bei der Entwicklung des dynamischen Umweltmodells getroffen wurden, deutlich. So wird der Verbrauch an umweltverschmutzenden Brennstoffen zunächst als exogene Größen vorgegeben. Die exogenen Variablen stellen Größen dar, die das Systemverhalten von außen beeinflussen, aber selbst nicht vom System verändert werden. Die Brennstoffverbräuche müßten eigentlich auch als endogene Variablen behandelt werden, da das Verbrauchsverhalten des Menschen durch die Umweltverschmutzung und deren Auswirkungen beeinflußt wird. Dieser Schritt kann in der Fortführung dieser Arbeit vollzogen werden, wenn das Umweltmodell an ein Gesellschaftsmodell, in dem die Daten über Energieverbräuche endogen durch Systemsimulation erzeugt werden, angekoppelt wird. Die endogenen Modellvariablen werden modellintern berechnet. Sie können in vier Kategorien eingeteilt werden:

- Soziale Variablen
- Politische Variablen
- Ökonomische Variablen
- Physische Variablen

Welche einzelnen Größen herangezogen werden, um sozio-politisch-ökonomisch-technische Wirkungszusammenhänge zu untersuchen, ist aus Abb. 17 ersichtlich.

Wetter, Klima, geographische Gegebenheiten

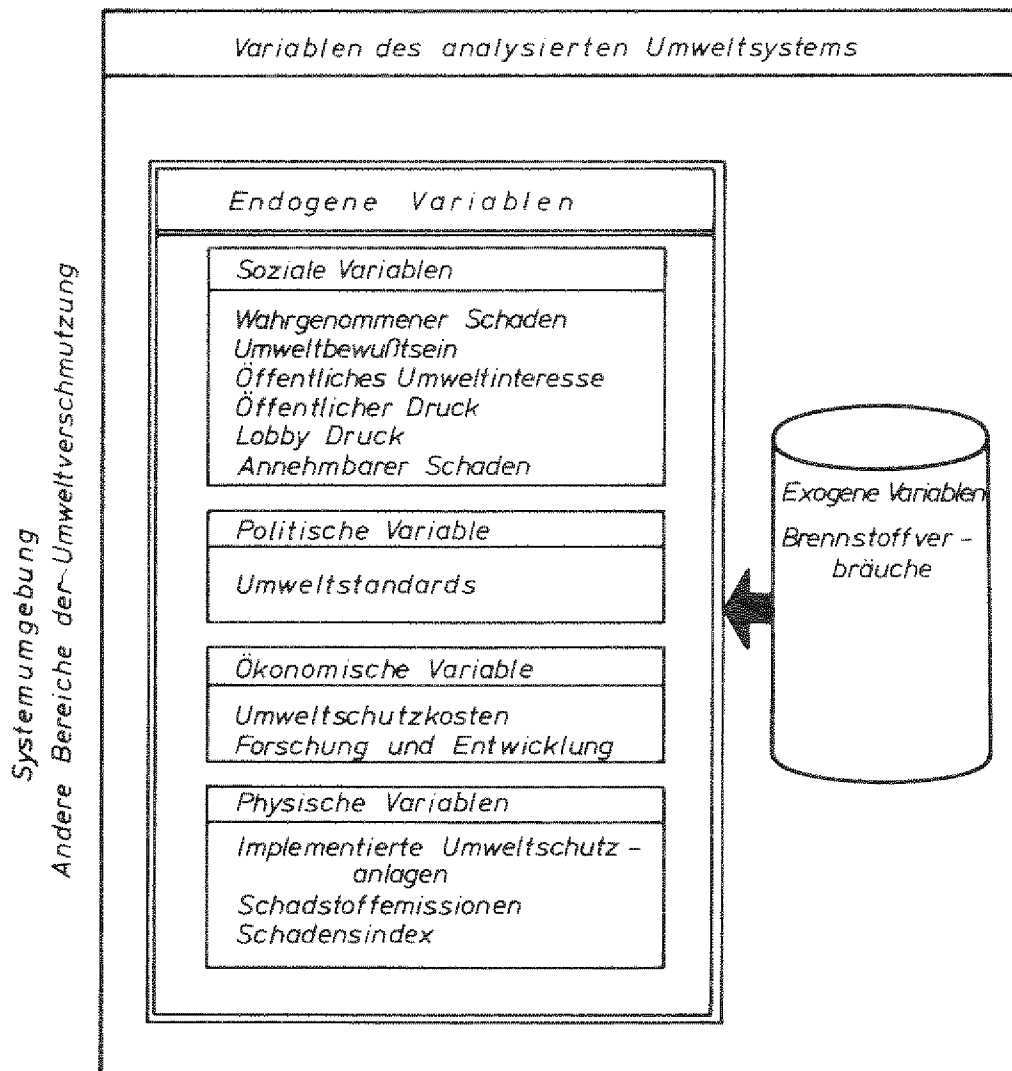


Abb. 17: Systemgrenzen des Umweltmodells

Die Verknüpfung von Größen wie "Öffentliches Interesse" oder "Lobby Druck" mit einem quantitativen Modell bereitet einige Schwierigkeiten; doch bei der Untersuchung der Wirkungszusammenhänge der einzelnen Modellvariablen wird deutlich, welchen Einfluß sie auf das Systemverhalten haben. Niemand wird den entscheidenden Einfluß, der durch Größen wie die genannten wirksam wird, leugnen. An einem Zitat soll z.B. der Lobby-Druck verdeutlicht werden:

"An dieser Stelle soll ein Wort des Bedauerns eingefügt werden, daß es zwischen den zuständigen Ministerien und der betroffenen Wirtschaft zu keiner gemeinsamen Anstrengung gekommen ist, die verschiedenen Rauchgasentschwefelungsverfahren auf ihre wirtschaftliche Realisierbarkeit hin zu überprüfen. Die Elektrizitätswirtschaft, unterstützt vom Steinkohlenbergbau, hat zwar zu wiederholtem Male dargestellt, daß die Rauchgasentschwefelung noch nicht Stand der Technik sei. Zwar hat das Bundeswirtschaftsministerium ebenfalls versucht, das BMI mit Argumenten zu einer Modifikation seiner Einstellung zu bewegen. Diese Bemühungen sind von letztgenannten nach unseren Feststellungen ebenso ignoriert worden wie die vom BMFT angeregte und mitfinanzierte Systemanalyse der Entschwefelungsverfahren."

Haager, Hauptgesellschaftsführer der VDEW /46/.

Es soll hier betont werden, daß der "Lobby Druck" mit keinem negativen "Beigeschmack" in das Modell eingebaut wird, sondern nur als eine Regelgröße unter der Vielzahl der anderen Regelgrößen verstanden wird.

6.1.2 Die Wirkungszusammenhänge der Modellvariablen

Hauptverursacher der Umweltverschmutzung ist die Energiewirtschaft. Quelle der atmosphärischen Schadstoffbelastung ist in der Hauptsache die durch Verbrennung fossiler Brennstoffe verursachte Schadstoffemission. Daher ist es zweckmäßig beim Verursacher in den Wirkungskreislauf einzusteigen. Die grundlegenden Wirkungszusammenhänge der Modellvariablen sind in Abb. 18 in Form eines Loop-Diagramms dargestellt. Zur Vereinfachung ist in dieser Darstellung nicht nach einzelnen Wirtschaftssektoren unterschieden. Das Modell gliedert sich aber in die Sektoren Verkehr, Industrie- und Öffentliche Kraftwerke und Haushalte sowie Kleinverbraucher.

Die potentiellen Emissionen sind die Emissionen, die durch die Verbrennung von Brennstoffen hervorgerufen werden, wenn keine Anlagen zur

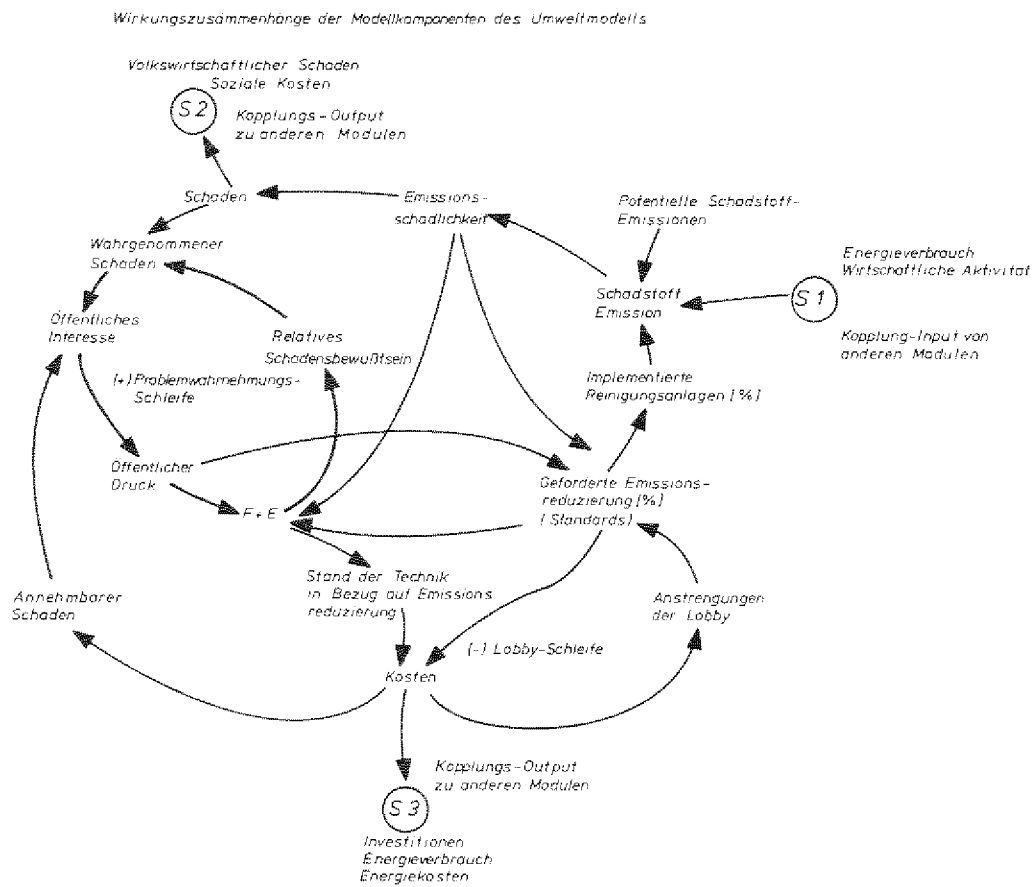


Abb. 18: Wirkungszusammenhänge der Modellkomponenten des Umweltmodells

Reduzierung der Schadstoffe irgendwo in den Verfahrensablauf eingebaut würden. Die Emissionsmenge hängt von der Mengenstruktur der einzelnen Brennstoffarten und von dem Verfahren der Verbrennung ab. In diesem Umweltmodell sollen zunächst die in Abb. 19 dargestellten Emissionsquellen (Emitenten) berücksichtigt werden. Kennt man nun die spezifischen Emissionsfaktoren der einzelnen Emissionsquellen, so kann man den Zusammenhang zwischen der emittierten Menge des Schadstoffs und den verursachenden wirtschaftlichen Aktivitäten analog zu den Input-Beziehungen in einem Input-Output-Modell behandeln.

Die spezifischen Emissionsfaktoren hängen nun von den Schadstoffgehalten im Brennstoff, z.B. Schwefelgehalt der Kohle, und den in den Verfahrensablauf eingebauten Reduzierungsanlagen, z.B. Rauchgasentschwefelungsanlage, ab.

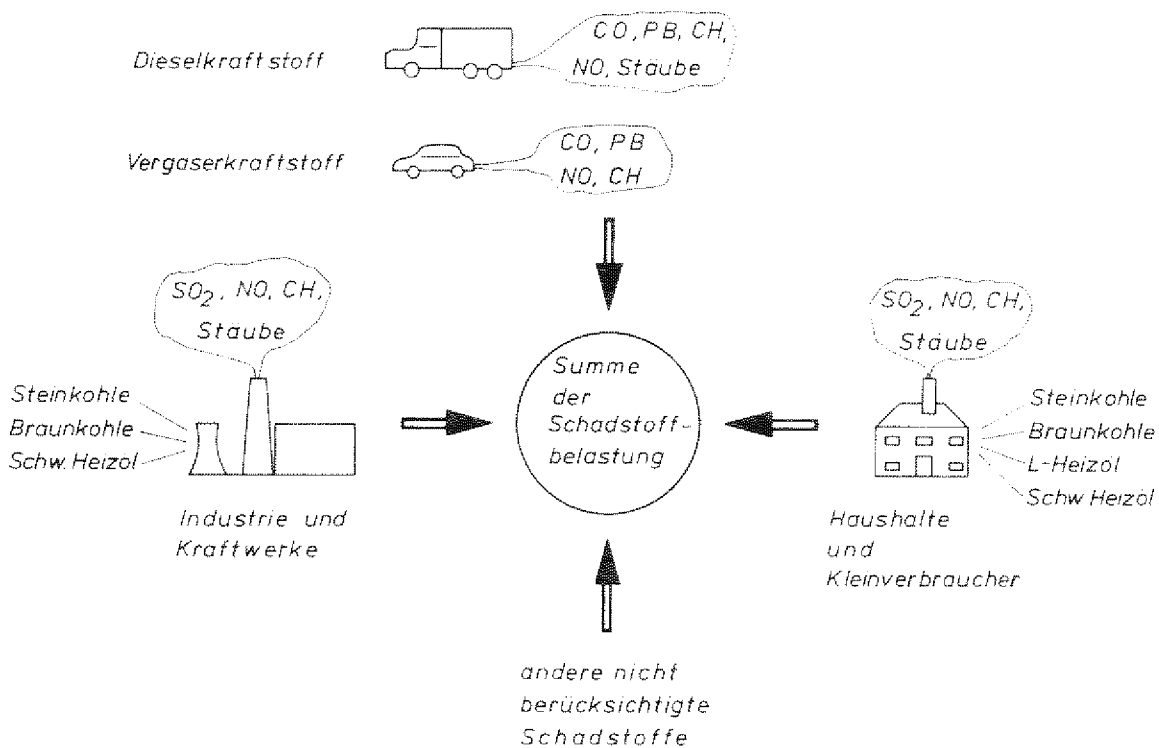


Abb. 19: Übersicht der für den Untersuchungszweck relevanten Emittenten

An dieser Stelle des Wirkungskreislaufes befindet sich eine Kopplungsstelle zum Wirtschaftsmodell. Die in diesem Modell bestimmten Brennstoffverbrauchsdaten gehen als Input in das Umweltmodell ein.

Die Schadstoffemissionen bewirken im weiteren einen Umweltschaden. Die Probleme bei der Bewertung der einzelnen Schadstoffe im Hinblick auf ihre Schadenswirkungen sind schon besprochen worden. Als Lösung wurde die Entwicklung eines Schadensindex vorgeschlagen. Dieser Schadensindex wird aus einer lufthygienischen Wertigkeit, der Emissionsmenge, maximalen Immissionskonzentrationswerten und einer Emission-Immission-Relation berechnet. Der Schadensindex kann dann als Maß für den in der Realität tatsächlich auftretenden Schaden gelten. Wird dieser Schaden in Geldeinheiten quantifiziert, so kann er als externer Effekt auf das Wirtschaftsmodell einwirken. Dieser externe Effekt hat in Form von sozialen Kosten einen entscheidenden Einfluß auf die Dynamik des gesellschaftlichen Verhaltens. Ein Algorithmus zur Quantifizierung des externen Effekts ist

der Entwicklung. Dieser Output des Umweltmodells ist dann Input für das Wirtschaftsmodell.

Der Schadensindex repräsentiert den effektiv durch die Luftverschmutzung hervorgerufenen Schaden. Dieser Schaden wird aber nicht in gleichem Umfang von der Bevölkerung wahrgenommen. Dies sei an einem Beispiel verdeutlicht: Als Schaden, der durch die Abgasbelastung des Verkehrs verursacht wurde, konnte zunächst nur die Geruchsbelästigung und Hustenreiz wahrgenommen werden. Erst nach umfangreichen medizinischen Untersuchungen wurde festgestellt, daß die emittierten Kohlenwasserstoffe die menschliche Gesundheit besonders gefährden. Unter ihnen befinden sich Substanzen mit kancerogener Wirkung, z.B. das 3,4-Benzpyren /47/. Diese Tatsache konnte auch durch statistische Erfassung von Todesfällen durch Lungenkrebs bestätigt werden. Demnach stellte sich als Quelle Nr. 1 für kancerogene Fremdstoffe der Kraftfahrzeugverkehr heraus /48/. Im Modell wird also effektiv vorhandener Schaden in wahrgenommenen Schaden bzw. der Schadensindex in einen wirksam werdenden Schadensindex transformiert. Dieser wahrgenommene Schaden, im Modell durch einen Schadensindex repräsentiert, erzeugt in der Bevölkerung Interesse an Umweltproblemen und der Umweltverschmutzung. Nach einer bestimmten Verzögerungszeit wandelt sich das Interesse in öffentlichen Druck. Öffentlicher Druck wird z.B. sichtbar in Bürgerinitiativen oder Gesetzesvorlagen.

Im Wirkungskreislauf weiter determiniert dieser öffentliche Druck einmal die von politischen Instanzen vorzugebenden Emissionsreduzierungsstandards und den Umfang von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Umweltbereich.

Die Bestimmung der Emissionsreduzierungsstandards erfolgt im Verkehrssektor auf andere Weise als im Kraftwerks- und Industriesektor und im Haushaltssektor. Dazu folgende Erläuterungen: Das Bundes-Immissions-Schutzgesetz (BImSchG) und die "Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft" (TA-Luft) legt Emissionsgrenzen fest, die grundsätzlich nach dem Stand der Technik zu erreichen sind. Unter Maßnahmen nach dem Stand der Technik sind dabei Verfahren und Einrichtungen zur Begrenzung der Emis-

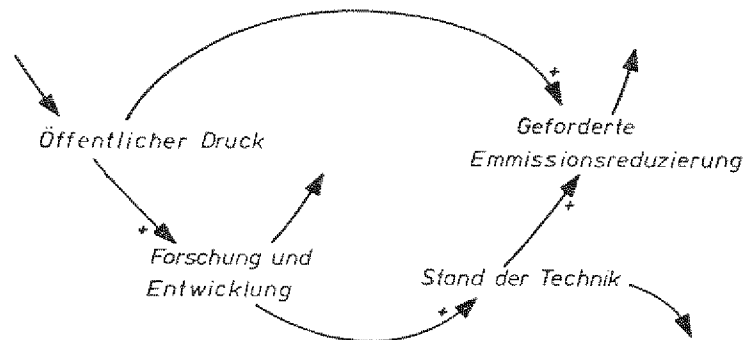


Abb. 20: Wirkungszusammenhang im Sektor Kraftwerke

sionen zu verstehen, die von der Fachpraxis als besonders wirksam anerkannt worden sind. Diese Verfahren und Einrichtungen müssen mit dem im Einzelfall geforderten vergleichbar sein, d.h. es müssen gleiche oder jedenfalls gleichartige technologische Verhältnisse gegeben sein. Die geforderten fortschrittlichen Maßnahmen müssen sich bereits im Betrieb bewährt haben; sie müssen praktisch erprobt sein.

Der Wirkungszusammenhang im Kraftwerks- und Industriesektor gestaltet sich dann wie folgt (vergl. Abb. 20): Die Emissionsstandards werden durch den Stand der Technik determiniert. Der Stand der Technik ergibt sich wiederum aus dem Aufwand für Forschung und Entwicklung. Da der öffentliche Druck auch Einfluß auf die Emissionsstandards hat, sind bei Fehlen öffentlichen Interesses geringere Standards, als durch den Stand der Technik vorgegeben, möglich.

Im Verkehrssektor muß man davon ausgehen, daß die politischen Instanzen einen höheren Standard vorgeben, um die Automobilindustrie zu höheren Anstrengungen in der Forschung und in der Entwicklung umweltschützender Maßnahmen im Kraftfahrzeug zu bewegen. Zum anderen sollen aber auch die Kraftstoffhersteller gezwungen werden, Giftstoffe im Kraftstoff zu reduzieren. Deutlich wird dies an der Bleigesetzgebung in der BRD.

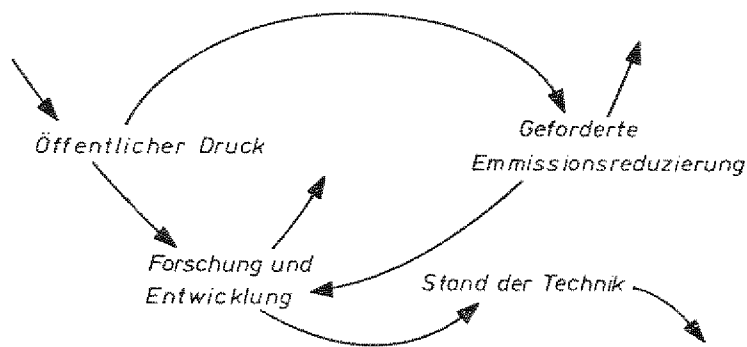


Abb. 21: Wirkungszusammenhang im Sektor Verkehr

In der Gesamtwirkungskette setzen sich die Wirkungen wie in Abb. 21 dargestellt fort.

Öffentlicher Druck determiniert die Emissionsstandards. Diese beeinflussen dann ebenfalls mit dem öffentlichen Druck zusammen den Umfang der Forschungs- und Entwicklungsvorhaben der Automobilindustrie und Raffinerien.

Nachdem die Emissionsstandards vorgegeben sind, müssen in den technischen Anlagen Maßnahmen getroffen werden, mit deren Hilfe die Standards erreicht werden können. Die dazu notwendige Anpassungszeit ist zum Teil in der Umstellung der vorliegenden Verfahrenstechnik begründet, zum Teil ist sie aber auch eine politische Vorgabegröße. Der bisher dargestellte Wirkungskreis schließt mit den tatsächlich implementierten Reduzierungsanlagen. Diese ändern die spezifischen Emissionsfaktoren und damit auch die Mengen der emittierten Schadstoffe. Mit Schließung dieses Wirkungskreises liegt ein negativer Rückkopplungskreis vor. In einem negativen Rückkopplungskreis ist die Rückwirkung auf die die Änderung verursachende Variable der Änderung entgegengerichtet. Das heißt, für den vorliegenden Rückkopplungskreis: nach bestimmten Zeitverzögerungen wird die Senkung der Emissionen um so größer, je höher die Ausgangsmenge der Schadstoff-

emissionen war. Die Wirkungszusammenhänge der bisher beschriebenen Variablen ergeben im Kraftwerks- und Industriebereich zwei Rückkopplungskreise (im folgenden auch kurz Loop genannt). Der Standard-Loop läuft über "Öffentlichen Druck" und Emissionsstandards, während der F+E-Loop über Öffentlichen Druck, F+E und Stand der Technik läuft.

In den bisher skizzierten Rückkopplungsloops wirken noch drei weitere Rückkopplungs-Loops hinein. Den ersten kann man Problemwahrnehmungsloop nennen. Wie schon bei der Erläuterung der Variablen "Wahrgenommener Schaden" angedeutet, bedarf es eines Bewußtseins von Schaden, um effektiv vorhandenen Schaden wahrnehmen zu können. Es gehört zu den unvermeidlichen Begleiterscheinungen der Industriegesellschaft, daß Schädigungsprozessen, die nicht unmittelbar katastrophale Folgen oder Ausmaße haben, eine gewisse Latenzzeit eigen ist, daß sie daher verkannt beziehungsweise bagatellisiert werden. Aber mit zunehmendem Umfang der Forschung werden der Bevölkerung auch nicht so offensichtliche Schädigungen, die zum Teil sehr große Ausmaße annehmen können, bewußt gemacht. Dies geschieht über Zeitungsartikel, Radio-Fernsehen und Bücher. Um diesen Prozeß modellhaft nachbilden zu können, wurde die Variable "Relatives Schadensbewußtsein" eingebaut. Diese Variable kann die Werte von Null bis Eins annehmen. Bei "Null" wird der effektiv vorhandene Schaden nicht bemerkt, bei "Eins" ist der effektiv vorhandene Schaden gleich dem wahrgenommenen Schaden. Der Problemwahrnehmungsloop arbeitet nun wie folgt (vgl. Abb. 22): Öffentliches Interesse induziert nach einer gewissen Zeit öffentlichen Druck. Dieser öffentliche Druck bewirkt zunächst die Bewilligung von Geldern für Forschungs- und Entwicklungsprogramme zur Umweltentlastung. Die damit verbundene Erhöhung des Erkenntnisgrades über Umweltprobleme beschleunigt gleichzeitig die Bewußtwerdung von Umweltschäden. Mit diesem Bewußtsein wird effektiv vorhandener Schaden zu wahrgenommenen Schaden, der wiederum öffentliches Interesse zur Folge hat.

Schnittstellen dieser Rückkopplungsschleife mit anderen Schleifen sind aus der Abb. 18 zu ersehen.

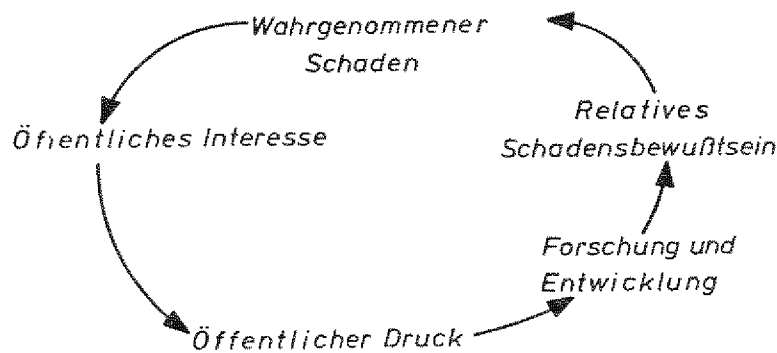


Abb. 22: Problem-Wahrnehmungsloop des Umweltmodells

Damit liegt ein positiver Rückkopplungskreis vor. Positive Rückkopplungs-Loops erzeugen Wachstum oder Schrumpfung, weil die Rückwirkung der Änderung einer Loop-Variablen die Änderung noch verstärkt. Für den vorliegenden Loop bedeutet das: je höher der wahrgenommene Schaden um so höher wird das relative Schadensbewußtsein.

Zwei weitere Rückkopplungs-Loops ergeben sich aus den durch Umweltschutzmaßnahmen verursachten Kosten. Diese Kosten ergeben sich aus den Maßnahmen und Einrichtung, die durch die vorgegebenen Emissionsstandards erforderlich werden. Weiterhin werden die Kosten durch den Stand der Technik beeinflusst. Man kann davon ausgehen, daß sich mit Weiterentwicklung des Standes der Technik die Kosten reduzieren werden. Das gilt besonders im Sektor Verkehr, wo die Standards höher liegen können als der Stand der Technik. Die Kosten haben Einfluß auf zwei Interessengruppen: einmal auf die Verbraucher, die das öffentliche Interesse artikulieren, zum anderen auf die Produzenten (Automobilindustrie, Kraftwerksbetreiber), deren Interessen als Lobby-Druck wirksam werden kann.

Als gesellschaftliche Zielgröße wird die Variable "Annehmbarer Schaden" eingeführt. Diese gesellschaftliche Zielgröße kann nicht für alle Zeiten als konstant angesehen werden.

Im Modell wird angenommen, daß sich der "Annehmbare Schaden" mit Zunahme der Umweltschutzkosten auch erhöhen wird. Eine Zunahme der "Annehmbaren Schäden" hat ein Sinken des öffentlichen Interesses zur Folge; damit schließt sich wieder ein negativer Rückkopplungskreis.

Der Lobby-Rückkopplungskreis geht über die Modellvariablen: Umweltstandards, Kosten, Lobby-Druck. Er ist ebenfalls ein negativer Kreis; d.h., der Erhöhung von Reduzierungsstandards wird entgegengewirkt (vergl. Abb. 18).

6.2 Die sozialen Indikatoren

Unter dem Oberbegriff Sozialindikatoren wird heute vor allem in den USA versucht, den Datenmangel in sozialen und ökologischen Gebieten zu überbrücken /49, 50, 51/. Obwohl seit 1971 in der Bundesrepublik eine Arbeitsgruppe "Soziale Indikatoren" beim interministeriellen Planungsausschuß der Bundesregierung eingerichtet wurde, konnten in dieser Arbeit noch keine Ergebnisse verwertet werden.

Mit den Sozial-Indikatoren soll zunächst ein System der Sozialstatistik entwickelt werden, in dem auch nicht-wirtschaftliche Phänomene erfaßt und verfolgt werden können, wie z.B. soziale, kulturelle, natürliche Bestände der Volkswirtschaft, Gesundheit und Bildungsstand der Bevölkerung usw. /14/. Im Rahmen dieser Arbeit könnte z.B. folgende Frage beantwortet werden: Haben die umweltpolitischen Informations- und Bildungsmaßnahmen ihre Adressaten erreicht und überzeugt? Informationen über das Umweltbewußtsein der Bevölkerung sind gerade dann wichtig, wenn ein wirtschaftlicher Ausgleich heterogener Umweltansprüche angestrebt werden soll. Im folgenden wird erläutert, wie die sozialen Indikatoren "Öffentliches Interesse", "Annehmbarer Schaden" und "Lobby-Druck" ermittelt werden. Alle drei Größen sind endogene Variablen, d.h. sie werden innerhalb der Rückkopplungsschleifen des Modells berechnet.

6.2.1 Die Entwicklung des Umweltinteresses in der Bevölkerung

Die Entwicklung des Umweltinteresses der Bevölkerung hängt unmittelbar mit der Forschungstätigkeit auf dem Gebiete der Reinhaltung der Luft und dem Umweltbewußtsein zusammen.

Den Beginn erster wissenschaftlicher Untersuchungen der Luftverschmutzung kann etwa in die Zeit von 1880 - 1905 gelegt werden (vgl. Abb. 23).

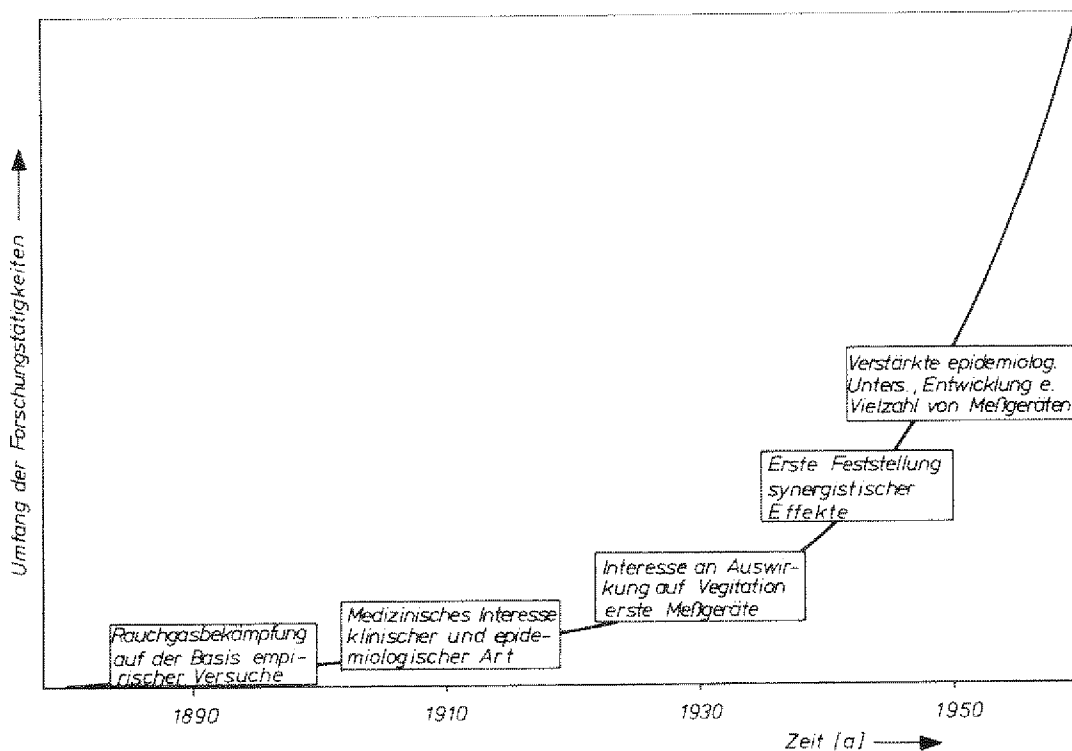


Abb. 23: Anstieg der Umwelt-Forschungstätigkeit

Die Untersuchungen beschränken sich aber auf rein empirische Versuche zur Bekämpfung des Rauches. So wurde ernsthaft vorgeschlagen, in den Straßen Rohrleitungen zu verlegen, den Rauchnebel durch sie abzusaugen und in hohe Schornsteine abzuleiten /52/.

In dem Zeitabschnitt von 1905 - 1915 stieg das Interesse an den Auswirkungen der Luftverschmutzung erheblich. Schwerpunkt der Untersuchung waren medizinische Forschungen klinischer und epidemiologischer Art. Schon damals wurde vermutet, daß Krebs dort, wo Kohlen verbrannt werden, häufiger auftritt /52/.

Die Zeit zwischen 1915 - 1925 wurde durch Krieg- und Nachkriegszeit überschattet, die Forschung auf dem Gebiet der Luftverschmutzung trat in den Hintergrund. Doch die Tatsache, daß 1915 erstmals eine Firma, deren Abgase für die gesamte Umgebung sehr gefährlich waren, aufgrund wissenschaftlicher Untersuchungen den Schwefel als Nebenprodukt wiedergewann, erscheint bemerkenswert /53/. Bis 1936 stieg die Forschungstätigkeit wieder stark an.

Schwerpunktmäßig werden jetzt die Auswirkungen auf die Vegetation untersucht. In dieser Zeit fallen auch die Entwicklungen der ersten Meßinstrumente für Luftverschmutzung. Auch Untersuchungen über die Gefahren durch die Auspuffgase von Verbrennungskraftmaschinen wurden in Angriff genommen. In dem Zeitabschnitt von 1936 bis 1945 nehmen die Studien über die Auswirkungen auf den Menschen wieder stark zu. Nun wurde auch erstmals das Problem der synergistischen Effekte untersucht. Ferner wurde damit begonnen, meteorologische Faktoren zu sammeln, welche die Verteilung der Schmutzstoffe beeinflussen. Mit dem Jahre 1950 beginnt in Deutschland eine intensive Erforschung der Luftverschmutzung. Die wissenschaftlichen Arbeiten, die ab 1950 erscheinen, erreichen von Jahr zu Jahr einen steigenden Umfang.

Die Entwicklung der Untersuchungen auf dem Gebiet atmosphärischer Verschmutzung ist noch einmal in Abb. 24 zu ersehen.

Ab 1950 ist auch ein langsamer Anstieg des öffentlichen Interesses zu vermerken. Die Erklärung kann einmal in der stark steigenden Anzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen, der Artikel in Wochen- und Tageszeitungen und der populär-wissenschaftlichen Literatur über Umweltprobleme zu finden sein.

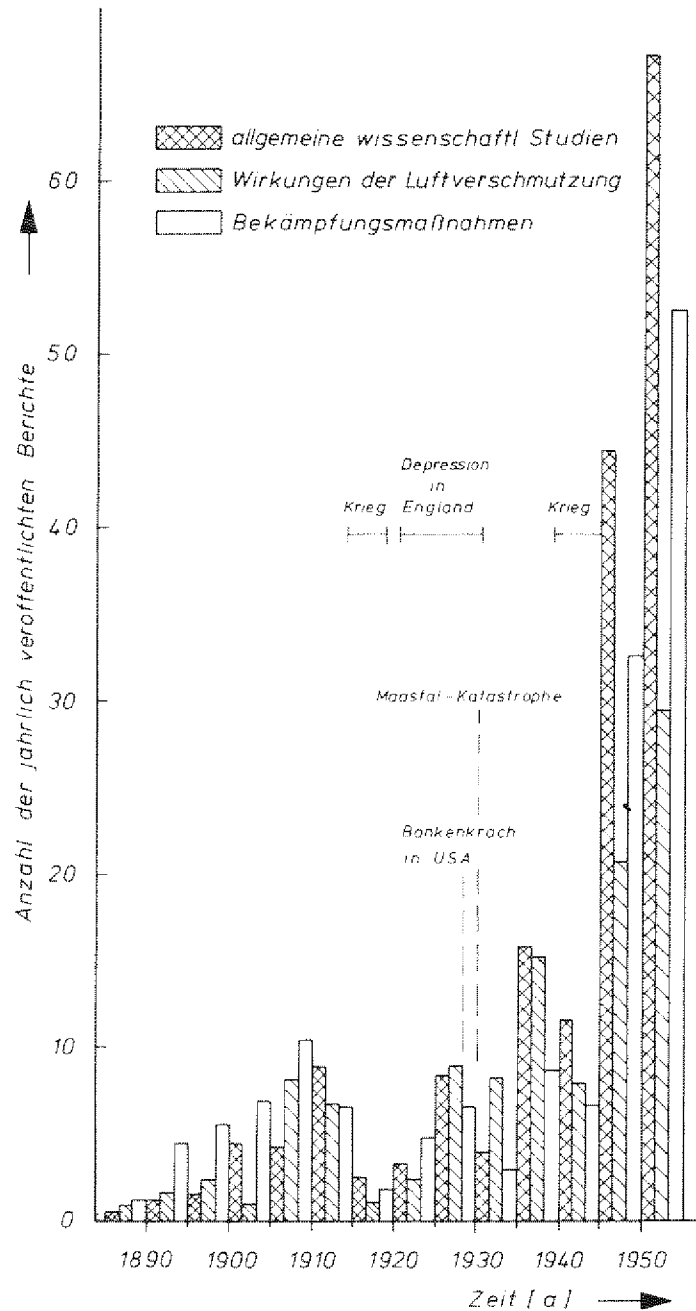


Abb. 24: Anstieg der Veröffentlichungen über Umweltprobleme /nach 53/

Auch die immer häufigere Behandlung von Umweltthemen in Radio und Fernsehsendungen ist als Ursache eines wachsenden Umweltinteresses zu sehen. Eine exakte Analyse der Publikation der letzten 20 Jahre konnte nicht durchgeführt werden, da in den Archiven bisher keine Indexstichworte

aus dem Umweltbereich vorliegen. Doch nach Auskunft des Archives der Frankfurter Allgemeinen bestand in den letzten 20 Jahren ein exponentielles Ansteigen der Anzahl von Artikeln über Umweltprobleme. Schließt man von dieser Tatsache auf das öffentliche Interesse, so muß man mit dem in Abb. 25 dargestellten Verlauf rechnen.

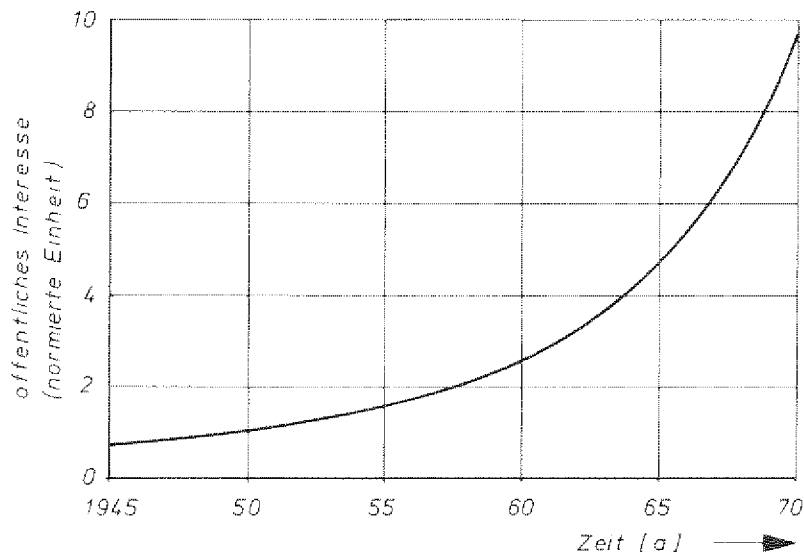


Abb. 25: Anstieg des öffentlichen Interesses an Umweltproblemen

Eine andere Erklärung für das Ansteigen des öffentlichen Interesses ist in dem Anstieg des Wohlstandes der Bevölkerung zu finden. Da der Grenznutzen der Bedürfnisbefriedigung mit Anstieg des persönlichen Wohlstandes sinkt, beginnt der Mensch irgendwann die Unfreundlichkeit seiner Umwelt zu registrieren. Nach einer Umfrage des Instituts für angewandte Sozialwissenschaft (infas), Bonn-Bad Godesberg, sind auf Bundesebene gegenwärtig durchschnittlich 70 % der Bevölkerung bereit, für Maßnahmen des Umweltschutzes persönliche Opfer zu bringen /54/. Ablehnend äußerten sich bei dieser Erhebung 16 %, weitere 14 % aller Befragten blieben eine klare Antwort schuldig.

Ein Vergleich mit Umfragen früherer Jahre ergibt eine beachtliche Zunahme des spontan erklärten Umweltengagements /55/. War der Interessen-

	Zu persönlichen Opfern sind ...			Umweltbelastungen werden ...		
	bereit	nicht bereit	weiß nicht, keine Ang.	bald gelöst	ständiges Problem bleiben	weiß nicht keine Ang.
Bundesbevölkerung November 1970	44	37	19			
Bundesbevölkerung November/Dezember 1971	53	34	13			
Bundesbevölkerung April/Mai 1972	46	33	21	29	59	12
Bundesbevölkerung Dez. 73 / Jan. 74	70	16	14	24	62	14
18 bis 24 Jahre	69	19	12	23	63	14
25 bis 34 Jahre	74	13	13	32	57	11
35 bis 49 Jahre	76	14	10	25	63	12
50 bis 64 Jahre	66	16	18	18	64	18
65 Jahre und älter	63	20	17	22	60	18
Volksschule ohne Lehre	62	16	22	20	58	22
Volksschule mit Lehre	71	17	12	27	60	13
Real-, Fachschule	75	13	12	23	68	9
Abitur, Hochschule	81	19	0	26	72	2

Tab. 3: Ergebnis einer "infas" Umfrage zum Umweltbewußtsein /nach 55/

anteil 1970 nur 44 %, so war er im Jahre 1973 schon 70 % (vgl. Tab. 3). Aus den Umfrageergebnissen des "infas" geht nach einer anderen Tatsache hervor: Auch die Einsicht, daß die Umweltprobleme nicht kurzfristig zu lösen sind - die Opferbereitschaft damit auch länger anhalten muß - hat zugenommen. 1972 hielten 59 % die Umweltverschmutzung für ein zukünftig ständiges Problem; 1973 waren es schon 62 %. Das deutet auch auf ein in Zukunft weiter steigendes Umweltinteresse hin.

In dem zu entwickelnden Umweltmodell wird das öffentliche Interesse durch den wirksam werdenden Schadensindex determiniert und den "Annehmbaren Schaden" determiniert. Der im Modell zugrunde gelegte Zusammenhang ist in Abb. 26 dargestellt. Die einzelnen Stützstellen der Funktion sind linear verbunden, da das Programm linear interpoliert.

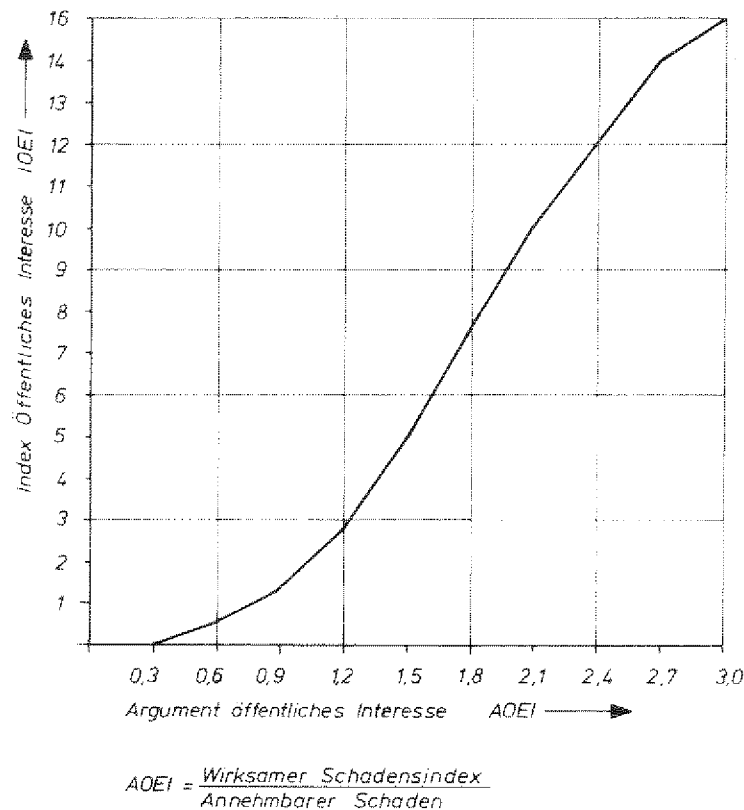


Abb. 26: Tafelfunktion "Öffentliches Interesse"

6.2.2 Die gesellschaftliche Zielgröße "Annehmbarer Schaden"

Der "Annehmbare Schaden" wurde als gesellschaftliche Zielgröße definiert. Damit soll ausgedrückt werden, welchen Schaden die Gesellschaft bereit ist zu akzeptieren. Da diese Größe nicht für alle Zeiten als konstant angenommen werden kann, muß es eine erklärende Größe geben, die den "Annehmbaren Schaden" verändert.

Folgender Wirkungszusammenhang wird unterstellt: Der für den Umweltschutz aufzuwendende Kostenanteil wird so stark annehmen, daß die Kosten für den Verbraucher überwältigt werden müssen. Das Verhältnis von Umwelt-

kosten und Nutzkosten wird sich zu Ungunsten der Nutzkosten verändern. Dieser inflationäre Effekt wird von der Bevölkerung nicht unbegrenzt hingenommen. Neben Änderung des Verbraucherverhaltens wird sie einen höheren Schaden akzeptieren. Der annehmbare Schaden ergibt sich also aus einem gesellschaftlichen Abwägungsprozeß zwischen dem Nutzen und den Kosten der Minderung der Umweltbelastung.

Im Modell wird der Annehmbare Schaden über die Umweltschutzkosten berechnet.

6.2.3 Der Sozialindikator - Lobby-Druck

Die Modellvariable "Lobby-Druck" liegt auf der gleichen Ebene wie die Variable "Öffentliches Interesse". Das öffentliche Interesse wirkt in Richtung einer Erhöhung der Emissionsstandards, die Anstrengungen der Lobby wirken entgegengesetzt, sie senken die Emissionsstandards. Determiniert wird der "Lobby-Druck" durch die Umweltschutzkosten. Zwei Tatsachen lassen den "Lobby-Druck" nicht so stark steigen, wie das öffentliche Interesse. Einmal haben die Vertreter der Lobby auch ein umweltpolitisches Bewußtsein, d.h., sie sehen die Notwendigkeit umweltschützender Maßnahmen. Zum anderen ist auch zu berücksichtigen, daß in zunehmendem Maße eine Umweltindustrie aufgebaut wird, die auch eine Lobby darstellt. Ferner wird berücksichtigt, daß die umweltverschmutzenden Wirtschaftseinheiten in einem bestimmten Zeitabstand nach Vorgabe der Standards mit ihrem Druck nachlassen. Die drei Wirkungsfaktoren werden in den Variablen "Argument Lobby-Druck" zusammengefaßt. Der Zusammenhang zwischen dieser Variablen und dem Lobby-Druck wird mit der in der Abb. 27 dargestellten Tafelfunktion in das Modell eingegeben.

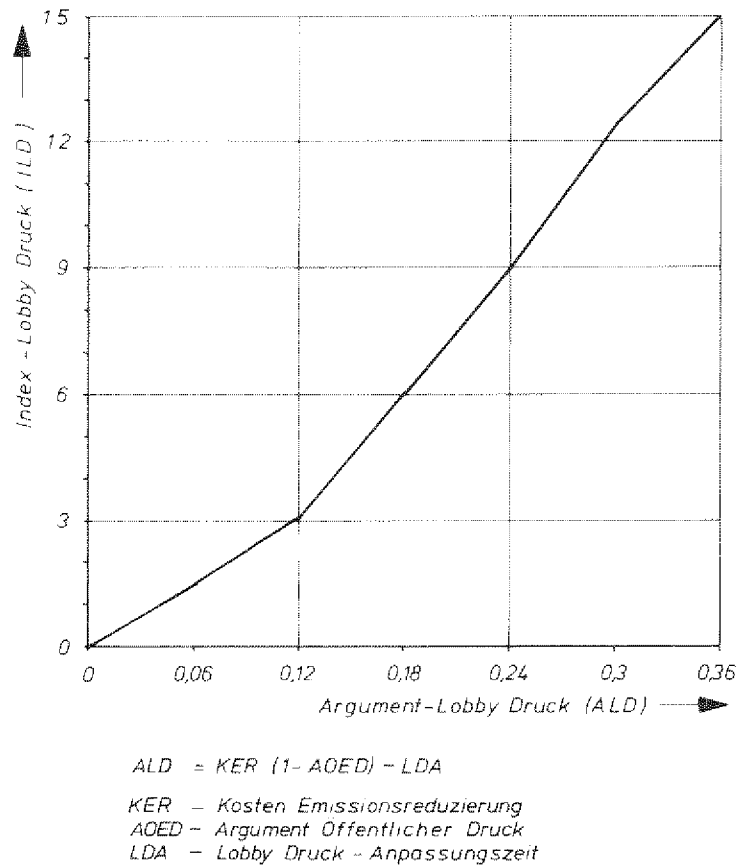


Abb. 27: Tafelfunktion "Lobby-Druck"

6.3 Beschreibung des Modellteils: Verkehrssektor

6.3.1 Die gegenwärtige Situation des Kraftfahrzeugverkehrs in der Bundesrepublik

Das Automobil ist heute für unsere Wirtschaft aber auch für unser öffentliches Leben und für jeden einzelnen unentbehrlich. Mit der Entwicklung des Kraftfahrzeugs war eine steigende Mobilität verbunden, die unter anderem eine hohe Freizügigkeit der Standortwahl in der Wirtschaft, einen zeitsparenden Wochenend- und Urlaubsverkehr und eine Verbesserung der Kommunikation durch Besuchsverkehr ermöglichte.

Einen guten Einblick in die gegenwärtige Situation des Kraftfahrzeugverkehrs in der Bundesrepublik geben die in dem vom Rat von Sachverständigen für Umweltfragen erarbeiteten Gutachten zusammengestellten Kennzahlen /48/:

1. In der Bundesrepublik Deutschland ist die mittlere Kfz-Dichte im Zeitraum von 1961 bis 1971 von 127 auf 291 Kfz/1000 E gestiegen. Während des gleichen Zeitraumes nahm die durchschnittliche Pkw-Dichte von 95 auf 247 Pkw/1000 E zu und erhöhte damit ihren Anteil an den Gesamtwerten von 75 auf 85 %.
2. Die Kraftfahrzeuge erbrachten 1961 im Mittel je km^2 der Fläche des Bundesgebietes eine Fahrleistung von rund 478.000 km. Unter Berücksichtigung der zwischenzeitlich erfolgten Veränderung der mittleren jährlichen Fahrleistungen der Kraftfahrzeuge stiegen diese Flächenbelastungen bis 1971 auf durchschnittlich 1.151.000 Kfz km/km^2 Jahr an. Dieser Wert liegt mehr als 5-mal so hoch wie der entsprechende Vergleichswert für die Vereinigten Staaten, obgleich hier allein die Pkw-Dichte 1971 bereits bei 435 Pkw/1000 lag.
3. Der größte Teil dieser Fahrleistungen wird in den flächenmäßig eng begrenzten Ballungsgebieten erbracht, wo die Auswirkungen des Kraftfahrzeugverkehrs am gravierendsten sind. Nach überschlägiger Ermittlung des Sachverständigenrates betrug die Fahrleistung 1971 in

Hamburg	rd	9 241 000	Kfz km/km^2 Jahr
Essen	rd	14 724 000	Kfz km/km^2 Jahr
Berlin (West)	rd	15 942 000	Kfz km/km^2 Jahr
Frankfurt/M.	rd	18 192 000	Kfz km/km^2 Jahr

Diese Zahlen entsprechen dem acht- bis siebzehnfachen des Durchschnittswertes für das Bundesgebiet.

Diese hohe Verkehrsdichte, mit derem weiteren Ansteigen in Zukunft zu rechnen ist, verursacht in zunehmendem Maße eine Umweltbelastung, die schon heute teilweise als unerträglich bezeichnet werden muß.

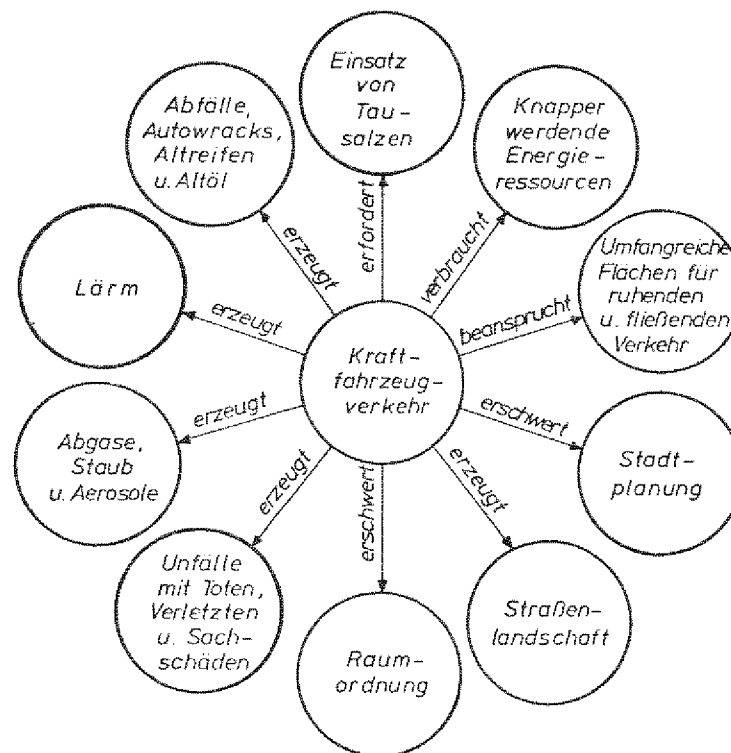


Abb. 28: Umweltschaden durch Kraftfahrzeugverkehr /nach 48/

In dem Maße wie das Auto zu unserem Wohlstand beiträgt, ist es damit aber auch in der Lage, die Lebensqualität zu drücken. Abb. 28 zeigt den breiten Fächer der negativen Einflüsse des Verkehrs auf die Umwelt. In dieser Arbeit wird die durch den Kraftfahrzeugverkehr verursachte atmosphärische Schadstoffbelastung untersucht.

6.3.2 Atmosphärische Schadstoffbelastung durch den Kraftfahrzeugverkehr

Wegen der besorgniserregenden Schadstoffanreicherung der Atemluft in Ballungsgebieten bildet diese Art der Umweltbelastung durch den Verkehr einen Schwerpunkt in der augenblicklichen Umweltdiskussion. Die von den Kraftfahrzeugen emittierten Abgase enthalten giftige Stoffe, die je nach Art des Kraftstoffes in unterschiedlicher Zusammensetzung anfallen. Die

wesentlichen Schadstoffe sind Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickoxide, Schwefeldioxid und speziell beim Dieselmotor Ruß; ferner die speziell vom Ottomotor emittierten Bleiverbindungen. Im folgenden sollen nun die spezifischen Emissionsfaktoren für die genannten Schadstoffe zusammengestellt und die Mengen der emittierten Schadstoffe ermittelt werden.

6.3.2.1 Die spezifischen Emissionsfaktoren von Verbrennungskraftmaschinen

Um die Mengen der emittierten Schadstoffe bestimmen zu können, benötigt man spezifische Emissionsfaktoren, die für den jeweiligen Verbrennungsvorgang den Anteil Schadstoff pro verbrauchter Energieeinheit angeben. Für den Kraftfahrzeugmotor sind verschiedene physikalische Einheiten gebräuchlich wie Schadstoffanteile im Abgas in kg/kg Kraftstoffe, gr/Meile

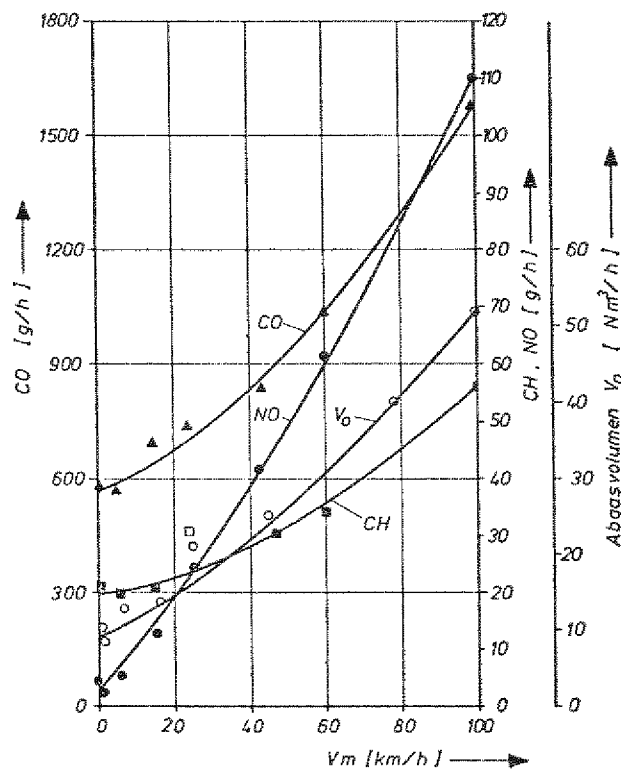


Abb. 29: Schadstoffemissionen und Abgasvolumen in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit /56/

gr/GJ. Über Äquivalenzzahlen lassen sich alle Einheiten in eine umrechnen, unter der Voraussetzung, daß Faktoren auf gleichen Testzyklen basieren. Die spezifischen Emissionsfaktoren werden in genau festgelegten Zyklus-Tests, in denen über ein bestimmtes Zeit-Geschwindigkeitsdiagramm ein durchschnittliches Fahrverhalten erreicht werden soll, ermittelt. In Abb. 29 sind Emissionsfaktoren von PKW und LKW in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit wiedergegeben. Die Kurven wurden aus Einzelmessungen an 44 Versuchsfahrzeugen gewonnen. Der progressive Anstieg der Emissionsfaktoren von Kohlenmonoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Stickoxid mit steigender mittlerer Fahrgeschwindigkeit ergibt sich vor allem aufgrund des erheblich zunehmenden spezifischen Energieverbrauchs und damit des zunehmenden Abgasausstoßes /56/. Die im Modell verwandten spezifischen Emissionsfaktoren sind in Tab. 4 wiedergegeben.

Schadstoff	Ottomotoren (PKW)			Dieselmotoren (LKW) Busse
	1959	1966	1969	1959 bis 1969
CO	0,65	0,30	0,25	0,03
CH ₄ 1)	0,10	0,06	0,03	0,01
NO _x 2)	0,04	0,04	0,04	0,045
SO ₂	-	-	-	0,01
Feststoffe	0,002	0,002	0,002	0,004

1) Emission an teilverbrannten Kohlenwasserstoffen

2) Emission an Stickoxiden

Tab. 4: Spezifische Emissionsfaktoren von Verbrennungskraftmaschinen in kg/t /nach 58/

Als Anfangswerte wurden die Faktoren von 1959 gewählt. Schwefelemissionen werden nicht berücksichtigt, da die Markenbenzine nicht mehr als 0,05 %

Schwefel enthalten und daher auch der Schwefelgehalt in den Auspuffgasen der Otto-Motoren nur bis 0,1 % betrug /57/. Für die Bleiemissionen wurde angenommen, daß 75 % des Kraftstoffbleigehaltenes emittiert werden. Als Anfangswert wurde von einem Blei-gehalt von 0,65 Gramm pro Liter ausgegangen.

6.3.2.2 Die Schadstoffmengen der Vergangenheit

Die Menge der emittierten Schadstoffe ist eng an den Kraftstoffverbrauch gekoppelt. Wie aus Abb. 30 hervorgeht, hat sich der Vergaserkraftstoffverbrauch in dem betrachteten Zeitraum verzehnfacht und der Dieseldieselkraftstoffverbrauch vervierfacht. Dieser enorme Anstieg hat natürlich auch seinen Niederschlag in der Schadstoffmenge gefunden, die jährlich durch den Verkehr in die Atmosphäre emittiert wurde. Messungen der Schadstoffmengen konnten bisher nur in wenigen regionalen Räumen vorgenommen werden. Es bleibt die Möglichkeit, die Schadstoffmengen unter Zugrundelegung der Werte für den Kraftstoffverbrauch und den spezifischen Emissionsfaktoren

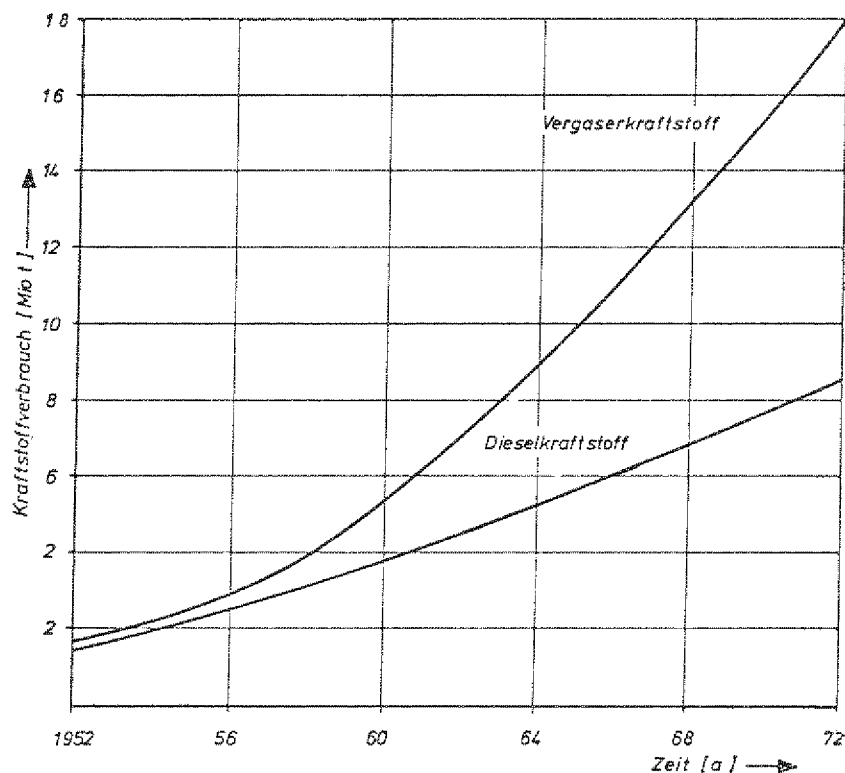


Abb. 30: Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs in der BRD

zu ermitteln. Führt man diese Rechnungen durch, dann erhält man den in Abb. 31 dargestellten Verlauf der Mengenentwicklung der Schadstoffemission durch den Kraftfahrzeugverkehr. Das Maximum im CH-Emissionsverlauf ist durch die Senkung des spezifischen Emissionsfaktors in den Jahren zwischen 1966 und 1969 zu erklären. Das gleiche gilt für den Wendepunkt in der CO-Kurve.

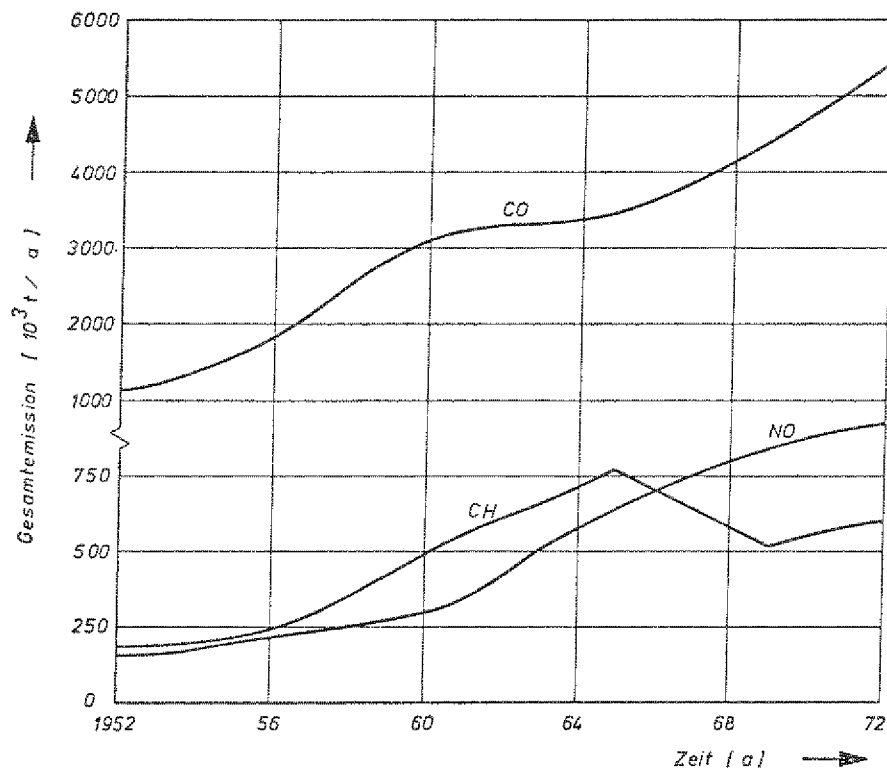


Abb. 31: Entwicklung der Schadstoffemissionen im Sektor Verkehr

Daten über gesamte Emissionsmengen in globalen Räumen haben nur dann einen Sinn, wenn berücksichtigt wird, daß örtliche Spitzenwerte in den Kerngebieten der Verdichtungsräume auftreten. Die Straßenverkehrszählungen des Deutschen Städtetages von 1965 haben ergeben, daß z.B. der stark belastete Abschnitt (Länge 0,5 km) der Friedrich-Ebert-Anlage in Frankfurt von einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsmenge von 70.000 bis 80.000 Kraftfahrzeugen befahren wurde, was überschläglich (unter Zugrundelegung eines je 50 m breiten Einflußstreifens nach beiden Seiten von Fahrbahn-Mitte aus) einer spezifischen Flächenbelastung von mehr als 250 Mio KFZ km/km^2 Jahr entspricht /59/. Ferner ist zu be-

achten, daß ein auf innerstädtischen Straßen zurückgelegter Kraftfahrzeugkilometer wesentlich nachteiligere Auswirkungen auf die Umwelt hat, als ein auf freier Strecke zurückgelegter Kraftfahrzeugkilometer (häufige Brems- und Anfahrvorgänge, hohe Verweil- und Stauzeiten) /48/.

6.3.3 Maßnahmen zur Verringerung des Umweltschadens im Verkehrsbereich

In dieser Untersuchung kommt das dynamische Moment der Forschung und der technischen Entwicklung mit dem Ziel, den Umweltschaden zu reduzieren, in zwei Größen zum Ausdruck: Forschung und Entwicklung und Stand der Technik. Auf dem Gebiet der Reduzierung von Luftverschmutzung durch KFZ-Abgase sind in den letzten Jahren eine Vielzahl von Forschungsarbeiten in Gang gesetzt worden /60/. Diese beziehen sich sowohl auf rein technische Maßnahmen als auch auf Änderungsmöglichkeiten der auf den Verkehr wirkenden gesellschaftlichen Verhältnisse.

Im Modell werden nur die direkten Maßnahmen zur Verminderung schädlicher Umwelteinwirkungen des Kraftfahrzeuges berücksichtigt. Maßnahmen der Einflußnahme auf die Verkehrsnachfrage (Fahrverbote für individuelle Kraftfahrzeuge, Einführung ergänzender Ballungsabgaben für den Individualverkehr, Erhöhung der Attraktivität im öffentlichen Personennahverkehr) sollen erst nach Kopplung des Umweltmodells mit einem Gesellschaftsmodell berücksichtigt werden. Bei den direkten Maßnahmen kann man zwischen Maßnahmen am konventionellen Verbrennungsmotor und Entwicklungen neuartiger Antriebssysteme unterscheiden. Im Umweltmodell werden die Auswirkungen beider Maßnahmen auf die Emissionsreduzierung in einer Größe zusammengefaßt.

6.3.3.1 Stand der Technik und Entwicklungsmöglichkeiten zur Herabsetzung der Schadstoffemission beim konventionellen Verbrennungsmotor

Die Reduzierung der Kohlenmonoxidemission ist in den letzten Jahren am weitesten fortgeschritten und auch schon durch gesetzliche Prüfungsvorschriften abgesichert. Erreicht wurde dies durch eine verbesserte Gemischbildung und Gemischverteilung. Das war bisher die einfachste Möglichkeit unter den vielen zur Beeinflussung der Abgaszusammensetzung von Ottomotoren (vgl. Abb. 32).

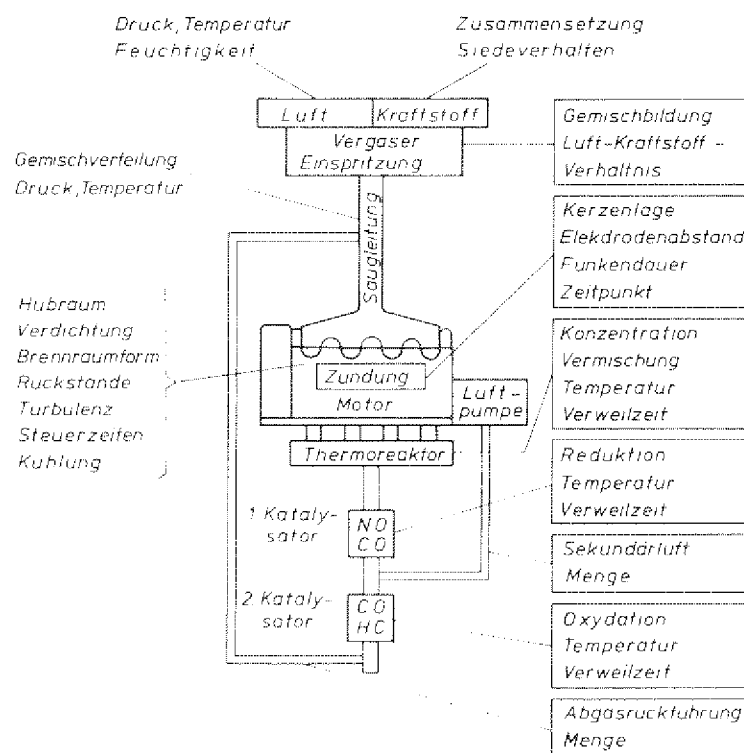


Abb. 32: Möglichkeiten der Beeinflussung der Abgaszusammensetzung /61/

Wie aus der graphischen Darstellung des Einflusses der Luftzahl λ auf Abgas, Leistung und Verbrauch in Abb. 33 hervorgeht, liegen optimale Verhältnisse bei knapp unterstöchiometrischen Kraftstoff-Luft-Gemischen vor /61/.

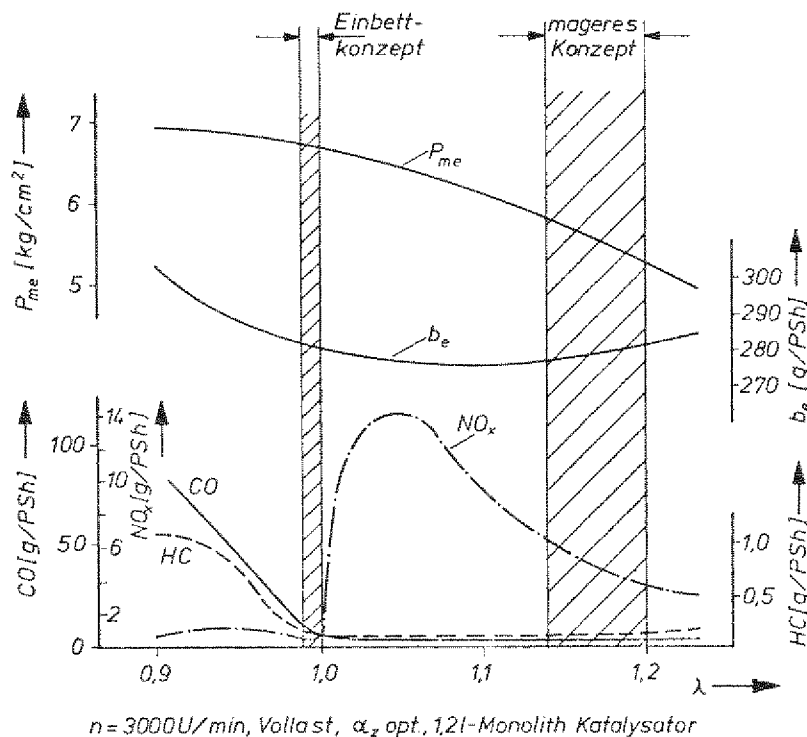


Abb. 33: Abgaszusammensetzung in Abhängigkeit von der Luftzahl
/nach 61/

Wie weiter aus Abb. 32 hervorgeht, sind eine Reihe weiterer Ansätze zur Emissionsreduzierung möglich. Die meisten Ansätze befinden sich am Anfang ihrer Entwicklung und haben bis heute noch lange nicht Serienreife erlangt.

Die NO_x -Emission kann durch äußere und innere Abgasrückführung vermindert werden. Die Abgasrückführung geschieht durch gesteuerte Beimengung von rückgeköhltem und gereinigtem Abgas zum Frischgas vor bzw. hinter der Drosselklappe.

Als weitere technische Maßnahmen wurden von der Arbeitsgruppe "Verkehr" im Rahmen der Beratungen für das Programm "Umweltgestaltung und Umweltschutz" der Bundesregierung vorgeschlagen /58/:

- Verbesserung des Ladungswechsels, insbesondere seiner Steuerung
- Optimierung der Vorgänge im Brennraum

- Exakte Steuerung des Zündzeitpunktes
- Verbesserung der Kühlungsregelung
- Katalytische Nachverbrennung
- Einsatz neuartiger Kraftstoffe (Methanol)

Diese Maßnahmen können kurzfristig ergriffen werden, während die folgenden mittel- bzw. langfristige Maßnahmen darstellen:

- Ultraschallzerstäubung des Kraftstoffs
- Thermische Nachverbrennung mit Sekundärlufteinblasung
- Ladungsschichtung
- Entwicklung von Bremsenergiespeichersystemen
- Entwicklung von Vergaserreaktoren zur Umwandlung flüssiger Kraftstoffe in Brenngase für Ottomotoren

Mit diesen Maßnahmen soll kurzfristig eine Reduktion der Schadstoffemission um etwa 20 % gegenüber den durchschnittlichen Emissionswerten von 1969 erreicht werden. Mittelfristig wird mit einer 50 %-igen und langfristig sogar mit einer 90 %-igen Reduktion gerechnet. Bei Dieselmotoren liegen die maximalen Reduktionswerte für langfristige Maßnahmen bei 30 bis 50 %.

6.3.3.2 Entwicklung neuartiger Antriebssysteme

Neben den Maßnahmen am konventionellen Verbrennungsmotor ist die Entwicklung emissionsarmer bzw. emissionsfreier Antriebe Inhalt des F+E-Programms der Kfz-Industrie der nächsten Jahre. Erfolgversprechend erscheint heute die Weiterentwicklung folgender Antriebssysteme /48/:

- | | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Elektrochemische Antriebe | 4. Antriebe mit stetiger Verbrennung |
| 1.1 Batterie-Antrieb | |
| 1.2 Brennstoffzellen Antrieb | 4.1 Gasturbinen Antrieb |
| 2. Hybrid-Antrieb | 4.2 Dampf-Antrieb |
| 3. Gasantrieb | 4.3 Sterling-Motor |

Eine weitere Möglichkeit, die Abgasemissionen zu beeinflussen, besteht darin, die Kraftstoffe den erhöhten Anforderungen von seiten des Umweltschutzes anzupassen. Die Entwicklung eines Antiklopfmittels auf einer anderen als Bleibasis, ungefähr gleich wirksam wie Blei, wirtschaftlich und zugänglich, untoxisch, ohne schädliche Wirkung auf den Motor und Nachverbrennungseinrichtungen einschließlich der Katalysatoren kann zu einer Emissionsreduzierung beitragen. Die Suche nach einem solchen Antiklopfmittel war bisher nicht sehr erfolgreich, geht allerdings weiter /62/. Um der photochemischen Aktivität der Olefine und Aromaten und der Kanzerogenität der Polyaromaten aus dem Wege zu gehen, müßte ein blei-freies, aliphatisches Benzin entwickelt werden.

6.3.4 Kosten umweltschützender Maßnahmen beim Auto

Eine Abschätzung der gesamten aufzuwendenden Kosten für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf den vorher genannten Gebieten ist nicht möglich. Die oben erwähnte Arbeitsgruppe Verkehr gibt unter Zugrundelegung von Kapazitätsgrenzen in dem betreffenden Forschungsbereich 210 - 250 Millionen DM/Jahr für konventionelle Antriebssysteme und 245 - 390 Millionen DM/Jahr für neuartige Antriebssysteme an /58/. Mit Sicherheit muß mit einer stetigen Zunahme der Bereitstellung für Forschungsgelder gerechnet werden. Möller /63/ legt nach einer Analyse der öffentlich geförderten Energieforschung folgende Zahlen vor:

	1971-73	1974
Umweltschutz im Verkehrssektor	$7,5 \cdot 10^6$ DM	$7,5 \cdot 10^6$ DM

Für Investitions- und Betriebskosten umweltschützender Einrichtung in Kraftfahrzeugen konnten in der Literatur mehrere Angaben, die im wesentlichen übereinstimmen, gefunden werden. Die von der amerikanischen Umweltbehörde (Environmental Protection Agency) geschätzten Kosten der Abgasentgiftung sind in Tab. 5 wiedergegeben /64/.

Modelljahr	Kosten	Abgasmengen in % gegenüber 1967		
		HC	CO	NO _x
1971	107	25	32	85
1972	114	20	28	65
1973/74	272	20	28	42
1975	812	12	16	42
1976/77	1158	3	3	6

Tab. 5: Kosten der Abgasentgiftung bei Kraftfahrzeugen

Die Betriebskosten liegen zwischen 5 und 40 DM pro Jahr und die Veränderung der Kraftstoffkosten liegt zwischen 7 % und 1 - 2 % /65/. Auch die Gesamtkosten für Investition und Betrieb von Abgasentgiftungsanlagen müssen als ständig steigend angenommen werden. Dies geht auch aus einer regionalen Studie im Delaware Valley hervor (vgl. Abb. 34) /66/.

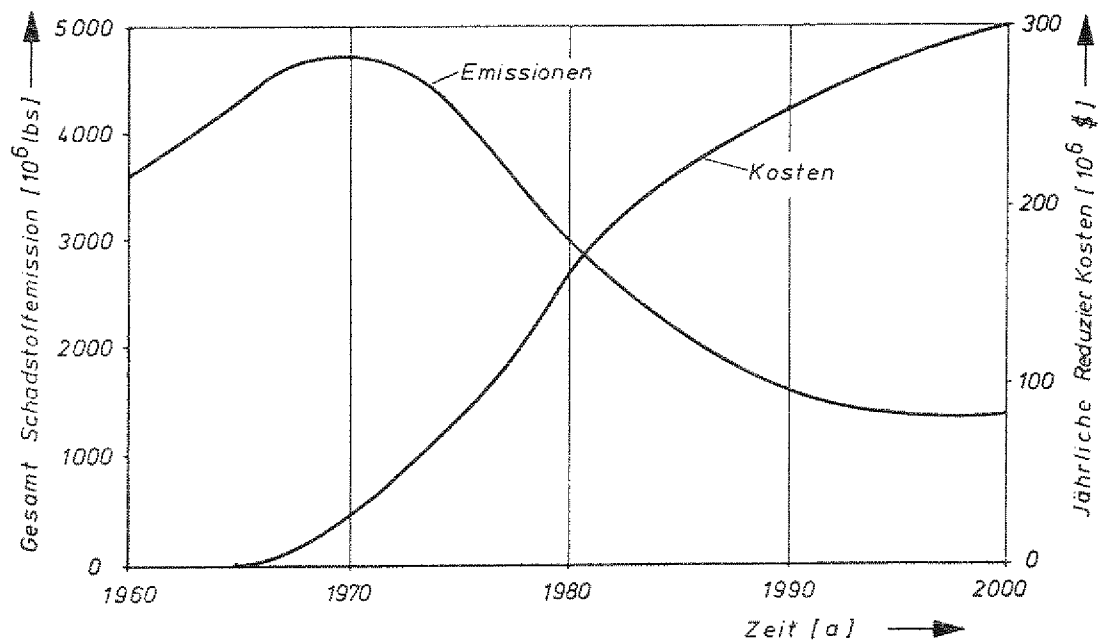


Abb. 34: Kosten der Kfz-Abgasreduzierung im Delaware Valley /nach 66/

Die neuesten Kostendaten gehen aus einer Studie hervor, die vom Bundesminister für Verkehr und der Kommission der Europäischen Gemeinschaften in Auftrag gegeben worden war /67/. Darin werden die Kosten für Reduzierungsmaßnahmen, die in einmalig erhöhte Anschaffungskosten einerseits und laufende Wartungs- und höhere Betriebskosten andererseits aufgeteilt sind, für ein Fahrzeug mit einer angenommenen mittleren Lebensdauer von neun Jahren mit 1.600,- DM angegeben (entsprechend dem Stand der Technik von 1973). Für alle Neufahrzeuge im Zeitraum von 1973 bis 1982 wurden somit Vermeidungskosten in Höhe von 18,8 Milliarden DM anfallen.

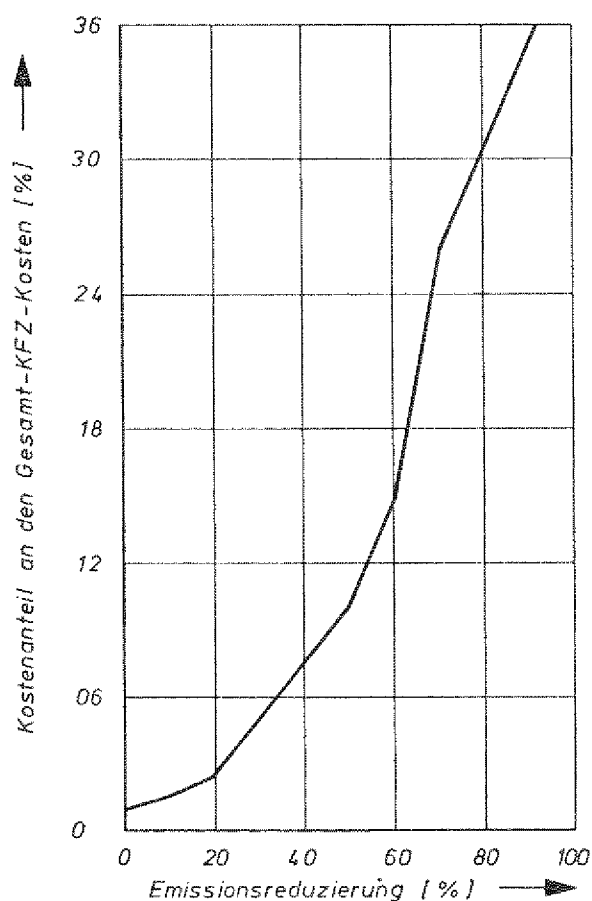


Abb. 35: Tafelfunktion der Emissions-Reduzierungskosten als Funktion der prozentualen Reduzierung

Nach Analyse der zur Verfügung stehenden Kostendaten wurde der in Abb. 35 dargestellte Zusammenhang zwischen Kosten und Abgasreinigungsmaßnahmen

angenommen. Bei maximaler Emissionsreduzierung von 90 % der möglichen Emission steigen die Kosten für den Autofahrer um 35 %.

6.4 Beschreibung des Modellteils: Kraftwerks- und Industriesektor

6.4.1 Die gegenwärtige Situation der industriellen und öffentlichen Kraftwirtschaft

Die angestrebte wirtschaftliche Entwicklung erfordert einen zunehmenden Ausbau der Wärmeerzeugungsanlagen und der Stromerzeugungs- und -verteilungsanlagen. Die enge Korrelation zwischen Energieverbrauch und wirtschaftlichem Wachstum läßt den Schluß zu, daß zwischen der Höhe des Energieverbrauchs und der wirtschaftlichen Prosperität eines Landes ein unmittelbarer kausaler Zusammenhang besteht. Die Elektrizitätsversorgung hat heute etwa einen Anteil von 11 % am Endenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland. Im Bundesgebiet wurden 1973 einschließlich Eigenverbrauch der Kraftwerke, Pumpspeicheraufwand und Übertragungsverluste 309,3 Mrd kWh verbraucht /68/. Das bedeutet gegenüber dem Vorjahr eine Zuwachsrate von 7,9 % (Industrieproduktionssteigerung 7,1 %). Nach dem 3. Verströmungsgesetz ist die Sicherstellung des Einsatzes von jährlich 30 Mio t heimischer Steinkohle in der Elektrizitätswirtschaft als Ziel vorgesehen.

Der Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung konnte sich bis 1973 auf 3,9 % erhöhen (12,2 Mrd kWh). Die Kernenergie wird neben den weiter auszubauenden fossilen Kraftwerken eine entscheidende Rolle in der Energieversorgung übernehmen müssen. Auch bei der Erzeugung von Prozeßwärme wird die Kernenergie einen zunehmenden Anteil übernehmen.

Neben dem Problem der Versorgungssicherheit stehen die Belange des Umweltschutzes. Die durch energiewirtschaftliche Aktivitäten hervorgerufene Bedrohung unserer Umwelt machen gesetzliche Maßnahmen zur Beseitigung inzwischen eingetretener Schäden und zur Verhinderung künftig auftretender zusätzlicher Belastungen notwendig. Zu den Bedrohungen

zählen einmal die bei der Stromerzeugung anfallenden Abwärmemengen. Die Hälfte des bis 1980 erforderlichen Kraftwerkszubau sollen das bis heute noch verbleibende Aufnahmevermögen für Wärmeeinleitung voll ausschöpfen /69/. Zum anderen üben die von den fossil beheizten Kraftwerken ausgehenden atmosphärischen Schadstoffbelastungen eine immer stärker werdende schädigende Wirkung auf Mensch, Pflanze und Tier aus.

6.4.2 Atmosphärische Schadstoffbelastung durch fossil beheizte Kraftwerke

Die mengenmäßig am stärksten anfallenden Schadstoffe sind das Schwefeldioxid und Staubpartikel. Diesen beiden Schadstoffen muß besondere Beachtung geschenkt werden, da ihre schädigende Wirkung sich durch Kombinationswirkungen verstärken können. Die schädigende Wirkung von Schwefeldioxid in Abhängigkeit von der Konzentration und der Belastungszeit ist in Abb. 36 dargestellt. Ferner sind unter den emittierten Schadstoffen von fossil beheizten Kraftwerken die Stickoxide und Kohlenwasserstoffe von Bedeutung. Fluorverbindungen werden wegen der im Vergleich zu den genannten Schadstoffen untergeordneten Bedeutung nicht in diese Untersuchung einbezogen. Ebenso bleibt die mit der Verwendung radiumhaltiger Kohle verbundene Radiumemission unberücksichtigt. Die Emissionsmengen der einzelnen Schadstoffe können wieder über spezifische Emissionsfaktoren ermittelt werden. Diese sollen im folgenden zusammengestellt werden.

6.4.2.1 Spezifische Emissionsfaktoren fossil beheizter Feuerungsanlagen in Industrie und Kraftwerken

Die atmosphärischen Schadstoffe bilden sich bei der Umsetzung der fossilen Brennstoffe in Energie bei hohen Temperaturen unterhalb von ca. 2000 K, welche durch die in den Brennstoffen gebundene chemische Energie - ausgedrückt durch ihren Heiz- bzw. Brennwert - zustandekommen.

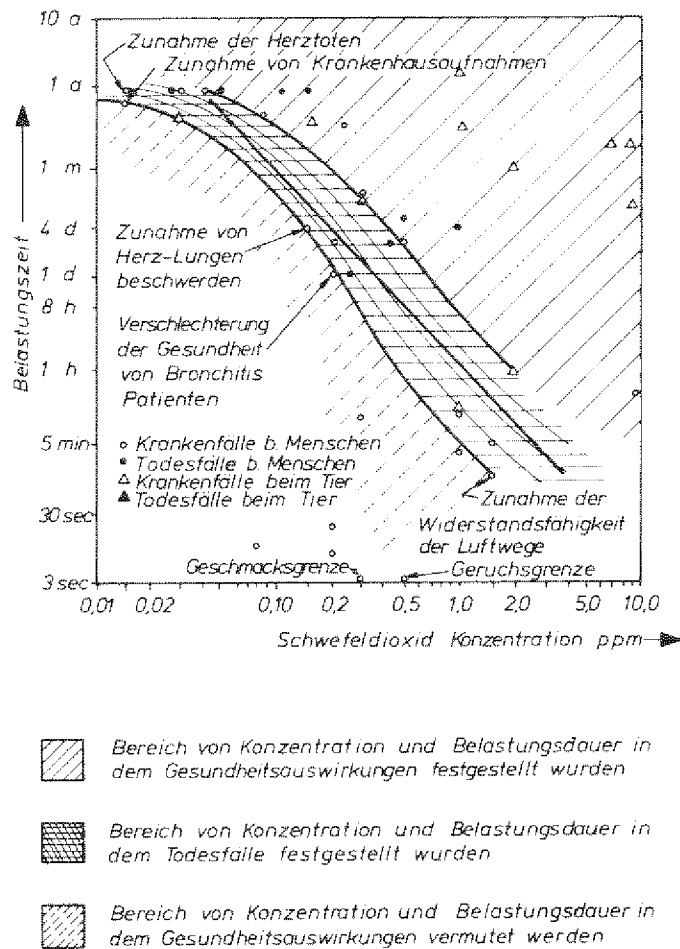


Abb. 36: Schadenswirkung von SO_2 in Abhängigkeit von Konzentration und Belastungszeit /nach 70/

Die staubförmigen Auswürfe in den Verbrennungsgas bestehen aus Flugasche, Flugkoks und Ruß. Während die Asche auf die Zusammensetzung der Brennstoffe zurückzuführen ist, ist die Entstehungsursache für Flugkoks und Ruß in der unvollkommenen Verbrennung zu suchen.

Die stabilen gasförmigen Komponenten der Abgas- bzw. Rauchgasströme werden im Anschluß an den eigentlichen Verbrennungsablauf infolge der Rekombination der gebildeten Radikale bei den sogenannten Abbruchreaktionen gebildet. Nach Abgabe der nutzbaren Wärme bei dem üblicherweise vorherrschenden Sauerstoffüberschuß liegen dann die stabilen Komponenten

Kohlenart	Revier	Bezeichnung	Gesamtschwefel (i. roh.)		
			%	im Mittel	
				%	bezogen auf SKE %
Steinkohlen	Ruhr	Kohlen	0,8 bis 1,2	1,1	1,1
		Koks	0,7 bis 1,1	0,9	0,9
	Saar	Kohlen	0,7 bis 1,0	0,8	0,8
		Koks	0,6 bis 0,9	0,7	0,7
	Aachen	Kohlen	0,7 bis 1,0	0,8	0,8
		Koks	0,8 bis 0,9	0,8	0,8
		Raucharme Briketts	0,7 bis 1,1		
	Niedersachsen	Kohlen	0,8 bis 1,1	0,9	0,9
Gewogenes Mittel		Kohlen		1,05	1,05
		Koks		0,87	0,90
Braunkohlen	Rheinland	Rohbraunkohle	0,1 bis 0,5	0,3	1,1
		Briketts		0,4	0,6
	Helmstedt u. Hessen	Rohbraunkohle	1,7 bis 2,2	1,9	7,3
		Briketts	3,2 bis 3,8	3,5	5,1
	Bayern	Rohbraunkohle		1,0	3,8
	Böhmen	Hartbraunkohle	0,3 bis 1,0	0,6	1,2
	Mitteldeutschland	Briketts	1,4 bis 2,6	2,0	2,9
	desgl. (Lausitz)	Briketts		0,4	0,6
Pechkohlen	Oberbayern	Kohlen	3,5 bis 6,0	4,5	6,3

Tab. 6: Schwefelgehalte fester Brennstoffe /nach 71/

CO_2 , H_2O , N_2 und SO_2 in den Verbrennungsabgasen vor /72/.

Für die SO_2 -Emission ist die Beschaffenheit der Brennstoffe von besonderer Bedeutung, denn der Schwefelgehalt des Brennstoffes determiniert die entstehende SO_2 -Menge im Abgas, da fast der gesamte Brennstoffschwefel in das Abgas übergeht /57/. In Tab. 6 sind die Schwefelgehalte verschiedener fester Brennstoffe zusammengestellt. Bei den flüssigen Brennstoffen wird der Schwefelgehalt durch die verschiedenen Schwefelgehalte je nach Herkunftsland bestimmt.

Mit folgenden Ausgangsschwefelgehalten muß gerechnet werden /71/:

<u>Provinz</u>	<u>Schwefelgehalt</u>
Kuwait	4 %
Arabien	2,8 %
Iran	2,5 %
Nigeria	0,4 %

Diese Schwefelgehalte können für die Zukunft nicht als konstant angesehen werden. Mit Abbau der schwefelarmen Rohölvorkommen wird man mehr und mehr auf schwefelreiche Rohölvorkommen zurückgreifen müssen. Die Streuung der Lieferungen und damit die Versorgungsanteile einzelner Provenienzen ist eine politische Größe, die Vorhersage dementsprechend schwierig. Für 1973 sind die Rohöleinfuhren der Bundesrepublik Deutschland wie folgt gestreut:

<u>Provenienz</u>	<u>Importanteil</u>
Saudi-Arabien	21,4 %
Iran	12,5 %
Übriges Mittelost	16,3 %
Libyen	21,6 %
Nigeria	12,0 %
Algerien	7,6 %
Übriges Afrika	2,2 %
Venezuela	2,7 %
UdSSR	3,5 %
Norwegen	0,2 %
Summe	100 %

Die Schadstoffe NO und NO_2 (kurz NO_x) bilden sich, weil der technische Verbrennungsvorgang in Gegenwart von molekularem Stickstoff und Sauerstoff abläuft, Luft also als Oxidationsmittel benutzt wird. Die Haupteinflüsse auf die Stickoxidbildung sind: Flammentemperatur, Sauerstoff-

		SO ₂	NO _x	C _N H _m	Staub	CO
		kg / t SKE				
Kraftwerke	Steinkohle	26	8.6	0.089	8	0.3
	Braunkohle	7.13	3.4	0.105	21	0.7
	Schw. Heizöl	23	9	0.1	3.02	0.65
	Gas	0.17	5	-	0.02	-
Industrielle Verbrennungs- prozesse	Koks	18.5	6.3	0.4	6.92	102
	Steinkohle	26	6.17	0.44	6.72	1.3
	Braunkohle	10	7	0.1	10	5
	Schw. Heizöl	23	558	0.77	1.5	0.17
	Gas	0.017	5	-	0.2	0.0058
	Koksproduktion/ Hochofenprozeß	6	-	-	24	-
	Raffinerieprozeß	-	-	1.7	-	-

Tab. 7: Spezifische Emissionsfaktoren von Kraftwerken und industriellen Verbrennungsprozessen

konzentration und Verweilzeit /73, 74/. Die spezifischen Emissionsfaktoren von Feuerungsanlagen in Kraftwerken und die der Industrie unterscheiden sich wegen der unterschiedlichen Heizleistung (vergl. Tab. 7). Zwei Energieumwandlungsarten, bei denen hohe Emissionen auftreten, müssen in dieser Untersuchung berücksichtigt werden: die Koksproduktion und der Kokeinsatz in der Eisen- und Stahlindustrie und den Raffinerieprozeß. Hier haben wir es mit völlig anderen Umwandlungsprozessen als der Verbrennung zu tun; demnach müssen spezielle Emissionsfaktoren zur Berechnung der Emissionsmengen herangezogen werden. Für die Bestimmung der Schadstoffmengen in dieser Untersuchung werden die in Tab. 7 zusammengestellten Emissionsfaktoren verwandt.

Die Werte sind Anfangswerte, d.h. spezifische Emissionswerte, die sich ohne Emissionsschutzmaßnahmen einstellen. Der spezifische Emissionsfaktor für Schwefeldioxid beim schweren Heizöl wird wegen der vorherzusehenden Änderung des Schwefelgehaltes im Rohöl exogen geändert /75/.

6.4.2.2 Die Schadstoffmengen der Vergangenheit

Die Schadstoffmengen der Vergangenheit lassen sich unter Zugrundelegung des verbrauchten Brennstoffverbrauchs und der spezifischen Emissionsfaktoren ermitteln. Die Verbrauchsentwicklung für Steinkohle, Braunkohle und Schweres Heizöl ist aus der Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland von 1950 bis 1972 entnommen /76/. Analog zum Anstieg der Verbrauchswerte ergibt sich im Zeitraum von 1952 bis 1972 auch ein Anstieg der

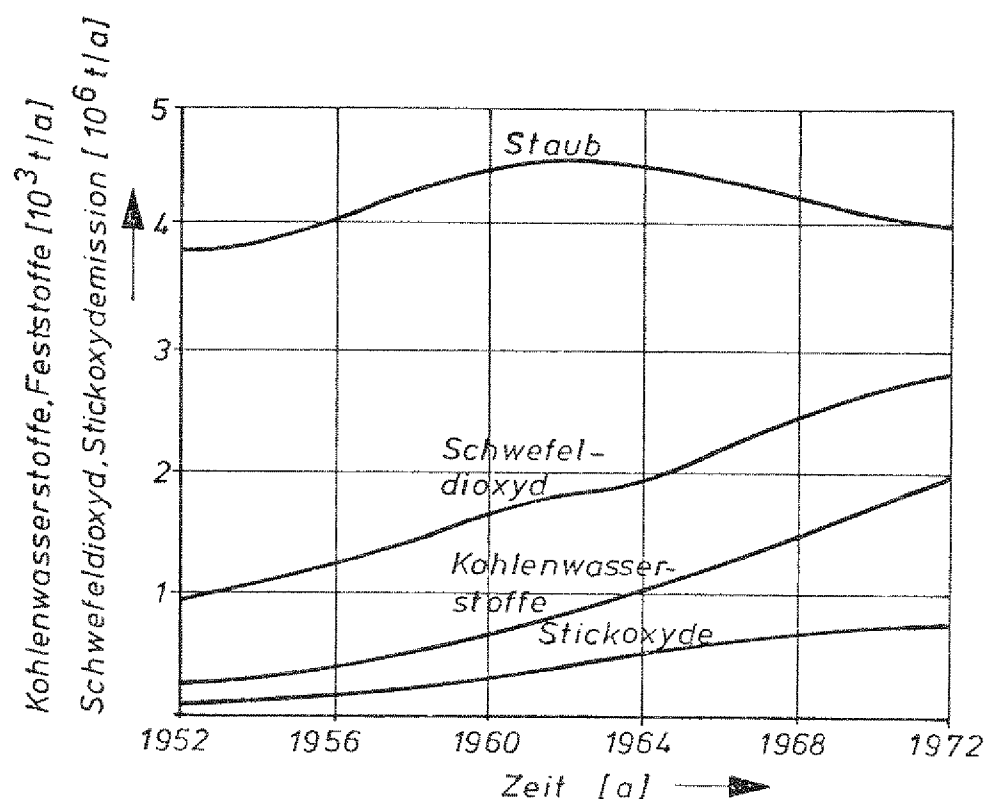


Abb. 36: Schadstoffemissionen aus stationären Feuerungsanlagen in der BRD

Emissionswerte (vergl. Abb. 36). Nur die Staubemission ist etwa ab 1960 reduziert worden. Der Stand der Technik bei Staubabscheidern ist am weitesten fortgeschritten. Moderne Elektrofilter sind heute in der Lage 99,4 % der Flugasche zurückzuhalten. Welche Staubreduzierung möglich ist, zeigt das Beispiel der Veba Kraftwerke Ruhr AG (VKR). Danach sind die Staubemissionen von 130 Tausend Tonnen auf 5 Tausend Tonnen gesunken /77/.

6.4.3 Möglichkeiten des Umweltschutzes im Sektor: Öffentliche und Industriekraftwerke

Gerade nach der neuesten Umweltgesetzgebung in der Bundesrepublik Deutschland (Bundes Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft)) hat die Diskussion über umweltschützende Maßnahmen am Kraftwerk heftig zugenommen.

Es geht um die Frage, ob Rauchgasentschwefelungsanlagen für Kraftwerke bestimmter Größe und Betriebsweise dem "Stand der Technik" entsprechen. Während die Staubabscheider schon lange zum "Stand der Technik" zu zählen sind, ist dies bei der Rauchgasentschwefelung noch umstritten. Für die Vermeidung der Schadstoffe Stickoxide und Kohlenwasserstoffe stehen zum heutigen Zeitpunkt bis auf Regelung der Brennparameter noch keine technischen Einrichtungen zur Verfügung. Neben den technischen Einrichtungen zur Reduzierung der Emissionen bei fossil beheizter Feuerung, sind ganz neuartige, umweltfreundliche Energieversorgungssysteme in der Diskussion. Diese Diskussion wurde aber weniger durch Umweltgefährdung konventioneller Energieumwandlungssysteme angeregt, sondern vielmehr durch die drohende Verknappung konventioneller Primärenergieträger. Daher sollen neuartige Energiesysteme als Umweltschutzmaßnahmen nur am Rande untersucht werden, zumal sie auch nur sehr langfristig wirksam werden können.

Im wesentlichen wird im folgenden der Stand der Technik von Rauchgasentschwefelungsanlagen und deren weitere Entwicklung untersucht.

6.4.3.1 Stand der Technik und Entwicklungsmöglichkeiten der Rauchgasentschwefelung

Aus der Vielzahl der Berichte, die sich mit der Entwicklung der Rauchgasentschwefelung auseinandersetzen, gibt es einige, die sich mit einer vergleichenden Analyse der einzelnen Verfahren bzw. einer Zusammenstellung der bisher arbeitenden Anlagen beschäftigen. Die für diese Arbeit und für das Modell notwendigen Angaben wurden aus den Literaturstellen /78, 79, 80, 81/ entnommen. Das Wesentliche wird im folgenden kurz dargestellt.

Nach diesem Informationsstand werden in der Welt in mehr als 50 kohle- und ölgefeuerten Kraftwerken Rauchgasentschwefelungsanlagen eingesetzt, oder sie befinden sich im Bau. Man kann davon ausgehen, daß Rauchgasentschwefelungsanlagen "Stand der Technik" darstellen und demnach auch in der Bundesrepublik Deutschland die Forderung nach einer Vermeidung der Schwefeldioxidemission gestellt werden kann.

Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich einmal nach dem zur Anwendung gelangenden Absorptionsmittel oder nach einem nassen oder trockenen Verfahrensweg. Als häufigstes Absorptionsmittel wird Kalk, entweder als Kalkstein (CaCO_3) oder als Oxid (CaO) oder Hydroxid (Ca(OH)_2) benutzt. In neuer Zeit gewinnen aber auch die Gruppen der Metalloxide - Oxide der Metalle Mangan, Eisen, Kupfer und Zink, kommen als Sorbentien für SO_2 zur Anwendung, an Bedeutung. In der Bundesrepublik Deutschland befinden sich fünf Unternehmen, die heute Rauchgasentschwefelungsanlagen anbieten oder entwickeln.

Als Beispiel für ein Rauchgasentschwefelungsverfahren soll ein in der BRD entwickeltes Verfahren kurz beschrieben werden (vergl. Abb. 37). Mit ca. 150°C tritt das Rauchgas in den Kopf des Waschturmes ein: Im oberen Teil des Wäschers werden die Rauchgase durch eine CaO -Suspension aus zentrisch angeordneten Dralldüsen gekühlt, grob entstaubt und entschwefelt. Anschließend erfolgt die Feinentstaubung und Entschwefelung im unteren Teil

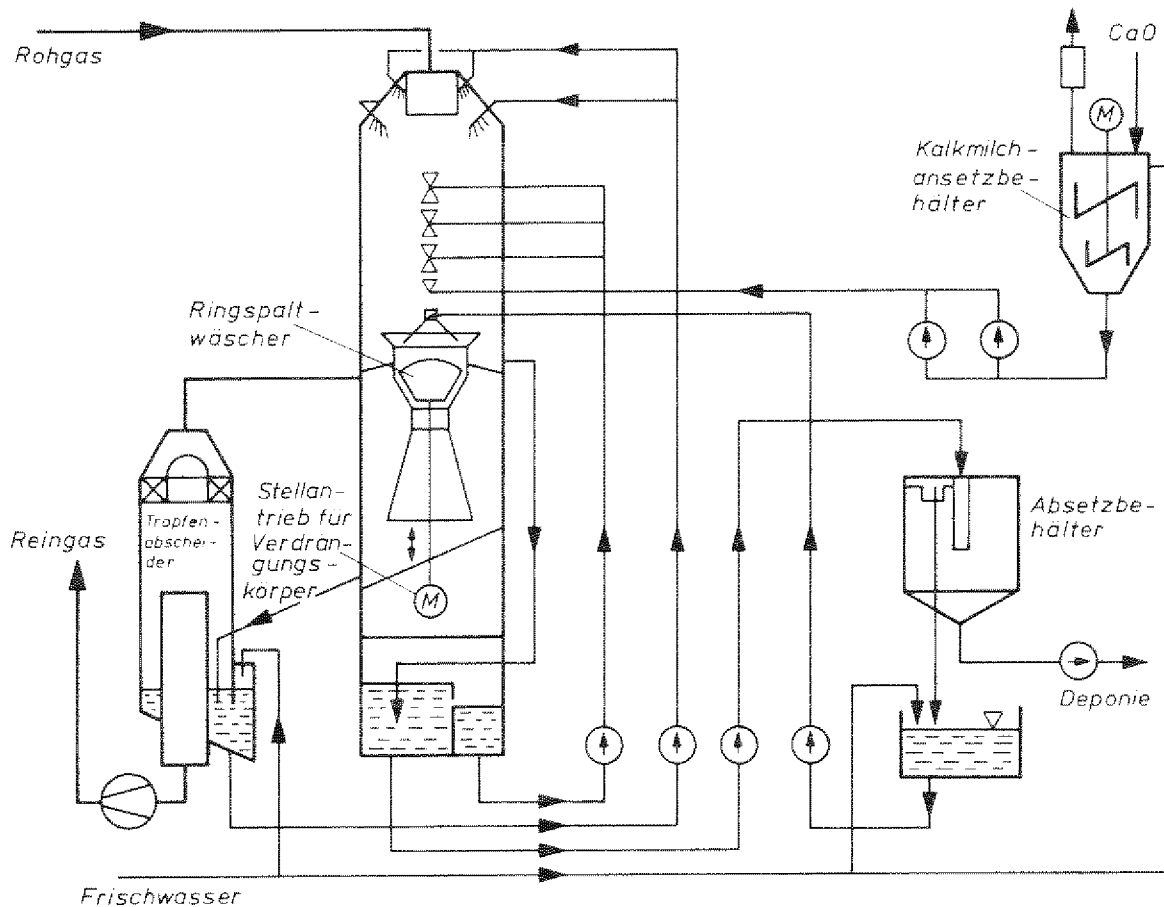


Abb. 37: Grob-Flußplan eines Rauchgasentschwefelungsverfahrens /nach 80/

mit dem sogenannten Ringspaltwäscher. Danach werden die Rauchgase im Waschturm selbst umgelenkt und passieren den danebenstehenden Tropfenabscheider sowie den Saugzug.

Rauchgas vor der Wäsche:	Temperatur	120 °C
	SO ₂ -Gehalt	1120 ppm
	SO ₃ -Gehalt	11 ppm
	O ₂ -Gehalt	2-6 Vol%
	Feststoff-Gehalt	12 gr/Nm ³
	Druck	20 mbar + p

Rauchgas nach der Wäsche:	Temperatur	ca. 60 °C
	SO ₂ -Gehalt	104 ppm
	Feststoff-Gehalt	38 mg/Nm ³
	Druck	0 mbar + p

Durch die nasse Gaswäsche werden der Staub bis auf geringe Reste, SO_2 und SO_3 zu ca. 90 % und die nitrosen Gase zu 10 bis 30 % aus dem Rauchgas entfernt. Auf die Möglichkeit der Brennstoffentschwefelung wird bei der Erläuterung der Reduzierungsmaßnahmen im Haushaltssektor eingegangen.

6.4.3.2 Möglichkeiten der Reduzierung von nitrosen Gasen in Kraftwerken

Die Verringerung der NO_x -Emission kann durch Veränderung der Größen, die Flammtemperatur, Sauerstoffkonzentration und Verweilzeit einer technischen Flamme bestimmen, erreicht werden. Diese Größen sind: Feuerungsleistung, Luftüberschuß, Drallgrad der Verbrennungsluft, Mischung von Brennstoff mit Verbrennungsluft, Lufttemperatur, Zerstäubungsgüte, Wärmeabfuhr durch Brennkammerwände und die Eigenschaften des Brennstoffs selber.

In Versuchen konnte nun festgestellt werden, daß die Stellung der Zerstäuberlanze von großem Einfluß auf die NO-Bildung ist. Dies geht auch aus Versuchen in /82/ hervor. Der Einfluß der Zerstäuberlanze auf NO-Emission ist aus Abb. 38 zu ersehen. Eine andere Möglichkeit, die NO-Bildung zu beeinflussen, besteht in der Rezirkulation von kalten Rauchgasen (vergl. Abb. 39), d.h., die Rückführung der Abgase in den Verbrennungsprozeß.

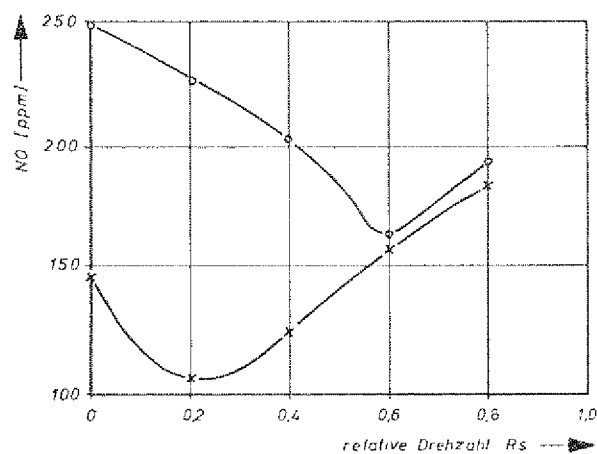


Abb. 38: Einfluß der Zerstäuberlanze auf die NO-Emission
/nach 82/

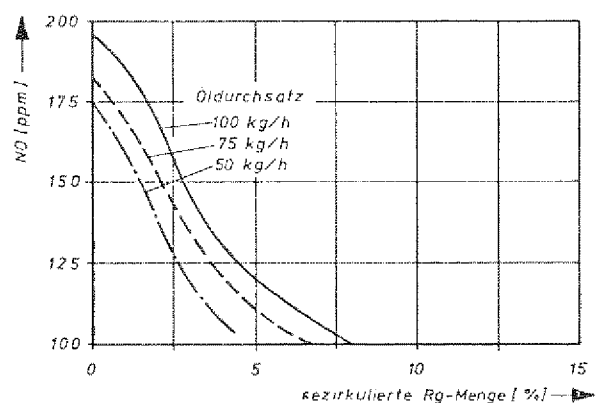


Abb. 39: Einfluß der Rezirkulation auf die NO-Emission
/nach 82/

Durch die Rezirkulation werden zwei Effekte erzielt: Zum einen wird die Spitztemperatur der Flamme herabgesetzt, und zum anderen der Sauerstoffpartialdruck verringert. Aus diesen Gründen ist die erreichbare Reduzierung der NO-Bildung vor allem in den Fällen groß, bei denen die Bindung von Luftstickstoff die Hauptquelle der NO-Bildung darstellt.

Wie aus diesen kurzen Erläuterungen hervorgeht, kann mit einer Reduzierung der NO_x -Emissionen durch Verändern der Brennparameter gerechnet werden.

6.4.3.3 Reduzierung des Umweltschadens durch neuartige umweltfreundliche Energieversorgungssysteme

Fast alle neuartigen Energieumwandlungssysteme basieren auf der Verwendung der Kernenergie. Die Kernenergie ist damit, wenn man einmal von den nichtfossilen, nichtnuklearen Energieträgern wie Sonne, Wind, Meer, Geothermischer Energie absieht, Angelpunkt neuartiger Energiesysteme.

Die Umweltfreundlichkeit der Kernenergie wird zwar in vielen wissenschaftlichen Untersuchungen als erwiesen angesehen, doch das Umweltbewußtsein der Bevölkerung und einiger Genehmigungsstellen spricht häufig noch gegen den Kernreaktor. Dieses kommt in zahlreichen Bürgerinitiativen und langwierigen Genehmigungsverfahren zum Ausdruck.

Das Modell berechnet zwar die Entwicklung der jährlichen Emissionen in einem gesonderten Modellteil; dieser Teil wird aber nicht an den gesellschaftlichen und technischen Regelkreis angekoppelt, da die Entwicklung von Rückhaltemaßnahmen heute noch zu ungewiß ist. Die Berechnung der Emissionsmengen geschieht mit Hilfe von spezifischen Emissionen pro MWh, die aus den Angaben der Tab. 8 ermittelt wurden.

Kraftwerke		Jährliche Emission in Ci / a 1300 MW _{el}		
		SWR	DWR	HTR
Atmosphäre	Tritium	50	30	10
	Krypton 85	1000	1050	10
	Jod 131	0.2	0.1	0.003
	Jod 133	2	0.5	0.012
	Xenon	5000	2500	10
Wasser	Tritium	150	1250	1000
	Restl. Nuklide	1	1	0.1
Wiederaufbereitungs- anlagen		Jährliche Emission in Ci/a 23 GW _{el}		
		LWR	HTR	
	Tritium	$1.6 \cdot 10^5$	$1.12 \cdot 10^5$	
	Krypton 85	$1 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^7$	
	Jod 131	0.03	0.065	
	Jod 133	0.08	-	
	Restl. Nuklide	35	30	
	H3 in Wasser	$4.5 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^5$	

Tab. 8: Jährliche Emissionsmengen von Kernkraftwerken

Die wichtigsten Argumente für die Umweltfreundlichkeit der Kernenergie seien hier kurz aufgeführt:

Die spezifischen Schadstoffemissionen sind so gering, daß die sich daraus ergebende Strahlenbelastung weit unter der natürlichen Strahlenbelastung bleibt. Der Abstand zur höchstzulässigen Strahlenbelastung nach der ersten Strahlenschutzverordnung ist noch höher. Außerdem bleibt die Strahlenbelastung weit unter dem, was in der Medizin durch nukleare Behandlung als ungefährlich akzeptiert wird. An folgenden Zahlen soll das belegt werden:

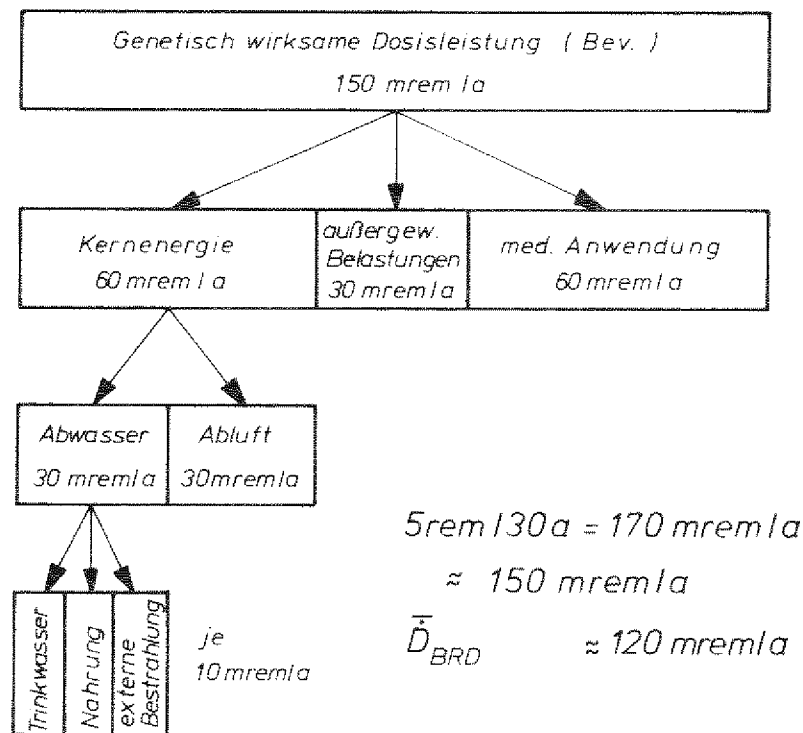


Abb. 40: Aufteilung der Grenzwerte der genetischen wirksamen Strahlenbelastung für Bevölkerungsgruppen durch künstliche Quellen /nach 83/

Bei einer Extrapolation der Verdünnung der Jahresdosis bis 20 km Entfernung würde eine Emission von 60000 Ci/a Xe-133 (pessimistische Annahme für einen 1000 ME_e-Siedewasserreaktor) eine mittlere Jahresdosis von etwa 0,05 mrem/a (in Hauptwindrichtung, ohne Windschwankung) erreicht werden /69/. Diese Strahlenbelastung liegt weit unter der in Abb. 40 zu findenden Belastungsgrenze von 30 mrem/a. Die in /69/ durchgeführte hypothetische Annahme, daß die gesamte heutige Stromerzeugung der BRD durch Kernkraftwerke erfolgte, zeigt, daß die hieraus resultierende Schadstoffbelastung der Luft um mehr als den Faktor 1000 unter den zulässigen Konzentrationswerten lägen. Es muß allerdings gesagt werden, daß die Beseitigung radioaktiver Abfälle und der Abbruch stillgelegter Kernkraftwerke noch eine Reihe von Problemen mit sich bringt. Für die Berechnungen der radioaktiven Schadstoffbelastungen wird der

in Kap. 4.2.3 dargestellte Modellansatz benutzt. Darin werden die pro Zeiteinheit in die Atmosphäre emittierten radioaktiven Schadstoffe und die natürlichen Zerfallsmechanismen berücksichtigt. Zur Umrechnung der Schadstoffmengen in Schadstoffkonzentration wird von der Bundesrepublik als geschlossene Zelle ausgegangen. Es wird angenommen, daß sich die Schadstoffe gleichmäßig über die Bundesrepublik verteilen und sich entsprechend der Verweilzeit der einzelnen Stoffe in der Atmosphäre und einem bestimmten Höhenprofil in der Atmosphäre konzentrieren. Für Krypton-85 ergibt sich z.B. bei einer Verweilzeit von 15,4 Jahren und einer barometrischen Höhenverteilung, daß 1,7 % der Gesamtmengen sich in den ersten 100 m ansammeln.

Nach Empfehlungen des Arbeitskreises "Strahlenschutztechnik" der Deutschen Atomkommission zur Bestimmung der zulässigen Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken in die Atmosphäre kann der Zusammenhang zwischen Konzentration (Ci/m^3) und Dosisleistung (mrem/a) mit der Dosiskonstanten ($\text{rem m}^3/\text{Ci s}$) hergestellt werden. Die Submersionsdosiskonstante (Dosiskonstante für Bestrahlung aus der Abluftfahne) g_{ne}^3 für Krypton-85 beträgt z.B. 74 ($\text{rem m}^3/\text{Ci s}$).

6.4.4 Die Kosten der Emissionsreduzierung bei brennstoffgefeuerten Kraftwerken

Genauere Kostendaten über die Abgasentschwefelung sind nur schwer anzugeben. Wegen stark variierenden Kosteneinflußgrößen wie Standort, Brennstoff und verfahrensspezifische Faktoren, sind erhebliche Abweichungen von Angaben aus der Literatur sowohl nach oben als auch nach unten möglich. In /79/ werden Kostenstudien aus den USA zitiert. Darin werden für Kalksteinverfahren bei Neuanlagen Investitionskosten von 45 \$/kW und Betriebskosten, einschließlich der Kapitalkosten von 2,3 mill/kWh (520 MW, Kohle 3,1 % S, 80 % Auslastung, Absatzteich, Reservewässer) angegeben.

Abgasent- schwefelungs- verfahren	2 % Schwefelgehalt				4 % Schwefelgehalt			
	Industrie	Blockgröße MWe			Industrie	Blockgröße MWe		
	100	100	300	600	100	100	300	600
Cat Ox	0,91	1,65	1,13	0,95	0,91	1,65	1,13	0,95
90 S FGD	0,867	1,361	0,961	0,913	1,163	1,723	1,342	1,247
70 S FGP	-	-	-	0,786	-	-	-	1,055
Bergbau	0,44	0,644	-	-	0,585	0,803	-	-
Reinluft	0,65	1,06	0,98	0,89	0,78	1,20	1,11	1,02
Grillo	0,852	1,355	0,887	0,748	0,922	1,445	0,970	0,831
Wellmann	0,624	0,805	0,705	0,68	0,747	0,935	0,833	0,813
NH3	0,51	0,79	0,63	0,58	0,69	0,93	0,76	0,72
Uhde	0,5	0,7	0,59	0,52	0,41	0,54	0,45	0,4
MUK	0,45	0,63	0,53	0,49	0,57	0,74	0,64	0,60
BAHCO	0,475	0,674	0,619	0,604	0,54	0,744	0,691	0,676
BISCHOFF	0,462	0,618	0,51	0,458	0,525	0,683	0,575	0,523
CE EVT	0,545	0,753	0,668	0,625	0,628	0,832	0,746	0,702
Chiyoda	0,54	0,807	0,66	0,598	0,645	0,97	0,784	0,716
Mittelwerte	0,7022	0,9036	0,73	0,6802	0,7012	1,0689	0,8359	0,7887

Tab. 9: Kosten der Abgasentschwefelung (DPF/kWh) für verschiedene Verfahren /nach 80/

Für deutsche Verhältnisse gibt Brocke Kostenerhöhungen zwischen 0,3 und 1,1 Pf/kWh an (ölgefeuerte Kraftwerke im Bereich 200 bis 800 MW, 2000 bis 8000 Jahresvollaststunden, 2 bis 4 % Schwefelgehalt) /79/. Ähnliche Werte ergab auch eine Systemstudie über Entschwefelungsanlagen hauptsächlich aus der Bundesrepublik Deutschland (vergl. Tab. 9). Die angegebenen Werte gelten sowohl für Abgase aus Kohlefeuerungen als auch aus Heizölfeuerungen. Sie beruhen auf Mitteilungen der Hersteller und sind zum Teil widerrufen worden. Außerdem müssen sie etwa um 20 % höher angesetzt werden. Damit ergeben sich Kostenerhöhungen bei der Stromerzeugung um 15-20 % /79/. In das Modell wird der in Abb. 41 dargestellte Zusammenhang von Kosten und Emissionsreduzierung eingegeben. Natürlich beruht dieser Zusammenhang auf den Kosten der Rauchgasentschwefelung und der Rauchgasentstaubung; für die Reduzierung von Stickoxiden und Schwefelwasserstoff müßte ein eigener Kostenzusammenhang ermittelt werden. Aber

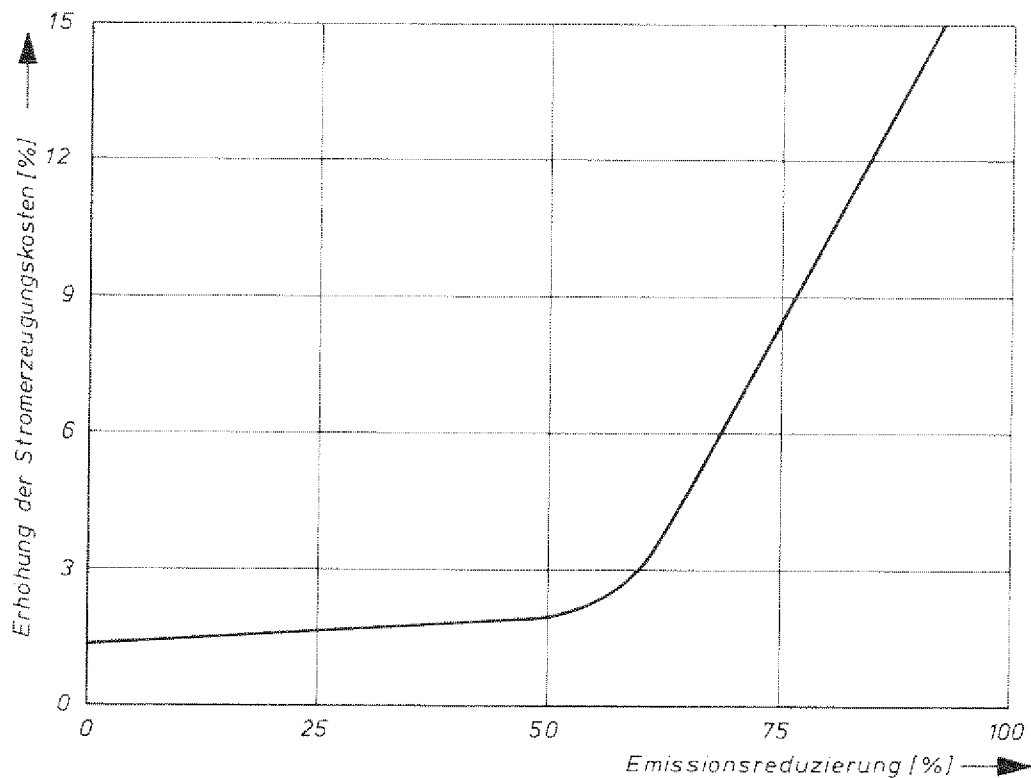


Abb. 41: Tafelfunktion für Reduzierungskosten im Kraftwerksektor

da keine Daten für solche Reduzierungsmaßnahmen vorhanden sind, soll in dieser Arbeit der dargestellte Zusammenhang für alle Reduzierungsmaßnahmen gelten.

6.5 Beschreibung des Modellsektors: Haushalte und Kleinverbraucher

Feuerungen von Haushalten und Kleinverbraucher produzieren in dicht besiedelten Gebieten einen hohen Anteil an der Gesamtschadstoffmenge. Wegen der Vielzahl und der geringen Höhe der Emissionsquellen führen die Emissionen zu starken Immissionsbelastungen. Die wesentlichen Schadstoffe sind auch hier wieder die Schwefeldioxide, Stickoxide, Kohlenwasserstoffe und Feststoffe.

Wie aus der Entwicklung des Brennstoffverbrauchs in den Haushalten der letzten 20 Jahre hervorgeht, ist der Anteil der festen Brennstoffe

(Steinkohle, Braunkohle) kontinuierlich zurückgegangen. Damit ist auch ein Rückgang der Emissionswerte zu verzeichnen. Doch angesichts der Tatsache, daß 80 bis 85 % des Endenergieeinsatzes (das sind etwa 44 % des Gesamt-Endenergieverbrauchs der BRD) im Haushaltsbereich der Raumheizung dienen, ist der stofflichen Umweltbelastung durch Feuerung der Haushalte und Kleinverbraucher vermehrte Aufmerksamkeit zu schenken.

6.5.1 Die atmosphärische Schadstoffbelastung durch Feuerungen der Haushalte und Kleinverbraucher

Die Emissionswerte für Feuerungen der Haushalte und Kleinverbraucher weisen in der Literatur große Streuungen auf. Brocke gibt zum Beispiel für die spezifische Feststoffemission 60,0 Feststoff/t OE entspricht 42 kg Feststoff/t Steinkohle an /84/. Bei Dreyhaupt dagegen betragen

		Spez. Emissionsfaktoren kg/t SKE				
		SO ₂	NO _x	C _n H _m	Staub	CO
Sammelheizung	Gas	0.004	14	0.07	0.035	3.5
	Heizöl	6.2	1.05	0.17	0.7	3.5
	Braunkohle	12	2	8	14	50
	Steinkohle	21	2.6	5	14	35
	Koks	18.3	2.6	4.1	4.1	35
Einzelheizung	Gas	0.01	0.01	0.7	0.23	7
	Heizöl	62	3.5	0.29	1.1	7
	Braunkohle	12	2	8	7	50
	Steinkohle	21	35	14	21	73
	Koks	18	3.5	4.1	4.1	35

Tab. 10: Spezifische Emissionsfaktoren von Feuerungen von Haushalten und Kleinverbrauchern

die spezifischen Feststoffemissionen nur 10,9 kg/t Steinkohle. Als Ausgangsgrößen im Modell werden die in Tab. 10 zusammengestellten Werte benutzt. Die Emissionswerte für Ölfeuerungen wurden aus neuesten Emissionsmessungen an 54 Ölfeuerungen (Heizöl EL) verschiedener Wärmeleistungen gewonnen /85/.

Aus diesen spezifischen Emissionswerten und den Verbrauchswerten für Brennstoffe der Haushalte und Kleinverbraucher lassen sich nun die Emissionsmengen in den letzten 20 Jahren abschätzen. In Abb. 42 sind die Brennstoffverbräuche pro Jahr der Bundesrepublik Deutschland und die SO_2 -Emissionen dargestellt.

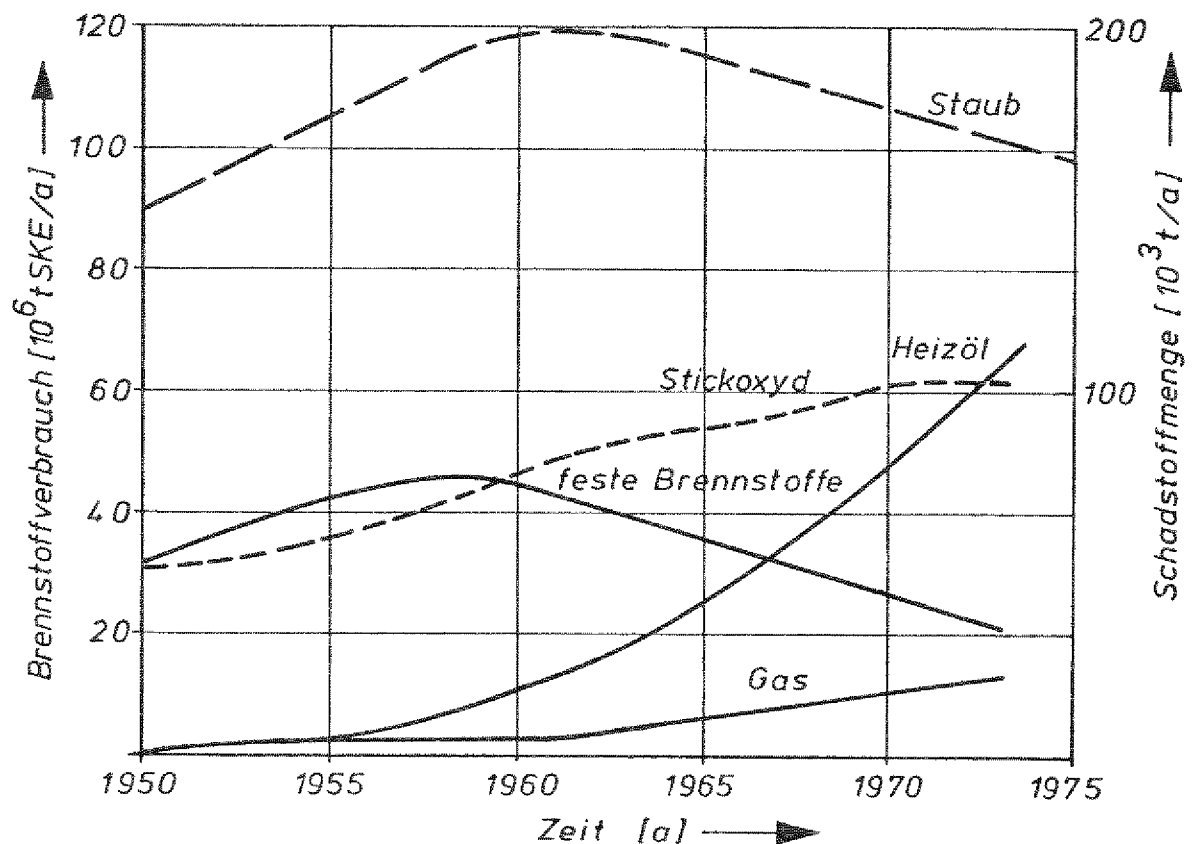


Abb. 42: Brennstoffverbrauch, Staub-Emissionen und NO -Emissionen von Haushalten und Kleinverbrauchern

Deutlich wird die direkte Abhängigkeit der Staub-Emissionen vom Steinkohleverbrauch. Ein Absinken des Steinkohleverbrauchs in den 60-iger

Jahren hatte eine Senkung der Staub-Emissionen zur Folge, obwohl ein starker Verbrauchsanstieg von leichtem Heizöl zu verzeichnen war.

6.5.2 Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen aus Feuerungen der Haushalte und Kleinverbraucher

Direkte Maßnahmen zur Emissionsreduzierung sind bei Feuerung der Haushalte und Kleinverbraucher nur schwer durchzuführen. Die Einrichtung von Abgasreinigungsanlagen in Individualfeuerungen erscheint zu schwierig und zu aufwendig, so daß die notwendigen Aufwendungen in keinem Verhältnis zum Nutzen stehen. Eher geeignet sind indirekte Maßnahmen wie:

- Umstellung auf Sammelheizung
- Elektroheizung
- Fernheizung
- Neuartige umweltfreundliche Brennstoffe
- Brennstoffentschwefelung

Bis auf den Einsatz neuartiger umweltfreundlicher Brennstoffe (Methanol, Wasserstoff) sind alle Maßnahmen kurz- bis mittelfristig einsetzbar (5 - 10 Jahre). In das Modell eingebaut wird die Maßnahme der Brennstoffentschwefelung, d.h. die augenblickliche Struktur der Verbrennungseinrichtungen der Haushalte und Kleinverbraucher bleibt erhalten, und die Umweltverschmutzung wird über die Reduzierung des Schwefelgehaltes im Brennstoff beeinflußt. Die anderen möglichen Maßnahmen können dann später in Simulationsläufen als Strategietest durchgeführt werden.

Die Entschwefelung der Steinkohle geschieht über die Pyritabscheidung und der anschließenden Entschwefelung des Pyrits. Es kann ein Effekt von 32 bis 40 % Entschwefelung erwartet werden, so daß im Endprodukt die 1 %-Grenze erreicht werden kann. Von einer Möglichkeit, den Schwefelgehalt bei Braunkohlen zu senken, ist bisher nichts bekannt geworden /71/.

Bei der Entschwefelung des Rohöls sind mehrere Verfahren möglich. Die direkte Entschwefelung (hydrierende Entschwefelung eines Gemisches aus

verdampftem oder flüssigem Öl und Wasserstoff mit Hilfe von Katalysatoren) wird eingesetzt bei allen Mitteldestillaten und bei Rohölen, ferner bei atmosphärischem Rückstand mit geringem Gehalt an Asche. Beim indirekten Verfahren wird nach der Vakuumdestillation nur das Vakuumdestillat entschwefelt. Je nach Wasserstoffeinsatz kann heute eine Entschwefelung bis zu 90 % erreicht werden. Die Entschwefelung ist also im wesentlichen von der Bereitstellung des Wasserstoffes abhängig.

6.5.3 Kosten der Brennstoffentschwefelung

Die Kosten der Heizölentschwefelung können maßgeblich von den Wasserstoffkosten und dem Entschwefelungsgrad beeinflusst werden. Abb. 43 gibt den Zusammenhang zwischen Entschwefelungsgrad und dem spezifischen Wasserstoffbedarf wieder. Für die Wasserstoffkosten liegen noch keine ver-

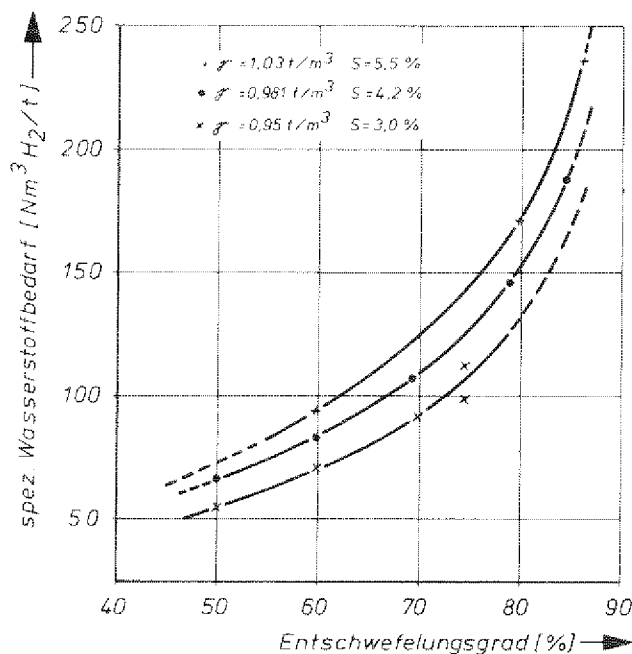


Abb. 43: Wasserstoffbedarf in Abhängigkeit vom Entschwefelungsgrad /91/

trauenswürdigen Angaben vor. Tab. 11 gibt Zahlen aus überschlägigen Rechnungen wieder. Aus Abb. 43 und Tab. 11 lassen sich zunächst die Wasser-

Kohlekosten (DM/Gcal)	Wasserstofferzeugungskosten (Pfg/Nm ³)	
	konventionelle Kohlevergasung	Kohlevergasung mittels nuklearer Prozeßwärme
5	5,9	5,3
10	8,2	6,4
15	10,5	7,6
20	12,8	8,8

Tab. 11: Wasserstofferzeugungskosten der nuklearen Kohlevergasung im Vergleich zu konventionellen Verfahren (Kernwärmepreis = 7 DM/Gcal) /nach 86/

stoffkosten berechnen. Die Entschwefelungskosten ergeben sich dann je nach Entschwefelungsgrad, Schwefelgehalt und Kohlekosten zu 5,- DM/t bis 25,- DM/t. Die Angaben für die gesamten Entschwefelungskosten schwanken in der Literatur zwischen 11,- DM/t und 38,- DM/t /87, 88/. Das liegt zum Teil an unterschiedlich zugrunde liegenden Entschwefelungsgraden, zum anderen aber auch daran, ob nukleare oder fossile Wasserstofferzeugung angenommen wird. Die Investitionsaufwendungen für die Entschwefelungseinrichtung sind im Vergleich zu den Wasserstoffkosten gering, so daß die Entschwefelungskosten etwa den Wasserstoffkosten entsprechen. In das Modell wird als Tafelfunktion der Kostenanteil an den Heizölkosten für Entschwefelung eingegeben. Für die Kohleentschwefelung sind nur sehr ungenaue Kostenangaben in der Literatur gemacht worden. Ältere Arbeiten zeigen, daß man in einigen Fällen in einem Schüttelherd mit einem Kostenaufwand von 1,80 DM/t Rohförderkohle 30 bis 40 % des Pyritschwefels aus der Kohle entfernen kann /88/. In der amerikanischen Literatur werden 20 %-ige Kostensteigerungen bei Kohlenentschwefelung angegeben /89/. Dieser hohe Kostenanteil ist auf den hohen Schwefelgehalt der amerikanischen Kohle zurückzuführen. In einer vom Bundesministerium herausgegebenen Arbeit wird die Aufwendung an Kohlenentschwefelung mit 4,- DM/t Kohle angegeben /90/.

7. DIE ÜBERPRÜFUNG DES MODELLS

Es ist eines der Hauptwesensmerkmale von Simulationsmodellen, die Strukturen beliebiger realer Systeme abzubilden. Die generell wissenschaftliche Anforderung der Isomorphie zwischen zugrunde liegendem realen System und formalen Modell kann allerdings mit der Aufgabenstellung der Modellbetrachtung nicht in Einklang gebracht werden. "Der wissenschaftliche Erkenntnisprozeß vollzieht zur Erfassung der komplexen Realität eine Abstraktion, indem unbedeutende Eigenschaften weggelassen und nur die für das Betrachtungsziel wesentlichen Merkmale von Sachverhalten in den Blickpunkt gezogen werden." Diese gedankliche Vereinfachung der Wirklichkeit ermöglicht erst die rationale Durchbringung der verwickelten Zusammenhänge /92/. Auch wenn hier davon ausgegangen wird, daß der Zweck der Modellbildung nicht die Isomorphie zur Realität beinhaltet, muß der entwickelte Modellansatz auf seine Realitätsnähe überprüft werden. Eine hinreichende Genauigkeit kann an mehreren Vergleichskriterien, von denen eine oder mehrere als notwendige und/oder hinreichende Bedingung gewählt werden können, überprüft werden. Als Vergleichskriterien können aus den Variablenverläufen der Vergangenheit gewählt werden:

1. Anzahl der Wendepunkte
2. Zeitliches Auftreten der Wendepunkte
3. Richtung der Wendepunkte
4. Amplitude der Fluktuation in korrespondierenden Zeitabschnitten
5. Durchschnittliche Amplitude der gesamten Zeitreihen
6. Simultanität der Wendepunkte für verschiedene Variablen
7. Durchschnittswerte der Variablen
8. Genaue Übereinstimmung der Werte der Variablen.

Als Vergleichszeit bietet sich die Vergangenheit an, für die reale Vergleichswerte vorliegen. In "historischen" Läufen kann dann das historische Modellverhalten mit dem realen Vergangenheitsverlauf in Einklang gebracht werden. Eine weitere Überprüfungsmöglichkeit besteht in einer Sensitivitätsanalyse des Modellverhaltens. Damit kann das Modell auf die

Sensitivität bestimmter Variablen untersucht werden, und es lassen sich damit Aussagen über den erforderlichen Genauigkeitsgrad der Daten machen. Ferner kann durch Aufschalten von Sprüngen auf das Modell das generelle Reaktionsverhalten getestet werden.

7.1 Überprüfung einer hinreichenden Realitätsnähe zur vergangenen Wirklichkeit

Die historische Entwicklung des realen Systems ist in Kapitel 6 dargestellt. Wird das Modell mit den aus der Vergangenheit bekannten und aus der Statistik gewonnenen Daten über die Zeit von 1950 bis 1972 durchgespielt, so erhalten wir die in den Abb. 44-45 dargestellten Computerläufe.

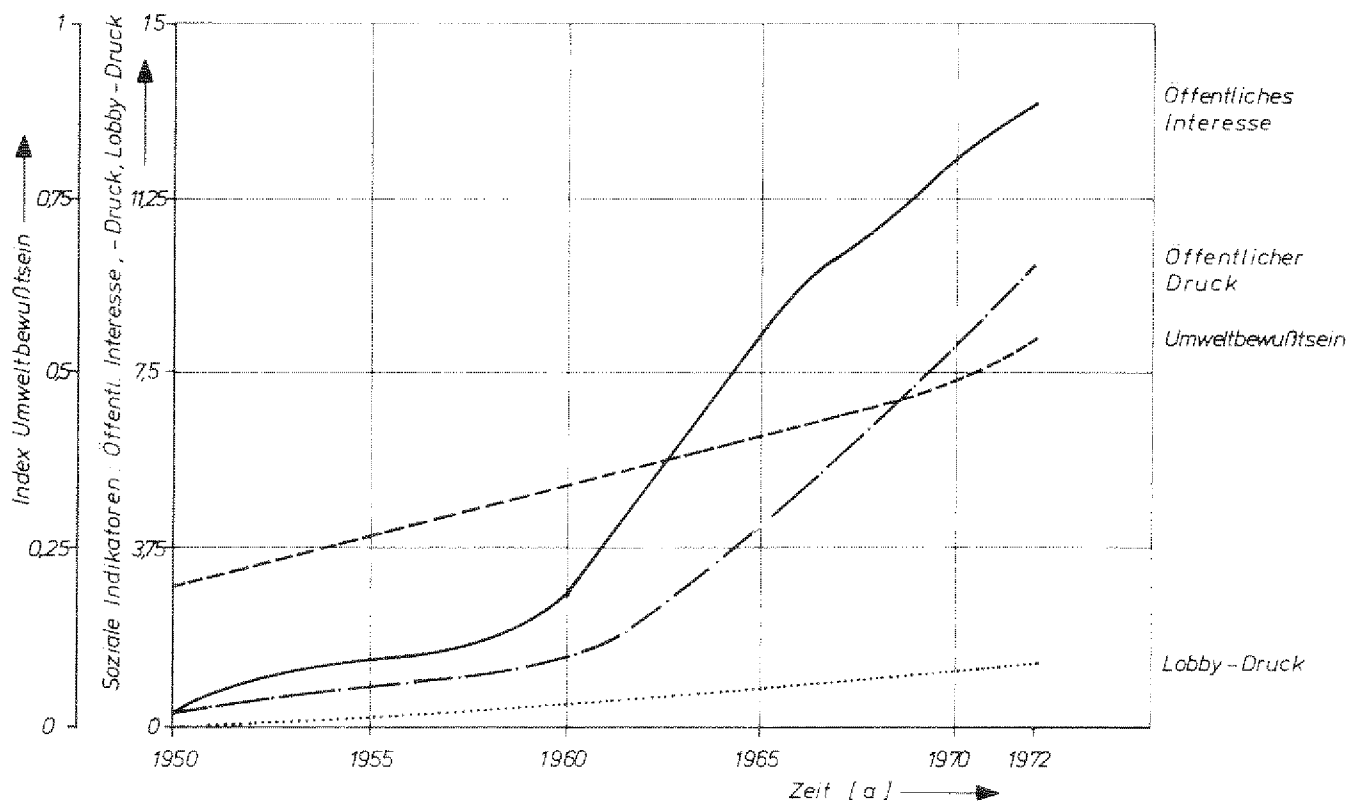


Abb. 44: Historischer Simulationslauf - soziale Indikatoren

Vergleicht man die Kurvenverläufe des "historischen" Simulationslaufs mit den realen Vergangenheitswerten, so stellt man einen hohen Grad an Übereinstimmung fest. Der Anstieg des öffentlichen Interesses (Abb. 44) über

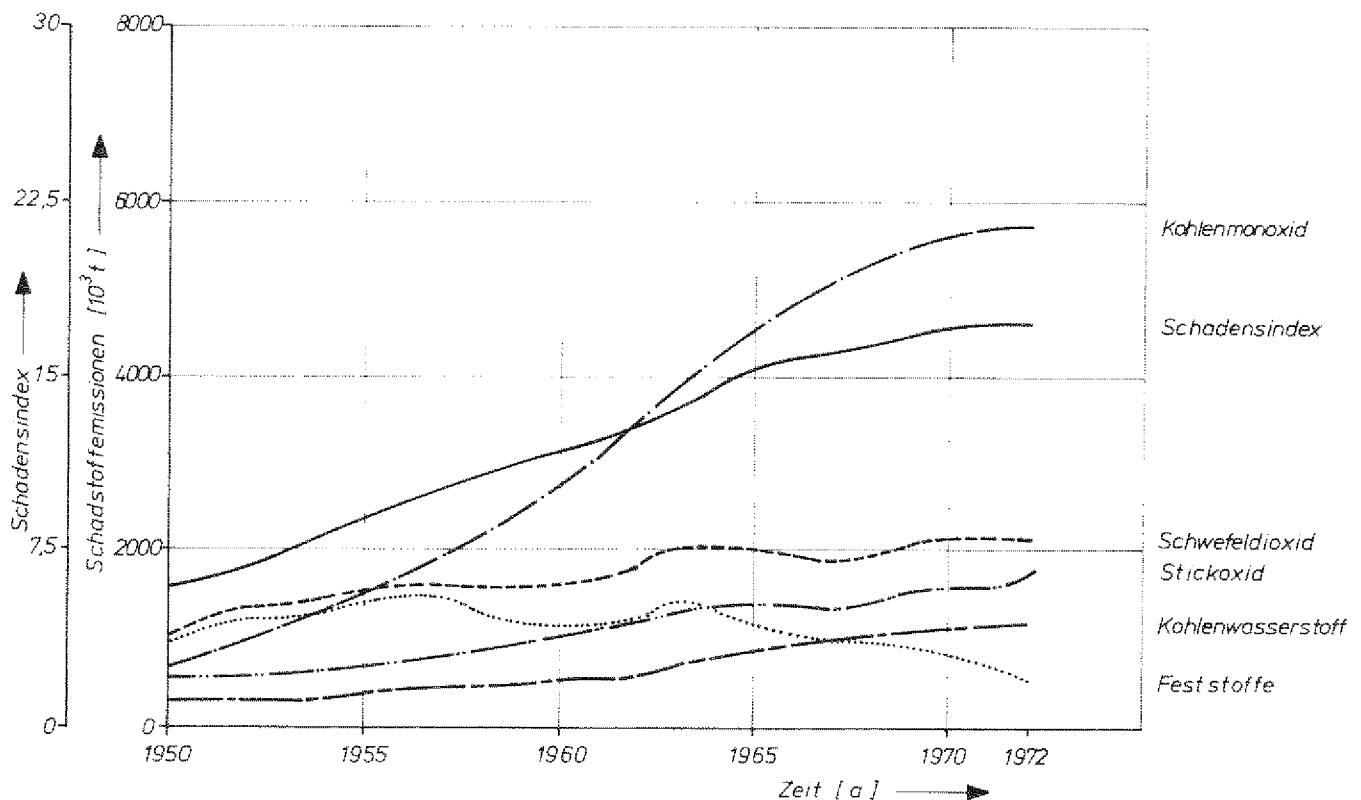


Abb. 45: Historischer Simulationslauf - Schadstoffe

dreiviertel seines maximalen Werten entspricht der Flut von Literatur über Umweltprobleme der letzten Jahre. Auch das Steigen des Umweltbewußtseins entspricht den durch demoskopische Erhebungen der letzten Jahre ermittelten Tendenzen. Bei den Schadstoffmengen der einzelnen Schadstoffe (Abb. 45) stimmen die Werte nahezu mit den Vergangenheitswerten überein. Der starke Anstieg der Kohlenmonoxidemission ist auf die starke Zunahme des Straßenverkehrs zurückzuführen. Die Abflachung der Kurve ab 1965 gibt die tatsächliche Reduzierung der spezifischen Kohlenmonoxid-Emissionsfaktoren durch Verbesserung der Vergasertechnik wieder. Die Senkung der Staubemission ab 1963 wird durch die zunehmende Installierung von Staubreinigungsanlagen bewirkt. Auch dieses reale Systemverhalten wird durch das Modell nachvollzogen.

Auch alle anderen Modellvariablen wurden genau auf ihr historisches Verhalten untersucht. Das Ergebnis ergab eine gute Übereinstimmung mit der

realen Vergangenheit, so daß das Modell als hinreichend wirklichkeitsnah angesehen werden kann.

7.2 Das generelle Verhalten des Modells

Das grundlegende Verhalten des Modells wird mit Hilfe von zwei Testläufen überprüft.

Zunächst werden konstante Energie-Verbrauchswerte – hier die Verbrauchswerte der Brenn- bzw. Kraftstoffe im Jahre 1950 – in das Modell eingegeben. Damit läßt sich feststellen, welche Eigendynamik in dem System steckt, d.h. wie sich das System verhält, ohne daß von außen Einflüsse wirksam werden. Der zeitliche Verlauf der wichtigsten Modellgrößen ist in Abb. 46 und 47 dargestellt.

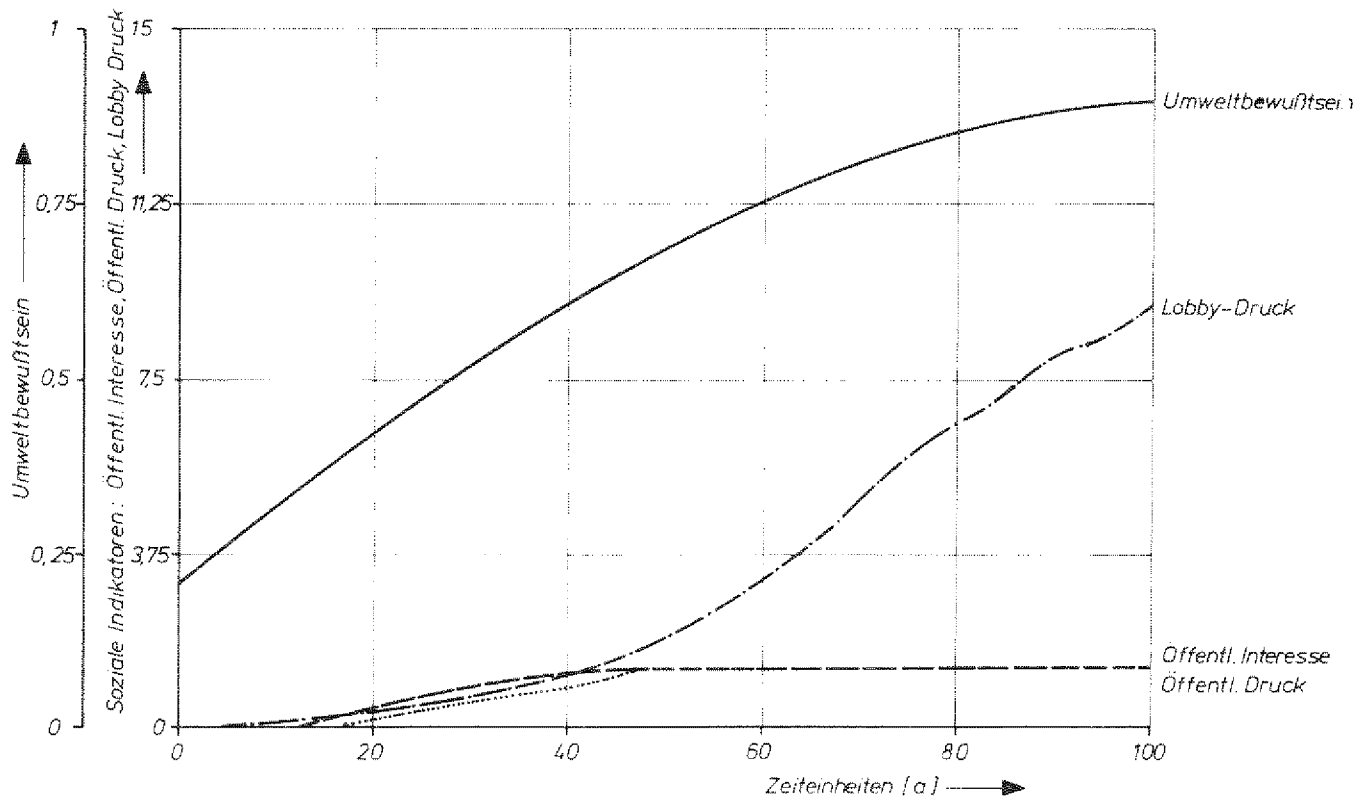


Abb. 46: Generelles Verhalten des Modells – soziale Indikatoren

Die aufgrund der konstanten Eingabewerte hervorgerufenen Schadenswerte reichen aus, um das selbstregelnde Verhalten des Systems in Gang zu

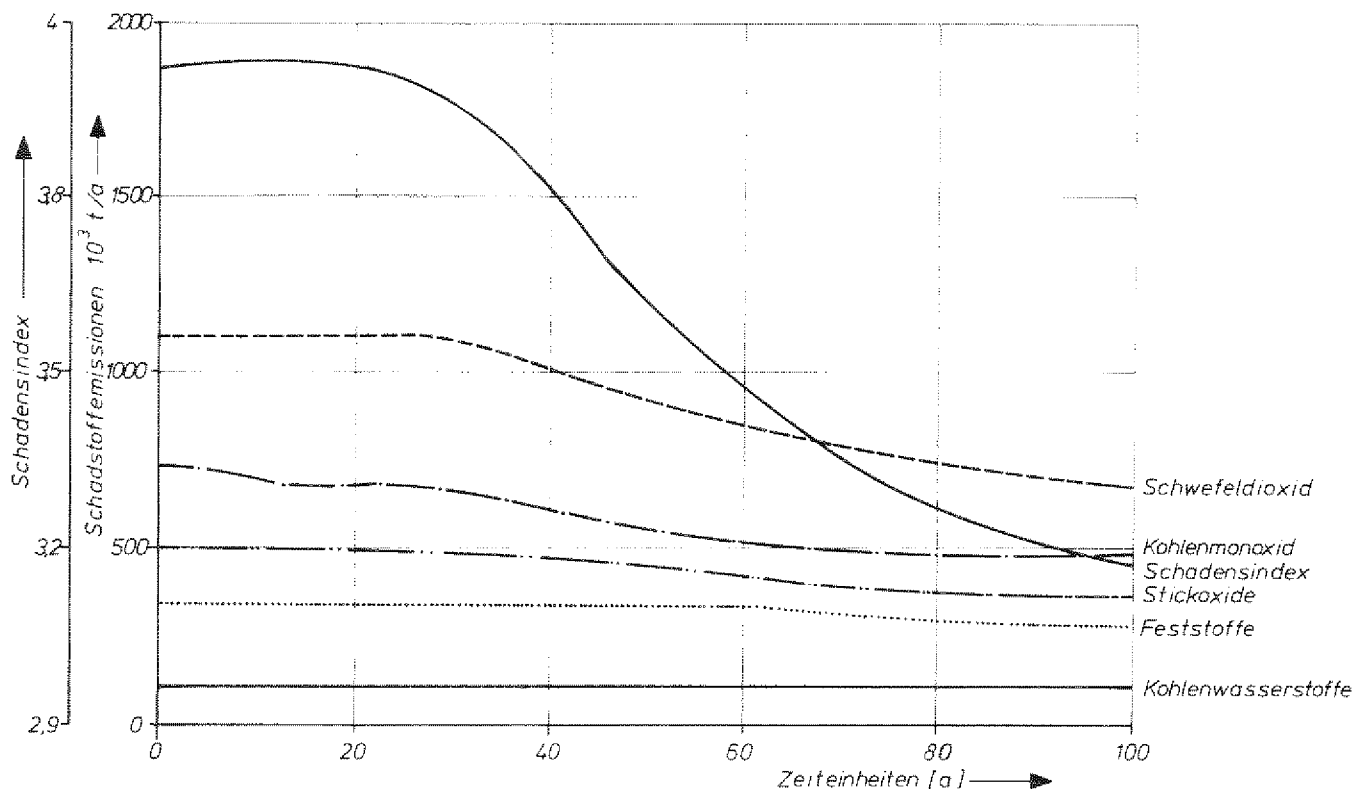


Abb. 47: Generelles Verhalten des Modells - Schadstoffe

setzen. Am stärksten steigt das Umweltbewußtsein. Es erreicht nach der Simulationszeit von 100 Jahren fast seinen maximalen Wert. Da die atmosphärische Schadstoffbelastung nur sehr gering ist, steigt das öffentliche Interesse an Umweltschutzmaßnahmen kaum an. Trotzdem bewirkt dieses geringe öffentliche Interesse eine Reduzierung der Emissionen von 20 bis 50 %. Die Schwefeldioxidreduzierung ist wegen der hohen Schadenswertigkeit am größten. Insgesamt verringert sich der Schadensindex um 25 %.

Da in diesem Simulationslauf reale Anfangswerte eingegeben wurden, können schon aus diesem Testlauf Schlüsse auf unser reales System gezogen werden. Eine Umweltbelastung auf niedrigerem Niveau, die aber über lange Zeit wirksam wird, ruft nur geringfügige Gegenmaßnahmen hervor. Wäre die Umweltsituation von 1950 konstant gehalten worden, und würde sie in Zukunft konstant gehalten werden, so wäre vermutlich nur eine geringfügige Verbesserung in den nächsten 100 Jahren zu verzeichnen. Mit anderen Worten

heißt das, daß erst eine katastrophenähnliche Gefährdung den Menschen aufweckt und ihn zu Gegenmaßnahmen zwingt. Das wird auch im nächsten Simulationslauf deutlich. Hier wird eine Sprungfunktion auf das System geschaltet (sprunghafter Anstieg der Energieverbrauchswerte zu einem Zeitpunkt), so daß sich eine Verzehnfachung der Emissionswerte ergibt.

Nach der Verzehnfachung der Emissionen steigt das öffentliche Interesse sprunghaft an (vergl. Abb. 48 und 49). Es erreicht innerhalb von zwei Jahren seinen maximalen Wert. Damit ist gezeigt, daß das Modell die Reaktion der Bevölkerung auf eine Katastrophe – eine Verzehnfachung wäre in der Tat eine Katastrophe – realistisch abbildet. Das Umweltbewußtsein erreicht erst nach 18 Jahren seinen maximalen Wert. Diese Verzögerung wird hervorgerufen durch die Zeit, die die Forschung zur Durchdringung der nun aufgetretenen neuen Probleme nötig hat. Etwa nach acht Jahren sind die ersten eingreifenden Umweltschutzmaßnahmen zu verzeichnen. Von diesem Zeitpunkt an wird die Emissionsreduzierung ständig verbessert.

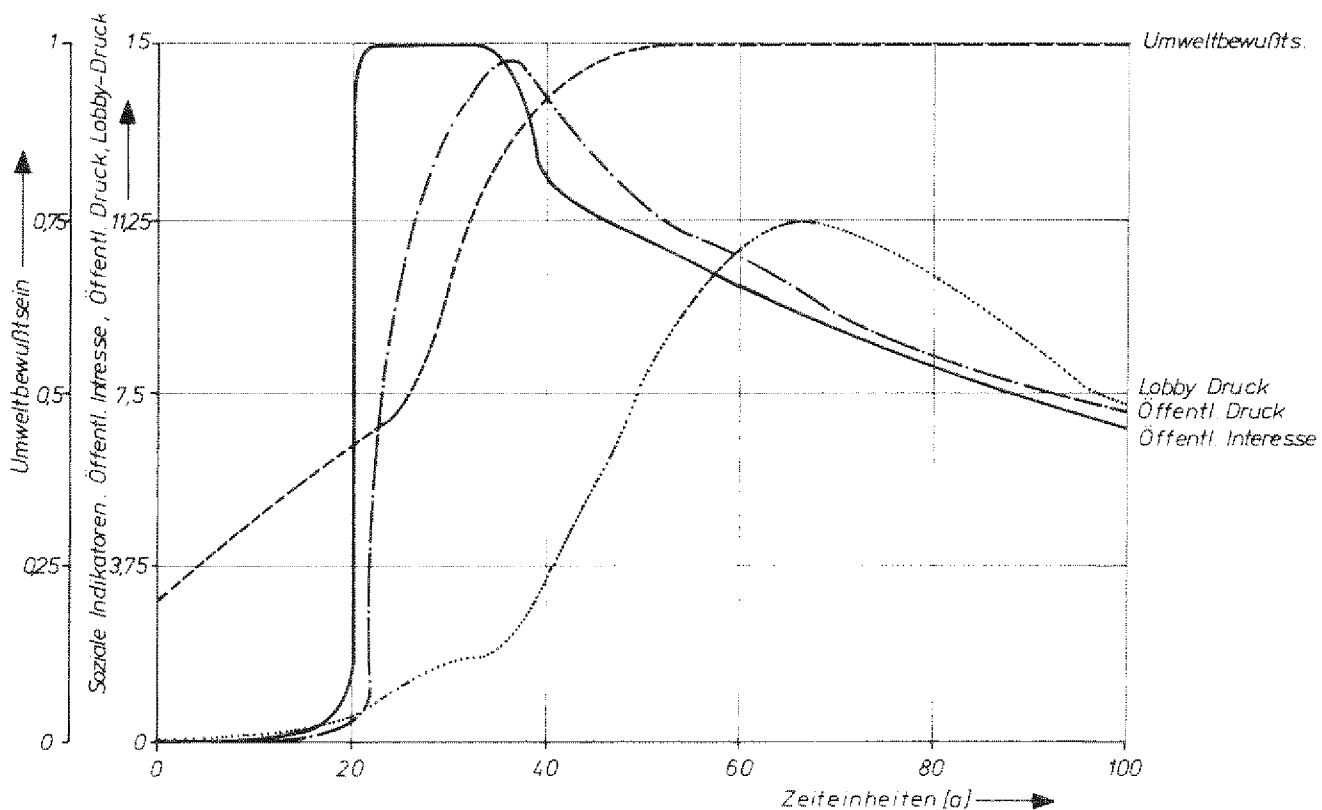


Abb. 48: Sprungverhalten des Modells – soziale Indikatoren

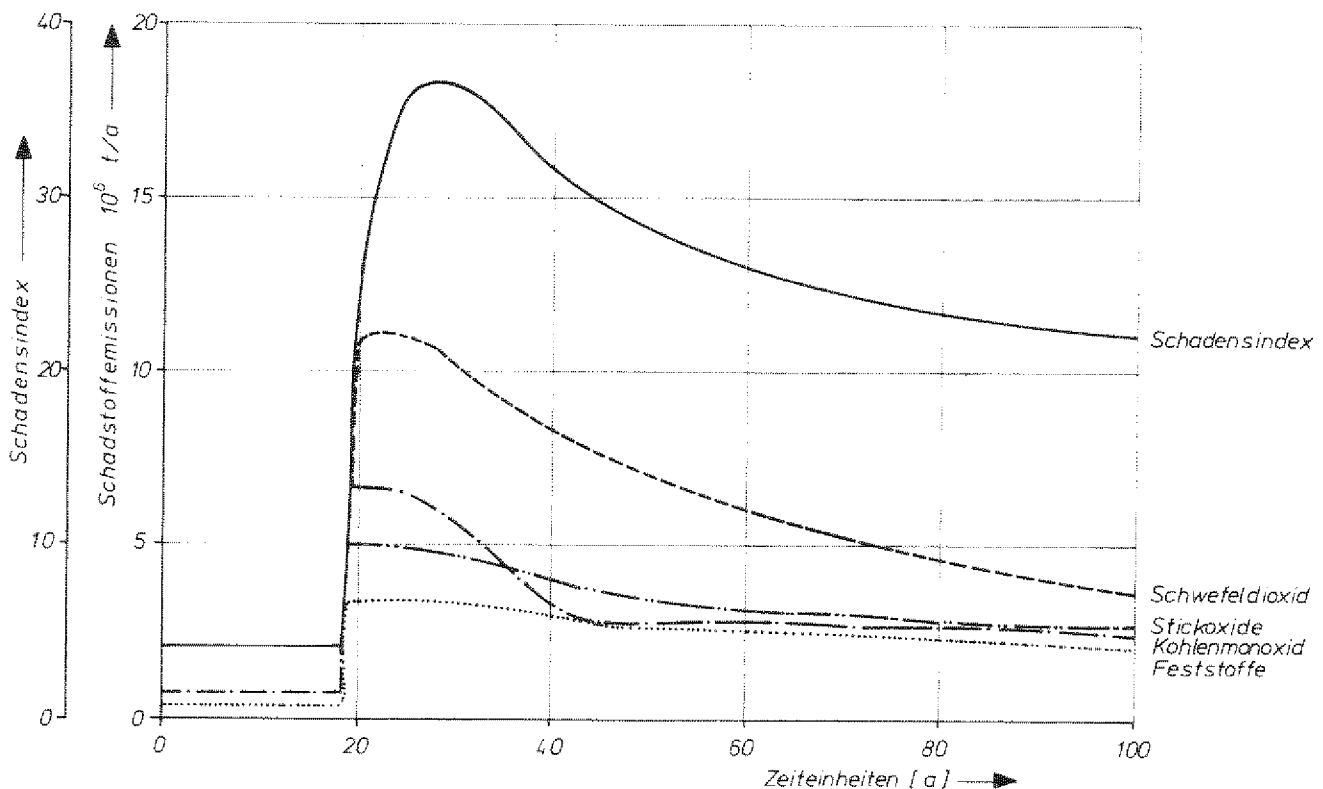


Abb. 49: Sprungverhalten des Modells - Schadstoffe

Die Emissionen des Kohlenmonoxids und des Schwefeldioxids werden besonders stark reduziert, während den Feststoffen und Kohlenwasserstoffen weniger Bedeutung beigemessen wird. Der Lobby Druck steigt ebenfalls nach acht Jahren sprunghaft an, weil der plötzliche Kostenanstieg Rentabilitätsprobleme aufwirft und damit die Wirtschaftsstabilität bedroht. Der Lobby Druck nimmt erst dann ab, wenn der Stand der Technik für Umweltschutzmaßnahmen eine Kostensenkung bewirkt. Die Emissionsreduzierung erreicht nach 60 Jahren Werte zwischen 80 % und 90 %. Höhere Reduzierungsgrade werden nur langsam erreicht. Weil die Aufwendungen zur Reduzierung der letzten 10 bis 20 % eine für die Wirtschaft kaum tragbare Belastung hervorrufen. Die "Umweltenergie" (zur Emissionsreduzierung aufgewandte Energie) würde dann so stark zunehmen, daß kaum noch Nutzenergie für den Verbraucher übrig bleiben würde. Damit ist auch zum Teil der hohe Schadensindex am Ende der Simulationszeit zu erklären. Insgesamt ist er von seinem höchsten Wert 47 auf 22 gesunken. Das bedeutet, daß der Schaden durch

atmosphärische Schadstoffbelastung nur um 50 % gesenkt worden wäre. Ein weiterer Grund für die Höhe des Schadens liegt in der wenig realistischen Annahme, daß die Verbrauchsstruktur im Sektor Haushalte und Kleinverbraucher als konstant angenommen wird. In diesem Sektor waren ja bis auf die Heizölentschwefelung keine Reduzierungsmaßnahmen vorgesehen. Würden hier etwas realistischere Annahme eingebaut, so kann man sagen, daß die Umweltbelastung nach einer Verzehnfachung in 40 Jahren wieder auf ihre Ausgangsbelastung gebracht werden kann. Dabei sind allerdings nicht irgendwelche irreversiblen Schäden berücksichtigt. Ferner muß gesagt werden, daß in dieser Ausbaustufe des Modells die Rückkopplungen aus anderen Modellbausteinen eines Gesamt-Energiemodells (vergl. Kap. 2) nicht wirksam werden konnten. Diese haben natürlich noch einen erheblichen Einfluß auf das Systemverhalten des Umweltbereiches.

7.3 Sensitivitätsanalysen

Um den Einfluß bestimmter Modellvariablen besonders der schwer quantifizierbaren nichtnumerischen Größen auf das Systemverhalten zu untersuchen, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Eine Sensitivitätsanalyse besteht in der Untersuchung der Wirkungen, die durch die Variation bestimmter Variablen hervorgerufen werden. Variablen, deren Variation eine hohe Wirkung hervorruft, muß besondere Beachtung geschenkt werden, da sie das Modellverhalten im wesentlichen steuern. Es kann sogar notwendig werden, die Variablen in mehrere Variablen zu unterteilen, um dem Kern der Beeinflussung auf die Spur zu kommen.

Als Hintergrund für die Sensitivitätsanalyse wurde der Simulationslauf des generellen Systemverhaltens mit Aufschalten eines sprunghaften Anstiegs gewählt. Diese Vorgehensweise weicht von der üblichen Modell-Sensitivitätsanalyse, in der als Hintergrund immer ein realitätsbezogener Zeithorizont gewählt wird, ab. Mit der hier gewählten Vorgehensweise sollen Spekulationen für die Zukunft im Stadium der Modellüberprüfung vermieden werden.

Nicht alle Simulationsläufe zur Sensitivitätsanalyse sollen hier besprochen werden. Beispielhaft wird im folgenden der Wirkungseinfluß des Lobby-Drucks dargestellt. In Abb. 50 ist die Änderung des Lobby-Drucks dargestellt. In einem Simulationslauf erreicht der Lobby-Druck drei-viertel seines Maximal-Wertes. In dem zweiten Simulationslauf steigt der Wert nur auf ein Zehntel seines Maximal-Wertes an.

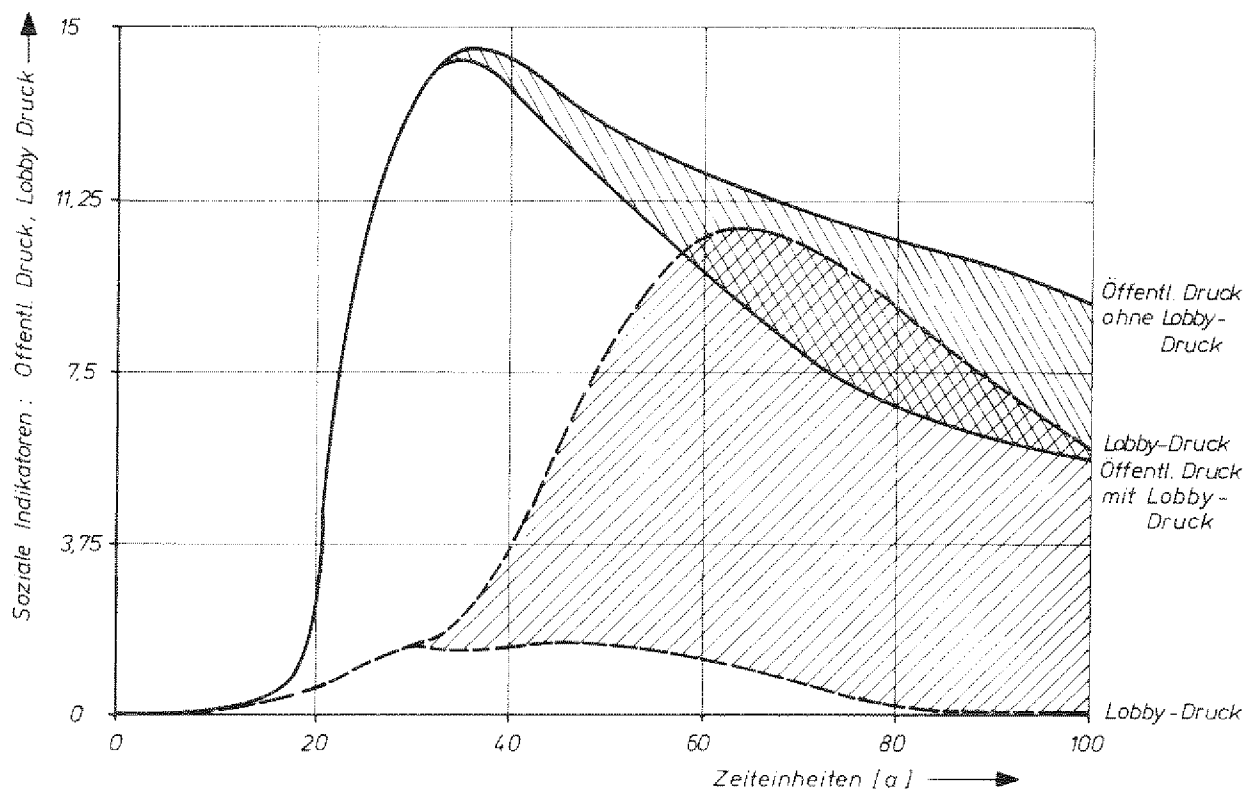


Abb. 50: Sensitivitätsanalyse - soziale Indikatoren

Die unterschiedlichen Auswirkungen dieser verschiedenen Indexwerte sind in Abb. 51 dargestellt. Zur Verdeutlichung sind nur zwei Variablen herausgegriffen worden, da bei allen anderen Variablen ähnliche Variationen auftreten. Die dargestellten Kurven sind durch Überdeckung zweier getrennter Simulationsläufe entstanden und geben die prozentuale Reduzierung der Stickoxid- und Kohlenmonoxidemissionen wieder. Bei starkem Lobby-Druck erreicht die Stickoxidreduzierung nur 50 % des Anfangswertes, während die Reduzierung bei schwachem Lobby-Druck mit 90 % fast ihren Maximalwert erreicht.

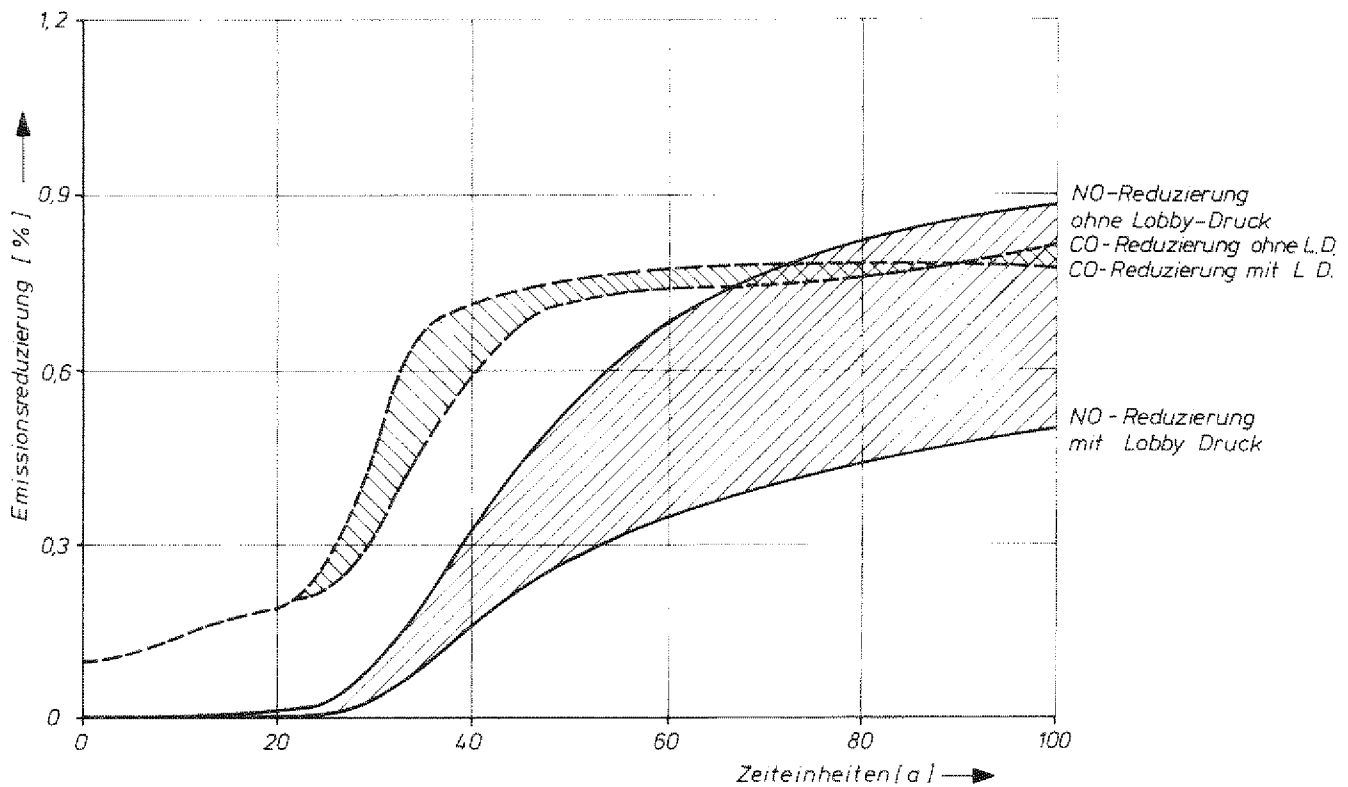


Abb. 51: Sensitivitätsanalyse - Schadstoffe

Bei der Kohlenmonoxidemission lassen sich gleiche Verhältnisse beobachten, nur daß hier die Streuung bei Variation des Lobby-Drucks nicht so stark ist. Das liegt an der wesentlich leichteren Durchführbarkeit der Reduzierung von CO-Emissionen, besonders beim Verbrennungsmotor. Das Modell wies wie in diesem Sensitivitätslauf bei allen anderen Sensitivitätsuntersuchungen keine überproportionale Sensitivität auf. Die untersuchten Systemvariablen entsprechen in ihrer Variation dem zu erwartenden Regelverhalten des Systems.

8. SIMULATIONS-LÄUFE

Mit Durchführung der Simulationsläufe tritt diese Untersuchung in die letzte Phase einer systemanalytischen Untersuchung ein. Diese Phase kann als Experimentierphase bezeichnet werden, d.h. mit Hilfe des ausgetesteten Modells können nun Pseudo-Experimente durchgeführt werden, wobei als Experiment das "Durchspielen" verschiedener alternativer Energieversorgungsstrategien angesehen werden kann. So ein "Durchspielen" alternativer Strategien ist mit realen sozialen Systemen nicht möglich. In dieser Modelluntersuchung wird es aber nun möglich, die ökologischen Auswirkungen möglicher Energietechnologien zu erkennen und abzuschätzen. Es muß einem aber immer bewußt sein, daß trotz größtmöglicher Realitätsnähe des Modells aus den Simulationsergebnissen keine exakte Prognose abgeleitet werden kann; dazu ist die Unwägbarkeit sozialen Verhaltens zu groß. Im folgenden werden also einige mögliche Alternativen der Energieversorgung mit Hilfe des Modells simuliert und deren Auswirkungen auf die atmosphärische Schadstoffbelastung untersucht.

8.1 Die Simulation verschiedener Strukturen der Primärenergieversorgung

Die Versorgungsstruktur in der Bundesrepublik Deutschland hängt im wesentlichen von zwei Faktoren ab. Einmal von der Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe, zum anderen von der Entwicklungsgeschwindigkeit der Kernenergie. Beide Faktoren sollen im folgenden kurz erläutert werden.

8.1.1 Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe in der BRD

Die Braunkohle ist heute mit 9 % am gesamten Primärenergieangebot in der Bundesrepublik Deutschland beteiligt. Sie bestreitet rund 19 % der gesamten Primärenergiegewinnung /93/. Mit 85 % der gesamten Braunkohlenförderung (1973 rd. 120 Mio t) werden ungefähr 75 Mrd kWh Strom erzeugt. Bis zum Jahre 1980 wird eine Förderung von 130 Mio t Braunkohle und eine

Stromerzeugung auf Braunkohlenbasis von rd. 100 Mrd kWh angestrebt. In den Braunkohlelagerstätten, die hauptsächlich im Rheinland zu finden sind, wurden die abbaubaren Braunkohlevorkommen auf rd. 62 Mrd t bzw. 18,6 Mrd t SKE geschätzt. Unter Zugrundelegen einer Förderung von 130 Mio t pro Jahr wären damit die Braunkohlevorkommen für mehrere Jahrhunderte ausreichend.

Für die Steinkohle gelten ähnliche Verhältnisse. Die inländischen Steinkohlevorkommen belaufen sich auf rd. 44 Mrd t (bis zu einer Abbautiefe von 1500 m NN) bzw. 230 Mrd t (bis zu einer Abbautiefe von 2000 m NN); damit ist die Energieversorgung mit Steinkohle auf Jahrhunderte gesichert /94/. Die Steinkohle geht im wesentlichen in die Stahlerzeugung (rd. 40 %) und die Elektrizitätswirtschaft (rd. 35 %). Der verbleibende Steinkohlenverbrauch entfällt auf den Hausbrand, den Verkehr und die übrige Industrie. Bis 1980 sollen in der Bundesrepublik 10 neue Steinkohlenkraftwerke mit einer Leistung von insgesamt 6000 bis 7000 MW gebaut werden.

Bei den Rohöl-Reserven ergibt sich ein völlig anderes Bild. Die Endlichkeit der nachgewiesenen Reserven wird nach dem heutigen Prospektionsstand mit 40 bis 50 Jahren angegeben.

Unsicherheit in die Verfügbarkeit bringt die Importabhängigkeit der westeuropäischen Industrienationen und Japans von den rohölfördernden Ländern. Welche Schwierigkeiten daraus erwachsen können, ist während der letzten Nah-Ost-Krise ganz deutlich geworden. Die eigenen Rohölreserven liefern keinen wesentlichen Beitrag zur Deckung des Rohölbedarfs. Auch wenn sich die bisher nachgewiesenen Reserven noch erhöhen, muß mit einer Erschöpfung Anfang des nächsten Jahrhunderts gerechnet werden.

Für die Erdgasversorgung muß mit den gleichen Problemen gerechnet werden. Zur Zeit kann sich die Bundesrepublik zu etwa 37 % aus eigenen Quellen, zu 50 % aus den Niederlanden und zu 13 % aus der Sowjet-Union versorgen. In Zukunft besteht die Möglichkeit, verflüssigtes Erdgas aus Afrika und Ländern des Nahen Ostens zu beziehen. Diese Lieferungen können wegen der hohen Kosten nur zur Deckung des Spitzenbedarfs verwandt werden. Auch beim Erdgas liegt das Verhältnis von nachgewiesenen Reserven zu Verbrauch

bei etwa 35 Jahren. Damit kann nur die Braun- bzw. Steinkohle in der Übergangsphase von konventioneller Energieerzeugung zu nuklearer Energieerzeugung eine sichere Energieversorgung gewährleisten. Da man ferner heute schon die Umwandlung fester fossiler Rohstoffe mit Wärme aus Hochtemperatur-Kernreaktoren absehen kann, scheint die Subvention von Kohle und die verstärkte Förderung des Einsatzes von Steinkohle in bereits bestehenden Steinkohlenkraftwerken der richtige Weg zu sein /95/. Wie lange die Übergangsphase mit ihren zahlreichen ungelösten Problemen dauern wird, hängt von der Entwicklung der Kernenergie ab. Im folgenden wird daher kurz untersucht, welchen Beitrag die Kernenergie zur Energieversorgung leisten kann.

8.1.2 Aussichten der Kernenergie in der Energiewirtschaft der Bundesrepublik Deutschland

Das Energieprogramm und Atomprogramm der Bundesrepublik Deutschland sieht den forcierten Ausbau der Kernkraftwerkskapazität vor und betont die Notwendigkeit, zur Schließung des Brennstoffkreislaufes und zur Entwicklung fortgeschrittener Reaktorsysteme weitere intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchzuführen /96/.

Von den drei heute als erfolgreich und aussichtsreich angesehenen Reaktorlinien

- den Leichtwasserreaktoren (LWR)
- den Hochtemperaturreaktoren (HTR)
- den schnellen Brutreaktoren (SBR)

haben die Leichtwasserreaktoren ihre technische Zuverlässigkeit und ihre Wirtschaftlichkeit bewiesen. Bis heute sind in der Bundesrepublik Kernkraftwerke mit 2400 MW_e in Betrieb genommen worden, weitere rund. 7000 MW_e sind in Bau /97/. In Tabelle 12 sind die LWR-Kernkraftwerke der Bundesrepublik zusammengestellt. Das Energieprogramm der Bundesregierung sieht als Mindestziel bis zum Jahre 1980 die Inbetriebnahme von Kernkraftwerken mit 18000 MW_e und bis 1985 mit 40000-50000 MW_e vor. Zur Erreichung dieses

Auftrag im Jahr	Betriebs- beginn	Bezeichnung, Standort	Eigentümer, Betreiber	Typ	Hersteller	Leistung (MWe)
1958	1961	VAK Kahl	VAK	SWR	AEG, GE	15
1962	1966	KRB Gundremmingen	KRB	SWR	AEG, GE	237
1964	1968	KWL Lingen	KWL (VEW)	SWR	AEG (KWU)	255
1964	1968	KWO Obrigheim	KWO	DWR	Siemens (KWU)	328
1967	1972	KKW Würgassen	Preussenelektra	SWR	AEG (KWU)	640
1967	1972	KKS Stade	KKS (NMK, HEW)	DWR	Siemens (KWU)	630
1969	1974	Biblis A	RWE	DWR	Siemens (KWU)	1.145
1969	1974	Brunsbüttelkoog	KKB (HEW, NMK)	SWR	AEG (KWU)	770
1970	1975	Philippsburg 1	KKP (BAG, EVS)	SWR	AEG (KWU)	864
1971	1975	GKN Neckarwestheim	Neckarwerke, Bundesbahn	DWR	Siemens (KWU)	775
1971	1977	Philippsburg 2	KKP	SWR	AEG (KWU)	864
1971	1976/77	KKI Ohu	Bayernwerk, Isar-Amper-Werke	SWR	AEG (KWU)	860
1971	1976	KKU Esenshamm	Preussenelektra, NMK	DWR	Siemens (KWU)	1.230
1971	1976	Biblis	RWE	DWR	Siemens (KWU)	1.230
1972	1976	Krömmel	HEW, NMK	SWR	AEG (KWU)	1.260
1972	1978	Mülheim-Kärlich	RWE	DWR	BBR	1.154
1973	1979	KWS-Whyll	KWS (BAG/EVS)	DWR	KWU	1.280

VAK - Versuchatomkraftwerk Kahl GmbH	RWE - Rheinisch Westf. Elektrizitätswerk AG
KRB - Kernkraftwerk RWE-Bayernwerk GmbH	VEW - Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG
KWL - Kernkraftwerk Lingen GmbH	NMK - Nordwestdeutsche Kraftwerke AG
KWO - Kernkraftwerk Obrigheim GmbH	HEW - Hamburgische Electricitätswerke AG
KKS - Kernkraftwerk Stade GmbH	BAG - Badenwerke AG
KKB - Kernkraftwerk Brunsbüttel GmbH	EVS - Energie-Versorgung Schwaben AG
KKP - Kernkraftwerk Philippsburg GmbH	TWS - Technische Werke Stuttgart AG
KKI - Kernkraftwerk Isar GmbH	
KKU - Kernkraftwerk Unterweser GmbH	SWR - Siedewasser-Reaktor
KWS - Kernkraftwerk Süd GmbH	DWR - Druckwasser-Reaktor

Tab. 12: LWR-Kernkraftwerke in der Bundesrepublik

Zieles müßten schon 1977 25 Blöcke der 1200 MW-Klasse in Angriff genommen werden. Bei den Leichtwasserreaktoren wird sich eine Weiterentwicklung hauptsächlich auf die Verbesserung ihrer Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit konzentrieren. Für eine Verbesserung der LWR-Brennelemente sind noch eine Reihe von Entwicklungsarbeiten notwendig, dies gilt besonders in bezug auf ein zuverlässiges Lastwechselverhalten, damit die LWR-Kraftwerke bei zunehmendem Anteil an der Elektrizitätserzeugung nicht nur im Grundlastbetrieb eingesetzt werden können. Bis 1976 sind für die Weiterentwicklung der Reaktoren und der Brennelemente 96 Mio DM vorgesehen /96/.

Der Weiterentwicklung der fortgeschrittenen Reaktorlinie des Hochtemperatur-Reaktors wird in der Bundesrepublik starke Bedeutung beigemessen. Diese Reaktorlinie zeichnet sich wegen der höheren Kühlmitteltemperaturen durch günstigere Wirkungsgrade und damit geringere Verlustwärmen aus; weitere Vorteile ergeben sich aus der Möglichkeit, auch Thorium als Brennstoff zu benutzen und das Uran besser auszunutzen. Da auch ein Einsatz als Prozeßwärmeerzeuger auf wesentlich höherem Temperaturniveau möglich wird, eröffnet sich ein zusätzliches wirtschaftliches und technisches Potential. Nach Fertigstellung und ersten Betriebserfahrungen eines 300 MW_e Prototyp-Kernkraftwerks mit einem Hochtemperaturreaktor vom Kugelhaufentyp (THTR 300) im Jahre 1977 kann mit der Entwicklung größerer HTR-Kraftwerke gerechnet werden. Insgesamt sind für das HTR-Forschungsprogramm bis zum Jahre 1976 717 Mio DM geplant; dassind ca. 8 mal soviel Forschungsmittel wie für die LWR-Linie im gleichen Zeitraum.

Mio DM	1973	1974	1975	1976	1973-76
SNR 300	130	162	197	237	725
KNK II Bau Betrieb, Versuche	12 8	8 6	14 23	4 29	38 66
SNR 2 Studie mit Projektierung	1	5	11	10	27
Demonstrationskraftwerke	-	-	-	3	3
GfK (ohne Versuchsanlagen)	80	79	72	64	295
KFA	1	1	1	1	4
Summe	232	261	318	348	1.159

Tab. 13: Forschungsprogramm für SBR-Linie

Die Forderung nach einer schnellen Entwicklung von schnellen Brutreaktoren (SBR), der zweiten fortgeschrittenen Reaktorlinie, findet ihre Begründung in der Erwartung, daß die Kosten und Preise für Natururan gegen Ende des Jahrhunderts ansteigen werden. Mit Schnellen Brutreaktoren kann

während des normalen Leistungsbetriebes aus Natururan oder aus abgereichertem Uran, das bei der Herstellung von LWR-Brennstoff als Abfall in großen Mengen anfällt, Plutonium-Brennstoff hergestellt werden. Da die Plutoniummengen weit über dem Eigenverbrauch des SBR selbst liegen, kann damit den hohen Urankosten begegnet werden.

Bis 1979 soll ein 280 MW_e-Prototyp-Kraftwerk mit einem natriumgekühlten Schnellbrutreaktor (SNR 300) fertiggestellt werden. Die Ergebnisse aus den Betriebserfahrungen mit diesem Reaktortyp werden die Weiterentwicklung der SBR-Linie bestimmen. Die geplanten staatlichen Aufwendungen für das Forschungsprogramm sind in Tab. 13 zusammengestellt.

Die Aufwendungen für die Entwicklung der SBR-Linie erreichen den höchsten Umfang, im ganzen 11 mal soviel wie für die SWR-Linie.

8.1.3 Die Simulation verschiedener Entwicklungsverläufe der Kernenergie

In diesem Kapitel sollen die möglichen Auswirkungen verschiedener Entwicklungsverläufe der Kernenergie auf die Luftverschmutzung in der Bundesrepublik Deutschland untersucht werden. Der Verbrauch fossiler Energieträger wird unmittelbar vom möglichen Einsatzpotential nuklearer Energie und der Entwicklung des Energiebedarfs beeinflusst. Heute wird ein schnelles Ansteigen des Kernenergieanteils vorhergesagt /4, 98, 99, 100/.

Zur Simulation werden die Energieverbrauchsstrukturen, die in einem dynamischen Simulationsmodell der Energiewirtschaft der Bundesrepublik ermittelt wurden, zu Grunde gelegt /101/. Die einzelnen Verbrauchsmengen und deren Entwicklung bis zum Jahre 2000 gehen aus Abb. 52 hervor. Bis zum Jahre 2000 erreicht die Kernenergie einen Deckungsanteil von 43 %. Die in diesem Simulationsergebnis aufgezeigten Entwicklungen decken sich weitgehend mit den oben genannten Prognosen und können als sehr wahrscheinlich angenommen werden, so daß dieser Simulationsverlauf als Standard- bzw. Referenzlauf angesehen werden kann. Es sollen aber, um mögliche Spitzen in der Umweltbelastung zu erkennen, Verzögerungen in der Reaktorentwicklung simuliert werden. In den durch Verzögerungen her-

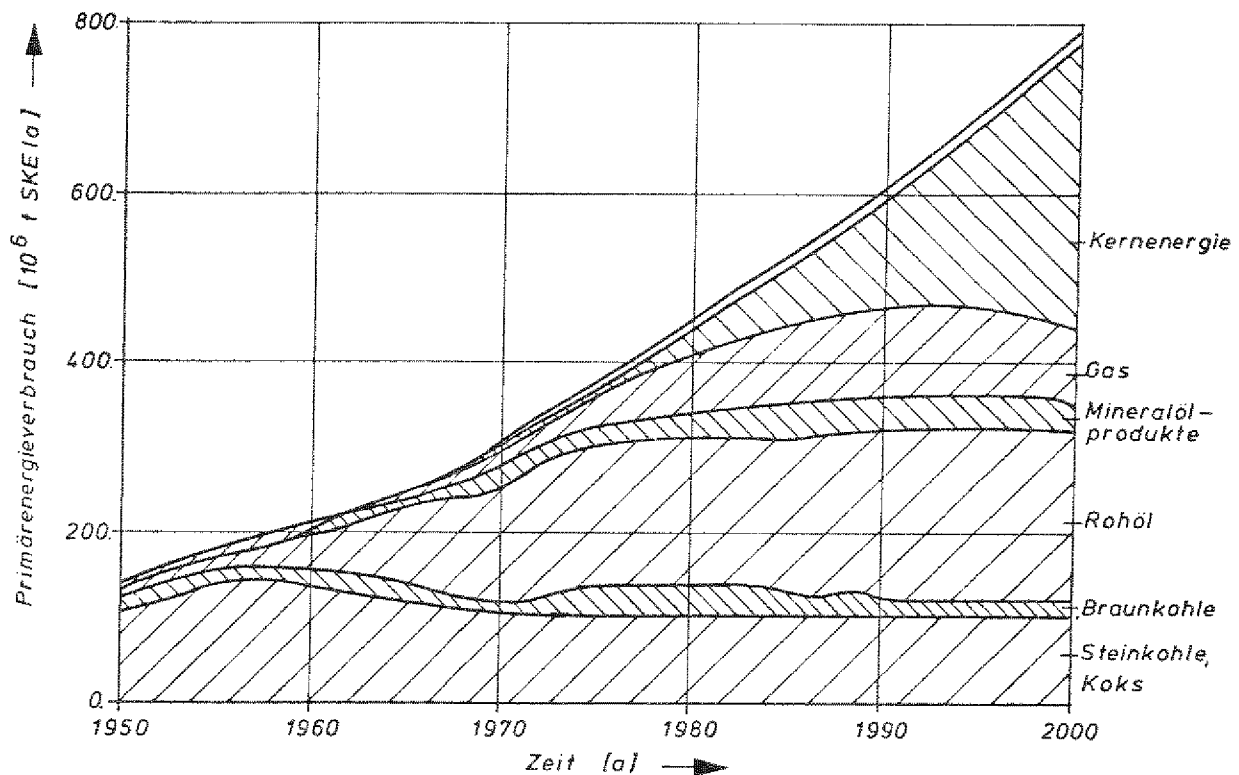


Abb. 52: Die Energiedeckungsstruktur des Standard-Simulationslaufes
Scenario I /101/

vorgerufenen Übergangsperioden muß angesichts der Importabhängigkeit der deutschen Mineralölversorgung (97 %), insbesondere von Lieferländern im nahen Osten, aber auch der drohenden Erschöpfung der Weltvorräte an Erdgas und Erdöl mit einem verstärkten Einsatz der heimischen Steinkohle gerechnet werden. Der verstärkte Einsatz von Steinkohle bedingt natürlich einen weiteren Anstieg der Umweltbelastung. Es erscheint daher sinnvoll, verschiedene Entwicklungsscenarios zu simulieren und den Verlauf der einzelnen Systemvariablen zu untersuchen.

Die verschiedenen Energiedeckungsstrukturen bei Variation der Reaktorentwicklung werden in dem BRD-Energiemodell ermittelt. Als erstes Entwicklungsszenario wird die Standardentwicklung gewählt und kann mit "Schneller Reaktorentwicklung" bezeichnet werden. Die Energiestrukturen der mittleren (Scenario II) und langsamen (Scenario III) Reaktorentwicklung gehen aus Abb. 53 und 54 hervor. Im Scenario I setzt das das verstärkte Kernenergie-

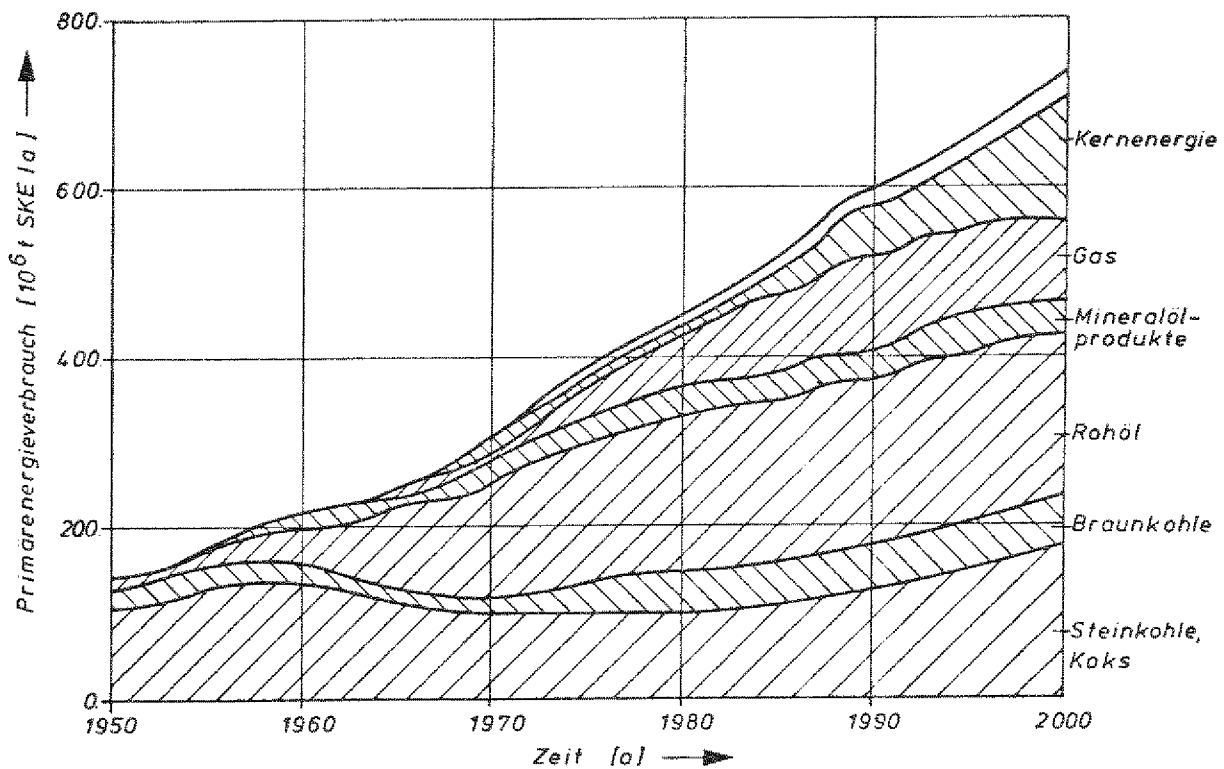


Abb. 53: Die Energiedeckungsstruktur bei mittlerer Reaktorentwicklung, Scenario II /101/

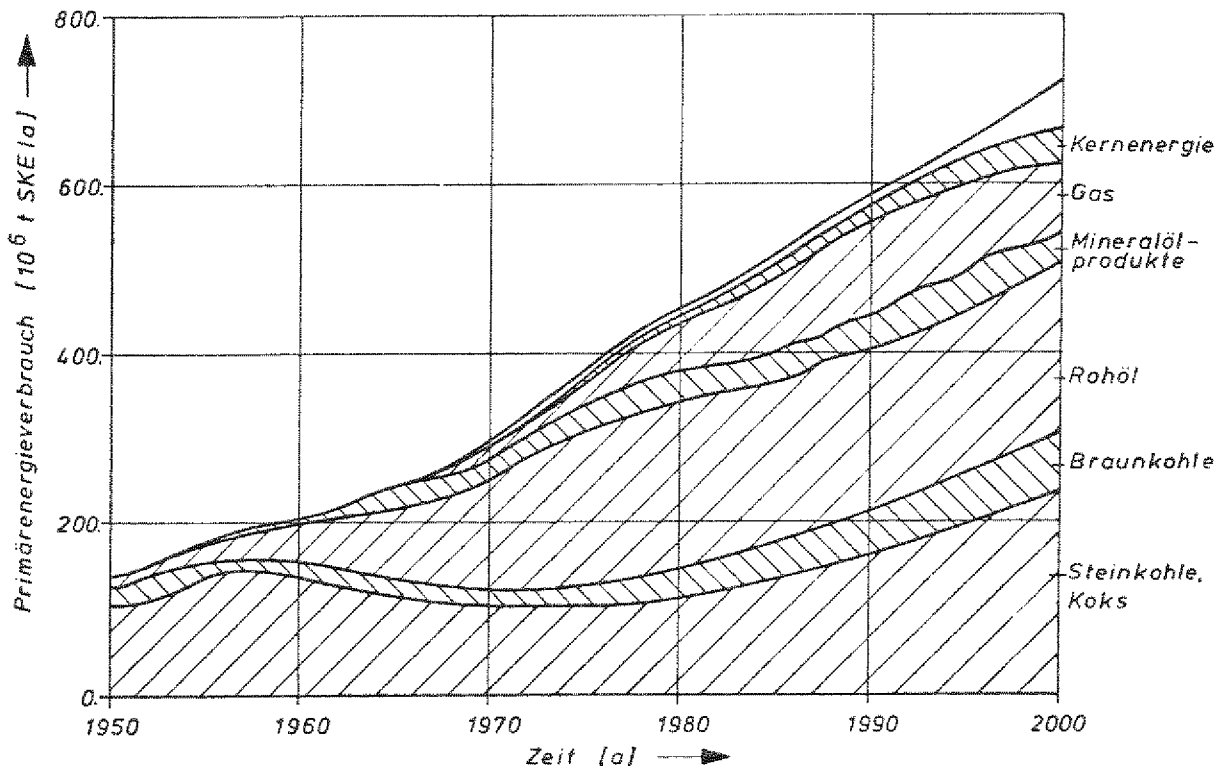


Abb. 54: Die Energiedeckungsstruktur bei langsamer Reaktorentwicklung, Scenario III /nach 101/

angebot im Jahre 1975 ein; dagegen beginnt im Szenario II der Kernenergieanteil erst im Jahre 1980 stärker anzusteigen und erreicht im Jahre 2000 nur 20 % der Gesamtprimärenergie.

Im Szenario III kommt die Kernenergie erst in den 90-iger Jahren zum Einsatz und hat im Jahre 2000 erst einen Anteil von 6 % erreicht (vergl. Abb. 54).

Als erstes seien die Schadstoffverläufe des Standard-Simulationslaufes untersucht.

8.1.3.1 Standardlauf: Simulation einer schnellen Reaktorentwicklung

Die Rechnungen beginnen im Jahre 1950 (vergl. Abb. 55). Die Betrachtung eines früheren Zeitraumes erschien nicht sinnvoll, da bis zum Jahre 1950 die Umweltproblematik nur in Einzelfällen auftrat aber nicht als Gesamtproblematik bewußt geworden war. Als Zeithorizont wurde das Jahr 2000 ge-

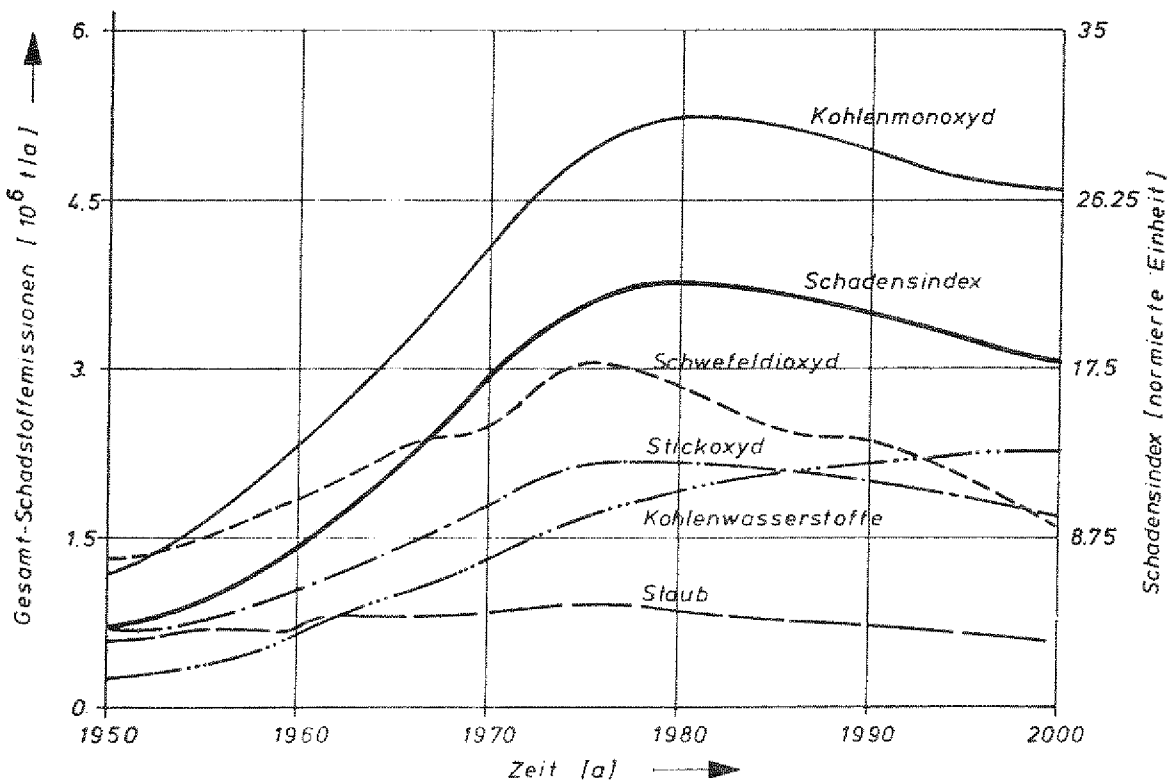


Abb. 55: Standard-Simulationslauf Szenario I - Schadstoffe

wählt. Die in dem zu untersuchenden Zeitraum errechneten Werte sollen nicht als Prognosewerte betrachtet werden. Mit der Modelluntersuchung ist es aber möglich, Trends, Wendepunkte und Extremstellen im Verhalten eines Systems aufzudecken, kurz: die Dynamik des Umweltsystems zu verstehen. Ferner können Auswirkungen verschiedener Entwicklungen und Strategien aufgezeigt werden. Entsprechend diesen Möglichkeiten der Simulationsmethode sollen die folgenden Untersuchungen verstanden werden.

Abb. 55 macht deutlich, daß um das Jahr 1980 mit dem Maximum der atmosphärischen Schadstoffbelastung gerechnet werden muß. Der Schadensindex hat dann den fünffachen Wert seines Anfangswertes erreicht und der Zustand der Luftverschmutzung des Jahres 1974 verschlechtert sich bis 1980 noch einmal um 8 %. Die jährlichen Schadstoffmengen der einzelnen Schadstoffe steigen bis in den Zeitraum von 1975 bis 1980. Erst dann werden die durch die steigenden Brennstoffverbräuche hervorgerufenen Emissionssteigerungen durch die langsam wirksam werdenden Reinhaltungsmaßnahmen kompensiert. Nur die Emissionen von Schwefeldioxid steigen lediglich bis 1975; ein potentieller Anstieg wird durch die Installierung von Rauchgasentschwefelungsanlagen in fast allen großen Verbrennungseinrichtungen verhindert. Auch die Staubemission kann schon ab dem Jahre 1976 reduziert werden.

Entsprechend der Kernenergiezunahme ab 1975 ist ein starker Zuwachs der gesamten radioaktiven Emissionen zu verzeichnen. Dieser starke Zuwachs wird allerdings in der Hauptsache durch die Installierung von Wiederaufbereitungsanlagen in der Bundesrepublik verursacht. Dies geht schon aus den in Tab. 11 zusammengestellten Freisetzungsraten radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre hervor. Demnach liegen die Raten für eine Wiederaufbereitungsanlage (33 GW_{el}) für Krypton-85 und Tritium um den Faktor 1000 über den Raten eines Kernkraftwerkes.

Für Krypton-85 wurden beispielhaft nähere Rechnungen durchgeführt. Unter der Annahme, daß der gegenwärtige Stand der Rückhaltetechnik nicht verbessert wird, würde die Krypton-Konzentration Anfang der 90-iger Jahre die zulässige Konzentration von Krypton in Luft von $1 \cdot 10^{-6} \text{ Ci/m}^3$

überschreiten /102/. Geht man dagegen davon aus, daß in Wiederaufarbeitungsanlagen eine Rückhaltung von 99 % mit kontrollierter Endbeseitigung möglich wird, dann ergibt sich der in Abb. 56 dargestellte Verlauf von Radioaktivität und Dosisleistung. Dann bleibt die Dosisleistung weit unter der natürlichen und künstlichen (ohne Nutzung der Kernenergie) von ca. 160 mrem/a /103/.

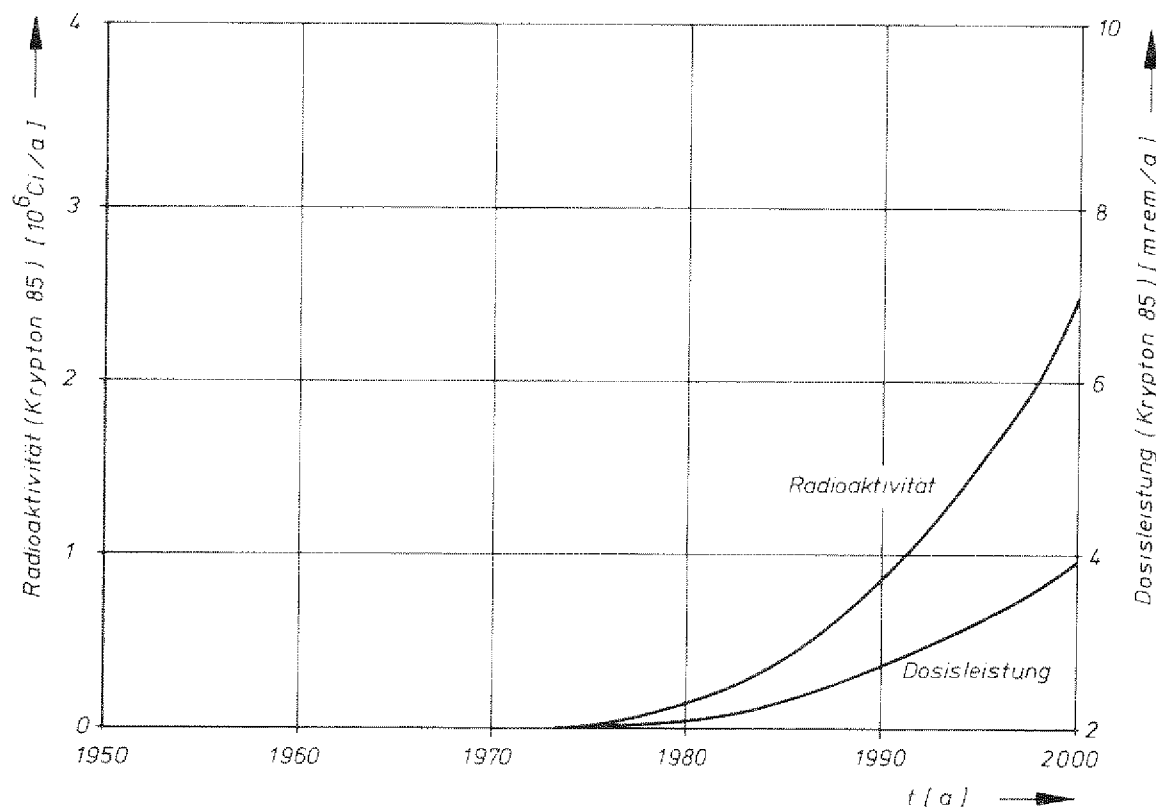


Abb. 56: Radioaktivität und Dosisleistung von Krypton-85 im Standardlauf mit 99 %-iger Rückhaltung in Wiederaufarbeitungsanlagen

Da die Emissionswerte noch keinen direkten Schluß auf die Umweltbelastung zulassen (wegen der Unmöglichkeit globaler Emission-Immission-Relationen) muß der Verlauf der sektoralen Schadensindizes untersucht werden. Der Schaden, verursacht durch den Sektor Haushalte und Kleinverbraucher, verdreifacht sich bis zum Jahre 1978, kann aber ab 1984 wieder reduziert werden. Der Sektor öffentl. und Industrie Kraftwerke erhöht seinen Schadensanteil an der Luftverschmutzung auf das fünffache seines An-

fangswerks von 1950. Den höchsten Beitrag zum Zuwachs der Luftverschmutzung leistet jedoch der Sektor Verkehr. Mit einer 10-fachen Steigerung des Schadensindex Verkehr bis zum Jahre 1980 ist im Verkehrssektor zu rechnen. In den Jahren 1965 bis 1967 ist ein Wendepunkt im Verlauf der sektoralen Schadensindizes festzustellen, d.h. der Anstieg beginnt abzuflachen. Bevor aus der Analyse der Schadstoffmengen-Verläufe Folgerungen abgeleitet werden, sollen noch kurz weitere Verläufe von Systemvariablen untersucht werden.

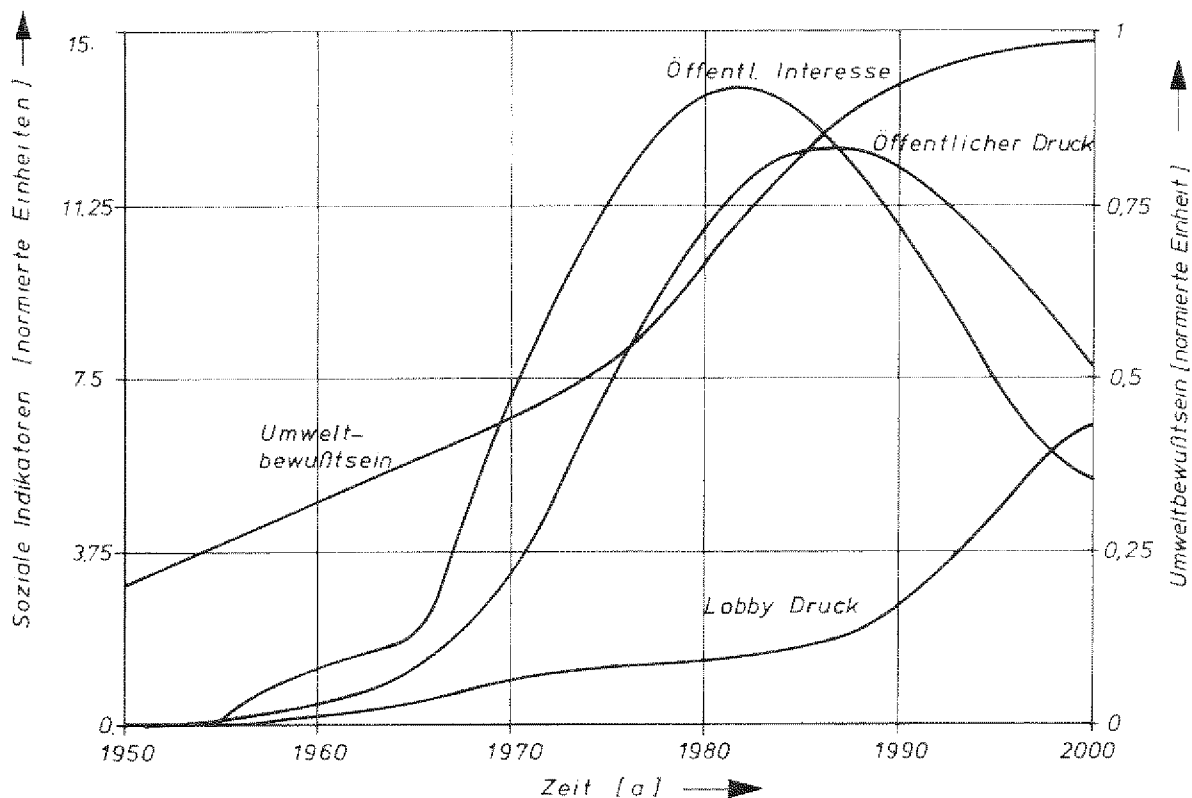


Abb. 57: Standard-Simulationslauf Scenario I - soziale Indikatoren

Abb. 57 zeigt die Änderung des Umweltbewußtseins der Bevölkerung, des Lobby-Drucks und des öffentlichen Drucks im betrachteten Zeitraum. Diese Ergebnisse stammen aus dem gleichen Simulationslauf, sind nur wegen der Überschaubarkeit in einem getrennten Plotterbild dargestellt.

Der öffentliche Druck zur Einleitung von Umweltschutzmaßnahmen erreicht 1984 seinen Höhepunkt. Mit Absinken des Umweltschadens geht auch der öffentliche Druck zurück. Das Umweltbewußtsein der Bevölkerung wird ab

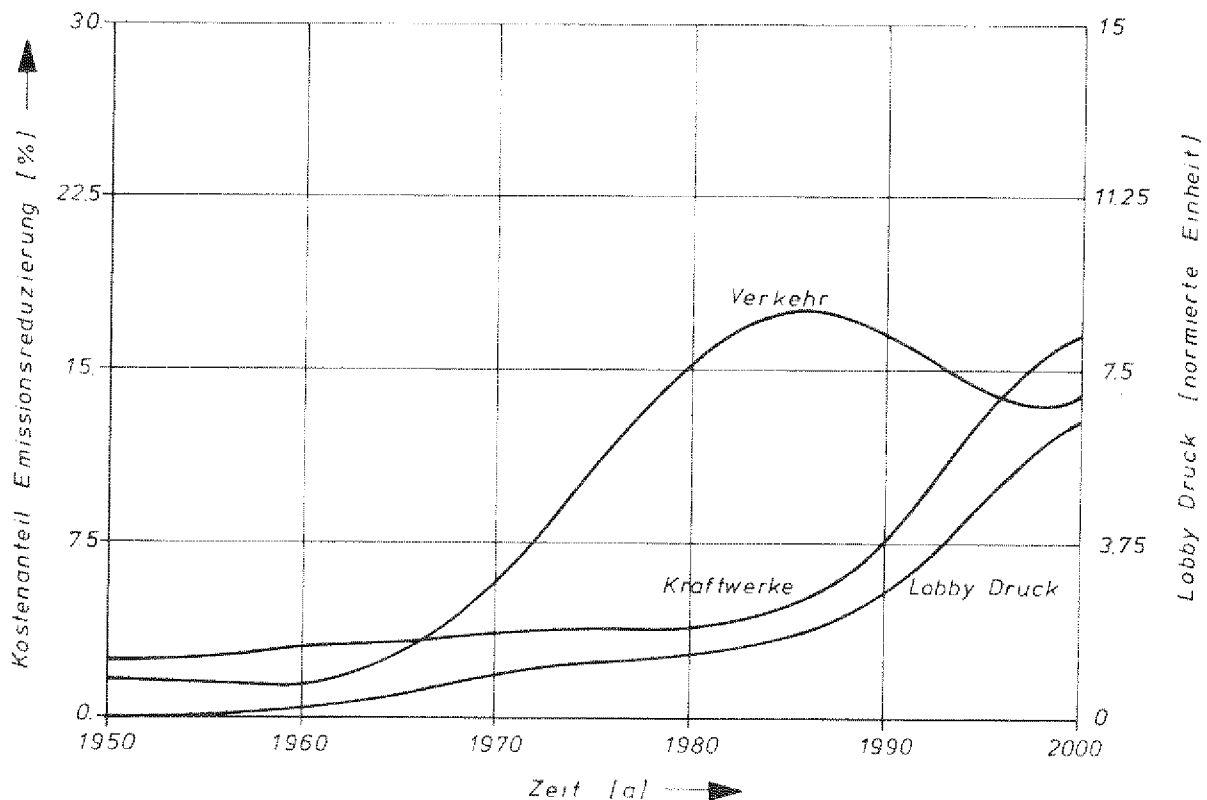


Abb. 58: Standard-Simulationslauf Scenario I - Kosten

1996 mit seinem Maximalwert wirksam. Das bedeutet, daß ab 1996 effektiv in der Umwelt vorhandene Schäden auch als solche wahrgenommen werden. Der Lobby-Druck beginnt ab 1980 stärker wirksam zu werden. Vergleicht man diesen Anstieg mit dem Anstieg der prozentualen Emissionsreduzierung (nicht alle Variablen können hier in Plotterbildern dargestellt werden), dann findet man einen direkten Zusammenhang: je höher die Reduzierungsstandards, um so höher der Lobby-Druck.

Zwei weitere Systemvariablen, deren dynamische Entwicklung betrachtet werden soll, sind die durch die Installierung von Umweltschutzmaßnahmen entstehenden Kosten. Wie aus Abb. 68 zu ersehen, steigen diese Kosten - sie sind unterteilt nach Maßnahmen beim Kraftfahrzeug und bei öffentlichen und Industriekraftwerken - in den 70-er und 80-er Jahren rapide an. Das Maximum im Verlauf der Reduzierungskosten beim Kraftfahrzeug Mitte der 80-er Jahre wird durch den zu diesem Zeitpunkt noch niedrigen Level "Stand der Technik" bewirkt. Die Kosten zur Erreichung eines

Reduzierungsstandards sind bei niedrigem Stand der Technik natürlich höher, als bei ausgereiften lang erprobten Anlagen zur Luftreinhaltung.

Bis zum Jahre 1985 muß man in der BRD ungefähr mit einer Zunahme von 16 bis 17 % der Kilometerkosten für Emissionsreduzierungsmaßnahmen rechnen. Unter Kilometerkosten werden hier die auf den gefahrenen Kilometer umgelegten Anschaffungs- und Betriebskosten verstanden. Bis zum Jahre 2000 ist dieser Kostenanteil wieder bis auf 14 % gestiegen. Für öffentliche und Industriekraftwerke wird sich bei Beibehaltung fossiler Brennstoffeuerung und Einhaltung der Reduzierungsstandards eine Kostensteigerung von ca. 7 % bis zum Jahre 1990 ergeben, bis zum Jahre 2000 erreicht diese Kostensteigerung ungefähr 16 %.

Aus der Analyse des Standard-Simulationslaufes lassen sich nun folgende zusammenfassende Schlußfolgerungen ziehen:

1. Die Luftverschmutzung durch Energieerzeugung wird in den 80-er Jahren ihren Höhepunkt erreichen.
2. Trotz stark zunehmender Aufwendungen für den Umweltschutz wird bis zum Jahre 2000 der Ausgangszustand von 1950 nicht wieder erreicht. Die Luftverschmutzung des Jahres 2000 erreicht höchstens wieder den Zustand von 1970.
3. Geht man davon aus, daß der Luftverschmutzungszustand des Jahres 1974 gerade noch erträglich ist (obwohl in vielen Regionen die Grenze der Verträglichkeit weit überschritten wird), so kann der Zeitraum zwischen 1975 bis 1985 als umweltkritisches Jahrzehnt bezeichnet werden. Der Luftverschmutzungszustand von 1974 wird wieder um 1990 erreicht.
4. Diese Umweltschutzmaßnahmen werden bis zum Ende dieses Jahrhunderts einen ungefähr 15 %-igen Anteil an den Gesamtkosten verschlingen.

8.1.3.2 Szenario-Läufe: Auswirkung von Verzögerungen in der Reaktorentwicklung

Im Standard-Simulationslauf wurde eine Entwicklung der Kernenergie ohne Verzögerung angenommen. Diese Annahme ist heute in fast allen Energieprognosen zu finden. Es erscheint aber doch sehr sinnvoll, zu untersuchen, welche ökologischen Konsequenzen sich aus einer Verzögerung in der Reaktorentwicklung ergeben können. Ferner ist die Beantwortung von Fragen wie folgende wichtig: Welche Höhe erreicht die Schwefeldioxidmenge bei verzögertem Kernenergieansatz? Können Umweltschutzmaßnahmen die aufgrund von erhöhtem fossilen Brennstoffverbrauch verursachte Luftverschmutzung auffangen? Zur Simulation der Verzögerung der Reaktorentwicklung werden die in Szenario II und Szenario III angenommenen Deckungsstrukturen eingegeben. Der Endenergiebedarf wird ebenfalls in dem BRD-Energiemodell bestimmt. Es wird angenommen, daß der zunehmende Bedarf an Steinkohle gedeckt werden kann und keine Verknappungskrise eintritt. In dem zunehmenden Einsatz von Steinkohle ist zunächst noch nicht die Möglichkeit der Kohlehydrierung und Kohlevergasung berücksichtigt; es wird davon ausgegangen, daß die Kohle in Feuerungseinrichtungen verbrannt wird.

Die Auswirkungen sollen an zwei Schadstoffverläufen gezeigt werden. Im Szenario II steigen die Schwefeldioxidemissionen bis Ende der siebziger Jahre um 0.3 Millionen Tonnen über das Niveau im Szenario I (vergl. Abb. 59). Bis zum Jahre 2000 bleiben die Schwefeldioxidemissionen dann auf einer Höhe von 3 Millionen Tonnen pro Jahr und liegen damit fast doppelt so hoch wie bei schneller Reaktorentwicklung. Im Szenario III steigen die Schwefeldioxidemissionen bis zum Jahre 2000 auf 3.8 Millionen Tonnen pro Jahr. Das sind 2.5-mal soviel wie im Szenario I.

Für die Stickoxidemissionen gelten ähnliche Verhältnisse, nur daß hier die Erhöhungen nicht so stark ausgeprägt sind. Aus Abb. 59 wird deutlich, daß trotz Umweltschutzmaßnahmen die erhöhten Emissionsmengen nicht vermieden werden können.

Es stellt sich nun die Frage, ob die durch die Verzögerung der Entwicklung

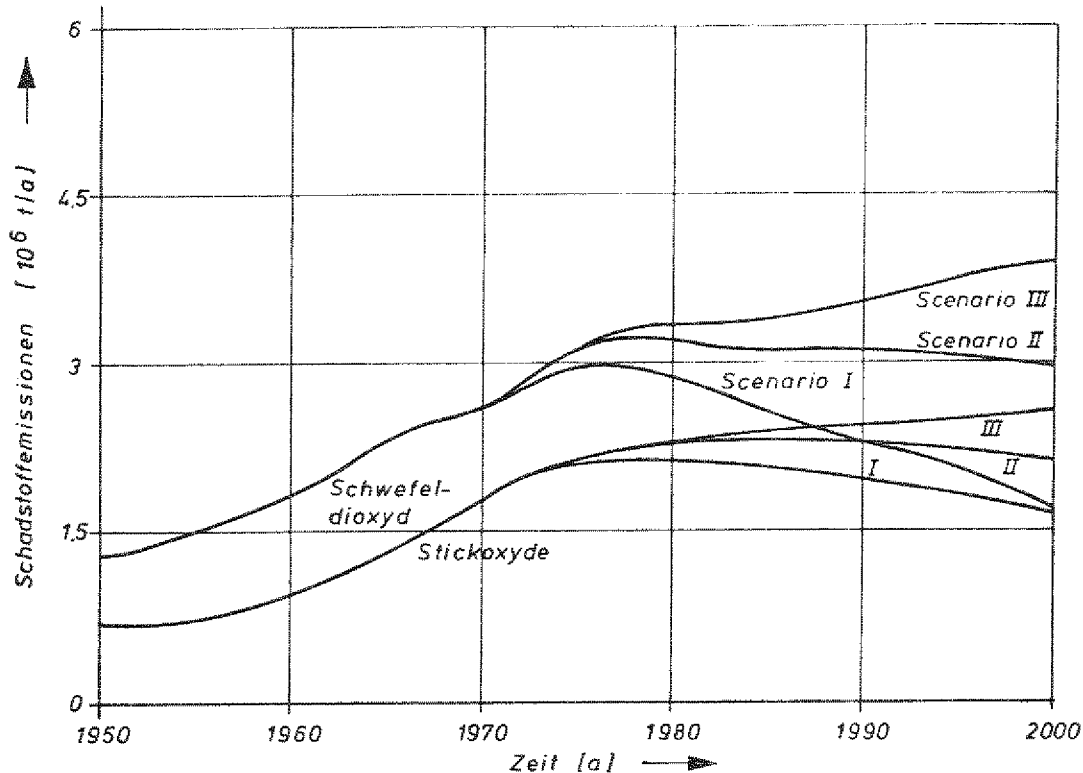


Abb. 59: Auswirkung verzögerter Reaktorentwicklung

der Kernenergie verursachte Steigerung der Luftverschmutzung vom ökologischen System noch verkraftet werden kann.

Ganz eindeutig zu verneinen ist diese Frage, wenn als Zubaustandorte weiterhin wegen der Kürze der Transportwege Randzonen der Ballungsgebiete gewählt werden. Denn in diesen Regionen liegt die Luftverschmutzung schon an bzw. über der Grenze der ökologischen Belastbarkeit. Der Zubau in noch nicht luftverschmutzten Regionen wirft eine Reihe bisher noch ungelöster Probleme auf:

Ausbreitung der Schadstoffe

Aufenthaltsdauer der Schadstoffe in der Atmosphäre

Transportweite der Schadstoffe

Damit ist noch nicht geklärt, ob eine Verteilung der Emissionsprobleme eine Lösung des Luftverschmutzungsproblems darstellt.

Ähnliche Probleme wirft auch die alternative Lösungsmöglichkeit der Er-

höhung der Schornsteine auf. Die Schadstoffbelastung wird zwar in unmittelbarer Nähe der Emissionsquelle reduziert, aber über überregionale Auswirkungen ist nur wenig bekannt.

Die Übergangszeit bis zu einer gesicherten Energieversorgung mit Kernenergie ist also durch eine stark zunehmende atmosphärische Umweltbelastung gekennzeichnet. Je länger auftretende Verzögerungen in der Reaktorentwicklung dauern, um so größer werden die durch chemische Schadstoffe hervorgerufenen ökologischen Probleme.

8.2 Strategielauf: Umweltauswirkung elektrogetriebener Kraftfahrzeuge

Wie in den vorangegangenen Untersuchungen festgestellt werden konnte, ist die Schadstoffanreicherung der Atmosphäre zu einem erheblichen Teil auf den Kraftfahrzeugverkehr zurückzuführen. Dies gilt in besonderem Maße in Ballungsgebieten für den innerstädtischen Verkehr. Zur Beseitigung der Umweltbelastung aus dem Kraftfahrzeugverkehr sind viele Lösungsalternativen (vergl. Kap. 6.3) diskutiert worden. Die im folgenden zu simulierende Lösung basiert auf der Annahme, daß der Individualverkehr im bisherigen oder gar gesteigerten Umfang Grundlage des Verkehrskonzepts bleibt. Mit Elektrospeicherfahrzeugen wird es möglich sein, einerseits den Anforderungen des Individualverkehrs gerecht zu werden, andererseits ist die Umweltbelastung in entscheidendem Maße zu beeinflussen. Es bleibt zu untersuchen, ob die Verlagerung der Emissionsquellen von der Flächenquelle des KFZ-Verkehrs zu den Punktquellen der Kraftwerke eine Gesamtverbesserung bringt. Für einen Vergleich konventioneller und elektrischer Antriebskonzepte muß eine gemeinsame Ausgangsbasis gefunden werden. An der Forschungsstelle für Energiewirtschaft wurden der Primärenergieaufwand für beide Konzepte unter Zugrundelegung der gleichen Transportleistung bzw. des gleichen Nutzeffektes ermittelt /104/. Als Modell diente der Transport einer Nutzlast von 1 t bei durchschnittlichen Stadtverkehrsbedingungen über einer Fahrstrecke von 1 km. Die durchschnittlichen Stadtverkehrsbedingungen wurden durch den "Europa-Testzyklus" reproduziert.

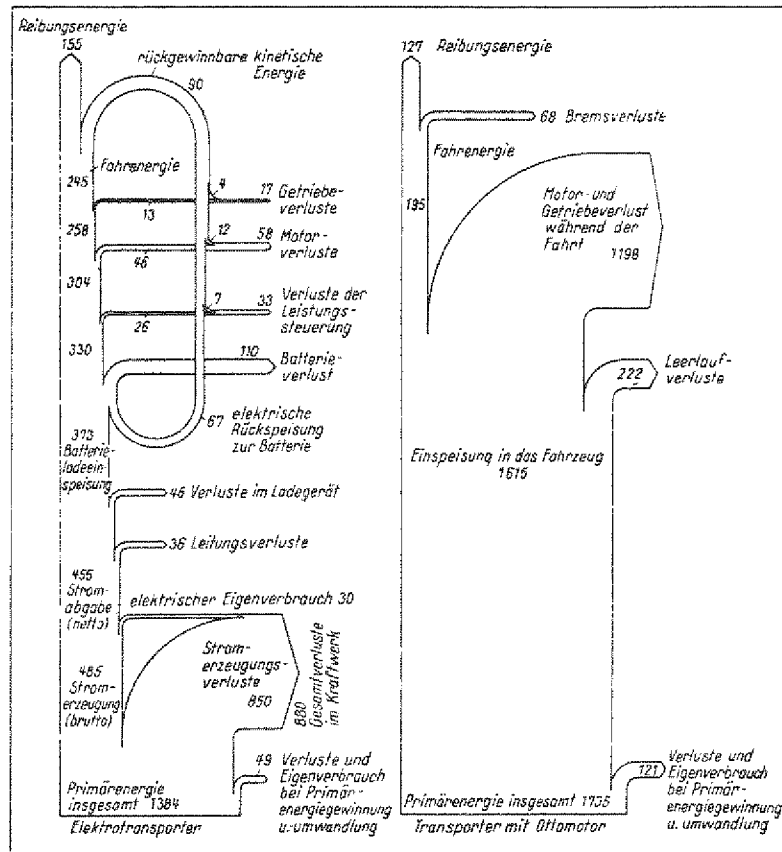


Abb. 60: Energieflußbild für Ottomotor und Elektromotor

Als Ergebnis ergab sich die Energiebilanz für den Transporter mit Ottomotor und für den Elektrotransporter. Die einzelnen Energieumsetzungen sind in einem Energieflußbild dargestellt (vergl. Abb. 60).

Wie aus dem Energieflußbild hervorgeht, ergibt sich für die Elektrotraktion ein um 26 % höherer Nutzenergiebedarf, der durch das hohe Gewicht der mitzuführenden Batterie verursacht wird. Der insgesamt erforderliche Primärenergieaufwand allerdings liegt beim Fahrzeug mit Ottomotor um 20 % über dem des elektrogetriebenen Fahrzeugs.

Zum Vergleich der atmosphärischen Schadstoffbelastungen beider Antriebskonzepte muß ebenso wie eine Energiebilanz auch eine Emissionsbilanz erstellt werden. Im Modell sind die Emissionen aller Energieumsetzungen berücksichtigt. Nur das bei der Regeneration der Katalysatoren aus Claus-Anlagen freiwerdende Schwefeldioxid wird vernachlässigt, da der Regenerationsprozeß nur ein- bis zweimal im Jahr durchgeführt wird /105/. Das gleiche gilt für den Regenerationsprozeß der beim "Reforming" der Benzin-

fraktion eingesetzten Katalysatoren. Mit dem Einsatz des Elektrospeicherfahrzeuges kann wegen technischer und marktpolitischer Schwierigkeiten erst im Jahre 1980 gerechnet werden. Das Modell simuliert daher einen langsamen Übergang zum Elektrospeicherfahrzeug ab 1980. Als Übergangsphase wurde ein Zeitraum von 10 Jahren gewählt. Die Simulation wurde mit den grundlegenden Energiedaten des Szenarios I (schnelle Reaktorentwicklung) durchgeführt, die Ergebnisse wurden mit dem Standardlauf verglichen. Dieser Vergleich ergibt, daß durch den Einsatz eines Elektrospeicherfahrzeuges eine erhebliche Verbesserung der Gesamtsituation der Luftverschmutzung möglich ist. Ein Vergleich der Plotterausdrucke des Standardlaufes und des Simulationslaufes "Elektrofahrzeug" macht diese Tatsache deutlich (Abb. 55 und 61). Der Schadensindex erreicht zwar noch den maximalen Wert des Standardlaufes, aber fällt dann im Zeitraum von 1980 bis 1990 um 12 Indexpunkte. Damit liegt der Umweltschaden durch Luftverschmutzung im Jahre 2000 wieder auf seinem Niveau von 1960. Wie weiter aus den Plotterbildern zu ersehen, werden durch Umstellung des Individual-

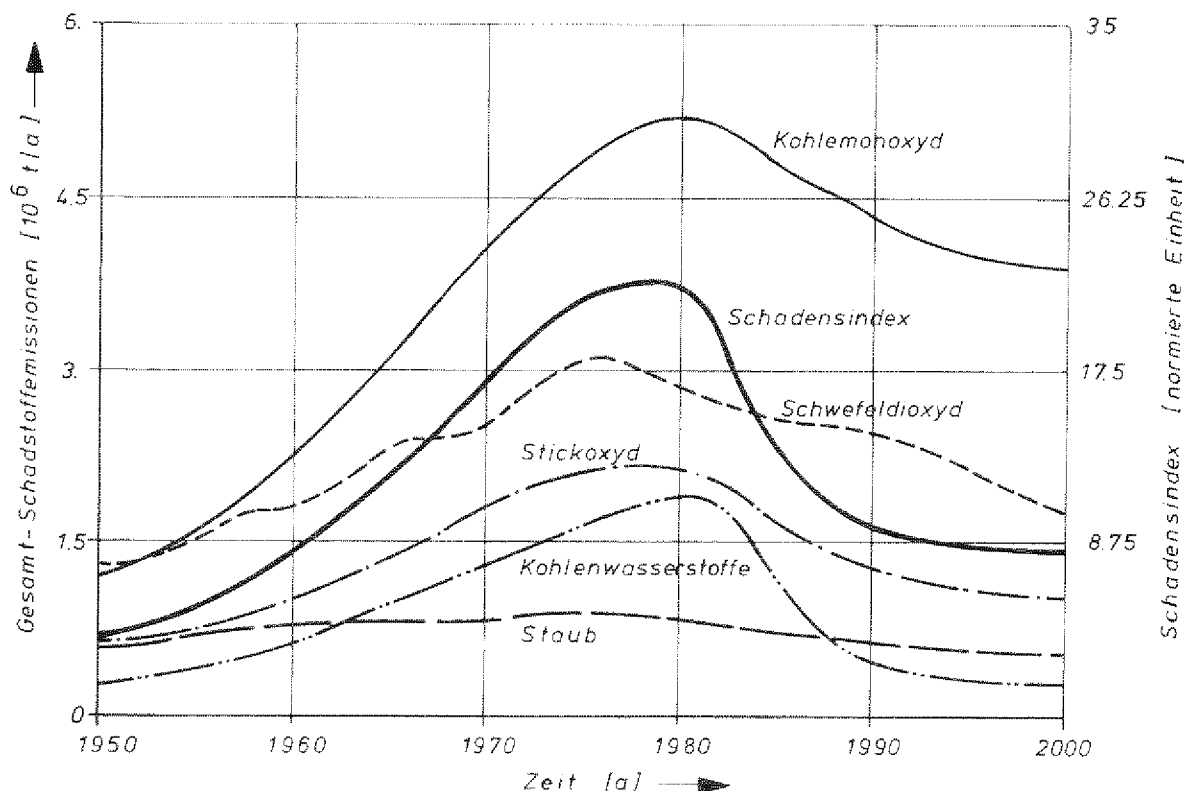


Abb. 61: Strategielauf Elektroantrieb - Schadstoffe

verkehrs auf Elektrospeicherfahrzeuge eine deutliche Reduzierung der emittierten Schadstoffmengen erreicht. Allerdings ist für die Schwefeldioxidemission eine Erhöhung zu verzeichnen. Der Emissionsreduzierung im Verkehrssektor steht also eine Erhöhung im Kraftwerkssektor gegenüber. Diese Erhöhung ist jedoch verhältnismäßig gering, da die elektrische Energie für den Elektromotor hauptsächlich aus Kernkraftwerken bezogen wird.

Kritischer wird die Schwefeldioxidbelastung, wenn das Elektrospeicherfahrzeug eingesetzt wird, ohne daß die Kernenergie den größten Anteil an der Stromerzeugung erreicht. Der Anstieg der Schwefeldioxidemissionen durch Einsatz eines Elektrospeicherfahrzeuges und bei Zugrundelegen der Energiestrukturen von Scenario II und Scenario III ist in Abb. 62 dargestellt.

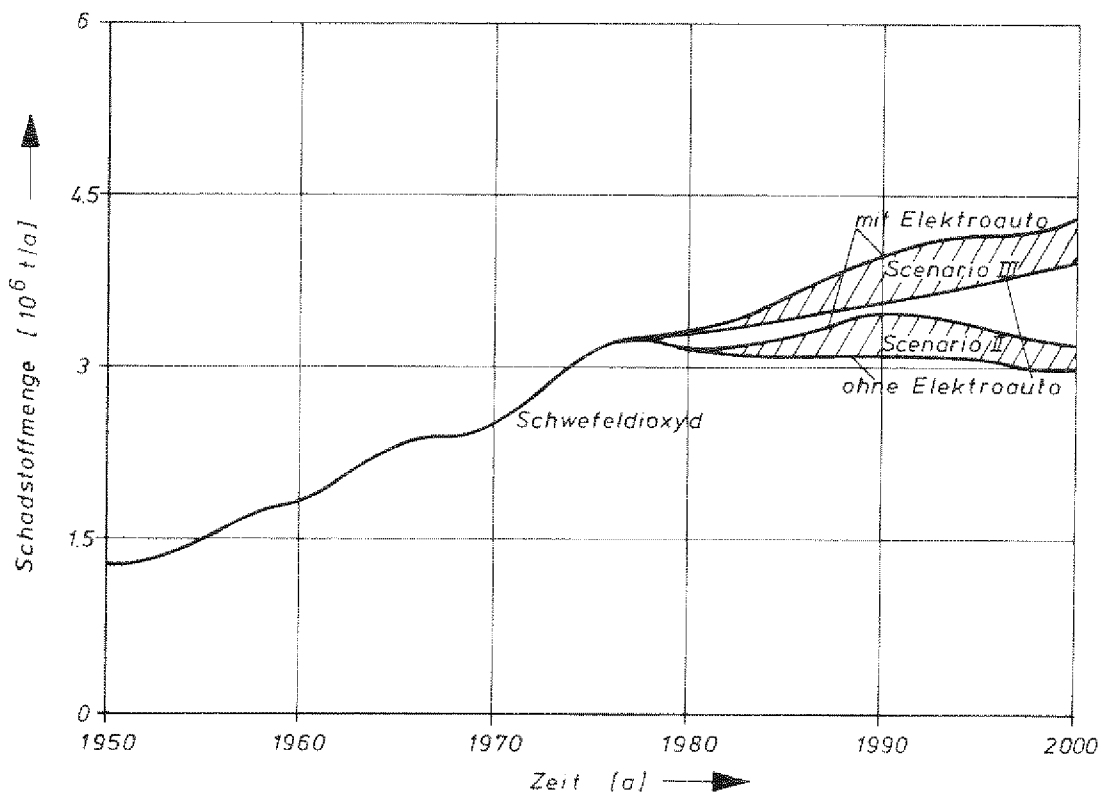


Abb. 62: Vergleich der Schwefelemissionen Ottomotor - Elektromotor

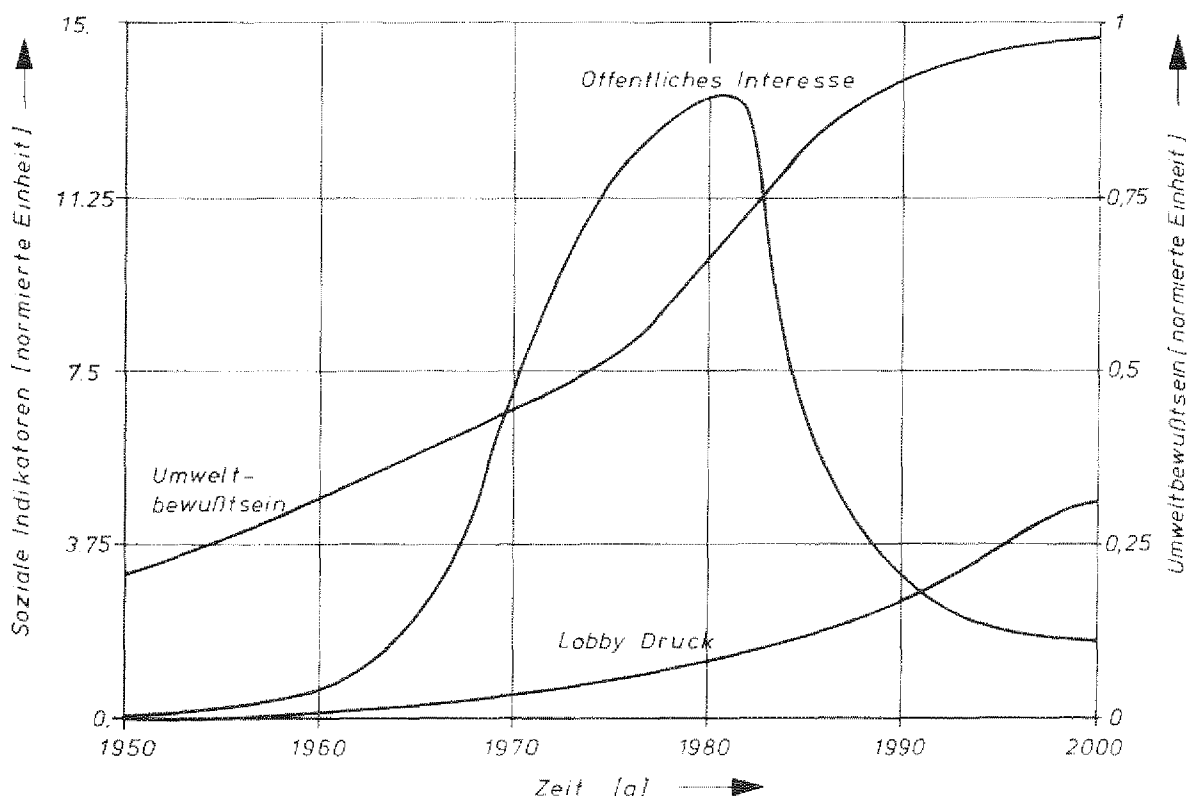


Abb. 63: Strategielauf Elektroantrieb - Soziale Indikatoren

Die höheren Schwefeldioxidemissionen werden ferner noch durch folgenden Wirkungszusammenhang verursacht. Die rapide Verbesserung der Umweltsituation nach Einsatz des Elektrospeicherfahrzeuges bewirkt ein sofortiges Nachlassen des öffentlichen Druckes (vergl. Abb. 63). Das wiederum zieht geringere Emission-Reduzierungsstandards nach sich. Die tatsächlichen Maßnahmen zur Emissionsreduzierung im Kraftwerkssektor erreichen nur eine Wirkung von 50 - 63 % und liegen damit 15 - 20 % unter den Werten, die bei der Simulation konventioneller Antriebssysteme erreicht werden. Abschließend läßt sich feststellen, daß sich durch Umstellen des Individualverkehrs vom Antrieb mit Ottomotor auf Antrieb mit Elektromotor eine wesentliche Reduzierung der gesamten Luftverschmutzung erreichen läßt. Es muß aber auch deutlich herausgestellt werden, daß die Zunahme der Schwefeldioxidemissionen ein großes Risiko darstellen. Parallel zur Entwicklung von Elektrospeicherfahrzeugen

müßte die Entwicklung von Abgas- und Brennstoffentschwefelungsverfahren vorangetrieben werden. Als Kompromißlösung kann auch der Einsatz eines Hybrid-Antriebes angesehen werden. Eine konventionelle Verbrennungskraftmaschine, die im Bereich der günstigsten Schadstoffemission arbeitet, lädt über einen Generator eine Batterie auf, die ihrerseits einen Elektromotor antreibt. Im innerstädtischen Verkehr kann reiner Elektroantrieb erfolgen, im Überlandverkehr bzw. Stadtrandverkehr kann wieder aufgeladen werden.

8.3 Strategielauf: Umweltauswirkungen durch Methanol als Alternativkraftwerk für Kraftfahrzeuge

Die Suche nach einem Alternativkraftstoff für Kraftfahrzeuge wurde nicht nur durch die absehbare Erschöpfung der Erdölvorräte, die als Rohstoffquelle zur Benzinherstellung dienen, eingeleitet, sondern auch durch die hohe Umweltgefährdung, die durch die Abgase aus dem Benzin- bzw. Dieselmotor verursacht wird. Eine Ablösung des Benzins durch Methanol verspricht eine erhebliche Reduzierung der Schadstoffemissionen; dies geht schon aus einem Vergleich der spezifischen Emissionsfaktoren hervor. Mit dem Einsatz von Methanol als Kraftstoff könnten damit zwei Probleme gelöst werden: das Rohstoffproblem und das Umweltproblem. Methanol ist ein einfacher Alkohol und kann aus Synthesegas als Ausgangsstoff mit Hilfe eines Katalysators zu Methanolalkohol umgewandelt werden. Zum Beispiel:



Wird das Methanol unter Verwendung nuklearer Prozeßwärme hergestellt, so ist in dieser Umwandlungsstufe bis auf Emissionen aus Leckagen mit keiner Luftverschmutzung zu rechnen. Die bei der Regeneration der Katalysatoren auftretenden Schadstoffemissionen können wegen ihrer Geringfügigkeit und ihres sporadischen Auftretens vernachlässigt werden.

Beim Abgasverhalten von Methanol-getriebenen Verbrennungskraftmaschinen

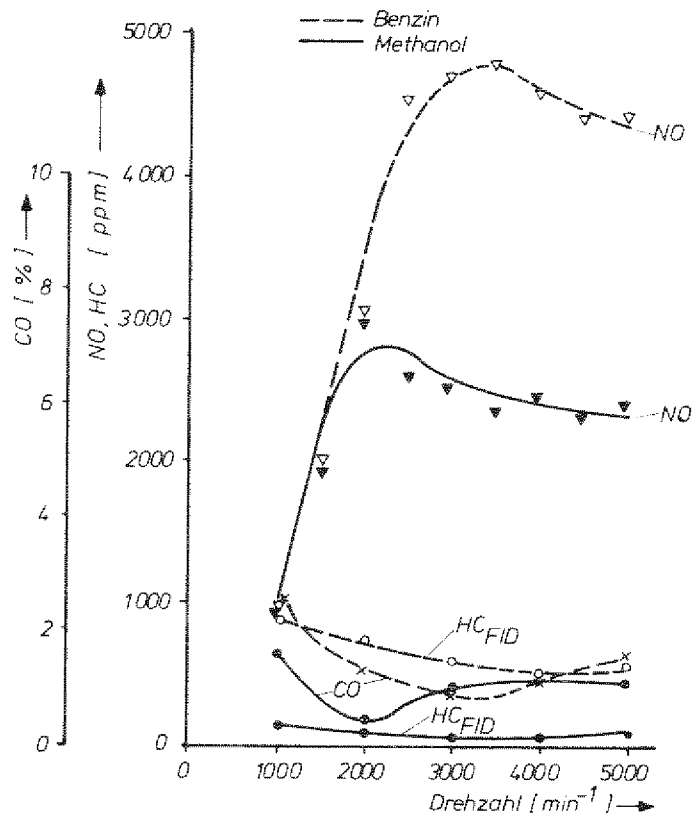


Abb. 64: Schadstoffemission bei Benzin- und Methanolumotor

lassen sich deutliche Vorteile erkennen (vergl. Abb. 64). Die Kohlenmonoxidemission entspricht etwa der des Benzinmotors. Jedoch in niedrigen Drehzahlbereichen ist eine deutliche Senkung zu erzielen. Das ist besonders im Stadtverkehr (Standzeiten, langsame Fahrtzyklen) von Vorteil. Die Stickoxidemission weist eine erhebliche Reduktion gegenüber dem Benzinmotor auf. Bei Versuchen im Volkswagenwerk an einem Einzylinder-Versuchsmotor konnte bei stöchiometrischem Luftverhältnis eine Reduktion von 18 % festgestellt werden. Versuche an einem Vollmotor erbrachten im höheren Drehzahlbereich eine Reduktion von 50 %. Bei einem Luftverhältnis von $\lambda = 1,3$ kann die NO_x -Emission wegen der chemischen Reaktionskinetik und der niedrigen Flammtemperatur des Methanols auf nahezu Null reduziert werden. Die Kohlenwasserstoffemissionen liegen wesentlich unter denen des Benzinmotors. Damit kann die Gefahr der Krebserregung durch Verkehrsabgase einschneidend verringert werden. Die im Abgas verbleibenden Kohlenwasser-

stoffe bestehen hauptsächlich aus unverbranntem Methanol sowie aus einem im Vergleich zum Benzinmotor etwa doppelt so großen Aldehydanteil. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß der Methanolmotor absolut keine Bleiverbindungen emittiert. Als Vor- und Nachteile lassen sich zusammenstellen:

- Vorteile
- keine Bleiverbindungen im Abgas
 - kaum Schwefelverbindungen (abhängig vom verwendeten Schmieröl)
 - keine Rußbildung wegen der geringeren C-Anteile
 - geringere CO-Emissionen im Bereich $\lambda = 1$ bis $\lambda = 1,1$
 - günstigere NO_x -Emissionen
 - geringere PAKW* - Emissionen
- Nachteile
- höhere Aldehyd-Emission und mehr Methanol im Abgas
 - stärkere Dampffahne bei höherer Luftfeuchte.

Neben dem reinen Methanol-Betrieb wurde auch ein Methanol-Benzingemisch als Kraftstoff vorgeschlagen. Bei Versuchen mit einem Passat-Fahrzeug, das mit 15 % Methanol und 85 % Benzin betrieben wurde, konnte im Europatest eine Reduzierung der Kohlenmonoxid-Emissionen um über 60 % erreicht werden. Allerdings mußten wegen der längeren Wärmelaufzeit durchschnittlich 0,7 g pro Test mehr Kohlenwasserstoffe als bei einem Benzinfahrzeug festgestellt werden.

Aus den genannten Reduktionsmöglichkeiten können nun spezifische Emissionsfaktoren für den Methanolmotor abgeleitet werden. Dabei muß berücksichtigt werden, daß der Methanolverbrauch pro erzeugte Leistung etwa um den Faktor 2 höher liegt als bei Benzin.

Folgende spezifischen Emissionsfaktoren wurden angenommen:

Kohlenmonoxid	:	90 g/Tonne Methanol
Stickoxide	:	3,44 g/Tonne Methanol
Kohlenwasserstoffe	:	5,77 g/Tonne Methanol

* PAKW = Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (stark karzinogen)

Bleiverbindungen	0
Schwefeloxide	0
Feststoffe	0

Die Simulation des Einsatzes eines Methanolmotors wurde unter der Annahme, daß Methanolkraftstoff und auch der Methanolmotor erst nach 1980 zur Verfügung stehen kann und innerhalb von 10 Jahren der Benzinmotor gänzlich abgelöst wird, durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 65 dargestellt.

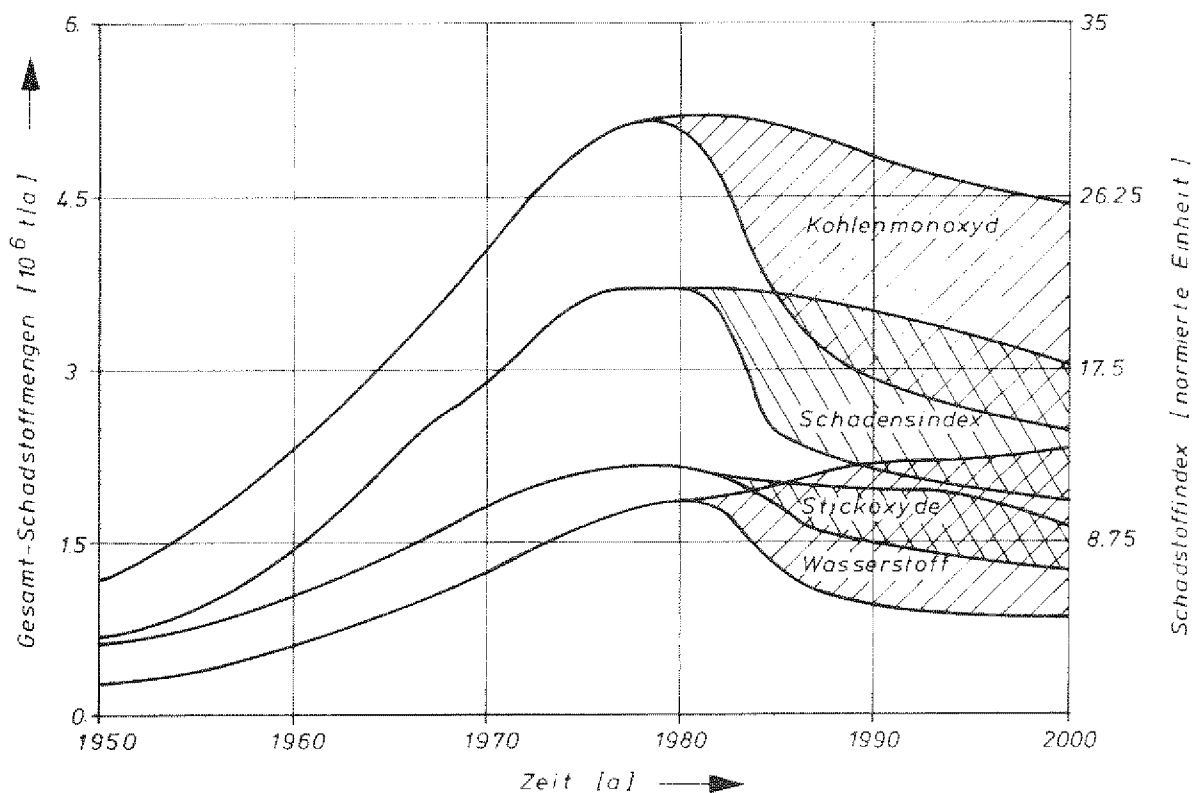


Abb. 65: Strategielauf Methanolmotor - Schadstoffe im Vergleich zum Standardlauf

Zur besseren Vergleichsmöglichkeit sind die Kurvenverläufe für die Schadstoffe und den Schadensindex aus dem Standardlauf in den Plotterausdruck des Strategielaufs "Methanolmotor" übertragen worden. Sie werden jeweils durch die oberen Kurven wiedergegeben. Auch durch den Einsatz des Methanolmotors kann der Höhepunkt der Luftverschmutzung in den 80-er Jahren nicht unterdrückt werden. Aber durch Einsatz von Methanolkraftstoff wird eine schnelle Senkung der Emissionen erreicht, so daß in den 90-er Jahren ein

erheblich geringerer Schaden durch Luftverschmutzung zu verzeichnen ist.

Die Reduktion der Schadstoffmengen innerhalb des Verkehrssektors erreicht beim Einsatz des Methanolmotors nicht die hohen Werte wie beim Elektro-speicherauto, dies gilt besonders für die Kohlenmonoxid- und Stickoxid-emissionen. Auf der anderen Seite liegen aber die Schwefeldioxid-Emissionen beim Elektroauto infolge der Verlagerung auf andere Emissions-quellen wesentlich höher.

Allgemein läßt sich feststellen, daß der Einsatz von Methanol als Alternativkraftstoff nicht nur eine Lösung zur Schonung der Rohstoffreserven darstellt, sondern ebenso auch als Umweltschutzmaßnahme betrachtet werden kann.

8.4 Strategie: Ersatz brennstoffgefeuerter Raumheizungssysteme durch elektrische Speicherheizung

Nachdem technische Umweltschutzmaßnahmen im Kraftwerkssektor und Verkehrssektor simuliert wurden, soll in einer letzten Strategiesimulation die Auswirkung technischer Maßnahmen im Sektor Haushalte und Kleinverbraucher untersucht werden. Da 80 % bis 85 % des Endenergieeinsatzes in diesem Sektor in Raumheizungen eingesetzt werden, sollen verschiedene Raumheizungssysteme im Hinblick auf ihre atmosphärische Schadstoffbelastung analysiert werden. Verglichen werden brennstoffgefeuerte Raumheizungssysteme (Steinkohle, Braunkohlenbriketts, Heizöl) und Elektro-speicherheizung.

Um die Schadstoffemissionen bestimmen zu können, müssen die Energieverbräuche in den einzelnen Umwandlungsstufen bekannt sein und auf einen Mittelwert für den Jahreswärmebedarf bezogen werden. Für den Jahreswärmebedarf wurde in einem Vergleich verschiedener Raumheizungssysteme bezüglich Primärenergieaufwand und Schadstoffemissionen an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft in München für nicht wärmedämmte Gebäude mit $0,654 \text{ GJ/m}^2 \text{ a}$ und für Gebäude mit Wärmedämmung mit $0,467 \text{ GJ/m}^2 \text{ a}$

Raumheizsystem			Wärme- bedarf (Ausle- gungs- wert) in	Jahres- wärme- bedarf in	Anlagen- nutzungs- grad **)	End- energie- bedarf in	Nutzungs- grad für Energie- gewinnung, -umwand- lung und -verteil- ung ***)	Gesamter Primär- energieaufwand in		Gesamt- nutzungs- grad
End- energie- träger	Heizsystem	Entwicklungs- stufe	$\frac{W}{m^2}$	$\frac{GJ}{m^2 \cdot a}$		$\frac{GJ}{m^2 \cdot a}$		$\frac{GJ}{m^2 \cdot a}$	%	
Strom	Einzelpeicher- heizung	Bauart III (a)	105	0,407	0,94	0,496	0,31	1,60	100	0,29
Strom	Einzelpeicher- heizung	Bauart III (b)	140	0,654	0,94	0,693	0,31	2,23	139	0,29
Gas	Einzelheizung		140	0,654	0,61	1,08	0,90	1,20	75	0,55
Öl	Einzelheizung		140	0,654	0,46	1,44	0,94	1,52	95	0,43
Öl	Sammelheizung	Durchschnitt 1980 *)	140	0,654	0,51	1,28	0,92	1,39	87	0,47
Öl	Sammelheizung	Bestwert 1980 **)	140	0,654	0,61	1,07	0,92	1,16	73	0,56
Koks	Sammelheizung	Durchschnitt 1980 *)	140	0,654	0,41	1,61	0,88	1,84	115	0,36
	Sammelheizung	Bestwert 1980 **)	140	0,654	0,48	1,36	0,88	1,55	97	0,42

*) gilt für neue Anlagen, außentemperaturgeregelt und mit einem Raumthermostat

**) Bestwert, für optimale Auslegung und Betriebsweise, mit Raumthermostaten in sämtlichen Räumen

***) unter Berücksichtigung des elektrischen Zusatzverbrauchs

Tab. 14: Gesamtnutzungsgrad und jährlicher Primärenergieaufwand für verschiedene Heizungssysteme /106/

angesetzt /106/. Der jährliche Brennstoffbedarf kann mit Hilfe von Jahresnutzungsgraden bestimmt werden. Der Gesamt-Jahresnutzungsgrad läßt sich in fünf Teilnutzungsgrade aufteilen:

- Feuerungstechnischer Nutzungsgrad
- Wärmeaustauschnutzungsgrad
- Verteilungsnutzungsgrad
- Raumregelungsnutzungsgrad
- Kesselregelungsnutzungsgrad.

Das Ergebnis der Berechnungen ist in Tab. 14 dargestellt. Der gesamte jährliche Primärenergieaufwand für eine Elektrospeicherheizung liegt bei gut wärmegeämmten Wohnungen um 33 % über dem einer Gas-Einzelheizung und nur 15 % über dem entsprechenden Wert für eine durchschnittliche Sammelheizung mit Ölfeuerung /106/.

Die Relationen zwischen Primärenergieverbrauch der Elektrospeicherheizung und dem Brennstoffverbrauch der anderen Raumheizungssysteme wird in das Modell eingegeben. Die Aufteilung der elektrischen Energie auf die einzelnen Primärenergie-Umwandlungssysteme erfolgt durch das BRD-Energie-modell. Über die zukünftigen Wärmebedarfswerte und die spezifischen Emissionsfaktoren der Verbrennungseinrichtungen im Sektor Haushalte und Kleinverbraucher werden die Schadstoffverläufe bestimmt. Es wird angenommen, daß die Umstellung auf Elektrospeicherheizung ab 1975 erfolgen kann und bis 1985 vollständig vollzogen ist. Das Ergebnis des Simulationslaufes ist in Abb. 66 dargestellt. Zum Vergleich dieses Strategielaufes mit dem Standardlauf sind die beiden Plotterbilder überlagert worden. Ein Vergleich der Plotterbilder zeigt sofort, daß eine Umstellung der Raumheizung auf ausschließlich Elektrospeicherheizung keine einschneidende Verbesserung der Umweltsituation mit sich bringt. Die leichte Reduzierung des Schadensindex um zwei bis drei Indexwerte ist auf die Verlagerung der

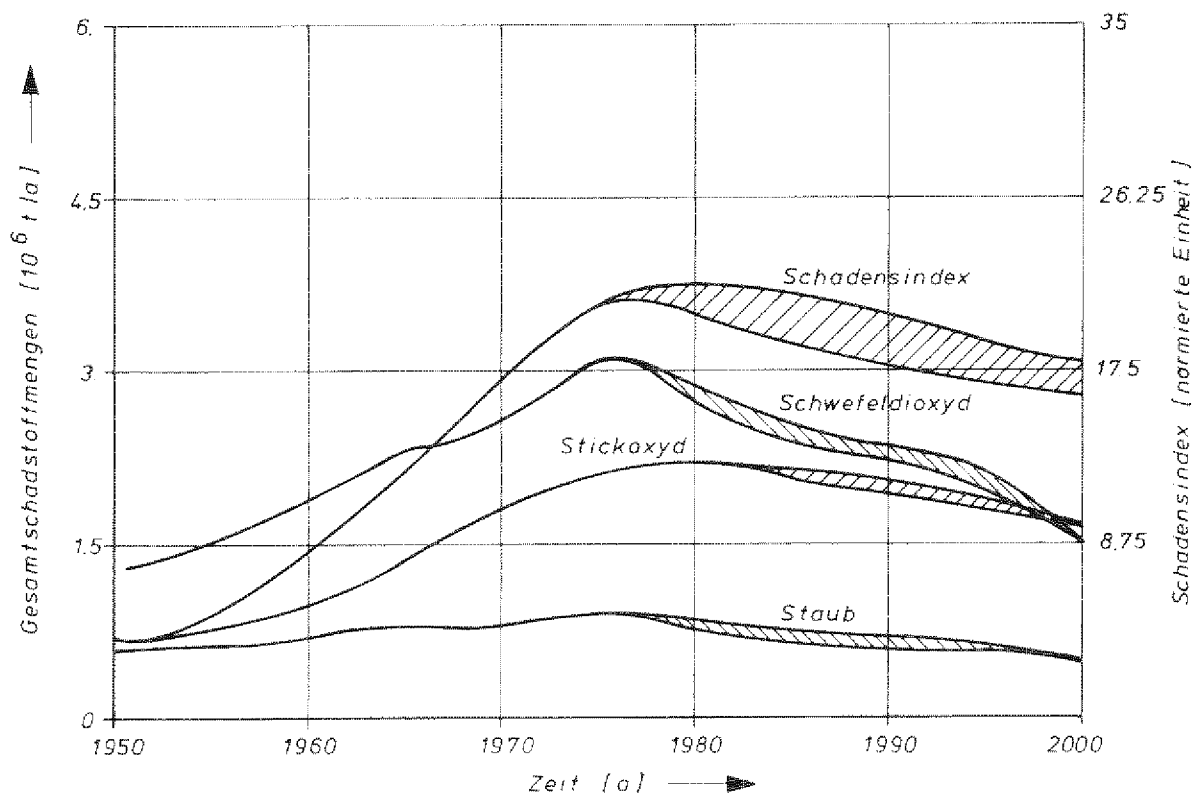


Abb. 66: Strategielauf Elektrospeicherheizung - Schadstoffe im Vergleich zum Standardlauf

Emissionen aus dem direkten menschlichen Einwirkungsbereich in die Punktquelle des Kraftwerks zurückzuführen.

Im Sektor Haushalte und Kleinverbraucher würde die Umstellung auf Gasheizung eine durchschlagende Maßnahme zur Verbesserung der atmosphärischen Schadstoffbelastung darstellen. Die Begründung liegt in den extrem niedrigen Emissionswerten für Gasfeuerungsanlagen /106/. Diese erhebliche Schadstoffreduzierung konnte in einem Strategielauf, der hier allerdings nicht erläutert werden soll, gezeigt werden.

Insgesamt können aus den durchgeführten Simulationsläufen folgende Erkenntnisse gezogen werden:

- Mit den 80-er Jahren ist ein kritisches Jahrzehnt im Hinblick auf die atmosphärische Schadstoffbelastung zu erwarten. Die einzelnen Schadstoffemissionen erreichen zu dieser Zeit ihre maximalen Werte.
- Das starke Anwachsen des Umweltbewußtseins der Bevölkerung und des daraus resultierenden öffentlichen Drucks zur Verbesserung der Umweltsituation bewirkt Ende der 80-er Jahre ein Greifen der Umweltschutzmaßnahmen. Auch bei verzögertem Einsatz der Kernenergie kann der Umweltschaden aus der Verfeuerung fossiler Brennstoffe auf ein zumutbares Niveau reduziert werden.
- Mit Wirksamwerden der Umweltschutzmaßnahmen ist ein starker Anstieg Produktionskosten verbunden. Sie erreichen bei der Produktion von Kraftfahrzeugen etwa 14 % der Kilometerkosten und bei Produktion von elektrischer Energie etwa 16 % der Gesamtkosten.
- Diese hohen Kosten bewirken, daß die Gesellschaft einen höheren Umweltschaden toleriert. Das führt im Zusammenhang mit den ersten Erfolgen in der Luftreinhaltung zu einem schnellen Absinken des öffentlichen Druckes nach 1985. Dieses Absinken des öffentlichen Druckes bewirkt, daß die Ausgangs-Umweltsituation von 1950 bis zum Jahre 2000 noch nicht wieder erreicht werden kann.

- Es kann aber festgestellt werden, daß die in der Gesellschaft wirksam werdenden Kräfte einen selbstregulierenden Effekt hervorrufen. Die Umweltsituation wird auf ein zumutbares Niveau reduziert.
- Die Umstellung von konventionellen Antriebsaggregaten bei Kraftfahrzeugen auf Elektroantrieb bringt eine spürbare Verbesserung der atmosphärischen Schadstoffbelastung.

9. WEITERENTWICKLUNG DES MODELLANSATZES

Ziel dieser systemtechnischen Modellbetrachtung war die modellmäßige Untersuchung der sozialen und politischen Einflußfaktoren auf das System einerseits und der technischen, ökonomischen und ökologischen Einflußfaktoren andererseits. Durch Einbeziehung von Größen wie "Öffentlicher Druck" oder "Lobby-Druck" sollten soziale Indikatoren repräsentiert werden.

Die Modellbetrachtung beschränkte sich zunächst nur auf die atmosphärische Schadstoffbelastung. Öffentliches Interesse wird aber nicht nur durch Luftverschmutzung hervorgerufen, sondern auch durch die anderen Arten der Umweltverschmutzung, die durch die Probleme der festen Abfälle, der Wasserverunreinigung, des Lärmes und der Abwärme bekannt sind. Mit Sicherheit ist der Gesamteindruck der Umweltsituation die ausschlaggebende Determinante für das Verhalten der Öffentlichkeit. Ferner hat die regional unterschiedlich stark auftretende Luftverunreinigung auch eine regional-unterschiedliche Ausprägung der anderen Wirkungsfaktoren zur Folge. Die Betrachtung des Umweltsystems der Bundesrepublik Deutschland als homogenes System oder die Rechnung mit Durchschnittswerten verschleiert natürlich völlig die regionalen Unterschiede und Besonderheiten.

Ein weiterer wichtiger Wirkungszusammenhang konnte in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden. Die Auswirkungen der Umweltsituation auf den gesamten Wirtschaftsprozess, den Energieverbrauch und die Energieverbrauchsstruktur. Die Isolierung des Umweltsystems von seinem Umgebungssystem führt natürlich auch zu Fehlerergebnissen. Die Kopplung über die Umweltschutzkosten an ein Wirtschaftsmodell, in dem die erklärenden Größen für den Energieverbrauch in den einzelnen Wirtschaftssektoren endogen erzeugt werden, ließe sich verhältnismäßig leicht durchführen, da parallel zur Arbeit an diesem Modell ein BRD-Energiemodell entwickelt wurde. Darin sind die industriellen Verflechtungen explizit dargestellt, so daß die gesamtwirtschaftlichen Folgen von Energiekostenänderungen infolge von Umweltschutzmaßnahmen aufzeigen ließen.

Die Auswirkungen der Umweltschäden auf die Gesamtwirtschaft lassen sich nach dem heutigen Stand der Kenntnisse nur schwer quantifizieren. Die Erforschung der durch Umweltnutzung verursachten sozialen Kosten ist erst in der letzten Zeit in den USA aufgenommen worden.

Aus den vorangegangenen kritischen Anmerkungen zu dem vorgelegten Modellansatz ergeben sich folgende Möglichkeiten und Notwendigkeiten der Weiterentwicklung des Modellansatzes:

- Ausweitung der Modellbetrachtung auf Abwasser-, Lärm-, Abfall- und Abwärmeprobleme. Ferner müssen nicht nur die Belastungen aufgrund energetischer Aktivitäten berücksichtigt werden, sondern auch die vielfältigen Belastungen der nichtenergetischen Industrieaktivitäten.
- Kopplung des Umweltmodells an ein Wirtschafts-, Bevölkerungs-, und Energiebedarfsmodell.
- Aufteilung der BRD in Regionen zur Berücksichtigung der regionalen Unterschiede. Bei einer regionalen Betrachtungsweise kann dann auch eine Umrechnung von Emissionen in Immissionen mit Hilfe von Ausbreitungsmodellen erfolgen. Die Möglichkeit zur Durchführung solcher regionalen Modellbetrachtungen hängt aber weitgehend von der Verfügbarkeit entsprechenden Datenmaterials, wie z.B. einer regionalen Input-Output-Matrix, ab. Diese Möglichkeit wird aber um so geringer, je kleiner die Region wird.
- Die sozialen Kosten infolge von Umweltnutzung müssen bestimmt werden, um Auswirkungen der Umweltsituation auf die Gesamtwirtschaft aufzeigen zu können.
- Die Möglichkeit des interaktiven Zugriffs des Benutzers in das Modell würde die Aussagefähigkeit des Modells noch mehr steigern. Die Darstellung der Variablenverläufe auf einem aktiven Bildschirm und die Möglichkeit, den Simulationslauf zu beliebigen Zeiten abubrechen, würde die Arbeit mit dem Modell effektiver gestalten.

10. LITERATUR

- /1/ Overhage, P. Experiment Menschheit, Frankfurt 1968, S. 224
- /2/ Steinbuch, K. Kurskorrektur, Stuttgart 1973, S. 114
- /3/ Bundesinnen-
ministerium Umweltprogramm der Bundesregierung
Bonn 1971
- /4/ Bohn, Th. Energiebedarf, Analyse und Möglichkeit der
Deckung, VDI Tagung Nichtkonventionelle
Energiesysteme, Düsseldorf, Juni 1974
- /5/ Limaye, D.R.,
Sharko, J.R. Analytical Techniques for Energy Policy
Evaluation, in: Energy Modeling,
Resources for Future Inc. (Hrsg.), Working
Paper EN-1 S. 350 ff
- /6/ Kapp, K.W. Volkswirtschaftliche Kosten der Privatwirt-
schaft, Tübingen-Zürich 1958
- /7/ Kapp, K.W. Zur Theorie der Sozialkosten der Umweltkrise
in: Sozialisierung der Verluste, München 1972
- /8/ Siebert, H. Probleme von Nutzen-Kosten Analysen umwelt-
schützender Maßnahmen in: Wirtschaftsdienst
III/1973, S. 131-135
- /9/ Vester, F. Das Überlebensprogramm, München 1972, S. 57
- /10/ Wohlers, H.C. Environmental Health, Acad. Press, New York
1971, zitiert nach Vester /9/
- /11/ Galbers Wirtschaftslexikon Wiesbaden 1967
- /12/ Deutscher Bundestag 1972, Materialien zum
Umweltprogramm der Bundesregierung, Volks-
wirtschaftliches Gesamtgutachten, S. 579
- /13/ Binswanger, H.C.,
Lederberger, F. Energiezuwachsbremung als Mittel der Wachs-
tumskontrolle, 3. Symposium für wirtschaft-
liche und rechtliche Fragen des Umwelt-
schutzes, St. Gallen, November 1973
- /14/ Schürmann, H.J. Umweltorientierte Wasserpolitik und Energie-
politik, Arbeitspapier Energiewirtschaft-
liches Institut der Universität Köln,
Köln 1973

- /15/ Beck, E.G.,
Manojlovic, N.,
Fischer, B. Vergleichende Untersuchung über die Zell-
toxizität atmosphärischer Schwebestäube
in: Proceedings of the 3. Intern. Clean
Air Congress, Düsseldorf 1973

- /16/ Mandschagaladse, W.I. Einige genetische Aspekte der Wirkungen der
industriellen und landwirtschaftlichen Gifte
auf den Organismus in: Proc. 3. Intern.
Clean Air Congress, Düsseldorf 1973

- /17/ Hettche, H.O. Luftverunreinigung und Lungenkrebs in:
Naturwissenschaften 58 Jg., Heft 8, 1971,
S. 409-413

- /18/ Lave, L.B.,
Seskin, E.P. Health and Air Pollution in: Swedish Journal
of Economics 73/76, 1971

- /19/ Rosenberger, G. Untersuchungen über Immissionswirkungen bei
Nutztieren in der Bundesrepublik Deutschland
in: Proc. 3. Intern. Clean Air Congress,
Düsseldorf 1973

- /20/ Frenzel, G. Die letzten Zeugnisse mittelalterlicher
Glasmalerei im Untergang in: Proc. 3. Intern.
Clean Air Congress, Düsseldorf 1973

- /21/ Scherrer, H.V. Gesamtwertung der Umweltbelastung, Aufsatz
in: Neue Züricher Zeitung 14.8.1972

- /22/ VDI Kommission Wirkung von Staub und Gasen,
Präambel für die Richtlinien "Maximale
Immissionswerte" in: Umwelt 6/1973, S. 37-38

- /23/ Babcock, L.R. A Combined Pollution Index for Measurement
of Total Air Pollution in: Journal of Air
Pollution Control Assoziation, Oktober 1970
Vol 20, No. 10, S. 653-659

- /24/ Thomas, W.A.,
Babcock, L.R.,
Shults, W.D. Oak Ridge Air Pollution Index, Oak Ridge
National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee
1971, ORNL-NSF-EP-8

- /25/ Schikarski, W. u.a. An Approach for Comparing Air Pollution from
Fossil-Fuel and Nuclear Power Plants in:
Environmental Aspects of Nuclear Power
Stations Proc. of a IAEA Symposium New York,
Wien 1971, S. 877

- /26/ Nord, F.J. Meso-scale and Large-Scale Transport of Air Pollution in: Proc. 3. Intern. Clean Air Congress, Düsseldorf 1973
- /27/ Junge, C.E. Circulation of Trace Constituents in the Atmosphere and Aspects of Global Air Pollution, Intern. Symposium Chem. and Toxicol Aspects of Environmental Quality, München Juli 1969
- /28/ Metham, A.R. Natural Removal of Pollution from the Atmosphere in: Quart. Journal Roy. Meteorol. Soc. 76/1950, S. 359
- /29/ Hauna, S.R. Application of a Simple Model of Photochemical Smog in: Proc. 3. Intern. Clean Air Congress, Düsseldorf 1973
- /30/ Hales, J.M. Advances in the Theory and Modeling of Pollutant - Gas Washout in: Proc. 3. Intern. Clean Air Congress, Düsseldorf 1973
- /31/ Brocke, W. u.a. Die Entwicklung der SO₂ Emission und Immission in der BRD und technische Möglichkeiten zur Immissionsminderung, Ausarbeitung der Landesanstalt für Immissions- und Bodennutzungsschutz, Essen Mai 1972
- /32/ Schwarz, K. MIK-Werte als Entscheidungshilfe in: VDI Nachrichten Nr. 22, 31. Mai 1974
- /33/ Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, Umweltgutachten 1974, Stuttgart-Mainz 1974, S. 207
- /34/ Leontief, W., Ford, D. Air Pollution and the Economic Structure, Empirical Results of Input-Output Computations in: Brody A., Carter, A. (Hrsg.) Input-Output Techniques, Amsterdam 1972, S. 9 ff
- /35/ Thoss, R. Zur Planung des Umweltschutzes in: Raumforschung und Raumordnung 30/1972, S. 187
- /36/ Müller-Merbach, H. Operations Research, 2. Aufl. München 1971 S. 88
- /37/ Charpentier, J.P. u.a. Progress Report on a Review of Energy Models in Various Countries, IIASA, Laxenburg 1974

- /38/ Hoffmann, K.L. A Unified Framework for Energy System Planning, Polytechnic Institute of Brooklyn, USA June 1972
- /39/ Müller, W. Die Simulation betriebswirtschaftlicher Informationssysteme, Wiesbaden 1969, S. 145
- /40/ Forrester, J.W. Principles of Systems, Wright Allen Press, Cambridge Mass. 1969
- /41/ Forrester, J.W. Industrial Dynamics, MIT Press, Cambridge Mass. 1971
- /42/ Forrester, J.W. World Dynamics, MIT Press, Cambridge Mass. 1971
- /43/ Ford, A. The Dynamics of Pollution Control in: 3. Symposium für wirtschaftliche und rechtliche Fragen des Umweltschutzes, St. Gallen November 1973
- /44/ Harbordt, S. Der Einfluß sozialer und politischer Faktoren auf die "Grenzen des Wachstums" in: Analysen und Prognosen, Mai 1974
- /45/ Vester, F. Prinzip und Bedeutung kybernetischer Technologien, Der Weg des vorausschauenden Steuerns in: Umwelt 1/1974
- /46/ Haager, K. Sicherheit in der Elektrizitätsversorgung und Umweltschutz - ein Zielkonflikt? in: Elektrizitätswirtschaft Jg. 73 (1974) Heft 11, S. 283-286
- /47/ World Health Organization, Health Hazards of the Human Environment, Genf 1972, S. 29
- /48/ Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, Auto und Umwelt, Gutachten vom September 1973, Stuttgart-Mainz 1973
- /49/ Bauer, R.A. Social Indicators, Cambridge Mass 1966
- /50/ Leipert, C. Soziale Indikatoren in: Konjunkturpolitik Zeitschrift für angewandte Konjunkturforschung, Heft 4, 1973

- /51/ Buttler, G. Sozialindikatoren, Beiträge Institut der deutschen Wirtschaft Köln 1973
- /52/ Halliday, E.C. Zur Geschichte der Luftverunreinigung in: Die Verunreinigung der Luft, World Health Organisation, Deutsche Ausgabe, Weinheim 1964
- /53/ Holmes, J.A. u.a. U.S. Dep. commerce, Bur. Mines. Bull. Nr. 58, 1951, S. 528, zitiert nach Halliday /52/
- /54/ Institut für angewandte Sozialwissenschaft, Umweltpolitisches Bewußtsein 1972, B5 Beiträge zur Umweltgestaltung, Berlin 1973
- /55/ Bundesinnenministerium, Umwelt - Informationen des Bundesministers des Innern zur Umweltplanung und zum Umweltschutz, Bonn 19.3.1974
- /56/ May, H., Plassmann, E. Abgasemission von Kraftfahrzeugen in Großstädten und industriellen Ballungsgebieten, Verlag TÜV Rheinland, Köln 1973
- /57/ Brocke, W. Die Emission von Schwefelverbindungen in der Bundesrepublik Deutschland, VDI Bericht Nr. 186, 1972
- /58/ Deutscher Bundestag, Materialien zum Umweltprogramm der Bundesregierung, Beiträge der Arbeitsgruppe Verkehr, Bonn 1972, S. 463
- /59/ Deutscher Städtetag, Verkehr und Stadtstraßen, Köln 1971, zitiert nach /48/
- /60/ Wer macht was, wie und wo? Eine Dokumentation zur Umweltforschung, B6 Beiträge zur Umweltgestaltung, Berlin-Bielefeld München 1973
- /61/ Robert Bosch GmbH, Untersuchung über Wirkung und Zusammenspiel von Gemischzusammensetzungen, Gemischaufbereitung, Zündung, Abgasrückführung und thermisch-katalytischer Abgasbehandlung im Hinblick auf minimale Schadstoffemission bei Ottomotoren in: Auf dem Weg zum Auto von Morgen, BMFT Köln 1973

- /72/ Kremer, H. Emission von Feuerungen in: 4 Umwelt aktuell - Reinhaltung der Luft - Texte der Vortragsreihe zur Umwelt 1972 in Stuttgart, Karlsruhe 1973
- /73/ Bathke, H. u.a. Stickoxidmessungen in Feuerungsabgasen von Kesselanlagen in: Brennstoff-Wärme-Kraft Zeitschrift für Energietechnik und Energiewirtschaft, Bd. 26, 1974, Nr. 1, S. 20
- /74/ Bell, O. Stickoxidbildung in stationären Heizölflammen bei Atmosphärendruck in: Brennstoff-Wärme-Kraft Zeitschrift für die Energietechnik und Energiewirtschaft Bd. 26, 1974, Nr. 7, S. 291
- /75/ Dreyhaupt, F.J. Luftreinhaltung als Faktor der Stadt und Regionalplanung, Umweltschutz I, Köln 1971, S. 35 ff
- /76/ Energiebilanzen der BRD von 1950 - 1973
- /77/ Vereinigung Industrielle Kraftwirtschaft VIK Essen, Tätigkeitsbericht 1972/1973 Essen 1973, S. 38
- /78/ Aus der Rechtsprechung: Rauchgasentschwefelung nicht Stand der Technik in: UMWELT 4/1974, S. 49-51
- /79/ Brocke, W., Davides, P. Internationaler Stand der Technik der Abgasentschwefelung in Kraftwerken in: Brennstoff-Wärme-Kraft Zeitschrift für Energietechnik und Energiewirtschaft Bd. 26, 1974, Nr. 3, S. 102
- /80/ VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V. Zwischenbericht "A" zur Systemanalyse Entschwefelungsverfahren, Essen, Juni 1973
- /81/ Fischer, H. Reduktion des Auswurfs von Schwefelverbindungen aus Schwefelgewinnungsanlagen - Ein Vergleich in: Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie vereinigt mit Brennstoffchemie Bd. 27, Heft 6, Juni 1974, S. 293

- /82/ Lowes, T.M. u.a. Die Beeinflussung der NO_x -Emission brennstoffgefeuerter Kessel und Öfen durch Veränderung von Brennparametern in: Brennstoff-Wärme-Kraft, Zeitschrift für Energietechnik und Energiewirtschaft Bd. 26, 1974, Nr. 1, S. 26
- /83/ Niehaus, Fr. Langzeitaspekte der Umweltbelastung durch Energiegewinnung - CO_2 und H_3
Dissertation in Vorbereitung RWTH Aachen 1974
- /84/ Brocke, W.
Schade, H. Die Luftverunreinigung durch Abgase aus der Verbrennung von Brennstoffen in stationären Anlagen der BRD, Teil I, in: Staub-Rein-
haltung der Luft, 31, 1971, Nr. 12, S. 475
- /85/ Michel, B. u.a. Schadstoffemissionen von Haushaltsfeuerungen - Abgasmessungen an Öl- und Gasfeuerungen
in: Staub - Reinhaltung der Luft 34, 1974, Nr. 5
- /86/ Mantey, C. Einsatz von Hochtemperaturreaktoren in der Eisen- und Stahlindustrie unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses auf Standort- und Umweltprobleme dieses Industriezweiges, Dissertation in Vorbereitung, RWTH Aachen 1974
- /87/ Schulten, R. u.a. Industriekraftwerk mit Hochtemperaturreaktor PR 500 "Otto-Prinzip" Jül-941-RG Jülich 1973
- /88/ Jüntgen, H. Möglichkeit zur Begrenzung von Schwefeldioxid - Emissionen
Chemieanlagen - Verfahren Heft 11, 1969
- /89/ Zweiter Internationaler Clean Air Congress in Washington 1970 in:
Stahl und Eisen 91 (1971) Nr. 9
- /90/ Bundesministerium des Innern Umweltbrief November 1974, Umwelt und Energie, Bonn 1974
- /91/ Eickhoff, H.-G. Technische und wirtschaftliche Möglichkeiten, die sich durch den Einsatz des Hochtemperaturreaktors für die künftige Mineralölversorgung der BRD ergeben, Jül-1017 RG Jülich 1973, S. 43

- /92/ Kosiol, E. Modellanalyse als Grundlage unternehmerischer Entscheidung in: Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, 13. Jg., 1961, S. 319
- /93/ Bergbauforschung Essen, Rheinische Braunkohlenwerke AG Köln, Kernforschungsanlage Jülich, Sicherung der Energie und Rohstoffversorgung durch nukleare Prozeßwärme Dezember 1973, S. 22
- /94/ Krämer, H. u.a. Technischer und wirtschaftlicher Stand sowie Aussichten der Kernenergie in der Kraftwirtschaft der BRD, Jül-705 RG Jülich 1970
- /95/ Die Energiewirtschaft in ihrer ökonomischen und sozialen Umwelt 1975-1985, Vorträge und Diskussionsbeiträge der 17. Arbeitstagung am 5. und 6. April an der Uni. Köln, Tagungsberichte des EWI, Heft 17, München 1974
- /96/ BMFT, Viertes Atomprogramm der Bundesrepublik Deutschland für die Jahre 1973-1976, Bonn 1973, S. 39
- /97/ Müller, W.D. Wo bleiben die Kernkraftwerke in: Atomwirtschaft-Atomtechnik 2/1974, S. 65
- /98/ Kugeler, M. Energieprognose für die BRD unter Berücksichtigung des Einsatzes von Kernwärme zur Vergasung fossiler Rohstoffe, Jülich 1971
- /99/ Mandel, H. Strukturen der nuklearen Stromerzeugung in den 70 iger und 80 iger Jahren in: Atomwirtschaft-Atomtechnik, Bd. 18, Jg. 1973, Heft 1, S. 18-24
- /100/ Schmitt, D. Energiebedarf und Deckung in der BRD bis 1980 in: Wirtschaftsdienst Bd. 17, Jg. 1973, Heft 2, S. 83
- /101/ Rath-Nagel, S. Alternative Entwicklungsmöglichkeiten der Energiewirtschaft in der BRD Untersuchung mit Hilfe eines Simulationsmodells, Dissertation RWTH Aachen in Vorbereitung

- /102/ Kiefer, H. u.a. Überwachung der Radioaktivität in Wasser und Abluft Stuttgart 1967
- /103/ Bundesinnenministerium UMWELT Nr. 82 Informationen des Bundesministers des Innern zur Umweltplanung und zum Umweltschutz Bonn 5. Juni 1974
- /104/ Rudolph, M. Primärenergieaufwand und Schadstoffemission im Stadtverkehr - Modellvergleich konventioneller und elektrischer Traktion in: Brennstoff - Kraft - Wärme Bd. 25, 1973, Heft 9, S. 366-370
- /105/ Halbritter, G. Einführung in das Problem Kraftverkehr und Umwelt KFK 1614, Karlsruhe 1972
- /106/ Rudolph, M. Vergleich verschiedener Raumheizungssysteme bezüglich Primärenergieaufwand und Schadstoffemission im Jahre 1980 Brennstoff - Kraft - Wärme Bd. 25, 1973, Heft 3, S. 105-110

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Reaktorentwicklung sowie in der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung der Kernforschungsanlage Jülich.

Herrn Prof. Dr. R. Schulten möchte ich für die Themensetzung und die Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit danken.

Herrn Dr. Th. Bohn danke ich für sein Interesse, seine Hilfen und die Übernahme des Korreferates.

Ferner danke ich meinen Kollegen und Freunden für die anregenden Diskussionen und wertvollen Informationen.

D. Elsinghorst

