

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

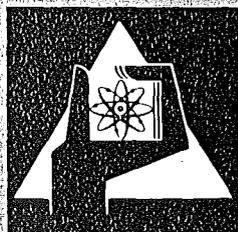
April 1974

KFK 1966 UF

Institut für Angewandte Systemtechnik und Reaktorphysik

Energie und Umwelt in Baden-Württemberg

D. Faude, A. Bayer, G. Halbritter,  
G. Spannagel, H. Stehfest, D. Wintzer



**GESELLSCHAFT  
FÜR  
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KFK 1966 UF

Institut für Angewandte Systemtechnik und Reaktorphysik  
in Zusammenarbeit mit dem  
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

E N E R G I E U N D U M W E L T I N B A D E N - W O R T T E M B E R G

Eine Studie im Auftrag des Ministeriums  
für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr  
Baden-Württemberg

von

D. Faude  
A. Bayer  
G. Halbritter  
G. Spannagel  
H. Stehfest  
D. Wintzer

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe



An der Studie haben ferner mitgearbeitet

P. Jansen

W. Sassin

H. Zajonc

Die Erstellung der Rechenprogramme erfolgte durch

B. Kirschner

U. Seele

unter Mithilfe von R. Hulata und G. Negele.

Herr A. Bayer gehört dem Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik an. Sein Beitrag entstand im Rahmen der Arbeiten zum Projekt Nukleare Sicherheit.

Die Autoren danken Fr!l. M. Mäule und Frau R. Kalckbrenner für die Anfertigung der Abbildungen und Frau R. Tonk für die Erstellung des Manuskripts.

Für Gespräche und die Bereitstellung von Daten sei gedankt

den Herren Dr. S. Jordan und Dr. W. Schikarski

sowie Herrn K. Nester, Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit.

Ferner sei allen Personen und Institutionen gedankt, die Informationen zur Verfügung gestellt haben, insbesondere

Gewerbeaufsichtsämtern,

dem Deutschen Wetterdienst, Offenbach, Abteilung Klima,

insbesondere Frau Dr. Kalb,

der Geophysikalischen Abteilung des Fliegerhorstes Bremgarten

(AufklG 51 "Immelmann"), insbesondere Herrn Priv. Doz. Dr. H. v. Rudloff,

der Landesstelle für Gewässerkunde und wasserwirtschaftliche Planung,

Karlsruhe, insbesondere Herrn Reg. Baurat Fleig,

Elektrizitäts- und Wärme-Versorgungsunternehmen,

Mineralöl- und Kohle-Gesellschaften,

## Zusammenfassung:

ENERGIE UND UMWELT IN BADEN-WÜRTTEMBERG. In dieser Studie werden die Umweltbeeinflussungen durch Energieumsetzungen untersucht. Schwerpunktmäßig wird dabei einmal sektoral der Bereich der Energieumwandlung, zum anderen regional das Oberrheingebiet behandelt. Aufbauend auf einer Analyse der energiewirtschaftlichen Strukturen in Baden-Württemberg werden die thermischen und chemischen Emissionen und deren regionale Verteilung bestimmt. Das Problem der Auswirkungen von Umweltbelastungen wird am Beispiel der radiologischen Belastungen sowie der Belastungen durch SO<sub>2</sub>-haltige Luft angesprochen. Für das regionale Gebiet des Oberrheins werden die Belastbarkeit des Rheins mit Abwärme, die Auswirkungen von Naßkühltürmen mit Naturzug, die radiologische Belastung durch kerntechnische Anlagen sowie die atmosphärische Belastung durch SO<sub>2</sub> untersucht.

## Abstract

ENERGY AND THE ENVIRONMENT IN BADEN-WÜRTTEMBERG. In this study the environmental impacts of energy production and consumption are investigated. Special emphasis is placed upon the energy conversion sector, i.e. power stations and refineries and upon the regional problems of the Upper Rhein area. Thermal and chemical emissions, and their regional distribution, are determined from a regional analysis of the energy statistics of Baden-Württemberg. The problem of the effects of environmental pollution is addressed by two examples: effects of ionizing radiation and epidemiological analyses of air pollution (SO<sub>2</sub>).

For the regional area of the Upper Rhein the following problems are investigated in greater detail:

- thermal capacity of the Rheinriver under various meteorological conditions
- effects of wet cooling towers with natural draft
- expected radiation doses from nuclear facilities
- air pollution, i.e. a map of the regional SO<sub>2</sub>-concentrations calculated from data on emissions and meteorological conditions.

Am 29. März 1973 hat das Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr Baden-Württemberg das Institut für Angewandte Systemtechnik und Reaktorphysik beauftragt, ein ergänzendes Gutachten zum Thema "Energieversorgung und Umweltschutz in Baden-Württemberg" zu erstellen. Dieses Gutachten sollte sich am Gesamtkonzept eines Gutachtensauftrags ausrichten, den das Ministerium zum gleichen Zeitpunkt der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, erteilt hat. Die Untersuchungen des IASR sollten sich dabei schwerpunktmäßig einmal sektoral auf den Bereich der Energieumwandlung, zum andern regional auf das Oberrheingebiet konzentrieren.

Der Gutachtensauftrag mit den für das IASR vereinbarten Schwerpunkten und Änderungen (im Text unterstrichen) hat folgenden Wortlaut:

## G u t a c h t e n

über

"Energieversorgung und Umweltschutz in Baden-Württemberg"

Das Gutachten soll

- soweit darüber heute Erkenntnisse vorliegen oder in dem zur Verfügung stehenden Zeitraum Untersuchungen durchgeführt werden können -

die Auswirkungen der Energieversorgung auf die Umwelt in Baden-Württemberg und einzelnen Teilräumen des Landes heute und in der vorhersehbaren Zukunft darstellen,

die Umweltbelastung durch die einzelnen Arten der Energieversorgung vergleichend gegenüberstellen,

heute oder künftig mögliche Maßnahmen zur Verringerung der Umweltbelastung einschließlich ihrer wirtschaftlichen Auswirkungen aufzeigen und

Empfehlungen für eine Sicherstellung der Energieversorgung unter möglichst geringer Umweltbelastung und zu möglichst günstigen Preisen geben.

Im einzelnen sollen folgende Fragen behandelt werden:

1. Die spezifischen Emissionen und Umweltgefahren bei

- a) Gewinnung / Erzeugung,
- b) Transport,
- c) Lagerung und
- d) Endeinsatz zur Erzeugung von Nutzenergie im industriellen und im privaten Bereich

der verschiedenen Energieträger sollen dargestellt werden, soweit sie für Baden-Württemberg Bedeutung haben.

2. Die energiewirtschaftliche Gesamtstruktur und die aus den Energieumsetzungen resultierenden thermischen wie stofflichen Emissionen bzw. - soweit möglich - Immissionen sollen nach Verbrauchssektoren und Nutzungsarten

- a) für ganz Baden-Württemberg
- b) für das Oberrheingebiet

aufgrund der verfügbaren Daten für 1971 aufgegliedert werden.

3. Die entsprechenden Werte für 1980 sollen auf der Grundlage der Untersuchung des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung Berlin "Die regionalen Entwicklungstendenzen des Energieverbrauchs in Baden-Württemberg und seinen Regierungsbezirken bis 1980" vom Februar 1970 und ihrer (nicht regional aufgeschlüsselten) Fortschreibung vom Februar 1972 ermittelt und kommentiert werden.

4. Aufgrund einer Gesamtbetrachtung der Prozeßketten sollen Prioritäten unter dem Gesichtspunkt der geringstmöglichen Umweltbeeinflussung beim heutigen Stand der Technik

- a) für den Einsatz der verschiedenen Energieträger allgemein oder in bestimmten Teilen des Landes
- b) für die Art der Beschaffung der verschiedenen Energieträger

gesetzt werden, wobei auf begrenzende Faktoren einer Realisierung dieser Prioritäten hingewiesen werden soll.

5. Unter Berücksichtigung der heute abschätzbaren technologischen Weiterentwicklung sollen Möglichkeiten zur künftigen Verminderung der (spezifischen) Umweltbeeinflussung durch die Energieversorgung (z.B. durch integrierte Versorgungskonzeptionen, Wärmedämmung, Abwärmenutzung, neue Kühlmethoden, Entschwefelung usw.) herausgearbeitet und unter dem Aspekt
  - a) der Art und des Ausmaßes dieser Verminderung
  - b) der unmittelbaren wirtschaftlichen Auswirkungendiskutiert werden.
  
6. Aus einer Gesamtschau aller Ziele der Energiepolitik und unter Einbeziehung allgemeiner volkswirtschaftlicher Gesichtspunkte sollen auf der Grundlage der energiewirtschaftlichen Gegebenheiten und Möglichkeiten Empfehlungen (Leitlinien) für die Energiepolitik, besonders in Baden-Württemberg, gegeben werden.

Die hier vorgelegte Studie kann die Fragen des Auftraggebers, insbesondere wegen der Kürze des Bearbeitungszeitraums, der zur Verfügung stand, nur zum Teil beantworten. So wird z.B. der Verkehrssektor in seinen Umweltauswirkungen nicht analysiert. Auch wird bei allen Analysen von einer normalen Funktionsweise der Anlagen ausgegangen, also Umweltauswirkungen auf Grund von Störfällen nicht miteinbezogen.

Um zusammenfassende Empfehlungen für eine Energiepolitik Baden-Württembergs geben zu können, ist im wesentlichen die Kenntnis folgender, die Vielschichtigkeit des Problems "Energieversorgung und Umweltschutz" in etwa abdeckender Zusammenhänge notwendig:

- 1) der von den orographischen und meteorologischen Verhältnissen eines Raumes abhängige Zusammenhang von Emission zu Immission
  
- 2) der durch die Immission verursachte Schaden
  
- 3) die Beurteilungsmaßstäbe für solche Schäden unter Einbeziehung der Nutzenaspekte jener Aktivitäten, die diese Schadstoffe verursachen

- 4) die technologischen Möglichkeiten einer Emissionsreduktion und ihre ökonomischen Rückwirkungen
- 5) der Einfluß von Maßnahmen in der Wirtschaftsstruktur bzw. von Raumordnungsmaßnahmen auf die Immissionen
- 6) der Einfluß des Verbraucherverhaltens auf die Emission.

Es wurde in der vorliegenden Studie versucht, auf dem Gebiet der Wärmebelastung und der chemischen und radiologischen Belastung den Zusammenhang 1 und, soweit dies beim derzeitigen Stand des Wissens möglich war, den Zusammenhang 2 zu erarbeiten. Hinweise ergeben sich auch zum Zusammenhang 4, sowie in ersten Ansätzen zum Zusammenhang 5.

Die Studie vermittelt Einzelheiten und Hinweise für mögliche Handlungsrichtungen. Sie wird deshalb sicherlich zu Denkanstößen führen, die eine wenigstens pragmatische Lösung energiepolitischer Probleme möglich machen werden. Die Weiterarbeit an eben diesen Problemen ist nötig.

Die in dieser Studie behandelten Probleme führen sowohl von der Datenbeschaffung her als auch bezüglich der Analysemodelle und Beurteilungsmaßstäbe auf weiten Gebieten in Neuland. Die Autoren haben sich bemüht, obwohl vieles ungeklärt bleiben mußte, der Anforderung gerecht zu werden, Aussagen zu erarbeiten. Es sei von daher vermerkt, daß weitere Forschungsarbeiten dazu führen können, daß die eine oder andere Theorie geändert und die eine oder andere Aussage modifiziert werden muß.

  
(W. Häfele)

## I n h a l t

1. Die energiewirtschaftliche Gesamtstruktur Baden-Württembergs	1
1.1 Die Darstellung des Energieeinsatzes 1971	1
1.1.1 Die Mineralölwirtschaft	6
1.1.2 Die Kohlewirtschaft	7
1.1.3 Die Gaswirtschaft	7
1.1.4 Die Kernenergiewirtschaft	8
1.1.5 Die Elektrizitätswirtschaft	10
1.2 Eine Prognose des Energieeinsatzes für 1980 nach DIW	12
2. Grundsätzliches zur Umweltbelastung von Luft und Wasser durch den Energieeinsatz	17
2.1 Arten der Umweltbelastung	18
2.1.1 Thermische Emissionen, insbesondere aus Kraftwerken	18
2.1.2 Radioaktive Emissionen	22
2.1.3 Chemische Schadstoffemissionen	24
2.2 Probleme der Auswirkungen von Umweltbelastungen	30
2.2.1 Radiologische Belastung	31
2.2.2 Belastung durch SO <sub>2</sub> -haltige Luft	35
3. Die Emissionen aus dem Energieeinsatz in Baden-Württemberg	41
3.1 Thermische und Schadstoff-Emissionen 1971	41
3.1.1 Thermische Emissionen	41
3.1.2 Chemische Schadstoff-Emissionen	43
3.2 Thermische und Schadstoff-Emissionen 1980	46
3.2.1 Thermische Emissionen	46
3.2.2 Chemische Schadstoff-Emissionen	47
3.3 Die regionale Verteilung der thermischen und Schadstoff-Emissionen	49

4. Eine regionale Betrachtung am Beispiel des Oberrheingebiets	57
4.1 Die meteorologischen Verhältnisse im Oberrheingebiet	58
4.1.1 Sonnenscheindauer und Bodentemperaturen	58
4.1.2 Relative Feuchte- und Bodennebelhäufigkeit	60
4.1.3 Windverhältnisse	62
4.1.4 Stabilitätsverhältnisse der bodennahen Luft	62
4.1.5 Inversionen	65
4.1.6 Abschließende Bemerkungen	67
4.2 Belastbarkeit des Oberrheins durch Abwärme aus Kraftwerken	69
4.3 Die Auswirkungen von Naßkühltürmen mit Naturzug	79
4.3.1 Beschattung	79
4.3.2 Bodennebelbildung	83
4.4 Die radiologische Belastung im Oberrheingebiet	90
4.4.1 Tritium	93
4.4.2 Edelgase	98
4.4.3 Jod	98
4.4.4 Belastungen aus Wiederaufarbeitungsprozessen	99
4.5 Die atmosphärische Schadstoffbelastung (SO <sub>2</sub> ) am Beispiel der Modellregion "Nördlicher Oberrhein"	106
4.5.1 Das Gebiet - die Energiesituation - die Emissionen	106
4.5.2 Eine Modellsimulation der SO <sub>2</sub> -Immissionsbelastung	110
4.5.3 Analyse zukünftiger Entwicklungen der SO <sub>2</sub> - Immissionsbelastung	123
5. Auswertungen und Schlußfolgerungen	131
Anhänge	
Anhang A zu Abschnitt 4.2	139
Anhang B zu Abschnitt 4.3	144
Anhang C zu Abschnitt 4.5	146
Anhang D zu Abschnitt 4.5	151
Literatur	162

# 1. Die energiewirtschaftliche Gesamtstruktur Baden-Württembergs

## 1.1 Die Darstellung des Energieeinsatzes 1971

Ausgangsbasis für eine Analyse der gesamten energiewirtschaftlichen Prozesse von der Gewinnung bzw. Einfuhr der einzelnen Energieträger über den Umwandlungsbereich bis zum Endverbrauch ist die ENERGIEBILANZ BADEN-WÜRTTEMBERG 1971 des Wirtschaftsministeriums /1/. Sie ist in zusammengefaßter Form in den Tab. 1 und 2 sowie als Energiefluß-Bild in Abb. 1 wiedergegeben.

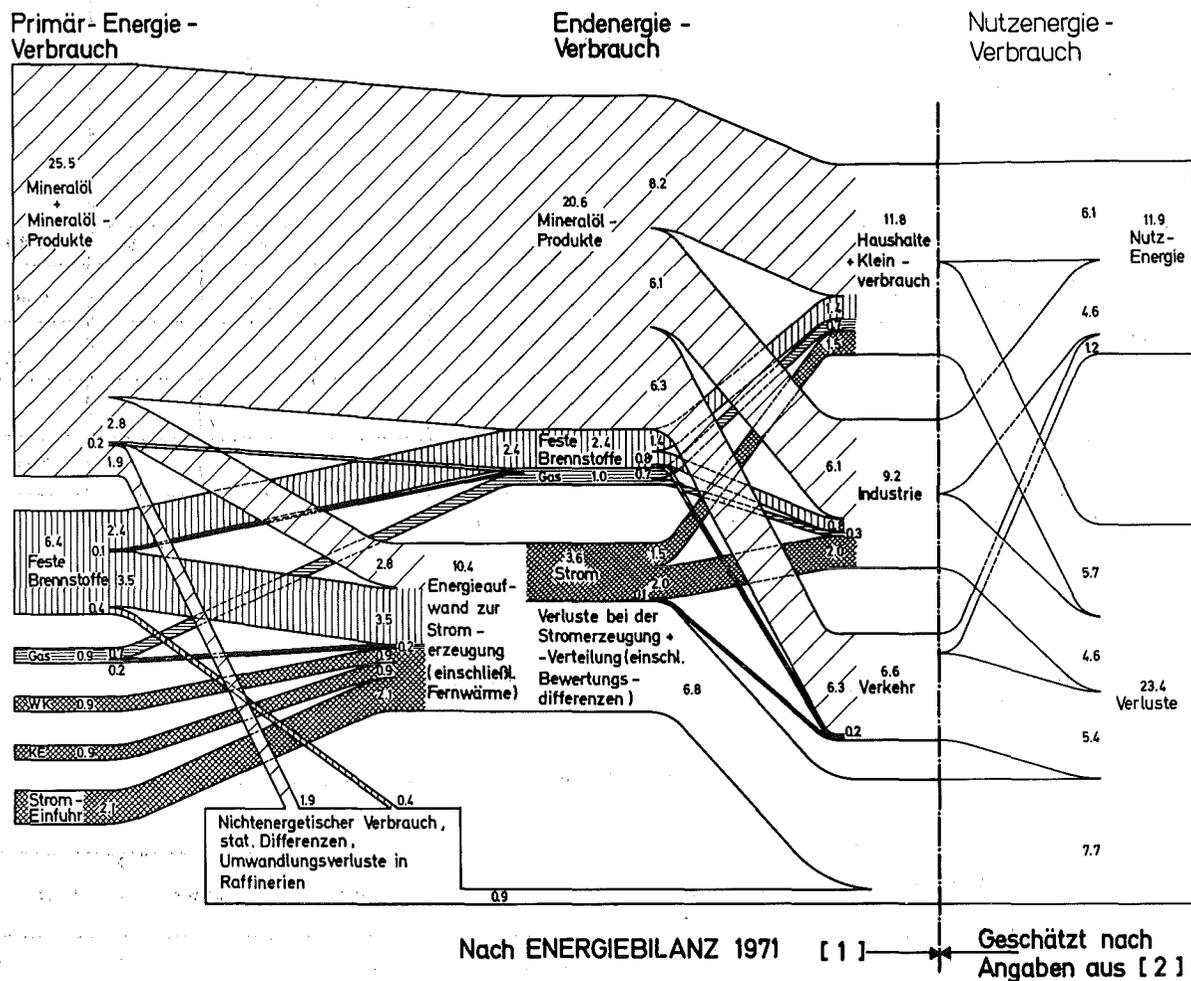


Abb. 1 Energiefluß in Baden-Württemberg 1971 (Zahlen in Mio t SKE)

Tab. 1 Energiebilanz Baden-Württemberg 1971  
(in 1000 t SKE)

	Feste Brennstoffe (Kohle)	Mineralöl und -Produkte (flüssig)	Gas	Wasserkraft	Kernenergie	Strom	Fernwärme	Gesamt	
Primärenergieverbrauch (in %)	6 400 (17,4)	25 490 (69,6)	870 (2,4)	910 (2,5)	880 (2,4)	2 090 (5,7)		36 640 (100,0)	
Energie-Umwandlungsbilanz	Umwandlungseinsatz								
	Gaswerke	180	80	140					
	öff. Wärmekraftwerke	3 240	1 980	120					
	ind. Wärmekraftwerke	100	640	50					
	Wasserkraftwerke				910		160		
	Kernkraftwerke					880			
	Fernheizwerke	190	200						
	Raffinerien		23 620	380					
	Gesamt	3 710	26 520	690	910	880	160		32 870
	Umwandlungsausstoß								
Gaswerke	120		240						
öff. Wärmekraftwerke						2 170			
ind. Wärmekraftwerke						420			
Wasserkraftwerke						440			
Kernkraftwerke						320			
Fernheizwerke							350		
Raffinerien		23 460	1 450						
Gesamt	120	23 460	1 690			3 350	350	28 970	
Verbrauch + Verluste im Energiesektor		460	600			1 970 <sup>a)</sup>	20	3 050	
Nichtenergetischer Verbrauch		1 350	170					1 520	
Statistische Differenzen	- 390		- 120					- 510	
Endenergieverbrauch	2 420	20 620	980			3 310	330	27 660	

a) einschl. Differenzbetrag aus der unterschiedlichen Bewertung des Stroms

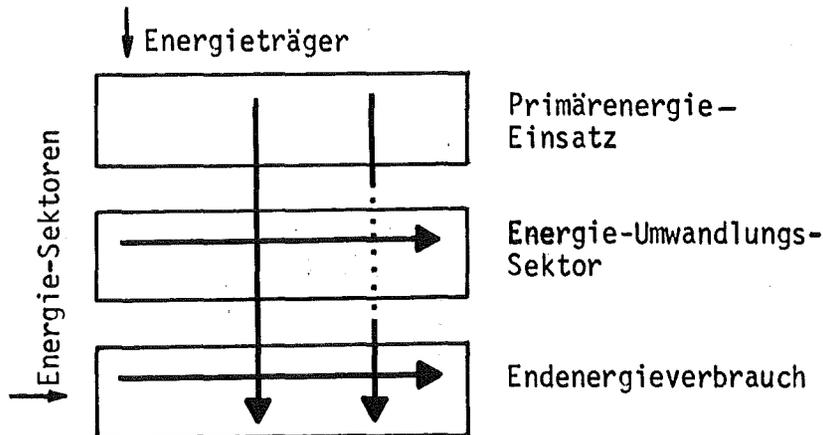
Tab. 2 Endenergieverbrauch Baden-Württemberg 1971

a) in 1000 t SKE

b) in % (Anteil der Energieträger bei den Verbrauchssektoren)

	Feste Brennstoffe		Heizöl		Kraftstoffe		Gas		Strom		Fernwärme		Gesamt	
	a)	b)	a)	b)	a)	b)	a)	b)	a)	b)	a)	b)	a)	b)
Industrie	780	8,5	5 940	64,5	240	2,6	270	2,9	1 820	19,8	160	1,7	9 210	100,0
Haushalte + Kleinverbrauch	1 400	11,8	8 020	67,7	200	1,7	710	6,0	1 350	11,4	170	1,4	11 850	100,0
Verkehr	240	3,6	200	3,1	6 020	91,2	-	-	140	2,1	-	-	6 600	100,0
Gesamt	2 420	8,7	14 160	51,2	6 460	23,4	980	3,5	3 310	12,0	330	1,2	27 660	100,0

Die Energiebilanz ist nach folgendem Schema aufgebaut:



Man unterscheidet drei Hauptteile: den Primärenergieeinsatz (die Energiedarbietung in der ersten vorliegenden Stufe), den Umwandlungssektor (den eigentlichen Bereich der Energiewirtschaft) und den Endenergieverbrauch. Aus den Spalten der Energiebilanz (senkrechte Pfeile) sind die Prozeßschritte zu entnehmen, die die einzelnen Energieträger durchlaufen; die Zeilen (waagrechte Pfeile) geben die Energieumsetzungen in den einzelnen Sektoren an.

Die ENERGIEBILANZ weist für 1971, das Referenzjahr für die Ermittlung des Ist-Zustandes, einen Primärenergieverbrauch von 36,6 Mio. t SKE aus und setzt sich nahezu ausschließlich aus importierten Energieträgern zusammen. Nennenswerte Energiereserven besitzt das Land nicht - die eigene Energiegewinnung (in Tab. 1 nicht ausgewiesen) macht mit 1,4 Mio t SKE nur 4 % des gesamten Primärenergieverbrauchs aus und besteht überwiegend in der Nutzung von Wasserkraft. Nutzbare Kohlevorräte fehlen vollkommen; in Oberschwaben und im Oberrheintal existieren geringe Erdöl- und Erdgasvorkommen, die genutzt werden; der Vollständigkeit halber seien noch geringe Uranvorkommen im südlichen Schwarzwald erwähnt.

Auffallend ist der überragende Anteil des Mineralöls und seiner Produkte am Energieverbrauch - 69,6 % des Primärenergieverbrauchs und 74,6 % des Endenergieverbrauchs. Dieser Anteil liegt deutlich über dem Bundesdurchschnitt, wie aus Tab. 3. zu ersehen ist.

Der Strukturwandel von der Kohle zum Mineralöl in den vergangenen 15 Jahren hat sich in Baden-Württemberg stärker vollzogen als im übrigen Bundesgebiet.

Bemerkenswert ist auch der vergleichsweise hohe Anteil am Primär-Stromaufkommen (Wasserkraft und Stromeinfuhr). Demgegenüber hat sich die Gasversorgung schwächer entwickelt als im Bundesdurchschnitt.

Tab. 3 Anteil der Energieträger am Primärenergie-Verbrauch 1971

	in Baden- Württemberg	in der BRD (nach /3/)
Kohle	17,4 %	35,7 %
Mineralöl	69,6 %	54,8 %
Gas	2,4 %	7,1 %
Kernenergie	2,4 %	0,6 %
Wasserkraft	2,5 %	1,2 %
Strom	5,7 %	0,6 %
Gesamt	100,0 % ± 36,6 Mio t SKE	100,0 % ± 339,4 Mio t SKE

Im Energieumwandlungsbereich ist die elektrische Stromerzeugung aus Wärme- und Wasserkraftwerken sowie die Verarbeitung von Rohöl in Raffinerien besonders hervorzuheben. Abb. 2 zeigt die Standorte dieser Anlagen in Baden-Württemberg.

Der Endenergieverbrauch (vgl. Tab. 2) ist in die drei Sektoren

Industrie	33 %
Haushalte + Kleinverbrauch	43 %
Verkehr	24 %

aufgegliedert. Der Sektor Industrie umfaßt den gesamten Bereich der industriellen Produktion ohne die Teilbereiche der Energiewirtschaft. Im Sektor Haushalte + Kleinverbrauch sind private Haushalte, Handel und Gewerbe, öffentliche Einrichtungen und die Landwirtschaft zusammengefaßt. Nicht enthalten im Endenergieverbrauch dieser beiden Sektoren ist der Energieverbrauch für Kraftfahrzeuge; dieser Beitrag ergibt zusammen mit dem Energieverbrauch des gewerblichen Transportwesens (Schiene, Straße, Wasser, Luft) den Sektor Verkehr.

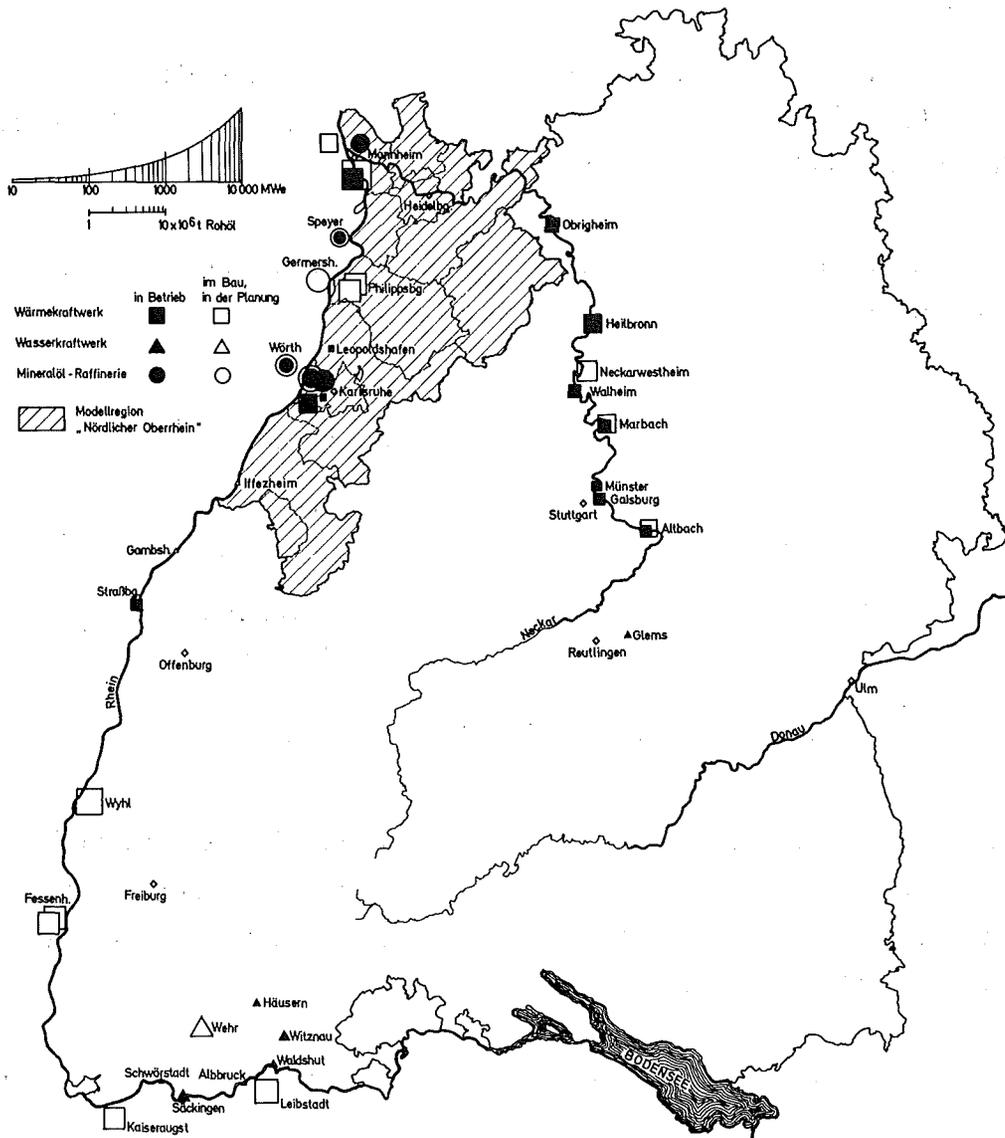


Abb. 2 Kraftwerke und Mineralölraffinerien in Baden-Württemberg und den angrenzenden Gebieten  
(in Betrieb: bis Ende 1971,  
im Bau, in der Planung: bis 1980 in Betrieb)

Im folgenden wird in Kurzform die Struktur der einzelnen Teilbereiche der Energiewirtschaft (vgl. die Spalten der Tab. 1) analysiert.

### 1.1.1 Die Mineralölwirtschaft

Der Primärenergieverbrauch an Mineralöl betrug 25,5 Mio t SKE, davon wurden 23,6 Mio t SKE ( $\hat{=}$  16,3 Mio t) als Rohöl und per Saldo 1,9 Mio t SKE als Mineralölfertigprodukte importiert.

Zur Verarbeitung des Rohöls stehen drei Raffinerien im nordbadischen Raum zur Verfügung /4/:

	nominelle Jahreskapazität *)
ESSO, Karlsruhe	9,0 Mio t Rohöl
OMW, Karlsruhe	7,0 Mio t Rohöl
ERM, Mannheim	<u>3,6 Mio t Rohöl</u>
	19,6 Mio t Rohöl

\*) (effektive Jahreskapazität ca. 85 %)

Die Herkunft des Rohöls ist u.a. im Hinblick auf den Schwefelgehalt von Bedeutung: etwa 2/3 der 1971 in den Raffinerien Baden-Württembergs verarbeiteten Rohöle waren schwefelarme Rohöle aus dem nordafrikanischen Raum, das letzte Drittel stammt nahezu vollständig aus dem Nahen Osten.

Das Rohöl wird in Erdölleitungen nach Baden-Württemberg transportiert /4/:

- a) SPLSE (Société du Pipe-Line Sud-Européen)  
von Marseille nach Karlsruhe,
- b) TAL, Abschnitt RDO (Rhein-Donau-Leitung) von  
Ingolstadt nach Karlsruhe; wobei Ingolstadt  
durch Leitungen mit Triest und Genua verbunden ist,
- c) Raffinerie-Stichleitung von Karlsruhe nach  
Mannheim.

Die Verarbeitung des Rohöls in den Raffinerien erfolgt durch physikalische und chemische Verfahren unter Einsatz von Energie (Eigenverbrauch: Raffineriegas, schweres Heizöl, Destillationsrückstände).

Die Fertigprodukte (nach Abzug des Eigenverbrauchs) zeigen nach /1/ folgendes Spektrum:

Benzine	21 %
Dieselmkraftstoff	8 %
Leichtes Heizöl	33 %
Schweres Heizöl	29 %
Gase	4 %
Sonstiges	5 %

1971 haben die Mineralölfertigprodukte die Raffinerien zu 36 % auf der Straße, zu 32 % auf der Schiene, zu 25 % auf dem Wasser und zu 7 % in (lokalen) Produktleitungen verlassen (nach Angaben der Mineralölwirtschaft). Mehr als 80 % der Mineralölfertigprodukte werden im Endenergieverbrauch eingesetzt, der übrige Teil im Umwandlungsbereich und als nicht-energetische Produkte. Es liegen keine Angaben vor, in welchem Umfang die aus baden-württembergischen Raffinerien erzeugten Produkte auch im eigenen Land verbraucht werden - die Mineralölwirtschaft schätzt diesen Anteil auf etwa 40 %. De facto werden also ca. 10 Mio t Mineralölfertigprodukte aus Baden-Württemberg exportiert - umgekehrt kommen insgesamt ca. 12 Mio t als Importe nach Baden-Württemberg.

#### 1.1.2 Die Kohlewirtschaft

Hierzu zählen Steinkohle in Form von Kohle, Koks und Briketts, und Braunkohle in Form von Briketts. Auf das Fehlen eigener Kohlevorräte im Lande wurde bereits hingewiesen, sämtliche Kohle wird importiert, und zwar ca. 90 % aus der BRD - überwiegend aus dem Ruhrgebiet; der Rest aus dem Ausland. Der Transport erfolgt zu etwa gleichen Anteilen per Schiff und per Bahn. 60 % der Kohle wird im Umwandlungssektor eingesetzt, vorwiegend zur Stromerzeugung, der übrige Teil im Endenergieverbrauch.

#### 1.1.3 Die Gaswirtschaft

Die Gasversorgung, die in den vergangenen Jahren ausschließlich auf dem Bezug bzw. der Erzeugung von Stadtgas auf der Basis der Kohle-Verkokung beruhte, wurde in zunehmendem Maße auf Erdgas umgestellt. Dieser Umstellungsprozeß war 1971 noch im Gange. Die ENERGIEBILANZ /1/ umfaßt sowohl die

öffentliche Gasversorgung wie auch die Eigenerzeugung und den Eigenverbrauch der Raffinerien. Wenn man den letzteren Anteil ausklammert, so ergibt sich folgendes Bild:

Tab. 4 Gas-Bilanz Baden-Württemberg 1971

<u>Gasaufkommen</u>	10 <sup>3</sup> t SKE	<u>Gasverwendung</u>	10 <sup>3</sup> t SKE
Bezug von außen (davon 87 % Erdgas)	870	Einsatz in Kraftwerken	170
Netto-Ausstoß der Gaswerke	50	Endverbrauch Industrie	270
Netto-Ausstoß der Raffinerien	430	Haushalt + Kleinverbrauch	710
		Verluste, Stat. Differenzen	200
Gesamt	1 350	Gesamt	1 350

#### 1.1.4 Die Kernenergiewirtschaft

Die kommerzielle Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung stand 1971 mit zwei in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken noch in ihren Anfängen.

Das Kernkraftwerk Obrigheim (345 MWe) gehört in die Reihe der Demonstrationskernkraftwerke des deutschen Atomprogramms (Kernkraftwerke in der Größenklasse von 300 MWe mit der Aufgabe, die Wirtschaftlichkeit der Kernenergie-Nutzung zu demonstrieren und ihre Eignung im elektrischen Verbundbetrieb zu beweisen. Sie sind mit Zuschüssen der öffentlichen Hand errichtet worden). KKW Obrigheim ist vom Typ Leichtwasserreaktor (ein Druckwasserreaktor); das ist der Typ von Reaktoren, die heute in Deutschland in kommerziellen Anlagen in der Größe von 600 bis 1300 MWe in Betrieb bzw. im Bau und in Planung sind.

Der MZFR (Mehr-Zweck-Forschungs-Reaktor, 57 MWe) ist ein Versuchskernkraftwerk mit Schwerwasser-Natururan-Reaktor auf dem Gelände des Kernforschungszentrums Karlsruhe.

Kernkraftwerke machen nur einen Teil der gesamten Prozeßkette der Kernenergiewirtschaft aus, allerdings den wichtigsten, da hier die Nutzung der Energie aus den Atomkernen stattfindet. Die gesamte Kette umfaßt den Weg des Kernbrennstoffs Uran von der Gewinnung bis zur Beseitigung der Abfallprodukte, d.h. den nuklearen Brennstoffkreislauf insgesamt. Die Einzelschritte sind dabei

- Gewinnung von Natururan durch Abbau und Aufarbeitung von Uranerz ( $\rightarrow \text{U}_3\text{O}_8$ )
- Uran-Konversion ( $\text{U}_3\text{O}_8 \rightarrow \text{UF}_6$ )
- Anreicherung des natürlichen Gehalts an Uran-235 zur Verwendung in heutigen Leichtwasserreaktoren ( $\text{UF}_6$ )
- Herstellung von Brennelementen für den Einsatz in Reaktoren ( $\text{UF}_6 \rightarrow \text{UO}_2$ )
- Energiefreisetzung durch Kernspaltungsprozesse in Kernkraftwerken
- Transport von bestrahlten Brennelementen
- Wiederaufarbeitung von bestrahlten Brennelementen, d.h. Trennung des nicht verbrauchten Urans und des neu entstandenen Plutoniums von den radioaktiven Abfallprodukten
- Zwischen- und Endlagerung der radioaktiven Abfallprodukte

Zur Zeit finden in Baden-Württemberg - was den kommerziellen Bereich betrifft - nur die Schritte Energiefreisetzung durch Kernspaltungsprozesse in Kernkraftwerken mit nachfolgendem Transport von bestrahlten Brennelementen statt; alle übrigen Schritte fallen außerhalb des Landes bzw. außerhalb der BRD an. Die übrigen Schritte sind hier mit aufgeführt, weil auf Sicht der bedeutsamere Beitrag der Kernenergie zur Umweltbeeinflussung aus dem Brennstoffkreislauf und hier insbesondere aus der Wiederaufarbeitung zu erwarten ist. Hinzu kommt, daß eine Versuchsanlage zur Wiederaufarbeitung von Brennelementen (WAK Karlsruhe) in Baden-Württemberg betrieben wird, die neben der Wiederaufarbeitung von Brennelementen aus deutschen Forschungs- und Versuchsreaktoren auch die teilweise Wiederaufarbeitung von Brennelementen aus Obrigheim im Programm haben wird (nicht jedoch die Wiederaufarbeitung von Brennelementen aus kommerziellen Kernkraftwerken).

### 1.1.5 Die Elektrizitätswirtschaft

Die Elektrizitätswirtschaft ist ein Zweig der Energiewirtschaft, der mit allen bisher genannten Energiewirtschaftszweigen verflochten ist.

Einen Überblick über Elektrizitätserzeugung und -Verbrauch gibt Tab. 5; in Tab. 6 sind die Anlagen zur Elektrizitätserzeugung angegeben (zusammengestellt nach /1, 4-7/, siehe auch Abb. 2). Die Bruttoerzeugung betrug 1971 27 210 GWh, zusammen mit der Stromeinfuhr standen 41 099 GWh zur Verfügung. Die gesamte installierte Kraftwerks-Engpaßleistung der öffentlichen Versorgung lag Ende 1971 bei 5 400 MWe, aufgeteilt auf die Bereiche Wärmekraft, Wasserkraft und Kernenergie.

Tab. 5 Elektrizitätsbilanz Baden-Württemberg 1971  
(in GWh)

<b>Aufkommen</b> =====		<b>Verwendung</b> =====	
Öffentl. Elektrizitäts-Werke	22 446	<b>Nettoverbrauch</b>	
davon Wasserkraft	3 234	Industrie	14 835
Wärmekraft	16 621	davon aus öff. Netz	11 481
Kernenergie	2 591	Eigenanlagen	3 354
Industrie	3 766	Haushalte	5 932
davon Wasserkraft	325	Handel + Gewerbe	2 761
Wärmekraft	3 441	Öffentl. Einrichtungen	1 524
Deutsche Bundesbahn	998	Landwirtschaft	684
Inland gesamt	27 210	Verkehr	1 148
Stromeinfuhr	13 889	Netto-Verbrauch gesamt	26 884
Brutto-Verfügung gesamt	41 099	Stromausfuhr	7 733
<b>Verteilung</b> =====		<b>Eigenverbrauch der El. Wirtschaft</b>	
Öffentliches Netz	36 501	Pumpspeicher	1 303
davon Eigenerzeugung	22 446	Eigenverbrauch der Kraftwerke	1 588
Industrieeinspeisung	166	Obertragungsverluste	3 591
Stromeinfuhr	13 889	Eigenverbrauch gesamt	6 482
Eigenverbrauch Industrie	3 600	Brutto - Verwendung gesamt	41 099
Eigenverbrauch Deutsche Bundesbahn	998		
Verteilung gesamt	41 099		

Tab. 6 Kraftwerke der öffentlichen Versorgung  
in Baden-Württemberg  
(größer 50 MWe)

Stand: Ende 1971

<u>Wärme- und Wasserkraftwerke (Steinkohle, Öl, Gas)</u>		
Großkraftwerk Mannheim	Mannheim	847 MWe (+113 MWe Einphasen- Bahnstrom)
Badenwerk	Karlsruhe	690 MWe
Energie-Versorgung Schwaben	Heilbronn	603 MWe
	Marbach (I + II)	290 MWe
Neckarwerke	Altbach	316 MWe
	Walheim	267 MWe
Technische Werke Stuttgart	Gaisburg	250 MWe
	Münster	145 MWe (+ 36 MWe Einphasen- Bahnstrom)
Stadtwerke Karlsruhe	Karlsruhe	80 MWe
		<u>3 488 MWe</u>
Gesamte installierte Leistung in Baden-Württemberg		3 600 MWe
<u>Wasserkraftwerke</u>		
<u>Pumpspeicher mit natürlichem Zufluß</u>		
Schluchseewerk	Säckingen	360 MWe
	Häusern	110 MWe
	Witznau	190 MWe
	Waldshut	140 MWe
<u>Pumpspeicher ohne natürlichen Zufluß</u>		
Technische Werke Stuttgart	Glems	90 MWe
<u>Laufkraftwerke am Hochrhein (deutscher Anteil)</u>		
Rheinkraftwerk Albbruck-Doggern	Albbruck-Doggern	60 MWe
Kraftwerk Ryburg- Schwörstadt	Ryburg-Schwörstadt	54 MWe
		<u>1 004 MWe</u>
Gesamte installierte Leistung in Baden-Württemberg		1 395 MWe
<u>Kernkraftwerke</u>		
Kernkraftwerk Obrigheim	Obrigheim	345 MWe
MZFR Kernkraftwerk- Betriebsgesellschaft	Karlsruhe/Leopoldshafen	57 MWe
		<u>402 MWe</u>

### Die Wärmekraft

Das Rückgrat der Elektrizitätsversorgung bilden die konventionellen Wärmekraftwerke der öffentlichen Stromversorgung; Ende 1971 betrug die installierte Engpaßleistung 3 600 MWe. Die Brutto-Erzeugung in diesen Anlagen betrug 16 621 GWh, was einer mittleren Jahresausnutzung von 4 600 Volllaststunden entspricht. Die ENERGIEBILANZ /1/ weist dafür einen Brennstoffeinsatz von  $5\,340 \cdot 10^3$  t SKE aus und zwar 61 % Kohle, 37 % Öl, 2 % Gas. Die großen Kraftwerksanlagen stehen am Rhein zwischen Karlsruhe und Mannheim und am Neckar zwischen Plochingen und Heilbronn, d.h. einerseits in den Verbraucherschwerpunkten und andererseits an Stellen mit günstigem Kühlwasserangebot (siehe oberer Teil von Tab. 6).

### Die Wasserkraft

Hier werden vor allem die Wasserkräfte durch das Gefälle der natürlichen Wasservorkommen im Hochschwarzwald und am Hochrhein ausgenützt (siehe Mittelteil Tab. 6). Die Anlagen des Hochschwarzwaldes sind zudem Pumpspeichieranlagen für die Spitzenstrom-Bedarfsdeckung, die über den Bedarf Baden-Württembergs hinaus von Bedeutung sind. Die gesamte installierte Leistung der öffentlichen Versorgung an Wasserkraftanlagen betrug Ende 1971 1 395 MWe, das ist ein Anteil von 31 % der Wasserkraftanlagen in der BRD. Die Stromerzeugung betrug dabei 3 234 GWh, davon 2 360 GWh (73 %) als primäre Wasserkrafterzeugung und 874 GWh (27 %) als Rückgewinnung von Pumpspeicherstrom.

### Die Kernenergie

Wie schon erwähnt, waren 1971 zwei Kernkraftwerke mit zusammen 402 MWe in Betrieb; ihre Stromerzeugung betrug 2 591 GWh (entsprechend 6 500 Volllaststunden) - das sind etwa 10 % der gesamten Stromerzeugung in Baden-Württemberg.

#### 1.2 Eine Prognose des Energieeinsatzes für 1980 nach DIW

Für eine Prognose der Entwicklung des Energieeinsatzes lag die Untersuchung des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin, über DIE REGIONALEN ENTWICKLUNGSTENDENZEN DES ENERGIEVERBRAUCHS IN BADEN-WÜRTTEMBERG UND SEINEN REGIERUNGSBEZIRKEN BIS 1980 vom Februar 1970 vor, so-

wie eine (nicht regional aufgeschlüsselte) Fortschreibung vom Februar 1972 /8/. Diese Untersuchung beruht im wesentlichen auf einer Trendextrapolation für einzelne Verbrauchssektoren und Energieträger von der Vergangenheit in die Zukunft. Aufgrund der in /8/ vorliegenden Daten - es wurden die neueren Daten der Fortschreibung gewählt - konnte entsprechend der Tab. 1 die Energiebilanz Baden-Württemberg für das Jahr 1980 ermittelt werden. Tab. 7 zeigt diese Energiebilanz 1980. Die Zunahmen und Veränderungen im Energieeinsatz von 1971 bis 1980, wie sie sich aus einem Vergleich der Tabellen 1 und 7 ergeben, sind in Abb. 3 dargestellt.

Tab. 7 Energiebilanz Baden-Württemberg 1980  
(in 1000 t SKE)

	Feste Brennstoffe (Kohle)	Mineralöl und -Produkte (flüssig)	Gas	Wasserkraft	Kernenergie	Strom	Fernwärme	Gesamt
Primärenergieverbrauch (in %)	1 995 (3,4)	39 165 (66,6)	4 200 (7,2)	2 025 (3,4)	9 040 (15,4)	2 380 (4,0)		58 805 (100,0)
Energie-Umwandlungsbilanz	Umwandlungseinsatz-----							
	Wärme- kraftwerke	1 610	3 030	800				
	Wasser- kraftwerke				2 025			
	Kern- kraftwerke					9 040		
	Fern- heizwerke		750					
	Raffinerien		39 165					
	Gesamt	1 610	42 945	800	2 025	9 040		56 420
	Umwandlungs- ausstoß-----							
	Wärme- kraftwerke						2 200	
	Wasser- kraftwerke						790	
Kern- kraftwerke						3 530		
Fern- heizwerke							750	
Raffinerien		39 165						
Gesamt		39 165				6 520	750	46 435
Verbrauch + Verluste im Energiesektor	50	2 780				2 750 <sup>a)</sup>	70	5 650
Nichtenergetischer Verbrauch		2 820						2 820
Endenergieverbrauch	335	29 785	3 400			6 150	680	40 350
davon Industrie	200	8 360	1 350			2 870	280	13 060
Haushalte + Kleinverbrauch	100	13 170	2 050			3 050	400	18 770
Verkehr	35	8 255				230		8 520

a) einschl. Differenzbetrag aus der unterschiedlichen Bewertung des Stroms

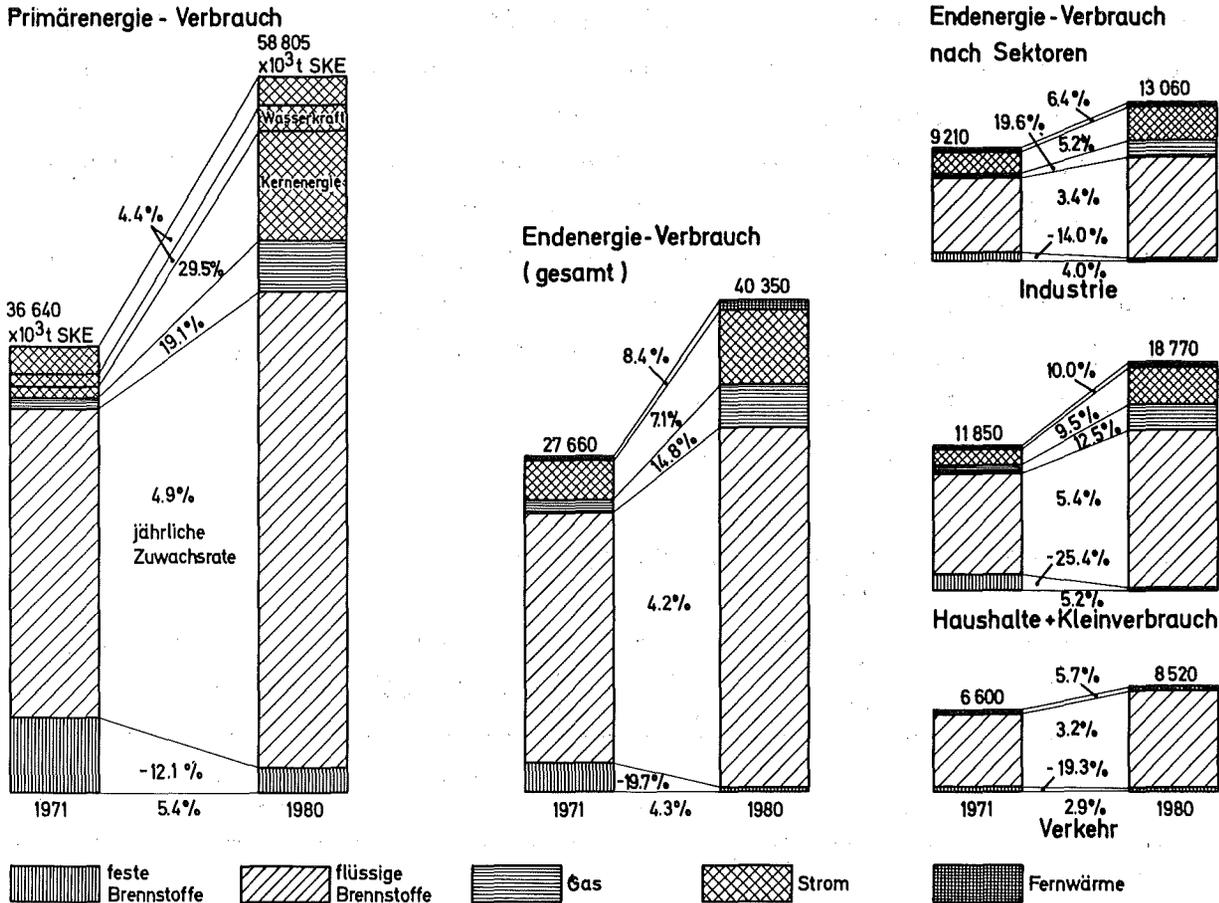


Abb. 3 Zunahme des Energieverbrauchs in Baden-Württemberg 1971 - 1980

Einige Aussagen aus Abb. 3 seien hier festgehalten (alle %-Angaben bedeuten jährliche Zuwachsraten):

- der Endenergieverbrauch wächst mit 4,3 % von 27,7 Mio t SKE auf 40,4 Mio t SKE.
- Der Primärenergieverbrauch wächst mit 5,4 % stärker als der Endenergieverbrauch. Dies ist auf die überproportionale Zunahme des Stromverbrauchs zurückzuführen.
- Der Sektor Industrie wächst mit 4 % leicht unterproportional, der Sektor Haushalte + Kleinverbrauch mit 5,2 % überproportional, der Sektor Verkehr mit 2,9 % stark unterproportional zum gesamten Endenergieverbrauch.
- Der Kohleverbrauch geht relativ und absolut sehr stark zurück.

- Der Anteil des Mineralöls ist 1971 und 1980 nahezu gleich.
- Gas und Kernenergie haben mit 19 % bzw. 29 % die höchsten Zuwachsraten; die Kernenergie deckt 1980 etwa 1/6 des Primärenergiebedarfs.

Bei den einzelnen Energiewirtschaftszeigen ergibt sich aufgrund der Ergebnisse der DIW-Studie /8/ folgendes Bild (siehe auch Abb. 2):

### Mineralölwirtschaft

Der Primärenergieverbrauch an Mineralöl beträgt 1980 39,2 Mio t SKE, er besteht ausschließlich aus Rohöl (entsprechend 27,2 Mio t) - die DIW-Studie geht davon aus, daß die Mineralölverarbeitung zu 100 % dem Verbrauch im eigenen Land entspricht. Hierzu wird ein Bedarf an Verarbeitungs-Kapazität von 32,5 Mio t Rohöl pro Jahr angesetzt, das entspricht einem Zubau an Raffinerie-Kapazität von 13 Mio t/a Rohöl. Nach den Angaben der Mineralölwirtschaft (Ende 1973) sind Erweiterungen von insgesamt 8,5 Mio t/a geplant - ERM Mannheim von 3,6 Mio t/a auf 6,6 Mio t/a (davon ist der Ausbau auf 5,6 Mio t/a bis 1973 bereits erfolgt) und OMW Karlsruhe von 7 Mio t/a auf 12,5 Mio t/a. Somit besteht 1980 ein Defizit an Raffineriekapazität von 5 Mio t/a Rohöl, das durch einen Neubau abzudecken ist.

### Kohlewirtschaft

Der Kohleverbrauch ist mit 2 Mio t SKE 1980 auf 1/3 des Einsatzes von 1971 zurückgegangen. Kohle kommt im Endenergieverbrauch praktisch nicht mehr vor, sie wird im wesentlichen in Kraftwerken zur Stromerzeugung eingesetzt.

### Gaswirtschaft

Der Gasverbrauch steigt bis 1980 etwa auf die 5-fache Menge (4,2 Mio t SKE). Nach den Angaben der DIW-Studie handelt es sich ausschließlich um Fremdbezug von Erdgas.

### Elektrizitätswirtschaft

Die DIW-Studie betrachtet die öffentliche und die industrielle Elektrizitätswirtschaft gemeinsam. Beim Brutto-Stromaufkommen ergibt sich folgender Vergleich zwischen 1971 und 1980:

Tab. 8 Brutto-Stromaufkommen in  
Baden-Württemberg 1971 und 1980

Brutto-Stromaufkommen	1971		1980	
	GWh	%	GWh	%
Kohle/Öl/Erdgas	21 060	63,1	17 900	29,5
Wasserkraft	3 559	10,7	6 430	10,6
Kernenergie	2 591	7,8	28 700	47,4
Netto-Import	6 156	18,4	7 570	12,5
Gesamt	33 366	100,0	60 600	100,0

Im konventionellen Wärmebereich ist ein Rückgang in der Erzeugung von 21 060 GWh auf 17 900 GWh zu verzeichnen, die zu 30 % aus Kohle, zu 55 % aus Öl und zu 15 % aus Erdgas erzeugt werden. Auf der anderen Seite gibt die DIW-Studie eine Zunahme der installierten Engpaßleistung (von ca. 4 200 MWe) auf 4 900 MWe an. Hier zeigt sich, daß die Wärme 1980 vom Grundlast- in den Mittellastbereich verdrängt worden ist. Um diese Kapazität zu erreichen, ist ein Zubau an Kraftwerksleistung von (netto) 700 MWe notwendig, in Wirklichkeit ist der erforderliche Zubau größer, da mit Stilllegungen von alten Anlagen zu rechnen ist (nach DIW etwa 1 500 MWe). Folgende Ausbaupläne sind bekannt:

Großkraftwerk Mannheim	430 MWe	Inbetriebnahme 1973
	300 MWe	Inbetriebnahme 1976
Neckarwerke, Altbach	250 MWe	Inbetriebnahme 1973
EVS, Marbach	315 MWe	Inbetriebnahme 1974

Die Wasserkraft behält mit 6 430 GWh ihren Anteil von 10 % am Gesamtstromaufkommen bei. Zu erwähnen ist hier der Ausbau der Hornbergstufe des Hotzenwaldwerkes mit 960 MWe sowie der Bau von zwei Laufwasserwerken am Oberrhein bei Gamsheim und Iffezheim, deren deutscher Anteil 100 MWe beträgt.

Die Kernenergie übernimmt 1980 im wesentlichen die Grundlasterzeugung; 28 700 GWh, d.h. über 50 % der Bruttostromerzeugung werden 1980 aus Kernenergie erzeugt. Hierzu werden bis 1980 vier Kernkraftwerke in Betrieb genommen:

KKW Philippsburg I	900 MWe	Inbetriebnahme 1975
KKW Neckarwestheim	800 MWe	Inbetriebnahme 1976/77
KKW Philippsburg II	900 MWe	Inbetriebnahme 1978
KKW Süd (Wyhl)	1300 MWe	Inbetriebnahme 1979.

Die Kernkraftwerksplanungen entsprechen damit dem vom DIW genannten Bedarf.

## 2. Grundsätzliches zur Umweltbelastung von Luft und Wasser durch den Energieeinsatz

Eine umfassende Beurteilung der Umweltbelastung durch den Energieeinsatz stößt auf eine Reihe von Schwierigkeiten:

1. Eine Abgrenzung und Unterteilung des intuitiv einleuchtenden Begriffes Umwelt im Hinblick auf die Frage nach den wichtigen Umweltbelastungen ist schwierig.

In Abschnitt 2.1 wird die Betrachtung auf die Belastung der beiden Medien Luft und Wasser durch thermische, radioaktive und chemische (stoffliche) Emissionen beschränkt. Nicht berücksichtigt werden also z.B. die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes und die Flächenbeanspruchung durch die Errichtung von Energieerzeugungs- und Übertragungseinrichtungen oder Probleme der Lärmbelastung und der Abfallhandhabung.

2. Die wissenschaftlichen Voraussetzungen für die Feststellung und Beurteilung von Auswirkungen der einzelnen Umweltbelastungen auf Mensch bzw. Tier- und Pflanzenwelt sind nur sehr bedingt vorhanden.

In Abschnitt 2.2 werden an zwei Beispielen - der radiologischen und der  $\text{SO}_2$ -Belastung und ihren Wirkungen auf den Menschen - erste Ansätze zur Bewältigung dieser Problematik aufgezeigt.

3. Für die Beurteilung der Gesamtbelastung der Umwelt durch den Energieeinsatz wäre es notwendig, die aggregierte Wirkung der einzelnen Belastungsarten an bestimmten Orten und zu bestimmten Zeiten zu kennen. Die Voraussetzungen für die Entwicklung eines solchen Umweltbelastungsindex sind zur Zeit nicht gegeben.
4. Die Umweltbelastung aus dem Energieeinsatz und die damit für den Menschen verbundenen Risiken müßten mit Belastungen und Risiken anderer technologischer und ökonomischer Aktivitäten in Beziehung gebracht werden. Auch dafür ist zur Zeit die methodische Basis nicht entwickelt.

Im Sinne dieser Einschränkungen ist die Einteilung der folgenden Ausführungen

zu Arten und Auswirkungen von Umweltbelastungen als ein auf dem Stand der Kenntnis basierender, verbesserungsfähiger erster Ansatz zu sehen.

## 2.1 Arten der Umweltbelastung

### 2.1.1 Thermische Emissionen, insbesondere aus Kraftwerken

Energieverbrauch bedeutet Erzeugung von Wärme, die an die Umgebung abgegeben bzw. von ihr aufgenommen wird. Dies gilt sowohl für den Anteil der nicht genutzten oder nicht nutzbaren Verlustenergie ("unmittelbare" Abwärme) eines energetischen Prozesses als auch für den Anteil der Nutzenergie ("mittelbare" Abwärme). Auch der Nutzenergieanteil wird letztlich nahezu vollständig an die Umgebung abgegeben, und zwar einmal direkt - z.B. als Nutzwärme für die Raumheizung - zum anderen indirekt - z.B. über die Bewegungsenergie eines Kraftfahrzeugs. Die thermische Emission ist damit dem Verbrauch an Energie unmittelbar gleichzusetzen.

Einen Sonderfall, auf den im folgenden näher eingegangen wird, stellt der thermodynamische Umwandlungsprozeß von Wärme in elektrische Energie auf dem Umweg über mechanische Energie dar. Aufgrund eines Naturgesetzes kann Wärmeenergie nicht vollständig in elektrische Energie umgewandelt werden; ein Teil der Wärme fällt prozeßbedingt als sogenannte Abwärme an. Unter den heute vorliegenden technologischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten wird diese Abwärme durch ein Kühlmittel als Wärmeverlust an die Umgebung abgeführt, soweit sie nicht durch die Verbrennungsgase und durch unmittelbare Wärmeverluste der Anlage direkt abgegeben wird.

Man unterscheidet im wesentlichen drei Gruppen von Kühlverfahren: die Frischwasserkühlung (Durchlaufkühlung), die Kühlung mit Naßkühltürmen (Verdunstungskühlung) und die Trockenkühlung, letztere mit Hilfe von Trockenkühltürmen bzw. mittels direkter Luftkühlung.

Praktisch im Einsatz ist heute die Frischwasserkühlung und die Verdunstungskühlung als Rück-, Misch- oder Ablaufkühlung.

Bei den großen Kraftwerken Baden-Württembergs wird heute ausschließlich die

Frischwasserkühlung eingesetzt (zum Vergleich die Angaben der BRD: 55 % Frischwasserkühlung, 35 % Verdunstungskühlung, 10 % Mischkühlung /9/). Wie in Abschnitt 4.2 gezeigt wird, wird die Frischwasserkühlung in Zukunft nurmehr begrenzt verfügbar sein. Wirtschaftliche und technologische Gesichtspunkte legen es dann nahe, auf die nasse Rückkühlung überzugehen. Beide Kühlungsarten sind an das Vorhandensein von Wasser gebunden und von daher im Umfang ihrer Anwendung begrenzt. Während bei der Frischwasserkühlung die Temperaturerhöhung den begrenzenden Faktor darstellt, stellen bei der nassen Rückkühlung die Wasserverluste eine Grenze dar, um die übrigen Funktionen des Wassers (Ökologie, Schifffahrt, Trinkwasserversorgung) nicht zu gefährden. Auf längere Sicht wird die Abwärme aus Kraftwerken mit Hilfe von Trockenkühltürmen abzuführen sein. Die Entwicklung von Trockenkühltürmen großer Leistung steht heute noch in den Anfängen.

#### Frischwasserkühlung (Durchlaufkühlung)

Die Menge der abzuführenden Abwärme ist abhängig vom Wirkungsgrad des Kraftwerks. Große fossil beheizte Kraftwerke erreichen heute bei Frischwasserkühlung einen (Netto)-Wirkungsgrad von 40 %, während Kernkraftwerke mit Druck- oder Siedewasserreaktoren einen (Netto)-Wirkungsgrad von 32 % bzw. 34 % besitzen. Typische Wärmeverbrauchswerte bei Frischwasserkühlung für Kraftwerke in Baden-Württemberg zeigt die folgende Zusammenstellung:

Tab. 9 Spez. Wärmeverbrauch von Kraftwerken bei Frischwasserkühlung

	Fossil gefeuertes Kraftwerk (Kcal/KWh)	Kernkraftwerk mit Leichtwasserreaktor*) (Kcal/KWh)
Netto-Wärmeverbrauch	2 260	2 610
Umwandlung in elektrische Energie	860	860
Wärmeabgabe an das Kühlwasser	1 200	1 650
Wärmeabgabe an die Atmosphäre (Abgasverluste und Wärmeverluste der Anlage)	200	100

\*) Mittelwert aus Druckwasser- und Siedewasserreaktor

Aus einem fossil beheizten Kraftwerk wird demnach das 1,4-fache der erzeugten elektrischen Nettoleistung, bei Kernkraftwerken das 1,9-fache mit dem Kühlwasser abgeführt. Für eine Kraftwerksanlage von 1 000 MWe und bei einer Erwärmung des Kühlwassers im Kondensator um z.B.  $10^{\circ}\text{C}$  entsteht dabei ein Kühlwasserbedarf von  $33 \text{ m}^3/\text{sec}$  für das fossile Kraftwerk und von  $46 \text{ m}^3/\text{sec}$  für das Kernkraftwerk.

Dieses Kühlwasser wird dem Fließwasser entnommen und nach der Aufheizung wieder zurückgeleitet - die Frischwasserkühlung führt damit zu einer thermischen Gewässerbelastung. Da sich das Fließwasser teilweise durch Verdunstung wieder abkühlt, entsteht über die jeweilige Abkühlstrecke verteilt auch eine Belastung der Atmosphäre durch Feuchteemission.

### Verdunstungskühlung (nasse Rückkühlung)

Bei der nassen Rückkühlung wird das im Kondensator aufgeheizte Kühlwasser nachfolgend wieder abgekühlt. Dieser Prozeß wird in einem Turm durchgeführt, in welchem das Kühlwasser einem Luftstrom entgegenrieselt. Der Luftstrom kann durch die Kaminwirkung des Bauwerkes erzeugt werden, was hohe Türme erfordert (Kühlturm mit Naturzug). Ein niedriges Kühlturbauwerk benötigt für den erforderlichen Luftstrom Ventilatoren, die zur Geräuschentwicklung beitragen (zwangsbelüfteter Kühlturm). In Tab. 10 sind Daten von nassen Kühltürmen mit Naturzug zusammengestellt.

Da diese Art der Kühlung zu höheren Temperaturen im Kondensator als bei Frischwasserkühlung führt, ergibt sich eine Verschlechterung des thermodynamischen Wirkungsgrades. Diese Tatsache wirkt sich umso stärker aus, je niedriger die obere Temperatur des Wärme-Kraft-Prozesses liegt, d.h. sie fällt bei nuklear beheizten Kraftwerken stärker ins Gewicht als bei fossil beheizten Kraftwerken.

Die Verdunstungs- bzw. nasse Rückkühlung profitiert vom unterschiedlichen Energiegehalt der flüssigen und der gasförmigen Phase des Wassers ( $580 \text{ Kcal/kg}$  bei  $30^{\circ}\text{C}$ ). Die Wärmeabfuhr erfolgt hierbei mittels Verdunstung von Wasser (latente Wärme) und über Erwärmung des Wasserdampf-Luft-Gemisches (fühlbare Wärme) an die Atmosphäre. Die Summe aus latent und fühlbar abgegebener Wärmeenergie kann als Enthalpieemission beschrieben werden. Das nachstehende Beispiel beschreibt die Emissionsverhältnisse für einen nassen Kühlturm

Tab. 10 Daten nasser Kühltürme mit Naturzug

		Fossil	Nuklear beheiztes Kraftwerk
Elektrische Leistung des Kraftwerks	GWe	1	1
Wirkungsgrad	%	40	32
Leistung des Kühlturms	Mcal/sec	330	500
Kühlturmabmessungen			
Höhe	m	110	130
Durchmesser Tasse	m	90	110
Taille	m	55	65
Mündung	m	60	75
Betriebsdaten			
Wasserumlauf	m <sup>3</sup> /sec	24	36
Verdunstungsverlust	m <sup>3</sup> /sec	0.4	0.6
Wasserauswurf	l/sec	≤ 24	≤ 36
Luftdurchsatz	m <sup>3</sup> /sec	20 000	30 000

Die angegebenen Daten variieren je nach Kühlturmtyp und sind deswegen nur als Anhaltspunkte aufzufassen.

mit einer thermischen Leistung von 1 GW (entsprechend 240 Mcal/sec) bei mittleren Wetterbedingungen: Luft der Temperatur 10°C und der relativen Feuchte 75 % besitzt eine Enthalpie von etwa 6 kcal/kg. Nachdem diese Luft den Kühlturm durchströmt hat, verläßt sie diesen gesättigt (d.h., mit einer relativen Feuchte von 100 %) mit einer Temperatur von etwa 28°C und besitzt damit eine Enthalpie von 22 kcal/kg. Die Enthalpiedifferenz, also die Enthalpie, mit der die Luft beim Durchströmen des Kühlturms "beladen" wurde, beträgt 16 kcal/kg. In dem angeführten Beispiel würden 12 kcal/kg - 3/4 der abgeführten Wärme - als latente Wärme und das restliche Viertel als fühlbare Wärme emittiert. Im allgemeinen ist die Atmosphäre nicht fähig, die verdunstete Wassermenge sofort aufzunehmen; durch nachfolgende Kondensation entsteht dann die sichtbare Kühlturmfahne.

Das verdunstete Wasser muß dem Kühlkreislauf in Form von Zusatzwasser nachgeliefert werden. Die Menge des benötigten Zusatzwassers hängt neben der Art und Größe des Kraftwerks (d.h. der Kühlturmleistung) - wie bereits angedeutet - auch von den meteorologischen Gegebenheiten ab; die in Tab. 10 genannten Verdunstungsverluste von 0,4 m<sup>3</sup>/sec für ein fossiles Kraftwerk und

0,6 m<sup>3</sup>/sec für ein Kernkraftwerk von jeweils 1000 MWe sind typische Durchschnittswerte. Außerdem entsteht bei der nassen Rückkühlung zumeist ein weiterer Wasserbedarf durch die sogenannte Abschlammung, die notwendig ist, um im Kühlwasserkreislauf eine vorgegebene Salzkonzentration nicht zu überschreiten. Die Salzkonzentration hängt wesentlich von der Qualität des Zusatzwassers (im allg. Flußwasser) ab. Für Rheinwasser z.B. ergibt sich - je nach Vorbehandlung - eine Abschlammwassermenge von etwa 200 l pro 1000 l Verdunstungszusatzwasser, d.h. ein zusätzlicher Wasserbedarf von 20 % für die Abschlammung. Zu erwähnen ist schließlich noch ein Verlustanteil durch Tropfenauswurf, der jedoch bei modernen Kühltürmen klein ist.

### 2.1.2 Radioaktive Emissionen

Der Umgang mit der Kernenergie führt zwangsläufig zum Umgang und zur Handhabung von radioaktiven Substanzen. Abgesehen von den geringen natürlichen Radioaktivitäten der Kernbrennstoffe Uran bzw. Thorium und deren Zerfallsketten entstehen die radioaktiven Substanzen im Kernkraftwerk als Spaltprodukte bei der Kernspaltung und als Aktivierungsprodukte von im Reaktorkern befindlichen Materialien durch Neutronenstrahlung. Die Spalt- bzw. Aktivierungsprodukte verbleiben zum weitaus überwiegenden Teil in den festen Hüllen der Brennelemente bzw. im abgeschlossenen Primärkühlkreislauf. Eine bestimmte Menge radioaktiver Stoffe aus Leckagen und Reinigungsprozessen wird jedoch vom Kernkraftwerk im Normalbetrieb an die Atmosphäre und Hydrosphäre abgegeben. Hierbei bietet das Reaktor-Containment die Gewähr, daß diese Abgaben kontrolliert erfolgen. Die abgegebenen Mengen richten sich nach speziellen atomrechtlichen Genehmigungsbedingungen, die auf der Strahlenschutzverordnung basieren und so gehalten sind, daß bestimmte radiologische Belastungen in unmittelbarer Nähe des Kernkraftwerks nicht überschritten werden.

Im Hinblick auf die radiotoxikologische Bedeutung, die Halbwertszeit ( $t_H$ ) und die abgegebene Menge (in Curie) sind vor allem die kurzlebigen Radionuklide Xenon-133 ( $t_H = 5,3$  Tage) und Jod-131 ( $t_H = 8,05$  Tage) und die langlebigen Radionuklide Krypton-85 ( $t_H = 10,7$  Jahre) und Tritium (H-3,  $t_H = 12,3$  Jahre) von Bedeutung. Xenon, Krypton und Jod entstehen als Spaltprodukte, Tritium entsteht bei ternären Kernspaltungsprozessen sowie bei Neutronenabsorptions-

prozessen (Bor, Deuterium). Xenon und Krypton gelangen als Edelgase ausschließlich in die Atmosphäre; Jod wird zum überwiegenden Teil an die Atmosphäre, Tritium zum überwiegenden Teil an das Wasser abgegeben.

Was die Emissionsmengen dieser radioaktiven Substanzen aus Kernkraftwerken betrifft, so liegen für große Kernkraftwerksblöcke im Bereich 1000 MWe noch keine Erfahrungswerte vor. Die in Tab. 11 genannten Angaben (nach /10 - 12/) sind Abgabewerte, wie sie für in Deutschland im Bau befindliche und geplante große Kernkraftwerksblöcke zu erwarten sind.

Tab. 11 Erwartete Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken

Annahme: 1 000 MWe Reaktorleistung  
7 000 Vollaststunden/Jahr

	Abgabe an	Abgabemengen	
		DWR <sup>a)</sup> (Ci/a)	SWR <sup>b)</sup> (Ci/a)
Tritium	Wasser	950	130
Xenon-133	Luft	3 200 <sup>c)</sup>	2 400 <sup>c)</sup>
Krypton-85	Luft	1 300 <sup>c)</sup>	1 200 <sup>c)</sup>
Jod-131	Luft	0,06 <sup>c)</sup>	0,3 <sup>c)</sup>

- a) DWR=Druckwasserreaktor
- b) SWR=Siedewasserreaktor
- c) nahezu leistungsunabhängig

Neben den radioaktiven Emissionen aus Kernkraftwerken sind die Emissionen im Brennstoffzyklus von Interesse. Eine vergleichende Zusammenstellung der bei den einzelnen Schritten des Brennstoffzyklus auftretenden radioaktiven Emissionen zeigt Tab. 12; sie wurde aus /13/ entnommen und gibt die Aktivitätsfreisetzungen eines Modell-Brennstoffzyklus nach dem heutigen Kenntnisstand bezogen auf den jährlichen Brennstoffbedarf eines Leichtwasser-Modellreaktors von 1000 MWe an - die Werte in Tab. 11 sind also unmittelbar mit denen aus Tab. 12 vergleichbar. Man erkennt die hohen Emissionen an Tritium und Krypton-85 bei der Brennstoffwiederaufarbeitung, die deutlich höher sind

als bei Kernkraftwerken. Allerdings wird in diesem (amerikanischen) Modellfall das Tritium überwiegend an die Atmosphäre abgegeben, wogegen die Untersuchungen nach /10/ zeigen, daß der größere Teil (etwa 2/3) des bei der Wiederaufarbeitung anfallenden Tritiums heute in das Wasser abgegeben wird.

Tab. 12 Aktivitätsfreisetzungen in einem Modell-Brennstoffzyklus, normiert auf den jährlichen Brennstoffzyklus eines Leichtwasser-Modellreaktors von 1000 MWe (in Ci/a)

	Erz- Abbau	Erzauf- arbeitung	UF <sub>6</sub> - Konversion	An- reicherung	BE- fertigung	Wiederauf- arbeitung	Abfall- behandlung
<u>Gasförmig</u>							
Rn-222	-	74.5	-	-	-	-	-
Ra-226	-	0.02	-	-	-	-	-
Th-230	-	0.02	-	-	-	-	-
Uran	-	0.03	0.014	0.002	0.0002	-	-
Tritium	-	-	-	-	-	15 700	-
Kr-85	-	-	-	-	-	350 000	-
I-129	-	-	-	-	-	0.002	-
I-131	-	-	-	-	-	0.02	-
Spaltprodukte	-	-	-	-	-	1.0	-
Transurane	-	-	-	--	-	0.004	-
<u>Flüssig</u>							
Uran + Folgeprod.	-	2.0	0.33	0.02	0.03	-	-
Ra-226	-	-	0.027	-	-	-	-
Th-230	-	-	0.27	-	-	-	-
Th-234	-	-	-	-	0.01	-	-
Tritium	-	-	-	-	-	2 500	-
Ru-106	-	-	-	-	-	4	-

### 2.1.3 Chemische Schadstoffemissionen

#### Schadstoffemissionen aus Verbrennungsprozessen

Die in den fossilen Energieträgern chemisch gebundene Energie wird durch Oxydation mit Sauerstoff (Zufuhr von Verbrennungsluft) freigesetzt. Die dabei entstehenden Verbrennungsgase (die sog. Rauchgase) werden in die At-

mosphäre emittiert. Sie enthalten neben den reinen Verbrennungsprodukten (vorwiegend  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ ) eine Reihe sehr unterschiedlicher Schadstoffe, von denen die mengenmäßig bedeutsamen Schwefeldioxyd ( $\text{SO}_2$ ), Stickoxyde ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenmonoxyd ( $\text{CO}$ ), Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_m\text{H}_n$ ) und Feststoffe (Staub, Ruß, Aerosole) sind. Daneben enthalten die Verbrennungsgase in geringeren Mengen auch Spurenstoffe (meist Metalloxyde). Die Art und Menge der aus Verbrennungsprozessen stammenden Schadstoffe hängt einmal vom Brennstoff und zum anderen von der Art der Verbrennung, d.h. der Feuerungsanlage ab.

Tab. 13 zeigt eine Zuordnung von Brennstoffen und Verbrauchssektoren, die hinsichtlich der Emissionen für Baden-Württemberg von Bedeutung sind.

Tab. 13 Zuordnung von Energieträgern auf Verbrauchssektoren

	Kraftwerke	Industrie	Haushalt + Kleinverbrauch	Verkehr
Steinkohle	●	●	●	
Steinkohlenkoks		●	●	
Braunkohlebriketts			●	
Heizöl, HEL		●	●	
Heizöl, HS	●	●		
Gas	●	●	●	
Vergaserkraftstoff				●
Dieselmotorkraftstoff				●

Hierfür sind in Tab. 14 spezifische Emissionsfaktoren für die Schadstoffe  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_m\text{H}_n$  und Feststoffe zusammengestellt. Die Zahlen wurden durch Auswerten von Literaturangaben (/14 - 22/) ermittelt. Die Angaben für  $\text{SO}_2$  sind einigermaßen sichere Durchschnittswerte; die Angaben für die übrigen Schadstoffe sind wegen der zum Teil großen bestehenden Unsicherheiten und der großen Streuungsmöglichkeiten nicht als exakte Zahlenwerte zu verstehen, sondern sie sollen die Größenordnung für die jeweiligen Emissionen charakterisieren.

Tab. 14 Spezifische stoffliche Emissionen  
(in kg Schadstoff/t SKE Brennstoff)

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	CmHn	Feststoffe
<u>Kraftwerke</u>					
Steinkohle	21	7	0.2	0.1	4
Heizöl, schwer	20	6	0	0.2	0.4
Gas	0	4	0	0	0
<u>Industrie</u>					
Steinkohle	21	6	1.4	0.4	6
Steinkohlenkoks	18	6	1.4	0.3	3
Heizöl, leicht	6,5	2	0.2	0.2	0.2
Heizöl, schwer	20	6	0.2	0.2	1
Gas	0	3	0	0	0
<u>Haushalt + Kleinverbrauch</u>					
Steinkohle	20	3	25	5	20
Steinkohlenkoks	18	3	25	0.3	3
Braunkohle	12	2	25	2	10
Heizöl, leicht	6,5	2	0.3	0.2	0.2
Gas	0	1.5	0	0	0
<u>Verkehr</u>					
Vergaserkraftstoff	0.3	28	200	20	1.5
Dieselmotorkraftstoff	4.0	32	25	7	3

Im einzelnen ist zu den Schadstoffen folgendes zu bemerken:

### Schwefeldioxyd

Schwefelverbindungen werden sowohl durch natürliche als auch durch anthropogene Quellen in die Atmosphäre emittiert. Die natürliche Komponente des atmosphärischen Schwefels wird fast ausschließlich durch den Zerfall organischer Substanzen erzeugt, in Form von H<sub>2</sub>S emittiert und zu SO<sub>2</sub> oxydiert. Nach /23/ wird die natürliche Schwefelproduktionsrate der Erde auf etwa 110 Millionen t Schwefel pro Jahr entsprechend 220 Millionen t/a SO<sub>2</sub> abgeschätzt.

Anthropogene Quellen emittieren Schwefel fast ausschließlich in Form von SO<sub>2</sub> in die Atmosphäre. Der bei weitem größte Teil stammt dabei aus der Verbren-

nung schwefelhaltiger Brennstoffe. Bei flüssigen Brennstoffen wird der im Brennstoff enthaltene Schwefel vollständig emittiert, bei Steinkohlen bis auf einen geringen Anteil (ca. 3-5 %), der in der Asche gebunden wird; lediglich bei Braunkohlen kann die Schwefeleinbindung in der Asche bis zu 50 % der Schwefelmenge im Brennstoff betragen. Mit diesen Einschränkungen ist der Schwefelgehalt des Brennstoffs unmittelbar ein Maß für die spezifische SO<sub>2</sub>-Emission. Da 1 kg S mit 1 kg O<sub>2</sub> zu 2 kg SO<sub>2</sub> verbrennt, werden z.B. bei einem Schwefelgehalt von 1 % S 20 kg SO<sub>2</sub> pro t Brennstoff emittiert.

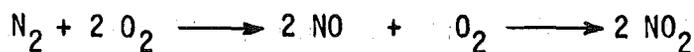
Für die Entfernung von SO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre gibt es eine Reihe von Prozessen. So katalysieren etwa spezielle Spurenstoffe die SO<sub>2</sub>-Oxydation zu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Eine wesentliche Rolle spielen auch photochemische Reaktionen, insbesondere der Systeme NO<sub>x</sub>-Kohlenwasserstoffe - SO<sub>2</sub>, aber auch O<sub>3</sub> kann bei der Oxidation von SO<sub>2</sub> in der Atmosphäre eine Rolle spielen. Regen kann außerdem zur Säuberung der Atmosphäre von SO<sub>2</sub> durch Auswaschen beitragen.

Die Konzentration von SO<sub>2</sub> in reiner, unbelasteter Luft liegt heute bei 3 bis 10 µg/m<sup>3</sup>, die Verweildauer beträgt hierbei ca. 10 bis 20 Tage; in der belasteten Atmosphäre von Ballungsgebieten kann die Verweildauer auf Stunden bis einige Tage absinken.

### Stickoxyde

NO<sub>x</sub> steht hier für NO, N<sub>2</sub>O<sub>2</sub> und NO<sub>2</sub>, wobei der im allgemeinen weitaus überwiegende Anteil des NO<sub>x</sub> aus NO<sub>2</sub> besteht. Über den natürlichen Untergrund von NO<sub>x</sub>-Verbindungen sind nur wenige Daten bekannt. Es gilt jedoch als sicher, daß nicht nur durch menschliche Aktivitäten NO<sub>x</sub> in die Atmosphäre emittiert wird. Die mittlere natürliche NO<sub>2</sub>-Konzentration beträgt nahezu gleichmäßig 2-3 µg/m<sup>3</sup>. NO<sub>2</sub> resultiert aus der Oxydation von NO, das vermutlich durch bakterielle Reduktion von Nitraten zu Nitriten im Boden erzeugt wird.

Anthropogenes NO<sub>2</sub> entsteht bei der Verbrennung durch die Komponenten der Verbrennungsluft:



Diese Reaktion ist u.a. stark temperaturabhängig; die Erzeugung von  $\text{NO}_2$  ist deshalb stark von den Gegebenheiten des Verbrennungsprozesses, d.h. von der Art der Verbrennungsanlage und dem Betriebsverhalten (Luftüberschuß) abhängig.

$\text{NO}_2$  verschwindet zum großen Teil durch Reaktion mit Wasserdampf und Ozon zu Salpetersäure und Nitraten. Weiter ist  $\text{NO}_2$  die wesentliche Ursache photochemischer Folgereaktionen. Durch Absorption im UV-Licht zerfällt  $\text{NO}_2$  entsprechend



Der atomare Sauerstoff reagiert mit  $\text{O}_2$  zu Ozon.  $\text{O}_3$  selbst ist sehr toxisch und bildet mit den vermehrt im Smog vorhandenen Kohlenwasserstoffen hoch toxische Radikale.

#### Kohlenmonoxyd

Das atmosphärische CO wurde erst 1952 entdeckt, so daß über seine atmosphärische Verteilung und sein Verhalten noch wenig bekannt ist. CO scheint ein weltweiter Bestandteil der Atmosphäre mit einer mittleren atmosphärischen Konzentration von 100 - 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  zu sein. Bei Verbrennungsvorgängen entsteht CO durch unvollständige Verbrennung von Kohlenstoff. Die Abbauprozesse von CO sind bisher nicht eindeutig identifiziert. Eine Anreicherung von CO in der Atmosphäre konnte bisher nicht nachgewiesen werden.

#### Kohlenwasserstoffe, Feststoffe

In diesen beiden Gruppen von Schadstoffen sind jeweils eine Reihe unterschiedlich gearteter und unterschiedlich wirkender Stoffe zusammengefaßt, die jeweils im einzelnen zu beschreiben wären. Bei den Kohlenwasserstoffen sind es vor allem paraffinische, olefinische und aromatische Verbindungen, die beim Umgang mit und bei der Verbrennung von Kraftstoffen emittiert werden, und die dann Reaktionsprodukte für die Bildung von photochemischem Smog darstellen.

Unter dem Begriff Feststoffe sind die luftgetragenen Stoffe (Aerosole) zusammengefaßt, die von Grob-Staub bis hin zu lungengängigen Feinststäuben reichen.

### Schadstoffemissionen aus Raffinerieprozessen

In Mineralöl-Raffinerien wird das in der Natur vorkommende Rohöl, das aus einem Gemisch sehr unterschiedlicher organischer Verbindungen besteht, getrennt und zu Brennstoff- und anderen Fertigprodukten weiterverarbeitet. Der grundlegende Schritt der Rohölverarbeitung ist die fraktionierende Destillation, die im allgemeinen in zwei Stufen - der atmosphärischen und der Vakuum-Destillation - durchgeführt wird. Hierbei wird das Rohöl entsprechend dem Siedeverhalten in seine Bestandteile getrennt; anschließend erfolgt mehr oder weniger umfangreich eine weitere Verarbeitung und Veredelung der Produkte (z.B. Cracken, Benzin-Reforming, Entschwefelung). Das Spektrum der Raffinerieprodukte reicht vom Raffinerie- und Flüssiggas über Benzine, Mitteldestillate (z.B. leichtes Heizöl), schweres Heizöl bis hin zu Sonderölen und Bitumen.

Die chemischen Emissionen einer Raffinerie entstehen einmal in den Feuerungsanlagen für die Eigenversorgung mit Prozeßdampf und Strom, zum andern prozeßbedingt bei einzelnen Verarbeitungs- und Handhabungsschritten. Im ersten Falle ist vor allem  $\text{SO}_2$  zu nennen und in Verbindung damit auch  $\text{NO}_x$ , im zweiten Fall ist es ein Spektrum von Kohlenwasserstoffen und in mengenmäßig geringem Umfang die sehr geruchsintensiven Stoffe Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) und Merkaptane.

Was die im vorigen Abschnitt genannten spezifischen Emissionsfaktoren aus industriellen Verbrennungsprozessen, insbesondere  $\text{SO}_2$ , betrifft, so können diese bei Raffinerien nicht verwendet werden, da Raffinerien in der Regel keine handelsüblichen Brennstoffe einsetzen; sie verwerten flüssige und gasförmige Brennstoffe aus dem eigenen Verarbeitungsprozeß: Raffineriegas, schweres Heizöl, Destillatrückstände, die in ihren Schwefelgehalten sehr stark variieren. Hinzu kommt, daß die Höhe des Eigenenergieverbrauchs vom Produktspektrum abhängt - in besonders gelagerten Fällen wird der elektrische Strombedarf durch Fremdbezug gedeckt.

Bei völliger Eigenversorgung kann als Durchschnittswert für die Eigenverbrauchsmenge 5 % des Rohöl-Durchsatzes angesetzt werden. Bei einem angenommenen Schwefelgehalt im Brennstoff von 3,5 % werden dann - im Sinne einer oberen Abschätzung - im Mittel 400 kg/h  $\text{SO}_2$  pro Million t Rohöl-Durchsatz im

Jahr emittiert. Im Vergleich dazu sind prozeßbedingte  $\text{SO}_2$ -Emissionen, z.B. bei der Schwefelerzeugung in Claus-Anlagen, zu vernachlässigen.

Über die Emissionen von Kohlenwasserstoffen liegen nur Schätzwerte vor, die nach Angaben der Mineralölwirtschaft z.B. folgende Werte erreichen:

	Gewichts-% bezogen auf den Durchsatz
Atmungsverluste durch Tanks	0.03
Ölabscheider	0.01
Verdampfungsverluste bei Ver- ladung sowie Undichtigkeiten an Flanschen und Leitungen	<u>0.02</u>
	0.06

Bezogen auf einen Jahresdurchschnitt von 1 Million t Rohöl bedeutet das eine mittlere Kohlenwasserstoff-Emission von 70 kg/h.

## 2.2 Probleme der Auswirkungen von Umweltbelastungen

Um die Auswirkungen von Umweltbelastungen auf die Bevölkerung zu beurteilen und einzuschätzen, ist im Prinzip die Kenntnis aller wesentlichen Belastungen nach Größe und zeitlichem Verhalten notwendig. Dazu müßten somatische und genetische Effekte der einzelnen Belastungsarten sowie das Zusammenwirken der zum Teil auf unterschiedliche Organe des menschlichen Körpers wirkende Belastungen bekannt sein. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist heute lückenhaft und nur für einzelne Belastungen bzw. Schadstoffe ansatzweise vorhanden.

Insbesondere gilt:

- Für viele Schadstoffe, besonders für chemische Schadstoffe aus der Verbrennung fossiler Energieträger, ist eine physikalisch-chemische Umwandlung im Laufe ihres Aufenthaltes in der Atmosphäre anzunehmen. Die Dynamik des entstehenden Schadstoffsystems ist aber quantitativ meist ungeklärt. So ist heute noch umstritten, inwieweit die primäre Wirkung des  $\text{SO}_2$  in der Lunge oder die sekundäre (über  $\text{SO}_3$  bzw.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) die Hauptwirkung ausmacht.

- Für einige Schadstoffe, besonders diejenigen, die in Spuren in den fossilen Brennstoffen auftreten, ist auch die physikalische und chemische Form nicht genügend bekannt. Hier sind besonders die Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle, Halogene usw. zu nennen.
- Der als Synergismus bezeichnete Effekt der Verstärkung (oder Abschwächung) von Wirkungen mehrerer gleichzeitig existenter Schadstoffe ist weitgehend nicht quantitativ angebar.
- Die Kenntnisse über die somatischen und genetischen Wirkungen fast aller Belastungsarten sind besonders im Bereich der Langzeitwirkungen kleiner Schadstoffkonzentrationen lückenhaft.

Für zwei Belastungsarten soll eine nähere Beschreibung erfolgen. Für die radiologischen Belastungen als die heute im Hinblick auf ihre Wirkungen und auf Probleme der Festlegung von Grenzwerten am weitesten erforschte Belastungsart und für die atmosphärische Schwefeldioxydbelastung, die durch ihre Bedeutung und ihr gekoppeltes Auftreten mit anderen luftgetragenen Schadstoffen (Staub,  $\text{NO}_x$ ) aus dem Verbrennungsprozeß als eine Art Leit-substanz der atmosphärischen Schadstoffbelastung betrachtet wird.

### 2.2.1 Radiologische Belastung

#### Art der Wirkung auf den Organismus

Beim Auftreffen energiereicher Strahlung (z.B. Röntgen,  $\alpha$ -,  $\beta$ -Strahlen, Neutronen) auf einen Organismus werden Atome und Moleküle angeregt und ionisiert. Über eine komplizierte Kette von z.T. stochastischen biochemischen Folgereaktionen können daraus Störungen des Zellebens und evtl. Zelltod resultieren.

Das Ausmaß der auftretenden Veränderungen ist vor allem von folgenden Faktoren abhängig

- Höhe der Energiedosis: Die physikalische Einheit der Energiedosis ist  $1 \text{ rad} = 1/100 \text{ Wsec/kg}$  also eine pro Masse absorbierte Energiemenge.
- Relative biologische Wirksamkeit: Die mit der Ionisationsdichte zusammenhängende biologische Wirkung von Neutronen- und  $\alpha$ -Strahlen ist bei gleicher Energiedosis deutlich höher als die von Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlen. Man

berücksichtigt dies durch Einführung eines von Art und Energie der Strahlung abhängigen Qualitätsfaktors  $Q$  mit dem die in rad gemessene, physikalische Energiedosis zu multiplizieren ist, um die biologisch wirksame Energiedosis in rem (roentgen equivalent man) zu erhalten. Für Roentgenstrahlen von 200 keV gilt dabei  $Q = 1$ , also  $1 \text{ rad} = 1 \text{ rem}$ . Für  $\alpha$ - und Neutronenstrahlen gilt  $Q = 10$ , also  $1 \text{ rad} = 10 \text{ rem}$ .

- Zeitliche und räumliche Verteilung der Energiedosis: In der Regel gilt, daß das Ausmaß der Wirkungen sinkt mit der Länge des Zeitraumes, über den eine Energiedosis eingestrahlt wird. Diese geringere Wirksamkeit bei niedriger Dosisleistung ist neben eventuell nicht überschrittenen Schwellenwerten insbesondere auf die Fähigkeit bestrahlter Zellen und Organe zurückzuführen, sich von Strahleneinwirkungen zu erholen oder sie zu kompensieren. Für die räumliche Verteilung gilt im allgemeinen, daß bei einer Strahlenexposition die einzelnen Körperteile unterschiedlichen Dosen ausgesetzt sind. Bei gleicher Dosis ist die Bestrahlung einzelner Organe oder Organteile mit geringeren Wirkungen verbunden als eine Ganzkörperbestrahlung.

### Folgen von Strahlenbelastungen

Es gibt keine spezifischen "Strahlenkrankheiten", vielmehr können alle durch Strahlenbelastung bewirkten Symptome und Krankheitsbilder auch durch andere Ursachen bedingt sein. Allenfalls das akute Strahlensyndrom ist durch das Zusammentreffen und die Abfolge bestimmter Krankheitssymptome, als spezifische Reaktion des menschlichen Organismus auf eine plötzliche hohe Strahlenbelastung (die Letaldosis liegt bei etwa 600 rem) zu bezeichnen. Die möglichen somatischen (vor allem Leukämie, Tumoren) und genetischen Folgen sind in keiner Weise strahlenspezifisch; bei ihnen ist die Folge einer Strahlenbelastung nur in einer evtl. Veränderung des durch andere bekannte und unbekanntere Ursachen gegebenen allgemeinen Krankheitsrisikos zu beobachten. Tab. 15 zeigt geschätzte Bereiche für diese Veränderungen für die wichtigsten Langzeitfolgen aus Strahlenbelastungen /24 - 27/. Folgen, für die ein Schwellwert nachgewiesen ist (Wachstumsstörungen bei Kindern, grauer Star, Verminderung der Fruchtbarkeit und der Zeugungsfähigkeit treten unterhalb von 15 rem/Jahr bzw. mehreren 100 rem nicht auf) sind dabei nicht aufgenommen.

Tab. 15 Strahlenbelastung und Risiko

Art des Schadens	Anzahl Schädigungen pro Jahr und 10 <sup>6</sup> Personen	
	natürliches Risiko	Erhöhung durch eine künstliche Strahlenbelastung von 170 mrem/a
Leukämie	50	1 - 5 (?)
Andere Krebsarten	3 000	1 - 10 (?)
Genetische Schäden (Mißbildungen)	200	0.1 - 1 (?)

Bei der Interpretation dieser Zahlen ist zu bedenken, daß die hier ausgewiesene Erhöhung der Risiken durch Strahlenbelastung eine Abschätzung eines hypothetischen Maximalrisikos darstellt. Statistisch signifikante Angaben über durch Strahlenbelastung bewirkte somatische und genetische Schäden beim Menschen liegen nur für Personengruppen vor, die relativ hohen Dosen ausgesetzt waren. Neben den Überlebenden der Atombombenexplosionen von Hiroshima und Nagasaki handelt es sich hierbei um kleinere Personengruppen, wie etwa aus medizinischen Gründen mit hohen Dosen behandelte Patienten oder beruflich strahlengeschädigte Personen. Die Übertragung der bei diesen, einer relativ hohen einmaligen Bestrahlung (zwischen 10 und 500 rem) ausgesetzten Personen gefundenen Risikowerte auf äußerst geringe Dosisleistungen im mrem-Bereich ist aus einer Reihe von Gründen - insbesondere die Annahme einer linearen Dosis/Wirkungsbeziehung und das Außerachtlassen der viel geringeren Dosisleistungen bei langzeitiger Exposition und von eventuell existierenden Schwellwerten - nur zur Ermittlung einer hypothetischen oberen Grenze der Risikobelastung geeignet.

Der in Tab. 15 verwendete Wert von 170 mrem/a ist ein von der ICRP (International Commission on Radiological Protection) empfohlener und international akzeptierter Grenzdosiswert für den Durchschnitt der Bevölkerung. Tab. 16 stellt diesen Wert in Relation zu anderen natürlichen und künstlichen Strahlenbelastungen.

Die natürliche Strahlenbelastung ist vor allem abhängig von der Höhenlage (die Belastung durch kosmische Strahlen beträgt in 800 m bereits ca. 60 mrem/a statt 30 mrem/a in Meereshöhe) und der geographischen Lage (die terrestrische Strahlung schwankt in der BRD je nach geologischer Formation und verwendeten

Baumaterialien zwischen ca. 25 mrem/a und 160 mrem/a / 28/) großen Schwankungen unterworfen. In diesem Lichte sind die oben angeführten Rückextrapolationen auf die Wirkung kleiner Dosen sowie die angegebenen Grenzwerte zu sehen.

Tab. 16 Natürliche und künstliche Strahlenbelastungen

Belastungsart	mrem/Jahr
ICRP-Grenzwert	170
<u>natürliche Strahlenbelastung in der BRD 1972</u> (Durchschnittswerte)	110
dabei	
Kosmische Strahlung in Meereshöhe	30
Terrestische Strahlung	60
inkorporierte radioaktive Stoffe	20
<u>künstliche Strahlenbelastung in der BRD 1972</u> (Durchschnittswerte)	ca. 60
dabei	
Röntgendiagnostik	50
Fallout aus Atombombenversuchen	8
berufliche Strahlenbelastung	< 1
Kleinquellen	< 2
Kernenergienutzung	< 1

Die ICRP hat außer dem oben erwähnten Grenzwert für den Durchschnitt der Bevölkerung auch für nahezu alle bekannten Radionuklide Grenzwerte als höchstzulässige Aktivitäten in Luft und Wasser festgelegt /29, 30/. Durch die von Anfang an praktizierte internationale Zusammenarbeit - 1928 entstand die ICRP aus der bereits Anfang dieses Jahrhunderts gegründeten "Radium-Kommission" - sind diese Grenzwerte und ihre Berechnungsgrundlagen heute auf der ganzen Welt anerkannt, d.h. im Gegensatz zu vielen chemischen Schadstoffen wurden für radioaktive Schadstoffe international und weltweit etwa die gleichen Grenzwerte festgesetzt. Darüber hinaus beruht die Festlegung von Grenzwerten in Luft und Wasser für Radionuklide auf dem Zusammenhang zwischen der Dosis, die das Radionuklid beim Menschen (Einzelperson oder Bevölkerung) erzeugt, und der Konzentration des Radionuklids in Luft (bzw. Wasser). Da dieser Zusammenhang, zumindest für eine sinnvolle Festlegung von Grenzwerten, ausrei-

chend bekannt ist, ist es möglich, auch die Dosen bei Anwesenheit mehrerer Radionuklide zu berechnen und mit dem Dosisgrenzwert zu vergleichen. Hier liegt somit die Möglichkeit vor, die Wirkung einer Vielzahl radiologisch bedeutsamer Nuklide einzuordnen. Dieser Tatsache trägt auch die 1. Strahlenschutzverordnung Rechnung, indem sie Freigrenzen bzw. maximal zulässige Konzentrationen festlegt, wenn mehrere radioaktive Stoffe oder ein Gemisch von Radionukliden vorliegen.

### 2.2.2 Belastung durch SO<sub>2</sub>-haltige Luft

#### Art der Wirkungen auf den Organismus

SO<sub>2</sub> und sein Oxydationsprodukt SO<sub>3</sub> wirkt beim Menschen überwiegend über den Atemtrakt. Dabei können Funktionsbeeinträchtigungen und Erkrankungen oder Verschlimmerung von Erkrankungen der Atemorgane festgestellt werden. Allgemein wird angenommen, daß dabei biologische Reaktionen auf lokale Irritation der Schleimhäute wirksam sind.

Statistiken zeigen auch eine auffallende Parallelität zwischen SO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft und regionalen Häufigkeitsunterschieden von Herz- und Kreislaufbeschwerden. Die zugehörigen Wirkungsmechanismen sind noch unklar. Bekannt ist, daß SO<sub>2</sub> sehr gut wasserlöslich ist und daher über die feuchten Schleimhäute der Atemorgane in die Blutbahn gelangen kann.

Eine Hauptschwierigkeit bei der Beurteilung der Wirkungen von SO<sub>2</sub> ist in den teils vermuteten, teils nachgewiesenen synergistischen Effekten von SO<sub>2</sub> mit anderen Luftschadstoffen (Staub, NO<sub>x</sub>) zu sehen. So ist die Belastung der Atemorgane besonders stark, wenn es sich um eine Kombination von SO<sub>2</sub> und SO<sub>3</sub> (in feuchter Umgebung H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) als Aerosole lungengängiger Partikelgröße handelt. Sowohl feste Aerosole (z.B. Staub) als auch flüssige Aerosole scheinen die Wirkung zu erhöhen. Beispielsweise werden beginnende Atembeschwerden im Laborversuch bei einem SO<sub>2</sub>-Luftgemisch erst dann festgestellt, wenn die SO<sub>2</sub>-Konzentration 2700 bis 5400 µg/m<sup>3</sup> beträgt und bei einem H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Luftgemisch erst dann, wenn die Schwefelsäurekonzentration 350 - 1000 µg/m<sup>3</sup> beträgt. Dagegen ruft eine kombinatorische Wirkung von nur 1500 µg/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub> mit 150 µg/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in der Luft ebenfalls Atembeschwerden hervor. Ähnliche Synergismen werden im Tierversuch für das Zusammenwirken von SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> und Staub gefunden /31/ oder für das Zusammenwirken von SO<sub>2</sub> und MnO<sub>2</sub> /32/.

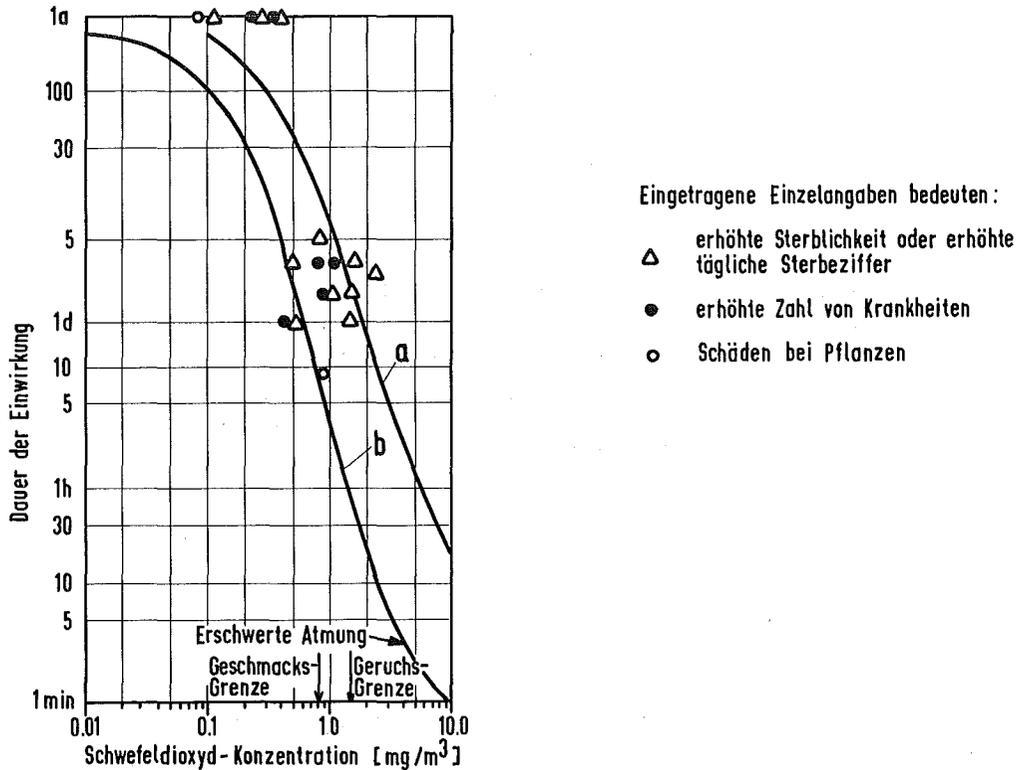
Das Verhältnis von  $\text{SO}_2$  zu anderen Luftschadstoffen ist vor allem auf Grund unterschiedlicher Emissionsverhältnisse und meteorologischer Bedingungen örtlich und zeitlich stärkeren Schwankungen unterworfen. So liegen typische Gewichtsverhältnisse für  $\text{SO}_2$  und Ruß zwischen 1:1 und 4:1 und für  $\text{SO}_2$  und  $\text{H}_2\text{SO}_4$  zwischen 10:1 und 100:1.

Beobachtungen und epidemiologische Studien über örtliche und zeitliche Paralleltäten zwischen  $\text{SO}_2$ -Konzentration und Gesundheitsschäden, die in verschiedenen Ländern gemacht wurden, dürfen also nicht so interpretiert werden, daß es sich dabei um  $\text{SO}_2$  als alleinigen Verursacher handelt.  $\text{SO}_2$  kann dabei nur als Leitsubstanz angesehen werden, die ein mehr oder weniger typisches schwefelhaltiges Luftgemisch charakterisiert.

#### Folgen von $\text{SO}_2$ -Belastungen

Eine Orientierung über den Zusammenhang zwischen  $\text{SO}_2$ -Konzentration in der Luft, Einwirkungsdauer und Gesundheitsschäden vermittelt Abb. 4.

Abb. 4 zeigt zunächst, daß Schädigungen bei umso kleineren Konzentrationen auftreten, je länger sie wirksam sind. Erhöhte Sterblichkeit wird festgestellt, wenn die  $\text{SO}_2$ -Konzentration einige Tage lang Werte um  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erreicht oder überschreitet. Für Langzeiteinwirkung (Jahresmittelwert) wird erhöhte Sterblichkeit schon im Belastungsbereich von etwa  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  beobachtet. Im folgenden wird für einige Bereiche der Abb. 4 durch Zusammenstellung verschiedener Literaturergebnisse eine sehr grobe quantitative Abschätzung der Wirkungen versucht. Dabei wird auf beobachtete statistische Korrelationen zwischen  $\text{SO}_2$ -Belastung und Gesundheitswirkungen zurückgegriffen. Solche Korrelationen können Ursache-Wirkungsbeziehungen nur als mehr oder weniger wahrscheinlich erkennen lassen, nicht aber beweisen.



Tab. 4 Zusammenhang zwischen SO<sub>2</sub>-Konzentration, Dauer der Einwirkung und biologischen Wirkungen.

Die Kurve a grenzt nach unten den Bereich ab, innerhalb dessen signifikante Einwirkungen auf die Gesundheit berichtet wurden. Kurve b grenzt nach unten den Bereich ab, innerhalb dessen eine erhöhte Zahl von Sterbefällen gegenüber dem normalen Erwartungswert berichtet wurden.

(Die Lage der Kurven wurde dem Bericht /36/ entnommen)

### Auswirkungen von Perioden besonders hoher Belastung

In den Jahren 1952 bis 1962 gab es in London 7 Perioden, während derer die Tagesmittelwerte der SO<sub>2</sub>-Konzentration für die Dauer von 5 bis 11 Tagen auf das mehrfache des Jahresmittelwertes mit Spitzenwerten bis zu etwa 4000 µg/m<sup>3</sup> anstieg. Ursache waren relativ windstille Inversionswetterlagen im Winter, während derer auch die Staubkonzentration in der Luft besonders hohe Werte erreichte. Während solcher Perioden wurde in der betroffenen Bevölkerung u.a. eine statistisch signifikante Erhöhung der Sterberate festgestellt. Die folgenden Angaben fußen auf den zugehörigen statistischen Einzeldaten aus /33/ sowie auf Daten für ähnliche Perioden in New York, Sheffield und Rotterdam /33 - 35/.

Tab. 17 Relative Schadenserhöhungen \*) je 100 µg/m<sup>3</sup> zusätzlicher SO<sub>2</sub>-Konzentration bei deutlich erhöhter Belastung von einigen Tagen Dauer

	Relative Schadenserhöhung je 100 µg/m <sup>3</sup>	Erfahrungsbereich
ärztl. behandelte Erkrankungen	0.02 bis 0.2	300 µg/m <sup>3</sup> bis 1600 µg/m <sup>3</sup>
Abwesenheit von der Arbeit	0.04 bis 0.3	300 µg/m <sup>3</sup> bis 1100 µg/m <sup>3</sup>
Sterbefälle	0.02 bis 0.06	300 µg/m <sup>3</sup> bis 4000 µg/m <sup>3</sup>

\*) Bezogen auf die durchschnittlichen Zahlen für ärztlich behandelte Erkrankungen, Abwesenheit von der Arbeit und Sterbefälle vor- und nach den Perioden besonderer Belastung.

### Auswirkungen der Langzeitbelastung

Das in der Literatur angegebene Zahlenmaterial über quantitative Auswirkungen der Langzeitbelastung durch SO<sub>2</sub> ist noch sehr heterogen. Es beruht auf statistischen Daten sehr unterschiedlichen Umfangs und auf unterschiedlichen Auswerteverfahren.

Einen Überblick über die Situation gibt Tab. 18

Tab. 18 Relative Schadenserhöhung \*) je 100 µg/m<sup>3</sup> erhöhter SO<sub>2</sub>-Konzentration bei Erhöhung der Langzeitkonzentration

	Relative Schadenserhöhung je 100 µg/m <sup>3</sup>	Erfahrungsbereich
Husten- und Bronchitis-Erkrankungen	0.1 bis 0.6	50 µg/m <sup>3</sup> bis 500 µg/m <sup>3</sup>
Abwesenheit von der Arbeit	0.1 bis 0.6	50 µg/m <sup>3</sup> bis 500 µg/m <sup>3</sup>
Sterbefälle	0.02 bis 0.08	20 µg/m <sup>3</sup> bis 500 µg/m <sup>3</sup>

\*) Bezogen auf Durchschnittswerte für Husten- und Bronchitis-Erkrankungen, Abwesenheit von der Arbeit und Sterbefälle.

Die Angaben der Tabelle fußen auf Literaturangaben /37 - 40/, die teilweise keine direkte Umrechnung in relative Schadenserhöhung je  $100 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  erlauben. Die Tabelle ist daher und aus oben genannten Gründen nicht im Sinne genauer Zahlenangaben zu verstehen. Es muß auch betont werden, daß die Verhältnisse für verschiedene Bevölkerungsgruppen wahrscheinlich recht unterschiedlich sind und daß eigentlich erst Angaben über die altersabhängige Verkürzung der mittleren Lebenserwartung zu detaillierten Beurteilungen von  $\text{SO}_2$ -Belastung und Wirkung führen können.

Ein Beispiel soll die Aussagen der Tabelle verdeutlichen: Die jährliche Zahl der Sterbefälle liegt mit gewissen Schwankungen von Region zu Region und von Land zu Land bei rund 1 % (in Baden-Württemberg 1.06 %) der Bevölkerung. Eine Verringerung der mittleren  $\text{SO}_2$ -Konzentration um  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ist mit den Zahlen der Tab. 18 in eine mögliche Verringerung der Zahl der jährlichen ca. 10 000 Sterbefälle um 20 bis 80 je Millionen Einwohner zu übersetzen.

Damit zeigen die aus Statistiken ermittelten Korrelationen, in welcher Größenordnung das Problem der Wirkungen niedriger  $\text{SO}_2$ -Belastungen liegt, auch wenn aus den bereits erläuterten Gründen diesen Angaben mehr qualitative Bedeutung im Sinne eines Problemhinweises beizumessen ist.

Vergleicht man die Ergebnisse für kurzzeitige und Langzeitwirkungen, so wird deutlich, daß kleine Erhöhungen oder Verringerungen der Langzeitbelastung möglicherweise höhere Konsequenzen für die Gesundheit der Bevölkerung haben als zwar in ungewöhnlich hohen Konzentrationen, aber selten auftretende Sonderbelastungen von einigen Tagen Dauer.

### Immissionsgrenzwerte

Die gegenwärtig für die BRD gültigen Immissionsgrenzwerte betragen nach der TA-Luft /41/

für Dauereinwirkung:  $400 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$   
für Kurzeiteinwirkung:  $750 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ , "wenn dieser Wert nur einmal eine halbe Stunde innerhalb einer Zeitspanne von 2 Stunden auftritt".

Der Wortlaut der Formulierung für die Kurzzeitwirkung ist nicht ganz konsistent mit der Interpretation, die das zugehörige Prüfverfahren der TA-

Luft beinhaltet. Nach dem Prüfverfahren ist der Immissionsgrenzwert für Kurzzeitwirkung derjenige Wert, der mit 97,5 %iger Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird.

Es ist jedoch nach dem derzeitigen Wissensstand nicht auszuschließen, daß auch unterhalb dieser Grenzwerte medizinische Wirkungen auftreten (vgl. insbesondere /37/).

Eine Reduzierung der Immissionsgrenzwerte für die BRD ist im Gespräch. Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, daß der von der EPA für die USA vorgeschlagene Langzeitstandard  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und der höchste Tagesmittelwert  $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$  beträgt.

### 3. Die Emissionen aus dem Energieeinsatz in Baden-Württemberg

#### 3.1 Thermische und Schadstoff-Emissionen 1971

##### 3.1.1 Thermische Emissionen

Die Wärmeemissionen, d.h. die insgesamt an die Umgebung abgegebenen Wärmemengen lassen sich - mit kleineren Korrekturen - unmittelbar aus der ENERGIEBILANZ ablesen. Mit diesen Korrekturen - Abzug des nichtenergetischen Verbrauchs, der Bewertungsdifferenz aus der Stromeinfuhr usw. - ergibt sich aus /1/ ein bereinigter Primärenergieverbrauch von 33,8 Mio t SKE, entsprechend 236 600 Tcal, der als thermische Emission insgesamt an die Umgebung abgeflissen ist. Eine Aufteilung nach Sektoren zeigt Tab. 19.

Tab. 19 Thermische Emissionen in Baden-Württemberg 1971

	in Tcal	in %
<u>Umwandlungsbereich</u>		
Elektrizitätswirtschaft einschl. Fernwärmeversorgung (Abwärme aus fossilen + nuklearen Kraftwerken, Eigenverbrauch, Übertragungsverluste)	35 200	14,8
Raffinerien (Eigenverbrauch)	6 500	2,8
Gaswirtschaft	1 200	0,5
		18,1
<u>Endenergieverbrauch</u>		
Industrie	64 500	27,2
Haushalte + Kleinverbrauch	83 000	35,2
Verkehr	46 200	19,5
		81,9
Gesamt	236 600	100,0

Zur Veranschaulichung: 236 600 Tcal ist eine Wärmemenge, mit der man z.B. den gesamten Wasserinhalt des Bodensees um 5°C oder eine Luftschicht der Mächtigkeit 100 m und einer Fläche, die der Baden-Württembergs entspricht, um 20°C aufheizen kann.

Man sieht aus Tab. 19, daß der Endenergieverbrauch mit 82 % zur gesamten Wärmeemission beiträgt, wobei der Sektor Haushalte und Kleinverbrauch mit 35 % den größten Anteil hat. Die Elektrizitätswirtschaft trägt dagegen nur mit 15 % zur Wärmeemission bei. Diese Zahlen lassen zunächst nur wenig Aussagen über das Problem "Abwärme" zu.

Die ökologischen Auswirkungen hängen davon ab, wieviel der entstehenden Wärme an die Flüsse (direkt oder durch Kanalisation und Kläranlagen) und wieviel an die Luft weitergegeben wird. Thermische Belastungsgrenzen sind am deutlichsten für Flüsse erkennbar. Darauf wird in Abschnitt 4.2 eingegangen. Weniger klar sind die Verhältnisse für die Wärmeemission in die Atmosphäre. Zu den stärksten Einzelquellen der anthropogenen Wärmeemission in die Atmosphäre zählen Naßkühltürme von Kraftwerken, auf die in Abschnitt 4.3 näher eingegangen wird, wobei Fragen des lokalen Abtransports von Wärme und Feuchte im Vordergrund stehen. Darüberhinaus sind mögliche, in ihrem Ausmaß gegenwärtig nicht genau bekannte, regionale Klimaänderungen im Auge zu behalten. Dabei spielt die in Abschnitt 3.3 dargestellte regionale Verteilung der Wärmeabgabe eine Rolle.

Die über das Land und das Jahr gemittelte Leistungsdichte des Energieverbrauchs \*) beträgt dann:

bezogen auf die Bevölkerungszahl: 3,5 kW/Einwohner  
bezogen auf die Fläche : 0,9 W/m<sup>2</sup>

Zum Vergleich: Die über Tag und Nacht und über das Jahr gemittelte, aus Sonneneinstrahlung auf dem Erdboden nettomäßig zur Verfügung stehende Wärmeleistung beträgt für die BRD ca. 100 W/m<sup>2</sup>; d.h. die anthropogene Energieerzeugung erreicht heute knapp 1 % der von der Sonne eingestrahltten Energie. Allerdings gilt diese Aussage nur über das ganze Land gemittelt, in Ballungsgebieten steigt die anthropogene Energiedichte deutlich über den Mittelwert (vgl. Abschnitt 3.3).

An dieser Stelle ist die Frage interessant, wieviel der insgesamt verbrauchten Primärenergie letztlich echte Nutzenergie und wieviel Verlustenergie

---

\*) Die Leistungsdichte wird dadurch ermittelt, daß man den Energieverbrauch eines Jahres in kWh(th) durch 8 760 Stunden dividiert.

darstellt. Die Energiebilanz gibt hierauf keine Antwort; sie weist aus, wer wieviel Energie verbraucht hat, aber nicht: wofür diese Energie verbraucht wurde. Erst mit dieser Kenntnis lassen sich aber Nutzungsgrade oder Wirkungsgrade beim Energieverbrauch bestimmen und daraus die Anteile von Nutzenergie und Verlustenergie auch beim Endenergieverbrauch bestimmen. In /2/ wurde versucht, eine solche Nutzenergiebilanz für die BRD für das Jahr 1968 aufzustellen. Dabei wurden folgende Nutzungsgrade ermittelt:

Haushalte + Kleinverbrauch	52 %
Industrie	50 %
Verkehr	18 %

Nach dem neuen ENERGIEPROGRAMM DER BUNDESREGIERUNG /42/ liegen diese Nutzungsgrade eher noch niedriger. Wenn man die obigen Zahlen, die allerdings nur erste Abschätzungen darstellen, auf Baden-Württemberg 1971 überträgt, so kommt man zu dem im Energiefluß in Abb. 1 auf der rechten Seite dargestellten Ergebnis: nur 1/3 des gesamten Primärenergieaufwandes wird tatsächlich als Nutzenergie verwendet.

### 3.1.2 Chemische Schadstoff-Emissionen

Die Mengen der chemischen Schadstoff-Emissionen ergeben sich aus den Energieumwandlungs- bzw. -verbrauchsmengen der ENERGIEBILANZ /1/ einerseits und den in Tab. 14 angegebenen Emissionsfaktoren andererseits. Die  $\text{SO}_2$ -Emissionen für die Mineralöl-Raffinerien beruhen auf unmittelbaren Angaben der Mineralölwirtschaft. Die Ergebnisse für die Schadstoffe  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_m\text{H}_n$  und Feststoffe sind in Tab. 20 sowie in Abb. 5 dargestellt.

Eine Beurteilung der Bedeutung der einzelnen Schadstoffe im Hinblick auf ihre Wirkungen ist anhand der in Tab. 20 ausgewiesenen Schadstoffmengen nicht möglich. Ein erster Ansatz einer Beurteilung wird durch die Einführung der "Relativen Schadstoffbelastung" versucht, die unter den folgenden vereinfachenden Annahmen ermittelt wurde: Man nimmt eine gleichförmige Verteilung eines durch Höhenverteilung und Verweildauer beeinflussten Anteiles der Schadstoffmengen in den ersten 100 m über die Gesamtfläche Baden-Württembergs an und errechnet so eine hypothetische durchschnittliche Schadstoffkonzentration  $D$ . Die relative Schadstoffbelastung  $S$  ergibt sich dann als Verhältnis von durchschnittlicher Schadstoffkonzentration  $D$  und einer für verschiedene Schadstoffe möglichst auf

Tab. 20 Chemische Schadstoff-Emission in Baden-Württemberg 1971  
(in Tonnen)

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	Feststoffe
nach Verbrauchs- sektoren:-----					
Kraftwerke	130 000	42 000	1 000	1 000	16 000
Raffinerien	21 000	5 000 <sup>b)</sup>	a)	10 000 <sup>b)</sup>	a)
Industrie	112 000	42 000	23 000	4 000	9 000
Haushalte + Kleinverbrauch	73 000	20 000	34 000	5 000	17 000
Verkehr <sup>c)</sup>	18 000	180 000	830 000	93 000	14 000
Gesamt-Emission	354 000	289 000	887 000	113 000	56 000
nach Energie- trägern:----- <sup>d)</sup>					
Feste Brennstoffe	114 000	34 000	33 000	4 000	35 000
Heizöl HEL	63 000	19 000	3 000	2 000	2 000
Heizöl HS	146 000	44 000	1 000	2 000	6 000
Gas	0	2 000	0	0	0
Vergaser- kraftstoff	1 000	111 000	792 000	79 000	6 000
Diesel- kraftstoff	9 000	74 000	58 000	16 000	7 000
Relative Schadstoff- belastung S bezogen auf die Gesamt-Emission	0.62	0.16	0.05	0.20	0.57

a) Keine Angaben vorhanden

c) ohne Luft- und Schiffsverkehr

b) Angaben geschätzt

d) ohne Beitrag aus Raffinerien

vergleichbare Weise ermittelten theoretischen Maximalkonzentration Z, also  $S=D/Z$ . Eine nähere Erläuterung des Verfahrens und der verwendeten Daten findet sich in /9/.

Mit der relativen Schadstoffbelastung soll zunächst nichts anderes als eine Rangfolge in der Bedeutung dieser Schadstoffe ausgedrückt werden. Aus dieser Globalbetrachtung sind ausdrücklich keine Rückschlüsse auf die regionale und lokale Bedeutung der einzelnen Schadstoffe zulässig. So erhält z.B. CO, aber auch NO<sub>x</sub> in belasteten Straßenfluchten von Innenstädten sicher einen ungleich höheren Stellenwert als bei einer Betrachtung des Gesamttraumes Baden-Württemberg. Mit diesen Einschränkungen zeigt die relative Schadstoffbelastung in Tab. 20, daß SO<sub>2</sub> und Feststoffe zur Zeit zwei Schwerpunkte der atmosphärischen Schadstoffbelastung darstellen.

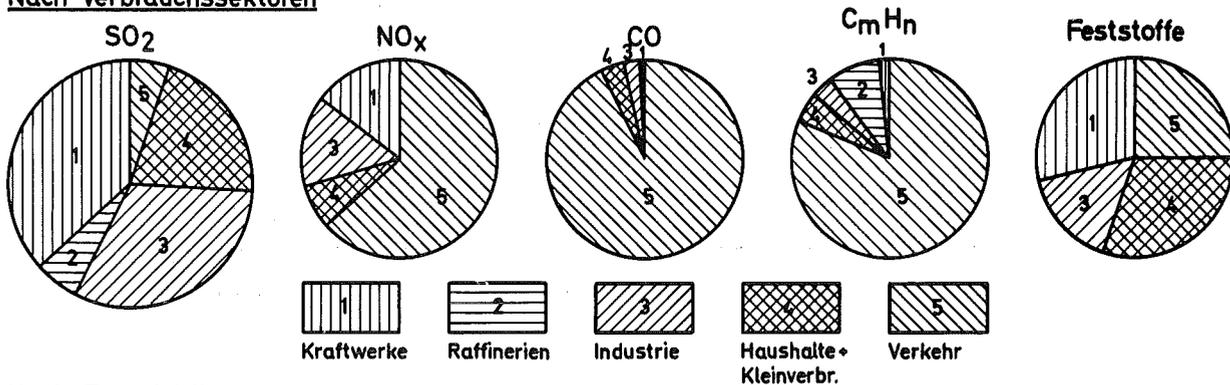
Bei den Feststoffen stellen die festen Brennstoffe mit einem Emissionsanteil von über 60 % den Hauptbelastungsfaktor dar. Die Verbrauchssektoren Kraftwerke und Haushalte und Kleinverbrauch (bei denen in erster Linie der Einsatz der festen Brennstoffe erfolgt) und der Sektor Verkehr (mit dem Ein-

satz von Vergaser- und Dieselkraftstoff) sind mit etwa gleich großen Anteilen an der Emission beteiligt, die Industrie fällt dagegen ab.

Die  $\text{SO}_2$ -Emissionen sind zu zwei Dritteln auf den Einsatz von flüssigen (davon Heizöl HEL mit 18 % und Heizöl HS mit 41 %) und zu einem Drittel auf den von festen Brennstoffen zurückzuführen. Der Sektor Verkehr trägt mit einem Anteil von 5 % nicht nennenswert zur  $\text{SO}_2$ -Emission bei. Bei einer Gegenüberstellung der Anteile von Kraftwerken (37 %), Raffinerien (6 %) und Industrie (32 %) einerseits und dem Anteil des Sektors Haushalte und Kleinverbrauch (20 %) andererseits ist auf die unterschiedlichen Emissionshöhen dieser beiden Emittentengruppen zu verweisen, die an dieser Stelle einen direkten Vergleich nicht sinnvoll erscheinen lassen. Eine detaillierte Darstellung des Einflusses unterschiedlicher Emissionshöhen erfolgt in Abschnitt 4.5.

Die relative Bedeutung der vorwiegend in Bodennähe (auf den Straßen) emittierten Gase  $\text{C}_m\text{H}_n$  und  $\text{CO}$  sowie  $\text{NO}_x$  wird durch detailliertere Rechnungen zu überprüfen sein.

Nach Verbrauchssektoren



Nach Energieträgern

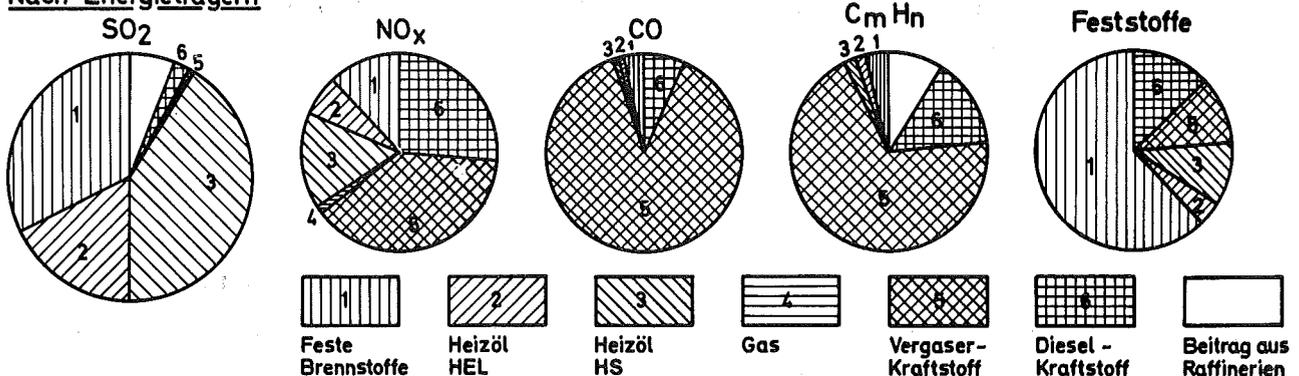


Abb. 5 Aufteilung der Schadstoff-Emissionen in Baden-Württemberg 1971

### 3.2 Thermische und Schadstoffemissionen 1980

#### 3.2.1 Thermische Emissionen

Der Anstieg im Primärenergieverbrauch von 36,6 Mio t SKE im Jahr 1971 auf 58,5 Mio t SKE im Jahr 1980 nach der DIW-Prognose /8/, also um den Faktor 1,6, ergibt unmittelbar einen entsprechenden Anstieg bei den thermischen Emissionen - diese steigen 1980 auf 384 200 Tcal an. Tab. 21 zeigt die Aufteilung dieser Emissionen.

Tab. 21 Thermische Emissionen in Baden-Württemberg 1980

	in Tcal	in %
<u>Umwandlungsbereich</u>		
Elektrizitätswirtschaft (Abwärme aus fossilen + nuklearen Kraftwerken, Eigenverbrauch, Über- tragungsverluste)	82 300	21,4
Raffinerien (Eigenverbrauch)	19 500	5,1
Gaswirtschaft		
<u>Endenergieverbrauch</u>		
Industrie	91 400	23,8
Haushalte + Kleinverbrauch	131 400	34,2
Verkehr	59 600	15,5
Gesamt	384 200	100,0

Daraus ergibt sich für die über das Land und das Jahr gemittelte Energiedichte im Jahr 1980:

bezogen auf die Bevölkerungszahl: 5,3 kW/Einwohner  
 bezogen auf die Fläche: 1,4 W/m<sup>2</sup>

Bedeutsam erscheint dabei der überproportionale Anstieg der punktuellen Wärmeemissionen aus Kraftwerken und Raffinerien (Faktor 2,5), der eine Verstärkung der ungleichgewichtigen Verteilung der thermischen Emissionen über die Fläche des Landes bedeutet.

### 3.2.2 Chemische Schadstoffemissionen

Die zeitliche Veränderung der Schadstoffemissionsmengen wird im wesentlichen durch drei Faktoren bestimmt:

1. durch die Änderung der absoluten Menge des Energieverbrauches.  
Von 1971 auf 1980 steigt er lt. DIW-Prognose um den Faktor 1,6.
2. durch die Änderungen in der Struktur des Energieverbrauches.  
Die wesentlichen Strukturänderungen lt. DIW-Prognose entstehen durch die hohen Zuwachsraten von Kernenergie und Gas und die starke Abnahme bei den festen Brennstoffen im Zeitraum von 1971 bis 1980.
3. durch die Veränderungen der natürlichen und technologischen Bedingungen des Energieeinsatzes und -verbrauches, also etwa Maßnahmen zur Entfernung von Schadstoffen aus Brennstoffen und Verbrennungsgasen, oder Einflüsse durch den unterschiedlichen Schadstoffgehalt der eingesetzten natürlichen Ressourcen.

Die Auswirkungen der unter Punkt 3. genannten Veränderungen sind heute nicht voll überschaubar. Wenn man diesen Punkt zunächst ausklammert und die Schadstoffemissionen aus dem Energieverbrauch 1980 nach / 8/ mit den heutigen Emissionsfaktoren errechnet, so ergeben sich die in Tab. 22 dargestellten Werte. Obwohl der Primärenergieverbrauch 1980 um 60 % gegenüber 1971 zunehmen wird, betragen die Zunahmen bei den Schadstoffemissionen für  $\text{SO}_2$  nur 8 %, für  $\text{NO}_x$  21 %, für CO 28 % und für  $\text{C}_m\text{H}_n$  30 % (Vergleich der Tab. 20 und 22). Für die Feststoffe ist dagegen eine Abnahme um fast 40 % festzustellen, die bedingt ist durch den starken Rückgang der festen Brennstoffe bei den Kraftwerken und insbesondere im Sektor Haushalte und Kleinverbrauch. Gemessen an der relativen Schadstoffbelastung S wird damit  $\text{SO}_2$  im Jahr 1980 der bedeutendste Schadstoff unter den genannten fünf sein.

Für  $\text{SO}_2$  sollen daher noch einige Fallbeispiele vor allem zu den Einflüssen des unter Punkt 3. genannten Faktors dargestellt und die jeweiligen Emissionsmengen bestimmt werden. Hierbei werden folgende Annahmen zugrundegelegt:

Tab. 22 Chemische Schadstoff-Emissionen in Baden-Württemberg 1980  
(in Tonnen)

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	Feststoffe
nach Verbrauchs- sektoren:-----					
Kraftwerke	110 000	37 000	0	1 000	8 000
Raffinerien	35 000	8 000 b)	a)	17 000 b)	a)
Industrie	139 000	46 000	2 000	2 000	8 000
Haushalte + Kleinverbrauch Verkehr c)	87 000	30 000	6 000	3 000	3 000
	12 000	230 000	1 132 000	124 000	16 000
Gesamt	383 000	351 000	1 140 000	147 000	35 000
nach Energie- trägern:-----					
Feste Brennstoffe	39 000	13 000	3 000	1 000	9 000
Heizöl HEL	101 000	31 000	4 000	3 000	3 000
Heizöl HS	196 000	59 000	1 000	2 000	7 000
Gas	0	10 000	0	0	0
Vergaser- kraftstoff	2 000	150 000	1 069 000	107 000	8 000
Diesel- kraftstoff	10 000	80 000	63 000	17 000	8 000
Relative Schadstoff- belastung S bezogen auf die Gesamt-Emission	0.67	0.19	0.06	0.26	0.35

a) keine Angaben vorhanden  
b) Angaben geschätzt

c) ohne Luft- und Schiffsverkehr  
d) ohne Beitrag aus Raffinerien

Fall 1: Vergleichsfall; Zahlenwerte aus Tab. 22, d.h. keine Änderung der spezifischen Emissionsbedingungen 1980 gegenüber 1971.

Fall 2: Anstieg des durchschnittlichen Schwefelgehalts im schweren Heizöl um 50 % gegenüber 1971 (d.h. auf 2,1 %), bedingt durch einen Anstieg des durchschnittlichen S-Gehaltes im eingesetzten Rohöl. (Nach /43/ betrug der durchschnittliche S-Gehalt von Rohölen, die in den Raffinerien der BRD verarbeitet werden, 1971 0,92 %; er ist seitdem angestiegen - für 1973 wird ein Wert von 1,18 % genannt. Auf einen weiteren Anstieg deutet hin, daß der durchschnittliche S-Gehalt der Weltvorräte an Rohöl mit 1,75 % angegeben wird.)

Fall 3: Durch eine geeignete Kombination von Verfahren der Heizöl- und Rauchgasentschwefelung werden Emissionsbedingungen erreicht, die einem S-Gehalt von 0,3 % im leichten Heizöl und 1 % im schweren Heizöl äquivalent sind.

Fall 4: Hypothetischer Fall, daß die 1980 vorgesehene Stromerzeugung aus Kernkraftwerken in konventionellen Kohlekraftwerken erfolgt.

Tab. 23 zeigt für diese vier Fälle, wie sich die SO<sub>2</sub>-Emissionen ändern.

Tab. 23 Alternativen der SO<sub>2</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg 1980 (in Tonnen)

	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
nach Verbrauchs- sektoren:-----				
Kraftwerke	110 000	<u>148 000</u>	<u>88 000</u>	<u>300 000</u>
Raffinerien	35 000	<u>52 000</u>	<u>25 000</u>	35 000
Industrie	139 000	<u>199 000</u>	<u>100 000</u>	139 000
Haushalte + Kleinverbrauch	87 000	87 000	<u>57 000</u>	87 000
Verkehr c)	12 000	12 000	12 000	12 000
Gesamt	383 000	498 000	282 000	573 000
nach Energie- trägern----- d)				
Feste Brennstoffe	39 000	39 000	39 000	<u>229 000</u>
Heizöl HEL	101 000	101 000	<u>66 000</u>	101 000
Heizöl HS	196 000	<u>294 000</u>	<u>140 000</u>	196 000
Gas	0	0	0	0
Vergaser- kraftstoff	2 000	2 000	2 000	2 000
Diesel- kraftstoff	10 000	10 000	10 000	10 000
Relative Schadstoff- belastung S bezogen auf die Gesamt-Emission	0.67	0.87	0.49	1.0

c) ohne Luft- und Schiffsverkehr

d) ohne Beitrag aus Raffinerien

### 3.3 Die regionale Verteilung der thermischen und Schadstoffemissionen

Die Abschnitte 3.1 und 3.2 hatten pauschale Ermittlungen über das ganze Land Baden-Württemberg zum Inhalt. Hieraus lassen sich noch keine Aussagen über die Verteilung der Schadstoffemissionen und die tatsächliche Belastungssituation in den dichter besiedelten Landesteilen ableiten. Im folgenden wird eine Übersicht über den regional stark unterschiedlichen Energieeinsatz und die daraus resultierenden Schadstoffemissionen gegeben.

In Tab. 24 wurde der Endenergieverbrauch nach /1/ der Sektoren Industrie (einschl. industrielle Stromerzeugung), Haushalte und Kleinverbrauch und

Tab. 24 Die regionale Aufteilung des Endenergieverbrauchs und der Emissionen in Baden-Württemberg 1971

NAME	ENERGIEVERBRAUCH (IN 1000 TONNEN SKE)				ENERGIEDICHTE		EMISSIONEN (IN TONNEN SCHADSTOFF)					
	INDUSTRIE	HAUSH.+KL.	VERK.	GESAMT	E/CAP (KW/CAP)	E/FL. (W/QM)	SO-2	NO-X	CO	CM-HN	FEST STOFFE	
NORD-WÜRTTEMBERG												
S STUTTGART	351.62	872.48	512.55	1736.64	2.55	7.79	9782.42	17840.83	68585.88	7983.62	2696.86	
S HEILBRONN	198.67	146.37	86.33	431.36	3.93	6.26	4272.77	3806.47	10779.20	1316.89	740.97	
S ULM	53.29	127.29	79.64	260.22	2.56	3.51	1313.77	2744.40	9748.61	1169.08	395.74	
AALEN	159.02	198.22	99.28	456.52	2.63	0.39	3408.41	3884.06	14165.80	1632.96	613.19	
BACKNANG	69.50	141.04	75.08	285.63	2.39	0.45	1737.37	2687.52	10624.92	1220.09	451.44	
BOEBLINGEN	242.15	275.43	149.54	667.11	2.86	1.36	5135.76	5832.30	22547.29	2545.21	941.15	
CRAILSHEIM	19.60	85.66	46.26	151.52	2.04	0.18	805.47	1574.51	6545.45	746.89	238.89	
ESSLINGEN	146.63	328.60	181.73	656.96	2.37	2.41	3656.42	6358.66	26448.83	2995.04	981.53	
GOEPFINGEN	238.09	301.83	160.89	700.80	2.85	1.03	4964.79	6198.39	22299.97	2590.05	1015.11	
HEIDENHEIM	308.88	167.76	78.65	555.29	4.08	0.83	6202.49	4135.09	11405.38	1345.17	815.01	
HEILBRONN	238.50	253.87	129.05	621.42	2.93	0.66	5196.83	5271.15	19102.02	2179.84	827.43	
KUENZELSAU	55.91	41.27	22.77	119.95	3.32	0.33	1227.52	1026.97	3194.21	374.30	192.97	
LEONBERG	40.41	177.27	96.76	314.43	2.13	1.01	1518.85	3242.10	13951.15	1580.81	473.44	
LUOWIGSBG.	227.31	410.64	210.91	848.86	2.52	1.83	5362.33	7692.06	30450.56	3476.33	1206.88	
MERGENTH.	5.50	53.05	28.37	87.02	1.90	0.17	400.78	938.77	3925.27	450.52	138.88	
NUERTINGEN	227.35	211.58	118.59	557.52	3.15	1.36	3991.18	4717.25	16974.10	1952.61	795.98	
DEHRINGEN	19.07	61.89	32.89	113.85	2.11	0.26	545.12	1109.36	4778.39	541.17	161.55	
SCHWAEB.GM	48.42	145.85	75.09	269.36	2.24	0.56	1372.43	2585.38	10694.50	1221.12	395.38	
SCHW.HALLL	25.14	80.33	44.22	149.69	2.16	0.25	838.95	1528.48	6142.63	706.23	225.96	
ULM	150.78	114.32	56.69	321.78	3.11	0.36	3189.54	2589.95	8489.79	974.08	447.59	
VAIHINGEN	82.61	121.73	65.68	269.42	2.63	0.65	1566.47	2395.76	9047.28	1045.23	361.76	
WAIBLINGEN	120.88	329.07	192.85	642.79	2.39	1.36	3532.63	6665.24	25693.17	2995.09	997.33	
NORD-BADEN												
S KARLSRUHE	624.20	389.34	210.83	1224.36	4.35	8.53	13172.16	10048.32	28740.37	3412.62	1589.42	
S HEIDELBERG	28.62	169.68	87.72	286.03	2.18	2.82	1375.11	2945.68	12316.78	1409.58	446.21	
S MANNHEIM	880.50	473.43	268.67	1622.01	4.56	10.40	16627.25	12914.22	34655.77	4205.30	2362.59	
S PFORZHEIM	40.37	135.78	62.16	238.31	2.38	3.47	1297.54	2183.21	8875.09	1016.75	358.35	
BRUCHSAL	138.11	180.39	88.02	406.52	2.69	0.80	2806.68	3431.91	12597.55	1447.94	540.49	
BUCHEN	19.00	82.69	37.76	139.45	1.94	0.16	728.49	1305.19	5420.77	618.94	210.94	
HEIDELBERG	258.41	245.36	120.62	624.39	3.12	1.20	5685.85	5163.57	18123.25	2066.20	835.13	
KARLSRUHE	186.24	282.63	139.12	607.99	2.67	0.96	4215.43	5286.83	20459.36	2327.89	888.10	
MANNHEIM	286.55	278.43	134.48	699.45	3.20	2.04	5585.25	5589.02	20093.36	2296.06	1012.58	
MOSBACH	80.09	95.66	51.12	226.87	2.71	0.46	1844.49	2031.56	6997.56	818.52	319.24	
PFORZHEIM	25.21	109.59	43.84	169.64	2.15	0.60	973.82	1542.71	6862.09	762.61	252.24	
SINSHEIM	54.61	118.90	57.53	231.04	2.40	0.42	1537.46	2121.15	7941.18	922.38	344.13	
TAUBERB.	53.95	104.04	51.68	209.66	2.33	0.25	1057.79	1801.80	7196.45	829.03	278.91	
SUED-BADEN												
S FREIBURG	137.03	226.64	127.69	491.36	2.71	4.65	3668.40	4805.85	16809.89	1982.81	826.60	
S BADEN-BAD.	6.64	66.80	31.89	105.33	2.57	1.02	526.83	1081.31	4404.48	508.44	177.64	
BUEHL	105.59	107.67	68.22	281.48	2.81	0.69	2312.08	2681.52	9383.47	1089.43	417.82	
DONAUESCH.	37.42	89.23	47.70	174.35	2.15	0.22	995.84	1671.99	6913.25	785.09	264.70	
EMMENDING.	67.99	152.21	70.02	290.23	2.21	0.40	1840.44	2560.05	10543.63	1189.05	423.56	
FREIBURG	33.82	199.78	66.22	209.82	2.06	0.31	1168.10	2257.50	9635.19	1087.12	359.60	
HOCHSCHWZM	26.64	57.41	31.42	115.47	2.32	0.15	753.92	1135.46	4386.36	506.30	230.18	
KEHL	79.34	78.02	40.40	197.76	2.91	0.58	1100.36	1511.69	5717.13	657.60	225.70	
KONSTANZ	161.85	254.51	128.15	544.52	2.60	0.98	3755.44	4852.92	18641.31	2129.79	936.91	
LAHR	26.79	117.85	55.59	200.23	2.07	0.42	1010.68	1904.58	8039.26	914.06	302.46	
LOERRACH	319.54	197.23	94.57	611.34	3.63	0.90	6407.61	4643.82	14325.69	1652.14	928.76	
MUELLHEIM	37.52	80.08	43.57	161.57	2.30	0.34	1083.69	1591.14	6531.64	735.97	255.13	
OFFENBURG	110.84	139.09	73.63	323.56	2.63	0.65	2570.76	2895.33	10403.61	1201.43	471.85	
RASTATT	304.78	188.51	95.66	588.34	3.83	1.01	5785.21	4481.96	14022.02	1620.76	762.58	
SAECKINGEN	338.26	94.70	46.07	479.03	5.76	1.17	2776.08	2157.63	7083.56	809.93	392.78	
STOCKACH	22.55	63.00	33.75	119.30	2.10	0.18	683.24	1176.95	5000.99	563.23	185.23	
UEBERLG.	19.39	94.59	50.72	164.70	1.98	0.27	740.36	1680.19	7769.89	862.12	242.80	
VILLINGEN	54.56	180.37	62.60	297.52	2.00	0.54	1616.67	2294.23	9263.96	1059.76	417.38	
WALDSHUT	281.28	89.79	49.24	420.31	5.27	0.66	4017.68	2634.94	7083.67	839.72	638.03	
WOLFACH	35.62	69.08	33.75	138.45	2.23	0.20	765.38	1214.61	4884.64	556.95	194.28	

Tab. 24 Die regionale Aufteilung des Endenergieverbrauchs und der Emissionen in Baden-Württemberg 1971  
(Fortsetzung)

NAME	ENERGIEVERBRAUCH (IN 1000 TONNEN SKE)				ENERGIEDICHTE		EMISSIONEN (IN TONNEN SCHADSTOFF)					
	INDUSTRIE	HAUSH.+KL.	VERK.	GESAMT	E/CAP (KW/CAP)	E/FL. (W/QM)	SO-2	NO-X	CO	CM-HN	FEST STOFFE	
SÜD-WÜRTTEMBERG	BALINGEN	132.52	156.01	85.75	374.28	3.02	0.71	2999.88	3373.35	12055.93	1395.09	531.25
	BIBERACH	52.68	140.36	74.60	267.64	2.12	0.24	1481.97	2595.48	10652.11	1215.25	386.63
	CALW	50.66	193.87	102.84	347.36	2.16	0.36	1968.89	3553.59	14476.68	1657.47	543.89
	EHINGEN	308.02	60.06	28.95	397.03	7.27	0.75	5648.21	2525.82	4392.29	539.50	421.15
	FREUDENST.	44.28	91.01	48.87	184.16	2.56	0.28	1250.62	1789.68	6475.84	760.82	277.69
	HECHINGEN	27.68	73.45	41.32	142.45	2.33	0.33	813.95	1439.94	5546.80	646.15	220.12
	HORB	24.97	60.08	32.74	117.79	2.21	0.31	589.04	1122.12	4564.95	525.32	165.59
	MUENSINGEN	7.47	50.98	27.40	85.86	1.88	0.12	412.89	912.52	3927.55	445.45	133.12
	RAVENSBURG	168.58	150.64	86.71	405.93	3.02	0.53	3452.33	3537.66	12375.00	1425.57	547.86
	REUTLINGEN	148.10	260.24	141.31	549.65	2.59	1.04	3538.55	5149.63	19590.54	2266.87	861.69
	ROTTWEIL	84.47	133.76	91.65	309.88	2.76	0.54	1893.01	3213.39	13158.38	1493.01	469.98
	SAULGAU	33.63	87.28	46.06	166.97	2.13	0.21	876.10	1594.75	6405.39	737.54	241.09
	SIGMARING.	27.06	64.72	36.77	128.54	2.25	0.18	706.42	1272.02	5214.48	595.51	189.14
	TETTANG	47.43	117.99	63.62	229.03	2.30	0.81	1255.78	2206.37	9616.28	1075.61	355.53
	TUEBINGEN	54.24	189.68	99.87	343.80	2.09	0.66	1891.71	3443.84	14233.47	1623.07	518.44
	TUTTLINGEN	38.75	125.12	61.92	225.79	2.28	0.46	1187.64	2138.41	8849.74	1011.69	346.25
WANGEN	127.51	95.70	53.41	276.62	3.11	0.34	2638.89	2332.03	7579.99	880.05	355.20	
SUMME	9290.66	11809.90	6269.92	27370.61	2.81	0.71	203112.75	242622.56	895830.94	102220.69	39771.85	

Ausgangswerte

(in 1000 t SKE)

	Industrie Endenergieverbrauch + ind. Stromerzeugung	Haushalte + Kleinverbrauch	Verkehr
Feste Brennstoffe	850	1 400	
Heizöl HEL	1 695	8 020	
Heizöl HS	4 644		
Gas	284	710	
Strom	1 817	1 350	
Fernwärme		330	
Vergaserkraftstoff			3 960
Dieselmkraftstoff			2 310
	9 290	11 810	6 270

Verkehr mit den entsprechenden Emissionen auf die einzelnen Stadt- und Landkreise aufgeteilt. Wegen der vorhandenen Daten mußte auf politische Grenzen zurückgegriffen werden; im Hinblick auf energiewirtschaftliche Betrachtungen sind diese Grenzen willkürlich. Die höchstbelasteten Gebiete - was die flächenbezogene Energiedichte betrifft - sind aus Tab. 25 ersichtlich.

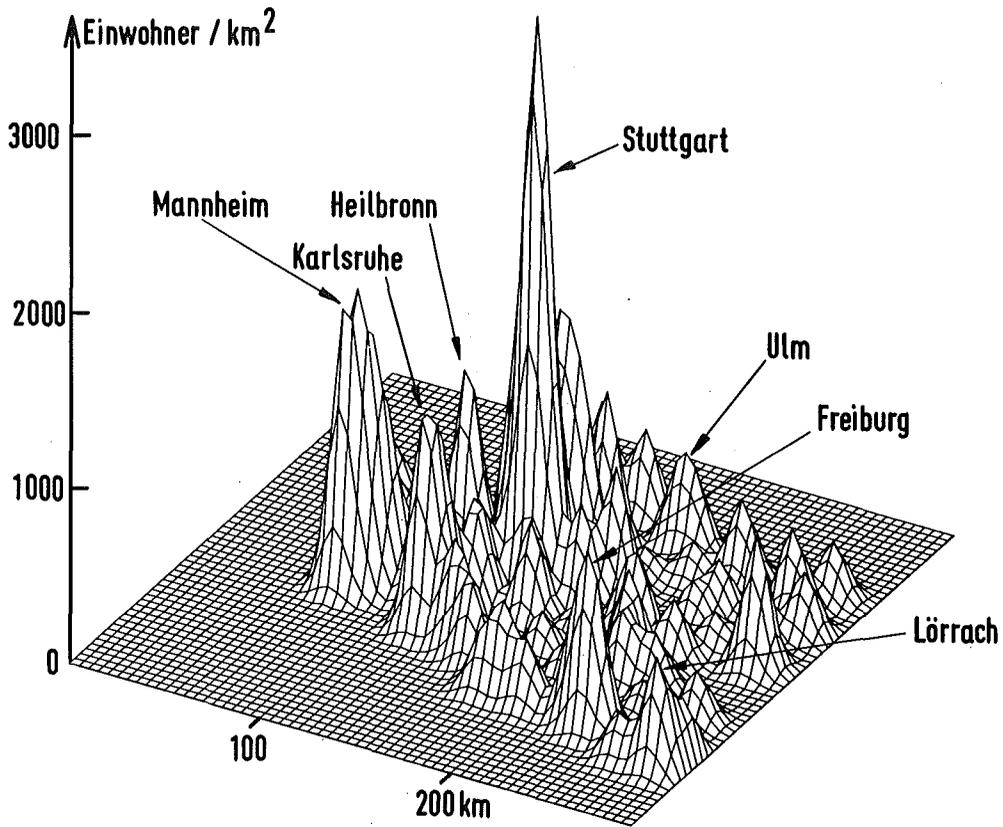
Tab. 25 Die höchstbelasteten Gebiete in Baden-Württemberg

Rangfolge	Stadtkreis	Fläche (km <sup>2</sup> )	Durchmesser (ca km)	Leistungsdichte Endenergieverbrauch (W/m <sup>2</sup> )
1)	Mannheim	145	14	10.40
2)	Karlsruhe	133	13	8.53
3)	Stuttgart	207	16	7.79
4)	Heilbronn	64	9	6.26
5)	Freiburg	98	11	4.65

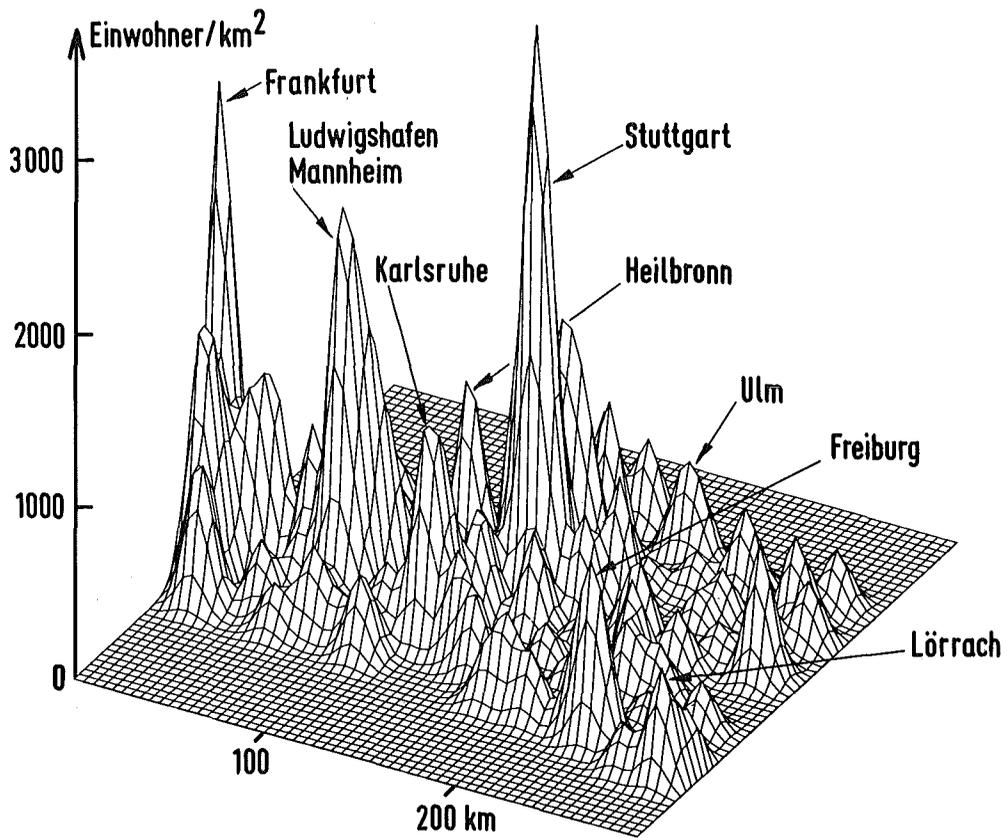
In diesen Städten, also in Gebieten mit etwa 10-15 km Durchmesser erreicht der Energieverbrauch bereits das 5- bis 10-fache des Landesmittelwertes und kommt damit in die Größenordnung von 1/10 der mittleren Sonneneinstrahlung. Diese Werte erhöhen sich noch, wenn der Umwandlungssektor mit berücksichtigt wird.

Eine graphische Darstellung der regional unterschiedlichen Situation wird in den Abb. 6 bis 8 gegeben /44/. In Abb. 6 ist die räumliche Verteilung der Bevölkerung dargestellt, in den Abb. 7 und 8 die räumliche Verteilung des gesamten Energieverbrauchs und der SO<sub>2</sub>-Emissionen einschließlich der Beiträge aus dem Umwandlungssektor.

Bei dieser Darstellung wurden die an Baden-Württemberg angrenzenden Gebiete im Nördlichen Oberrheingebiet mit einbezogen, weil dort hochbelastete Gebiete im Lande unmittelbar an hochbelastete Gebiete außerhalb des Landes angrenzen und damit erst eine gemeinsame Darstellung den rechten Eindruck von der dort tatsächlich vorhandenen Situation vermittelt. Für die Regionaldarstellungen

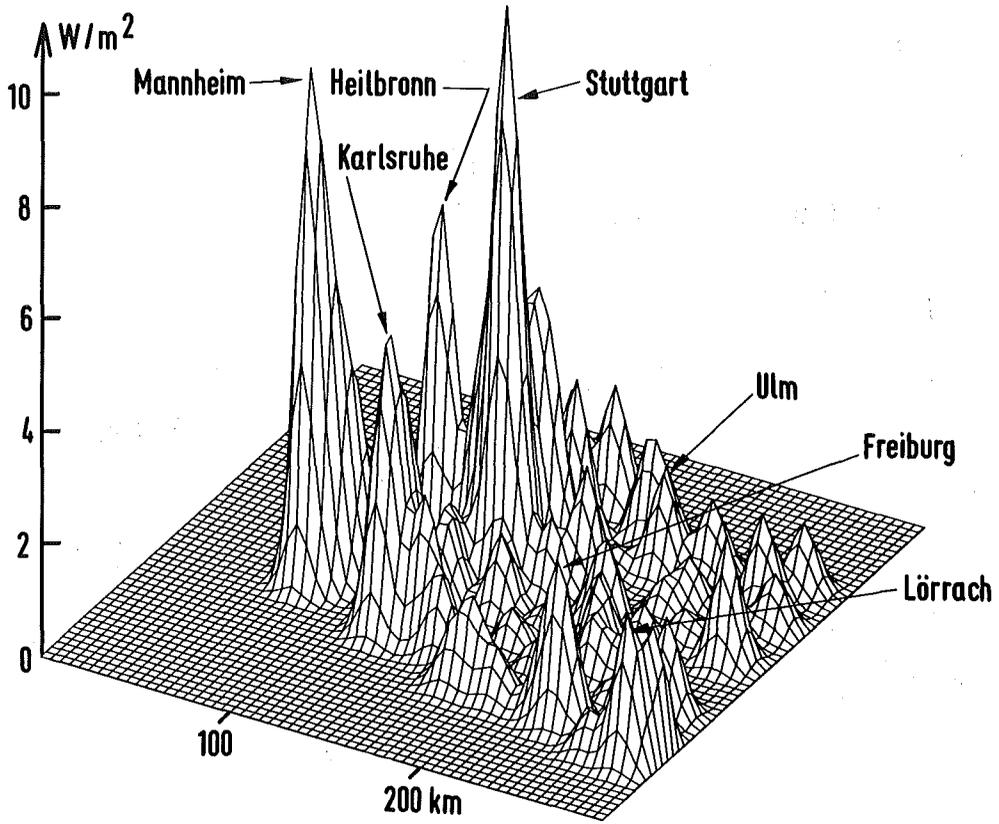


a) Baden-Württemberg



b) Süd-West-Deutschland

Abb. 6 Bevölkerungsdichte



a) Baden-Württemberg

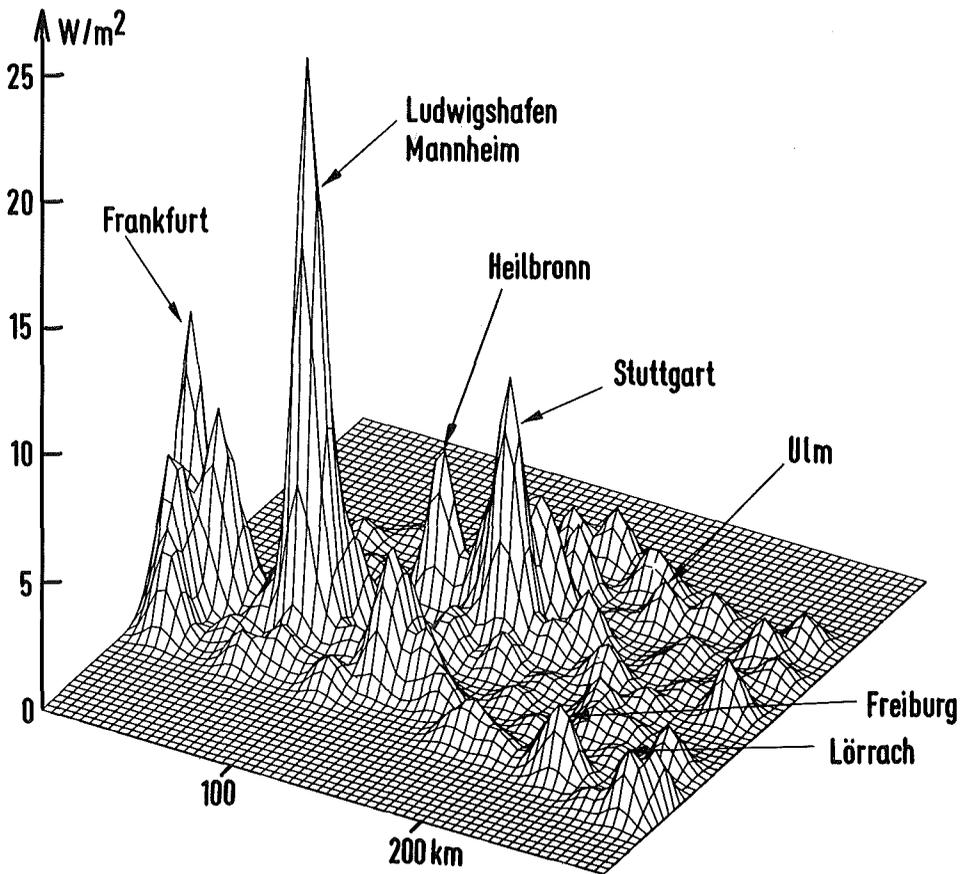
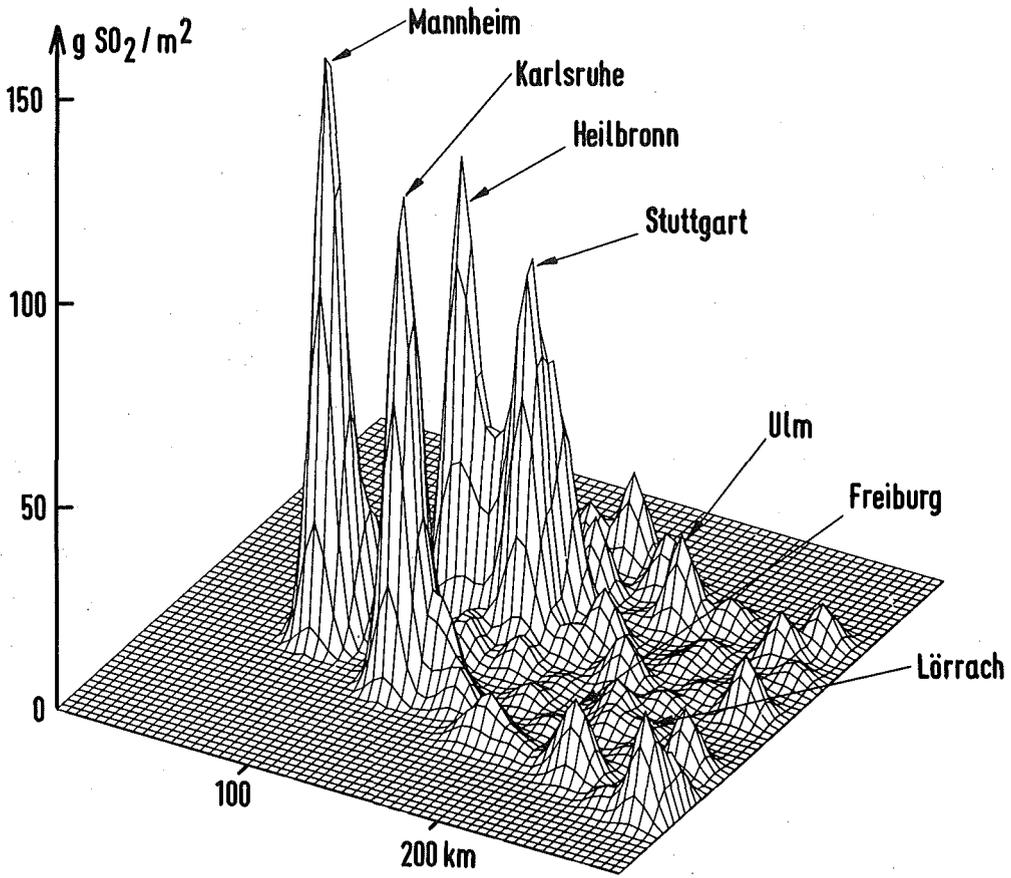
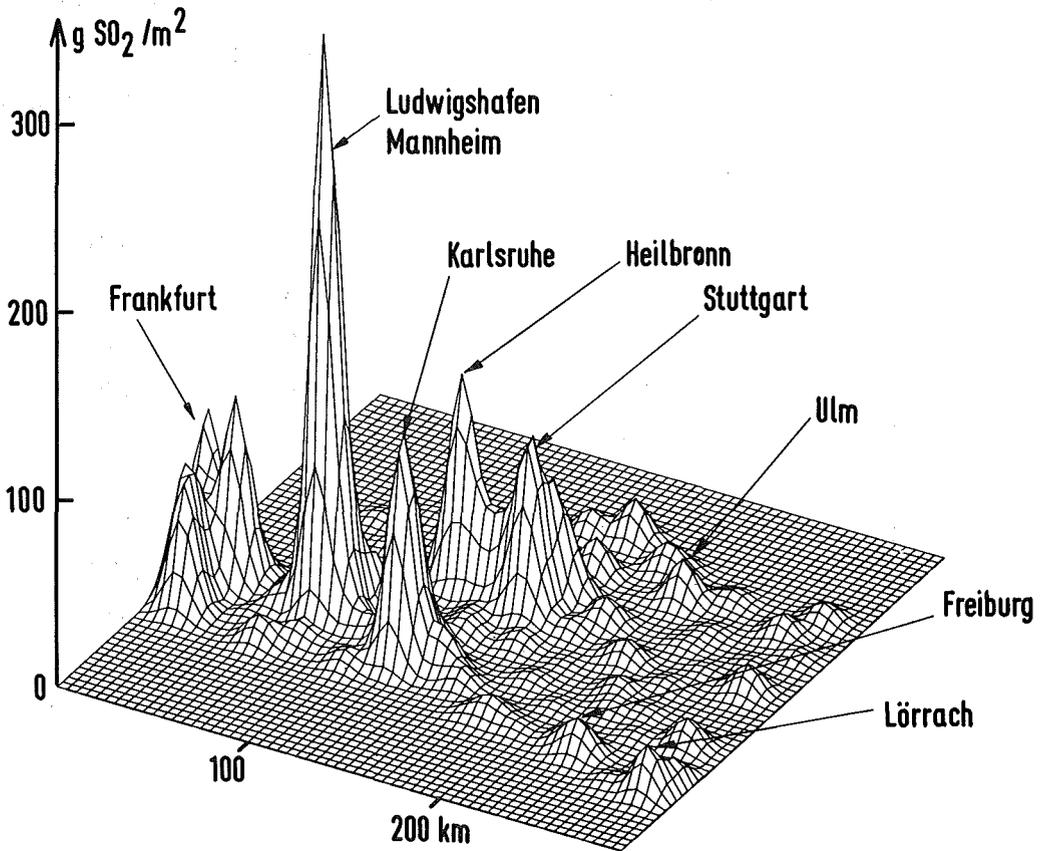


Abb. 7 Gesamte Energiefreisetzung (Jahresmittel)

b) Süd-West-Deutschland



a) Baden-Württemberg



b) Süd-West-Deutschland

Abb. 8 SO<sub>2</sub>-Emissionsdichte (Jahresmittel)

der Abb. 6 bis 8 waren - abweichend von dem in dieser Studie benutzten Datenmaterial für das Bezugsjahr 1971 - nur die Werte für 1970 in dem hier notwendigen Detaillierungsgrad verfügbar. Da mit dieser Darstellung jedoch die regionale Verteilung und nicht so sehr die absolute Höhe der Energieumsetzungen aufgezeigt werden soll, ist dieser Umstand nicht von Bedeutung.

Die gezeichneten Werte basieren auf statistischen Unterlagen für die Stadt- und Landkreise und sind vom jeweiligen mit der Bevölkerungsverteilung gewichteten Kreisschwerpunkt in Form einer Gaußverteilung mit 15 km Halbwertsbreite auf die Fläche verteilt. Diese Halbwertsbreite wurde im Hinblick auf eine möglichst getreue Wiedergabe der Situation in den Verdichtungsräumen gewählt. Strukturen mit einer Größe von etwa 3 und weniger Rasterpunkten Ausdehnung werden mit diesem Verfahren nur ungenau wiedergegeben. Das trifft vor allem für Großanlagen mit Standorten in sonst wenig genutzten Gebieten zu.

Im einzelnen ist den Regionaldarstellungen folgendes zu entnehmen:

- 1) Als ausgedehnte Verdichtungsräume treten Stuttgart mit den umliegenden Kreisen sowie Mannheim mit Heidelberg hervor. In zweiter Linie sind Karlsruhe und Heilbronn zu nennen. Das Mannheimer Gebiet erhält bei Hinzunahme der linksrheinischen Gebiete (in Abb. 6b ergänzt) ein deutlich stärkeres Gewicht.
- 2) In der Energiefreisetzung dominieren die Rheinstrecke im Gebiet Karlsruhe-Mannheim, weiter das Neckartal von Stuttgart bis Heilbronn. Hier macht sich neben dem weitgehend parallel zur Bevölkerung verteilten Endenergieverbrauch die Konzentration von Anlagen des Umwandlungssektors (Wärme-kraftwerke und Raffinerien) bemerkbar.
- 3) Noch stärker als bei der Energiefreisetzung tritt der Einfluß des Umwandlungssektors bei der  $SO_2$ -Emissionsstruktur in den Vordergrund: das Oberrheintal und das Neckartal bestimmen hier das Feld. Auch hier ist ein deutlicher Anstieg im nördlichen Oberrheingraben festzustellen, wenn die linksrheinischen Kreise mit berücksichtigt werden (siehe Abb. 8b).

#### 4. Eine regionale Betrachtung am Beispiel des Oberrheingebietes

Zustands- und Auswirkungsanalysen der Umwelt müssen sich eines Bündels von Methoden bedienen. Als ein wichtiges methodisches Werkzeug kann die Emission-Immissions-Rechnung angesehen werden. Viele Aussagen zur Umweltbelastung beschränken sich auf Aussagen über Emissionen. Diese Aussagen sind sicherlich notwendig. Die tatsächliche Beeinflussung der Natur wie auch des Menschen ist jedoch durch das Vorliegen von Immissionen (Schadstoffkonzentrationen) an bestimmten Orten zu bestimmten Zeiten bedingt. Viele Fragen der Umweltpolitik, wie etwa Raum- und Strukturplanung, Zumutbarkeit von Belastungen bzw. Standardsetzung und auch das damit zusammenhängende Problem möglicher Wachstumsgrenzen, lassen sich nur durch Kenntnis der Immissionen in den Regionen lösen. Die Ursache von Immissionen sind zwar immer Emissionen, in dem spezifischen Zusammenhang dieser beiden Größen drückt sich jedoch die "ökologische Leistungsfähigkeit" einer Region aus, d.h. die Verdünnungs- und Umwandlungsfähigkeit von Emissionen. Die folgenden Untersuchungen beziehen sich auf das Oberrheingebiet, das in erster Näherung als eine ökologisch abgeschlossene Region mit ähnlichen meteorologischen und hydrologischen Gegebenheiten angesehen werden kann.

#### 4.1 Die meteorologischen Verhältnisse im Oberrheingebiet

Für die Beurteilung der ökologischen Situation des Oberrheintales ist die Kenntnis der meteorologischen Gegebenheiten notwendig. Eine Reihe meteorologischer Daten wurde für die atmosphärischen Ausbreitungsrechnungen dieses Gutachtens sowie zur Beurteilung der Ergebnisse solcher Rechnungen benötigt.

Für die modelltheoretischen Untersuchungen der folgenden Abschnitte wurden Temperatur-, Feuchte- und Windbeobachtungen, Sonnenscheindauer, Bodennebel-, Inversionswetterlagenhäufigkeit und Häufigkeitsverteilungen der Ausbreitungskategorien ausgewertet. In erster Linie dienten hierzu die Wetterbeobachtungen der Stationen Freiburg (Stefan-Meier-Str., 269 m NN), Feldberg/Schwarzwald (1496 m NN) und Karlsruhe (Erzberger Str., 114 m NN); die Daten wurden in dankenswerter Weise vom Deutschen Wetterdienst, Abtlg. Klima, zur Verfügung gestellt. Außerdem konnten Wetterbeobachtungen des Bundeswehrfliegerhorstes Bremgarten/Heitersheim (südwestlich von Freiburg gelegen) zur Analyse herangezogen werden. Ein Teil der ausgewerteten Daten wurde der Literatur entnommen (DEUTSCHES METEOROLOGISCHES JAHRBUCH /45/, MANIER /46/, NESTER /47/, KLEISS /48/, DIEM /49/). Außerdem wurden Meßwerte der Stuttgarter Radiosonde verwendet (DEUTSCHER WETTERDIENST /50/). Der Versuch, das meteorologische Institut der Universität Karlsruhe an der Datenbeschaffung bzw. der Interpretation vorhandener Daten zu beteiligen, gelang leider nicht.

##### 4.1.1 Sonnenscheindauer und Bodentemperaturen

In den Abb. 9 und 10 ist die mittlere Sonnenscheindauer der Stationen Freiburg und Karlsruhe aus dem Beobachtungszeitraum zwischen 1960 und 1969 wiedergegeben. Auf der linken Ordinate sind Monatsmittelwerte der Dauer in Stunden pro Tag angegeben (durchgezogenes Histogramm); die rechte Ordinate gibt Monatsmittelwerte in Prozent der möglichen Sonnenscheindauer (gestricheltes Histogramm). Im Winterhalbjahr liegen die Mittelwerte für Freiburg bzw. Karlsruhe bei 2.8 h/Tag (28 %/mögliche Dauer) bzw. 2.5 h/Tag (25 %/mögliche Dauer). Im Sommerhalbjahr ergeben sich entsprechende Werte von 7.0 h/Tag (48 %/mögliche Dauer) bzw. 6.7 h/Tag (45 %/mögliche Dauer).

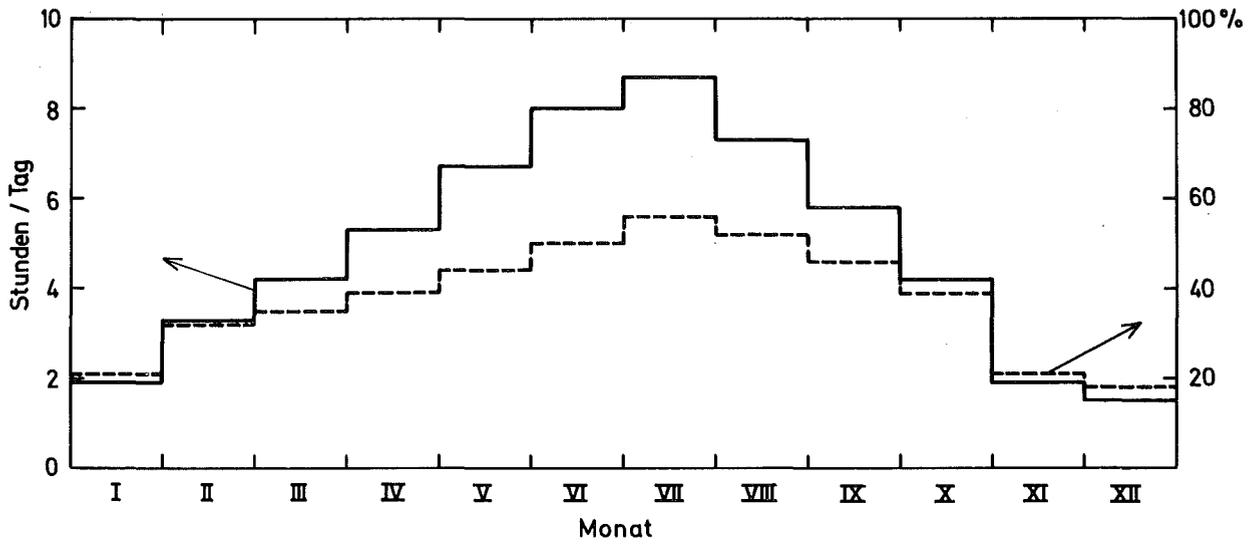


Abb. 9 Jährlicher Gang der Sonnenscheindauer in Freiburg

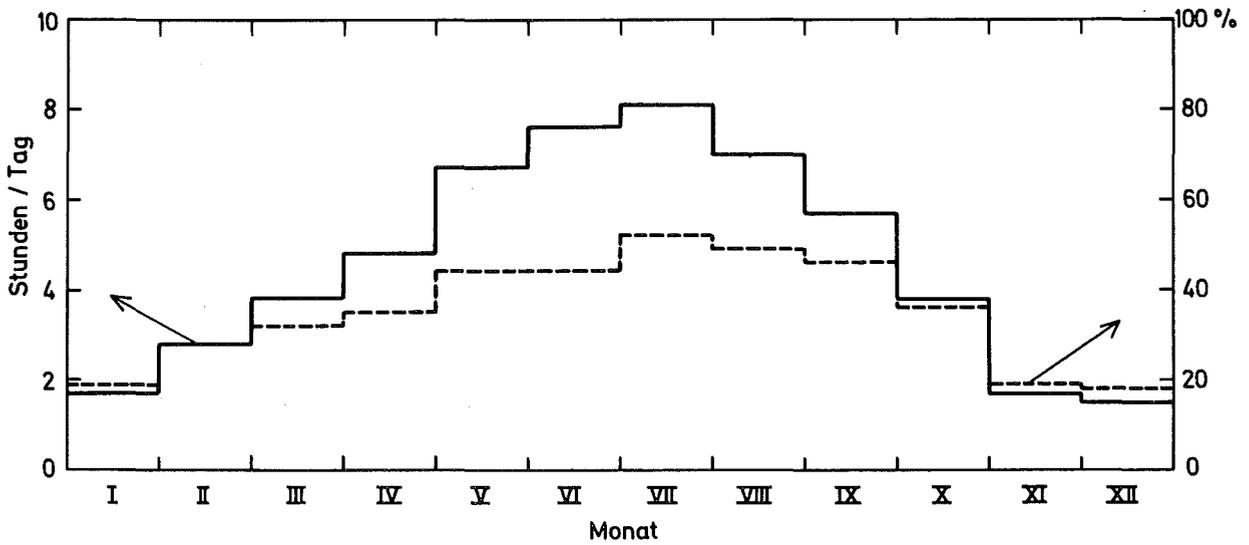


Abb. 10 Jährlicher Gang der Sonnenscheindauer in Karlsruhe

Die Abb. 11 zeigt eine Häufigkeitsverteilung der Temperaturen, die sich aus stündlichen Meßwerten der Stationen Freiburg und Karlsruhe zusammensetzt. Ausgewertet wurde der Zeitraum zwischen 1951 und 1965. Temperaturen unter etwa  $8^{\circ}$  treten in Karlsruhe etwas seltener auf als in Freiburg. Die Häufigkeitsverteilung zeigt an beiden Orten bei Temperaturen um  $13^{\circ}$  ein Maximum. Im langjährigen Mittel werden für Karlsruhe im Januar  $1.0^{\circ}$ , im Juli  $19.1^{\circ}$  angegeben. Für Freiburg liegen die entsprechenden Werte bei  $1.1^{\circ}$  bzw.  $19.3^{\circ}$ .

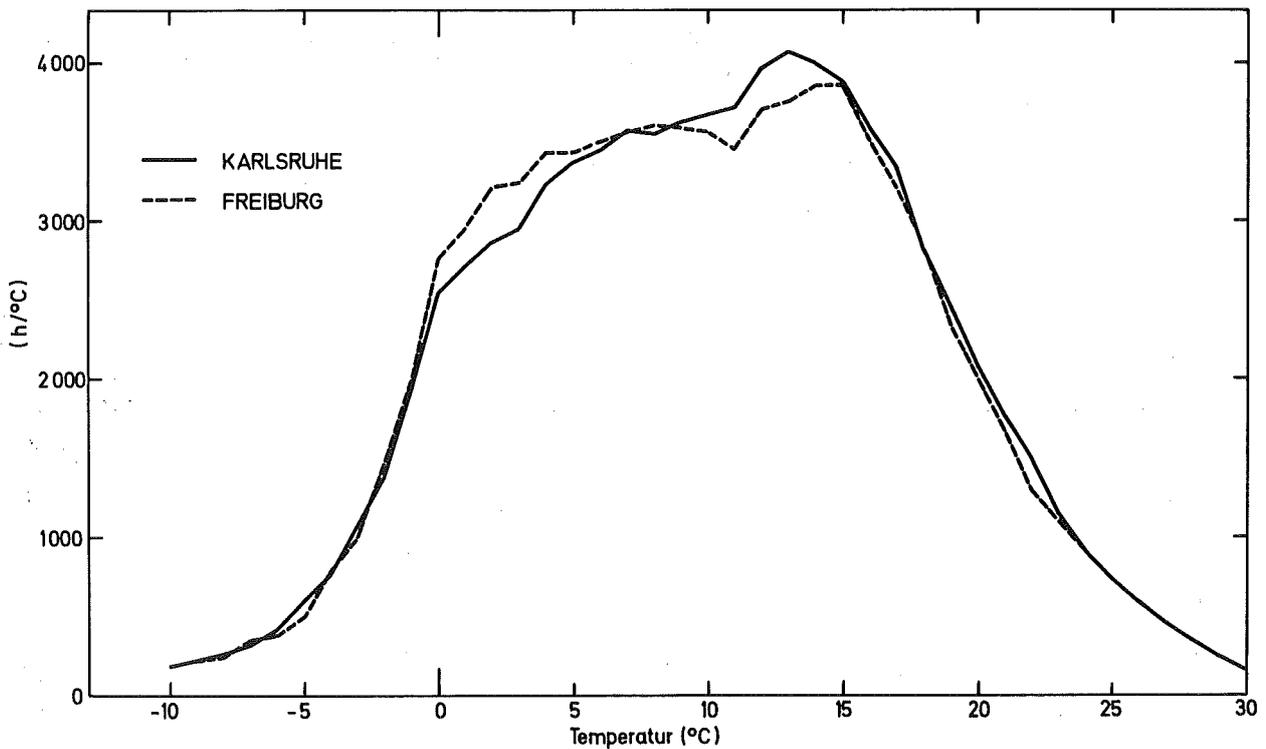


Abb. 11 Temperaturverteilungen für Freiburg und Karlsruhe im Zeitraum zwischen 1951 bis 1965

#### 4.1.2 Relative Feuchte- und Bodennebelhäufigkeit

Abb. 12 zeigt Häufigkeitsverteilungen der relativen Feuchte jeweils für Freiburg und für Karlsruhe. Die Auswertung erstreckt sich über stündliche Beobachtungen aus den Jahren 1951 bis 1965. In Abb. 12 ist eingetragen, mit welcher Häufigkeit eine bestimmte Feuchte überschritten wird. Die dargestellten Kurven ergaben sich mittels Interpolation der Feuchtwerte, die mit 5 %--

Schrittweite vorlagen. Beispielsweise werden in Freiburg bzw. in Karlsruhe in 50 % aller Fälle relative Feuchten von mehr als 78 % bzw. 82 % registriert.

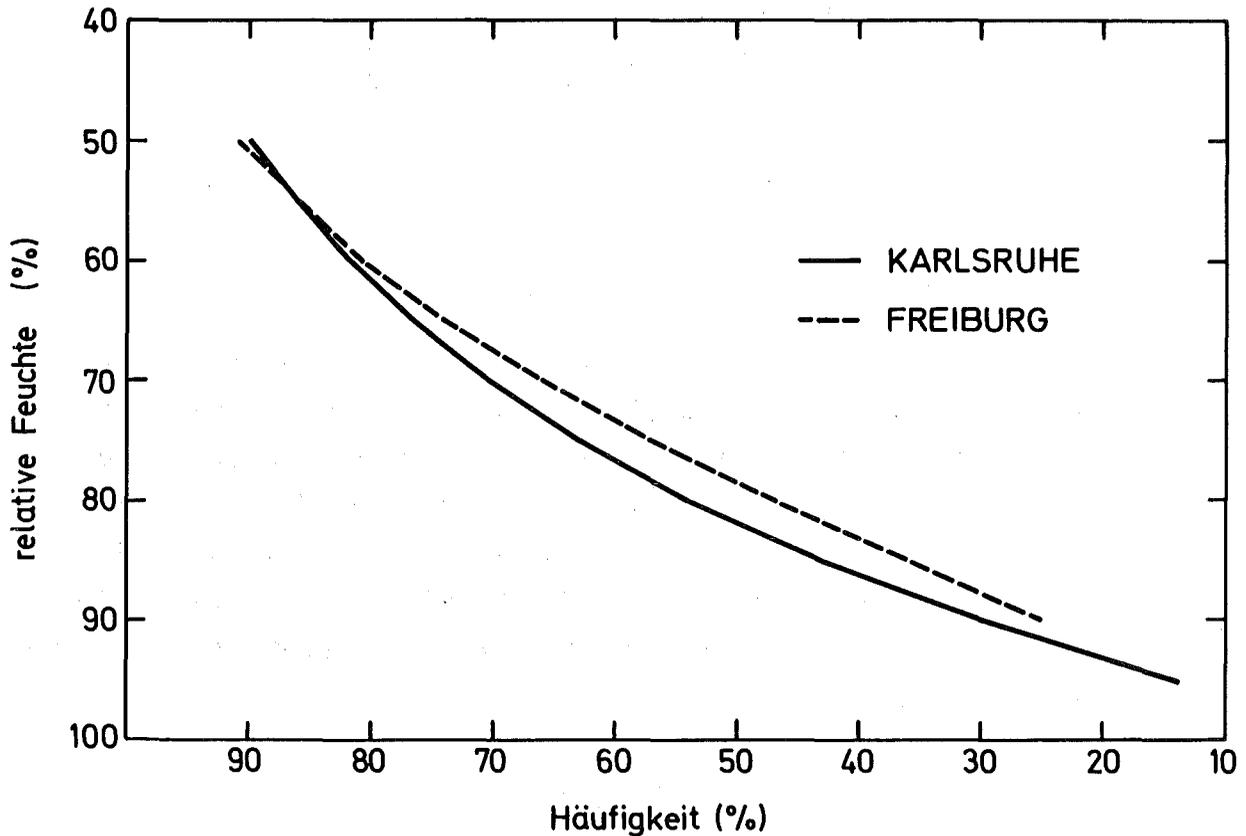


Abb. 12 Relative Feuchtwerte für Freiburg und Karlsruhe im Zeitraum 1951 bis 1965 in Abhängigkeit von der Häufigkeit in kumulativer Darstellung

In Tab. 26 sind die Bodennebelhäufigkeiten in Stunden pro Jahr für Bremgarten, Gernsheim und Frankfurt angegeben. Bremgarten weist gegenüber Gernsheim und Frankfurt mehr Bodennebel auf. Bei der Interpretation dieser Daten muß beachtet werden, daß die Bodennebelhäufigkeit durch Orographie, Flußnähe und Belüftung lokal entscheidend beeinflusst ist.

Tab. 26 Bodennebelhäufigkeit  
im Rheintal

Ort	Stunden/Jahr
Bremgarten	620
Gernsheim	325
Frankfurt	272

#### 4.1.3 Windverhältnisse

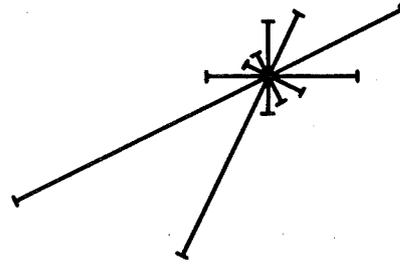
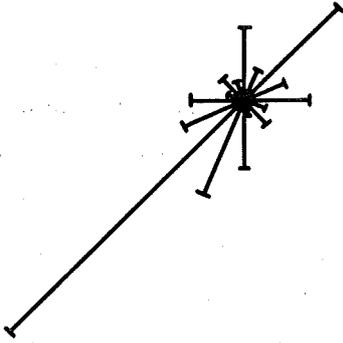
Abb. 13 zeigt die mittlere jährliche Häufigkeit der Windrichtungen für Freiburg, Karlsruhe, Mannheim, Feldberg/Schwarzwald und Kalmit/Haardt. Als wesentliches Merkmal der Windrichtungsverteilungen zeigt sich für Freiburg und für Karlsruhe, daß Winde aus SW und NO vorherrschen; Mannheim weist vorwiegend Winde aus N und S auf. Die Richtungsverteilung der Bodenwinde ist somit wesentlich durch die Richtung der Talachse gekennzeichnet. Die Höhenwindverteilung weist gegenüber der Bodenwindverteilung eine Rechtsdrehung auf.

#### 4.1.4 Stabilitätsverhältnisse der bodennahen Luft

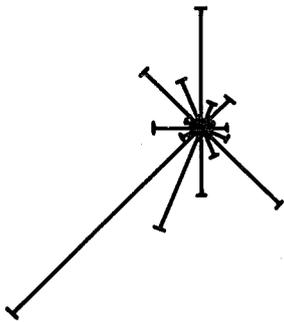
Die Geschwindigkeit, mit der die horizontale und vertikale Verdünnung von Fremdstoffen in der Luft erfolgt, wird maßgebend von der jeweiligen Intensität der Turbulenzen im Ausbreitungsraum bestimmt. Hohe Windgeschwindigkeiten und labile vertikale Temperaturschichtungen verursachen hohe Intensität der Turbulenz. Labile Temperaturschichtung liegt vor, wenn die Temperatur mit der Höhe stärker als adiabatisch, d.h. stärker als etwa  $1^{\circ}$  je 100 m abnimmt. Umgekehrt wird die Ausbildung von Turbulenzen behindert, wenn die Temperatur nur schwach mit der Höhe abnimmt oder gar zunimmt. Im letzteren Fall liegen Inversionen vor, bei denen die vertikale Durchmischung sehr gering ist. Man spricht von stabiler Temperaturschichtung.

Die vertikale Temperaturschichtung wird vorwiegend bestimmt durch die großräumige Wetterlage, durch die Intensität der Sonneneinstrahlung und durch die Wärmeabstrahlung vom Boden. Daher weist die Turbulenzintensität einen

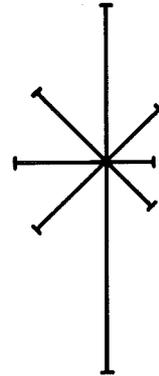
KARLSRUHE



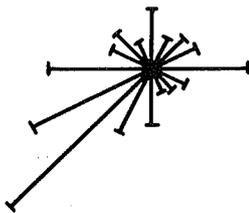
FREIBURG



MANNHEIM



FELDBERG



KALMIT

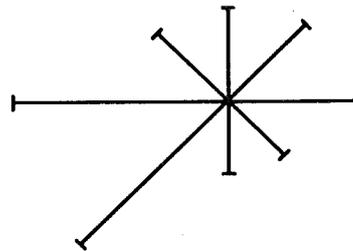


Abb. 13 Windrichtungsverteilungen für die Karlsruher Stationen Erzberger Str. (links) und Kernforschungszentrum (rechts), für Freiburg/Stefan-Meier Str., Mannheim, Feldberg/Schwarzwald und Kalmit/Hardt

deutlichen Tages- und Jahresgang auf. Es ist üblich, den Turbulenzzustand durch 6 Stabilitätsklassen zu klassifizieren. Regional unterschiedliche Jahresstatistiken für die Häufigkeit von Stabilitätsklassen oder auch feiner aufgeteilte Statistiken dienen als Grundlage für atmosphärische Ausbreitungsrechnungen, die die Herleitung von Immissionen zum Ziel haben. Für die Rechnungen zur atmosphärischen Ausbreitung von Schwefeldioxyd und von radioaktiven Stoffen wurde in dieser Studie eine von PASQUILL /51/ vorgeschlagene Einteilung und die zugehörigen empirischen Werte für horizontale und vertikale Ausbreitungsparameter (siehe Anhang C) benutzt. Die Rechnungen zur Wasserdampfausbreitung (Naßkühltürme) beruhen auf einer Stabilitätsklasseneinteilung und auf Ausbreitungsparametern, die von KLUG /52/ publiziert wurden.

Die dabei benutzten Häufigkeitsverteilungen der Stabilitätsklassen für das Sommer- (Mai bis Oktober) und Winterhalbjahr (November bis April) beruhen auf einer Auswertung von Messungen der Höhenabhängigkeit der Windstärke, die im Kernforschungszentrum Karlsruhe von NESTER /53/ durchgeführt wurde. Im Sommerhalbjahr liegen die labilen Ausbreitungsclassen (A, B und C) zu 31 % vor, die "neutrale" Klasse (D) zu 35 % und die stabilen Klassen (E und F) zu 34 %; im Winter ergeben sich entsprechende Werte zu 15 %, 48 % und 37 %.

Die erhöhte Häufigkeit der labilen Klassen im Sommer ist durch die intensivere Sonneneinstrahlung bedingt. Zu jeder Jahreszeit herrschen labile und neutrale Schichtungen während des Tages vor und stabile während der Nacht (vergl. Abb. 14).

Für Konzentrationsberechnungen luftfremder Stoffe ist von Bedeutung, daß jeder Stabilitätsklasse eine etwas andere Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten in bestimmten Höhen entspricht. Für die  $\text{SO}_2$ -Ausbreitungsrechnungen wurden entsprechende Daten von NESTER /53/ benutzt.

Untersuchungen von MANIER /46/ zeigen, daß sich die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Stabilitätsklassen innerhalb des Oberrheingebietes nicht stark ändert. Die erkennbaren Tendenzen bestehen in einer mäßigen Abnahme der stabilen und der labilen Stabilitätsklassen zugunsten der (häufigsten) neutralen Klasse in Süd-Nord-Richtung. Diese Tendenz wird verstärkt in Norddeutschland fortgesetzt, wo höhere mittlere Windgeschwindigkeiten neutrale Ausbreitungsbedingungen weiter begünstigen.

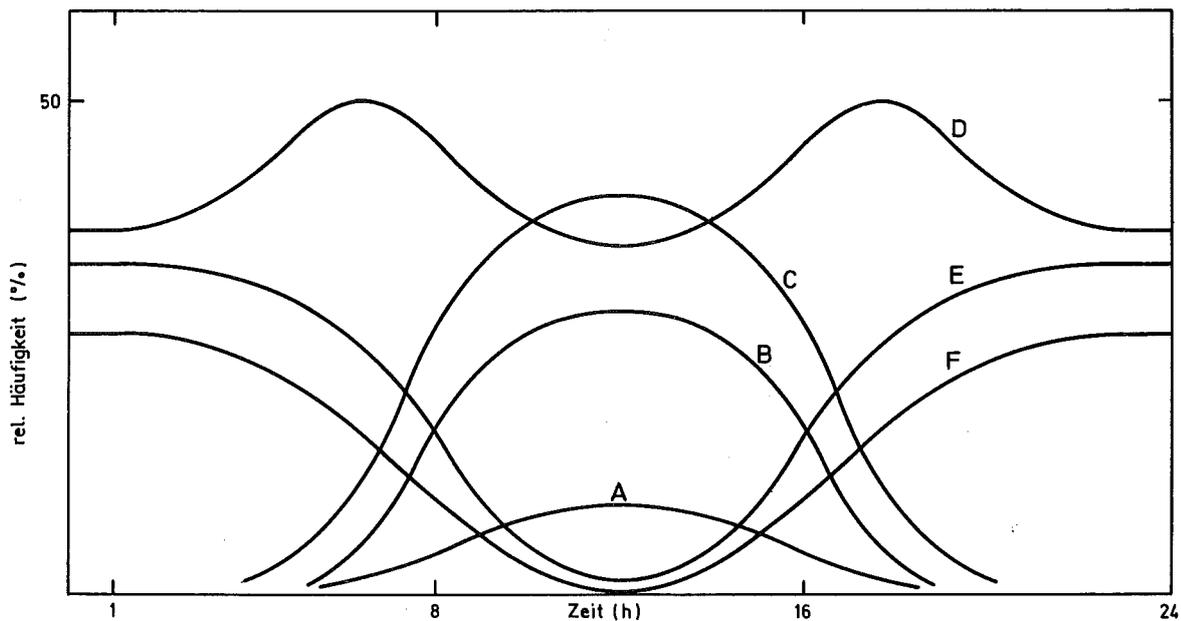


Abb. 14 Mittlerer Tagesgang der Ausbreitungskategorien (Nester (1972)); die Messungen wurden am meteorologischen Mast des KFZ Karlsruhe durchgeführt

#### 4.1.5 Inversionen

Boden- und Höheninversionen haben gewöhnlich eine große horizontale Ausdehnung. Daher ist verständlich, daß für Karlsruhe, unteres Neckartal und Stuttgart (DIEM /49/, KLEISS /48/, DEUTSCHER WETTERDIENST /50/) nahezu die gleiche Bodeninversionshäufigkeit (im Jahresmittel um 37 %) beobachtet wird (dies entspricht auch etwa der Häufigkeitsverteilung stabiler Ausbreitungsklassen, wie sie im Kernforschungszentrum Karlsruhe gemessen wurde). Überwiegend entstehen Bodeninversionen nachts durch Wärmeabstrahlung vom Boden. Tagsüber wird die bodennahe Luft durch Sonneneinstrahlung erwärmt, wodurch Inversionsuntergrenzen in die Höhe geschoben werden, oder wodurch die Bodeninversionen ganz aufgelöst werden.

Der großräumige Abtransport luftfremder Stoffe aus Schornsteinen hängt davon ab, ob die effektive Emissionshöhe über die bodennahe Inversionsschicht hinausragt. Die Kenntnisse zur Dicke bodennaher Inversionen sind noch lückenhaft. Nach Radiosondenmessungen in Stuttgart enden etwa 75 % der dortigen Bodeninversionen in Höhen zwischen 400 m und 600 m NN. Abb. 15 zeigt die Häufigkeitsverteilung dieser Obergrenzen. Im nördlichen Oberrheintal (Gebiet

Karlsruhe) sinken die Obergrenzen der sich von Stuttgart aus erstreckenden Bodeninversionsdecken häufig um rund 100 m (KLEISS /48/), d.h. auf 300 - 500 m NN (200 bis 400 m über Boden).

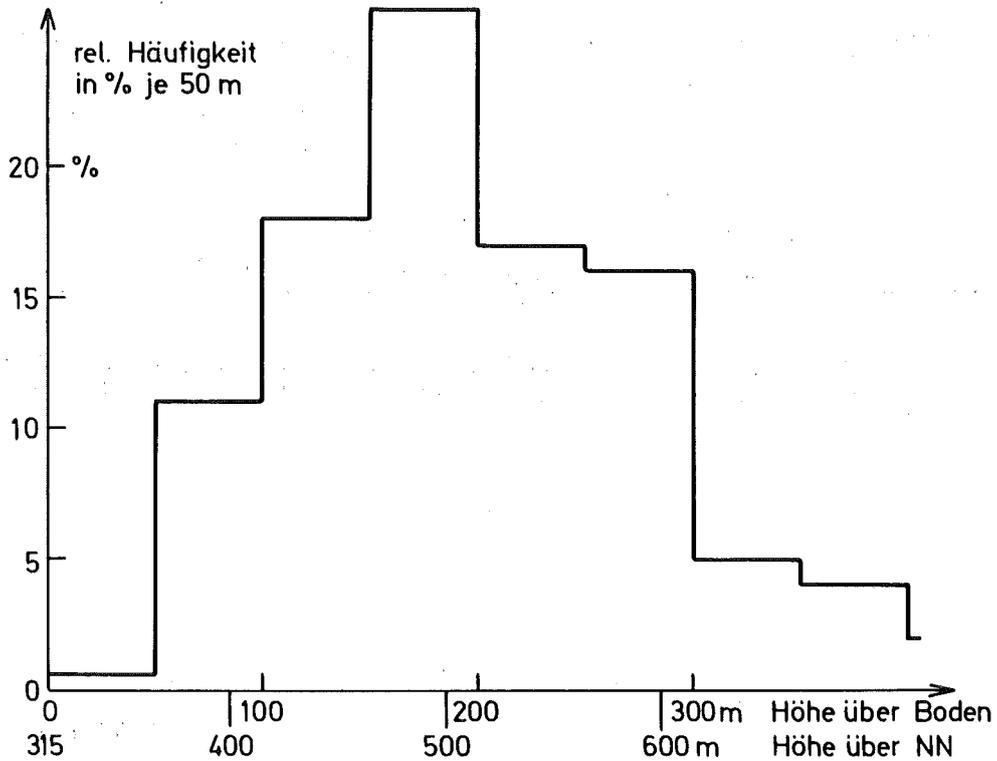


Abb. 15 Höhenverteilung der Obergrenzen von Bodeninversionen in Stuttgart (Jahresmittel von Radiosondenmessungen 0<sup>00</sup> und 12<sup>00</sup> GMT, 1957 - 1966)

Fast immer bestehen Höheninversionen; meist sind es mehrere bis zu Höhen um 3000 m NN. Im Gegensatz zu den Bodeninversionen dauern die Höheninversionen - insbesondere die höheren - meist einige Tage mit relativ geringen Höhenänderungen an.

Die Untergrenzen der jeweils untersten Höheninversionen begrenzen die vertikale Ausbreitung luftfremder Stoffe nach oben, sofern erstere nicht im Einzelfall wegen entsprechend großer Überhöhung durchbrochen werden.

Abb. 16 zeigt die in Stuttgart durch Radiosonden gemessene Häufigkeitsverteilung der Untergrenzen der jeweils untersten Höheninversionen, wobei die Verhältnisse für das Sommer- und Winterhalbjahr getrennt dargestellt sind. Es ist ersichtlich, daß die Untergrenzen der untersten Höheninversionen im Winterhalbjahr häufig um 600 m NN liegen, während sie im Sommerhalbjahr meist höher liegen. Ein Teil der Höheninversionen leitet sich (besonders im Winter) aus Bodeninversionen ab, deren Untergrenzen tagsüber durch Bodenaufheizung in die Höhe verschoben wurden.

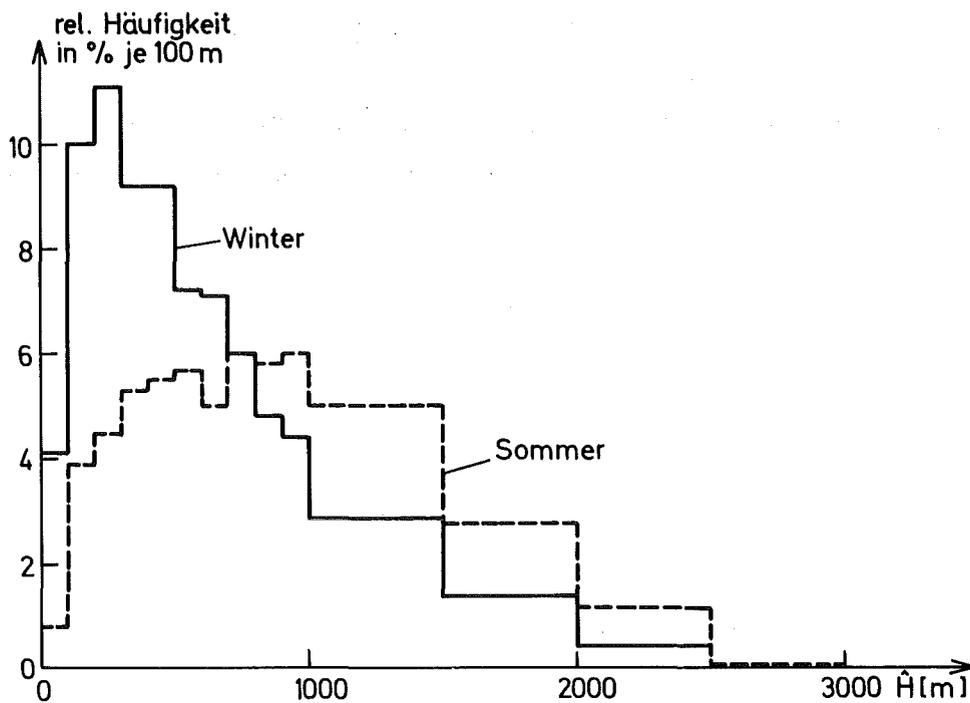


Abb. 16 Verteilung der Untergrenzen der untersten Höheninversionen (mit  $\Delta T \geq 0$ ) auf die Höhe über Boden (Stuttgart 315 m über NN)

#### 4.1.6 Abschließende Bemerkungen

Ein grober Vergleich des Oberrheintalklimas mit dem Klima der benachbarten Regionen (DEUTSCHER WETTERDIENST /50/, KLIMA-ATLAS VON BADEN-WÜRTTEMBERG /54/) zeigt für das Oberrheintal eine größere Sonnenscheindauer mit entsprechend höheren Temperaturen, verhältnismäßig geringe Bodenwindstärke, erhöhte relative Feuchte und damit entsprechend höhere Neigung zur Nebelbil-

ding. Besondere Beachtung verdienen die sehr häufig vorhandenen Inversionswetterlagen (Bodeninversionen), welche die Ausbreitungsverhältnisse wesentlich beeinflussen.

Diese Verhältnisse charakterisieren jedoch die atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen des Oberrheintales nur in grober Weise.

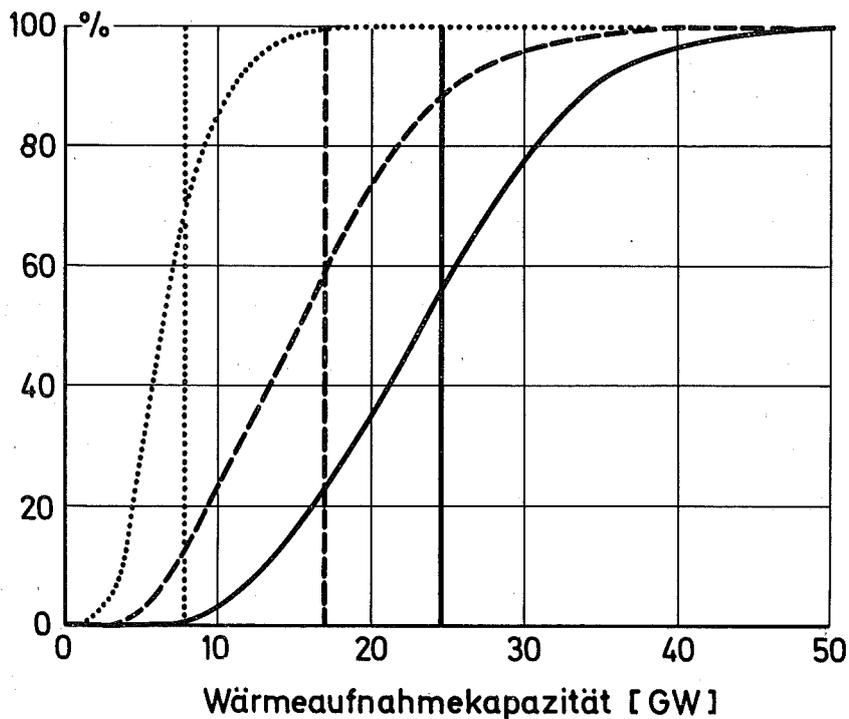
Die vorherrschenden Windrichtungen verlaufen talparallel. Allerdings werden sie durch lokale Zirkulationssysteme modifiziert, die beispielsweise bei der Einmündung von Seitentälern auftreten.

Für die Wind-, Temperatur- und Feuchteverhältnisse in einigen hundert Metern Höhe, die für Ausbreitungsfragen bedeutsam sind, liegen nicht genügend Daten vor. Eine detailliertere Beurteilung von Standortfragen im Oberrheintal erfordert zusätzliche Messungen, welche auch die lokalen Besonderheiten erfassen.

#### 4.2 Belastbarkeit des Oberrheins durch Abwärme aus Kraftwerken

Die Abwärmemengen, die in einen Fluß eingeleitet werden können, werden begrenzt durch die behördliche Vorschrift, daß die Flußwassertemperatur  $T$  nach vollständiger Durchmischung um nicht mehr als ein  $\Delta T_{\max}$  über der natürlichen Temperatur und auf keinen Fall über einer zulässigen Höchsttemperatur  $T_{\max}$  liegen darf. Als maximale Aufwärmespanne  $\Delta T_{\max}$  sind heute  $3^{\circ}\text{C}$  allgemein akzeptiert /55/, (siehe auch /56/). Unter dieser Voraussetzung wirkt sich die zweite Restriktion  $T < T_{\max}$  am Rhein praktisch nicht aus, weil die diskutierten  $T_{\max}$ -Werte in der Regel um mehr als  $3^{\circ}\text{C}$  über den natürlichen Flußtemperaturen liegen.

Einen groben Überblick über die Möglichkeiten für Abwärmeeinleitungen, die bei der Restriktion  $\Delta T_{\max} = 3^{\circ}\text{C}$  der für Baden-Württemberg interessante Rheinabschnitt zwischen der Aaremündung und Worms bietet, gibt Abb. 17. Das Maximum der Abwärme, die der Flußabschnitt aufnehmen kann - die sog. Abwärmeaufnahmekapazität - , wird erreicht, wenn 1. zu Beginn des Abschnitts der Fluß sofort um die zur Verfügung stehende Aufwärmespanne erwärmt wird und 2. dann längs der Fließstrecke überall gerade soviel Abwärme zugeführt wird, wie infolge der um  $\Delta T_{\max}$  erhöhten Temperatur zusätzlich an Wärme vom Fluß an die Atmosphäre übergeht. Der erste Anteil hängt nur von der künstlichen Erwärmung  $\Delta T_0$  am Beginn und von der Abflußmenge ab, der zweite Teil hängt von der Wassertemperatur, der Wasseroberfläche und den meteorologischen Bedingungen ab (s. Anhang A). Beide Anteile sind damit Zufallsgrößen, die Abbildung gibt deren Verteilungsfunktionen aufgrund der hydrologischen und meteorologischen Daten der Jahre 1961 - 70. Außerdem sind die Verteilung der Summe beider Anteile sowie (als senkrechte Striche) die arithmetischen Mittelwerte der 3 Verteilungen wiedergegeben. Vorausgesetzt wurde dabei  $\Delta T_0 = 0$ , d.h. natürliche Wassertemperatur an der Aaremündung. Macht man die für die Zukunft realistischere Annahme  $\Delta T_0 = 1.5^{\circ}\text{C}$  - dies entspricht ungefähr dem Fall, daß der Rhein vor der Aaremündung seine natürliche und die Aare eine um  $\Delta T_{\max} = 3^{\circ}\text{C}$  erhöhte Temperatur hat - so haben beide Anteile der Abwärmeaufnahmekapazität etwa die gleiche, in Abb. 17 punktiert eingetragene Verteilung. Man kann der Abb. 17 beispielsweise entnehmen, daß die Abwärmeaufnahmekapazität in 50 % der Fälle kleiner als 24 GW und in 75 % der Fälle kleiner als 30 GW ist. Die Abwärmeaufnahmekapazität schwankt etwa zwischen 10 und 45 GW.



$$\Delta T_0 = 0^\circ\text{C}, \quad \Delta T_{\max} = 3^\circ\text{C}$$

- ..... Abkühlung allein
- Erwärmung um  $\Delta T_{\max}$  allein
- Gesamt

Abb. 17 Verteilungsfunktion der Wärmeaufnahmekapazität des Rheins von der Aare mündung bis Worms

Die Abwärmeaufnahmekapazität läßt sich aus zwei Gründen praktisch nicht voll ausnutzen:

Einmal läßt sich die Abwärme nicht kontinuierlich verteilt, sondern nur punktuell einleiten. Zwischen den Einleitungsstellen sinkt die Temperaturerhöhung unter  $\Delta T_{\max}$ , wodurch die Wärmeabfuhr an die Atmosphäre geringer wird. Die durch die Aggregation der Abwärmequellen nicht nutzbare Kühlleistung ist jedoch nicht allzu groß. Wenn beispielsweise ein Kernkraftwerk von 2 GWe voll mit Frischwasserkühlung betrieben werden soll, braucht vor dem Einlaufbauwerk bei mittlerem Abfluß nur eine Aufwärmspanne von  $0.8^\circ\text{C}$  zur Ver-

fügung zu stehen. Wenn bei größerer Dichte der Abwärmequellen mit Ablauf- oder mit Mischkühlung gefahren wird, sind die noch nutzbaren Aufwärmspannen noch wesentlich kleiner. Es bedeutet also keine wesentliche Überschätzung der Möglichkeiten für Abwärmeeinleitungen, wenn im folgenden immer eine kontinuierlich längs der Fließstrecke verteilte Abwärmezufuhr unterstellt wird.

Auch die andere obengenannte Voraussetzung für die volle Nutzung der Abwärmekapazität läßt sich in der Praxis nicht erfüllen: Die momentane Erhöhung der Wassertemperatur direkt an der Aarenmündung auf  $T + \Delta T_{\max}$  würde eine unrealistisch große Abwärmequelle erfordern. Betrachtet man die vorliegenden, z.T. allerdings sehr unsicheren Kraftwerksplanungen, so ist die gleichmäßige Verteilung der Kraftwerksinstallationen am betrachteten Rheinabschnitt eine realistischere Annahme (s. Tab. 29). Ähnliches dürfte für die zukünftigen industriellen Abwärmeeinleitungen gelten. Unter der Voraussetzung gleichmäßig und kontinuierlich verteilter Abwärmezufuhr wurde für verschiedene Gesamtleistungen berechnet, welcher Bruchteil im Mittel über 10 Jahre an den Fluß abgegeben werden kann. Diese sogenannten Auslastbarkeiten zeigt die erste Zeile der Tab. 27 unter der Annahme  $\Delta T_0 = 0^\circ\text{C}$ ; Tab. 28 zeigt die entsprechenden Werte für  $\Delta T_0 = 1.5^\circ\text{C}$  (s.o.). Die angegebenen Werte für die installierte Abwärmeleistung sind dabei bereits bzgl. der 1971 eingeleiteten Abwärme aus Haushaltsabwässern und Schiffsmotoren sowie bzgl. des Wärmeentzugs durch Wasserkraftwerke korrigiert (s. Anhang A). D.h. die angegebenen Gesamtleistungen stehen voll für Abwärmeeinleitungen aus Kraftwerken und Industrie zur Verfügung.

Tab. 27 und 28 enthalten auch die Auslastbarkeit bei verschiedenen großen Kühlturmleistungen. Dabei wurde angenommen, daß die Kühlturmleistung (wie die Abwärmeleistung) längs des Flusses kontinuierlich und gleichmäßig verteilt ist. Man kann anhand dieser Zahlen also ermitteln, welche Kühlturmleistung erforderlich ist, um für eine bestimmte installierte Abwärmeleistung eine vorgegebene Auslastbarkeit zu erreichen. Wegen der Ausgleichsmöglichkeiten im Verbundnetz und wegen der Nachfrageschwankungen ist es nicht erforderlich, daß für eine bestimmte installierte elektrische Gesamtleistung die Kühlturmleistung bei Vollast jederzeit 100 %ig zur Verfügung steht. So ist im Falle  $\Delta T_0 = 0$  und bei einer installierten Leistung von 25 GWth nur eine Kühlturmleistung von 10 GW nötig, wenn man eine Auslastbarkeit von 90 % fordert. Die Frage, welche Auslastbarkeit man vernünftigerweise zu fordern hat, läßt sich jedoch erst beantworten, wenn man die Auslastbarkeitschwan-

Tab. 27 Auslastbarkeit als Funktion der Abwärme- und Kühlturmleistung ( $\Delta T_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{\text{max}} = 3^\circ\text{C}$ )

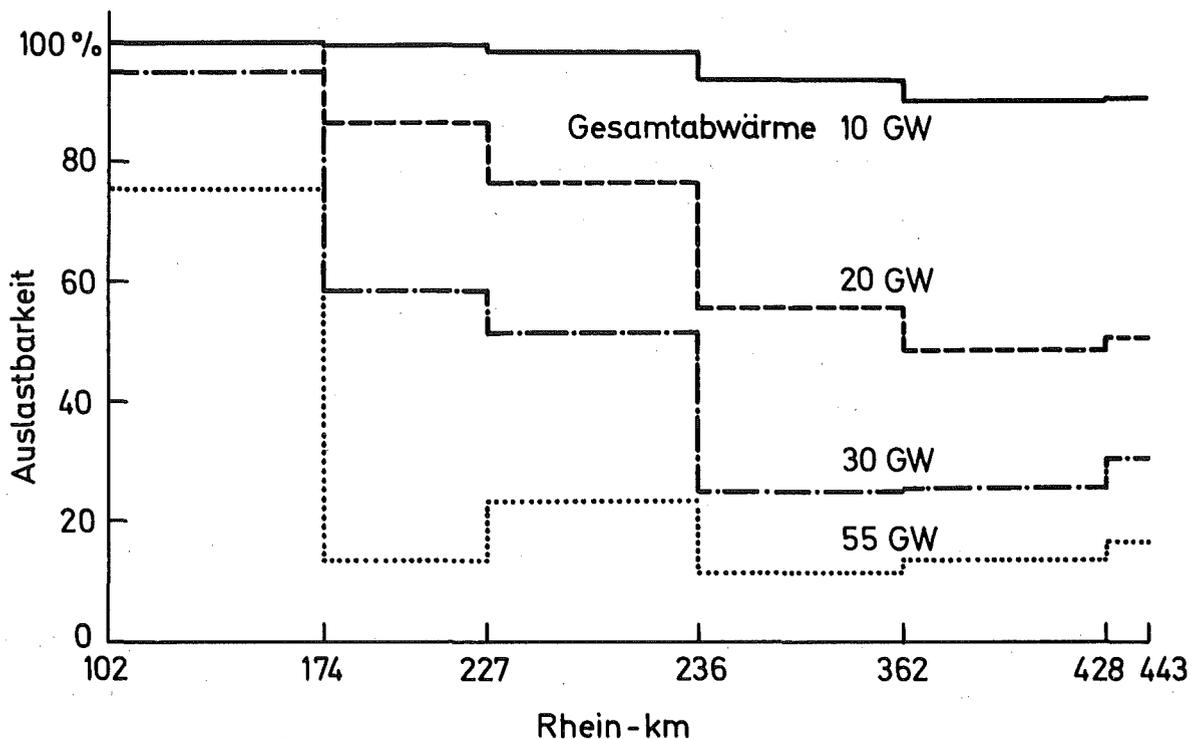
KUEHLT.- KAP. (GW)	ABWAERME (GW)										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
0	1.0000	0.9925	0.9542	0.8870	0.8028	0.7147	0.6332	0.5641	0.5072	0.4601	0.4208
5	1.0000	0.9982	0.9764	0.9263	0.8552	0.7754	0.6980	0.6297	0.5717	0.5226	0.4809
10	1.0000	1.0000	0.9959	0.9645	0.9073	0.8361	0.7627	0.6953	0.6362	0.5851	0.5410
15	1.0000	1.0000	1.0000	0.9946	0.9573	0.8964	0.8274	0.7608	0.7007	0.6476	0.6011
20	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9941	0.9538	0.8918	0.8264	0.7652	0.7101	0.6612
25	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9939	0.9527	0.8916	0.8297	0.7727	0.7213
30	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9940	0.9532	0.8939	0.8352	0.7814
35	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9942	0.9545	0.8973	0.8414
40	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9944	0.9560	0.9012
45	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9946	0.9577
50	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9948
55	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Tab. 28 Auslastbarkeit als Funktion der Abwärme- und Kühlturmleistung ( $\Delta T_0 = 1,5^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{\text{max}} = 3^\circ\text{C}$ )

KUEHLT.- KAP. (GW)	ABWAERME (GW)										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
0	0.9991	0.9598	0.8560	0.7220	0.5995	0.5067	0.4376	0.3850	0.3437	0.3104	0.2829
5	1.0000	0.9922	0.9298	0.8225	0.7082	0.6124	0.5369	0.4773	0.4294	0.3900	0.3571
10	1.0000	1.0000	0.9894	0.9194	0.8164	0.7182	0.6363	0.5696	0.5150	0.4696	0.4313
15	1.0000	1.0000	1.0000	0.9891	0.9195	0.8235	0.7356	0.6620	0.6007	0.5492	0.5055
20	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9897	0.9234	0.8345	0.7543	0.6864	0.6288	0.5798
25	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9903	0.9283	0.8462	0.7720	0.7085	0.6540
30	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9910	0.9335	0.8573	0.7881	0.7282
35	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9917	0.9383	0.8673	0.8024
40	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9923	0.9426	0.8763
45	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9928	0.9465
50	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9933
55	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

kungen am Oberrhein mit den Nachfrageschwankungen und mit dem Auslastbarkeitsschwankungen in anderen Teilen des Verbundnetzes vergleicht.

Abb. 18 zeigt für  $\Delta T_0 = 1.5^\circ\text{C}$  und verschiedene Abwärmeeinrichtungen die Auslastbarkeit aufgeschlüsselt nach 6 Teilstrecken des Rheins von der Aare- mündung bis Worms, wobei keine Kühlturmleistung angenommen wurde. Die Wahl der 6 Teilstrecken basiert auf der unterschiedlichen Flußbreite und der Abzweigung des großen Elsaßkanals (s. Anhang A).



$$\Delta T_0 = 1.5^\circ\text{C} , \Delta T_{\text{max}} = 3^\circ\text{C}$$

Abb. 18 Auslastbarkeit als Funktion der Fließstrecke

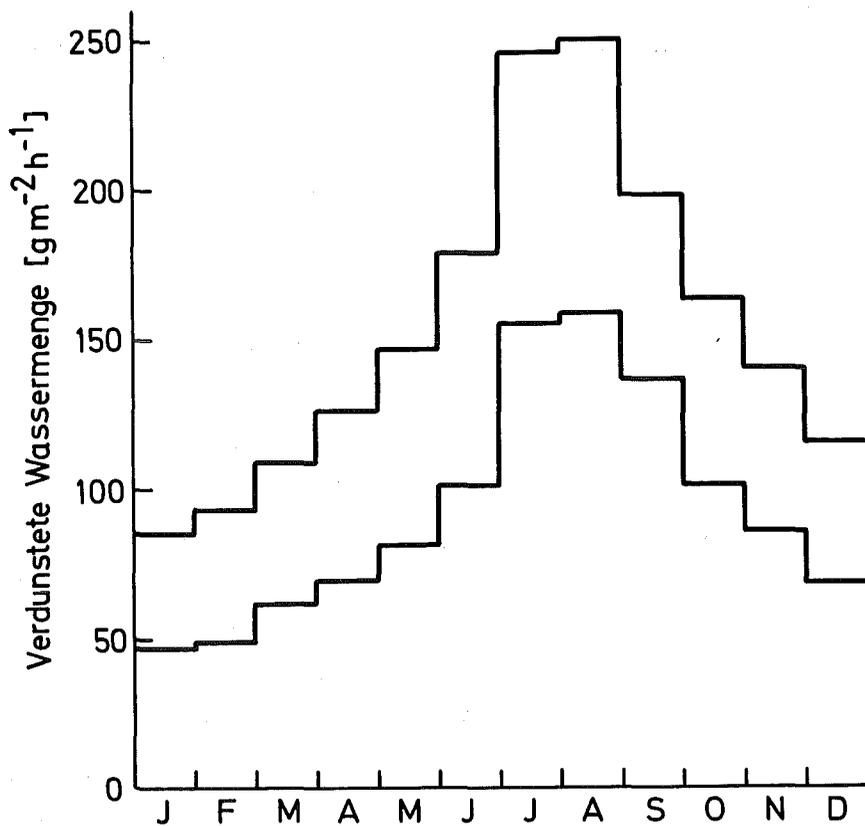
Die Abwärmeeinleitungen aus Kraftwerken und Industrie beliefen sich 1971 auf ca. 5 GW /55/. Bis 1980 ist mit der Installierung von weiteren ca. 10 GW elektrischer Leistung am betrachteten Rheinabschnitt zu rechnen (s. Tab. 29), was einer Abwärmeleistung von etwa 20 GW entspricht. Für die fernere Zukunft ist die Installation von noch einmal 15 GWe, d.h. 30 GW Abwärme, vorgesehen

(s. Tab. 29). Über die Zunahme der industriellen Abwärmeeinleitungen in der Zukunft sind keine verlässlichen Schätzungen erhältlich. Das Verhältnis zwischen Abwärme aus Kraftwerken und Industrieabwärme, das heute am Rheinabschnitt Aaremündung - Worms etwa 2:1 ist /55/, dürfte sich jedoch in der Zukunft vergrößern. (In /55/ wird mit der "Industrieabwärme" auch ein Teil der Abwärme aus Industriekraftwerken erfaßt.) Daher dürfte es nicht unrealistisch sein, bis 1980 eine Zunahme der industriellen Abwärmeeinleitungen um 5 GW anzunehmen, so daß dann 1980 insgesamt Abwärmeeinleitungen in Höhe von 30 GW zu erwarten sind. Bei Verwirklichung aller bekannten Planungen läge diese Größe bei ca. 60 GW.

Von den großen Kraftwerksplanungen sieht nur die Planung Fessenheim (3,6 GW Abwärme) bisher ausschließlich Frischwasserkühlung vor. Schon der Abb. 17 kann man entnehmen, daß dieses Kraftwerk bei Vollast die Restriktion  $\Delta T < 3^{\circ}\text{C}$  nicht immer wird einhalten können: Wenn (bei niedrigen Abflüssen) die Aufwärmspanne bis zur Abzweigung des Elsaßkanals ausgeschöpft wird, so steht als Kühlleistung für das Kraftwerk Fessenheim nur das zur Verfügung, was durch die Oberfläche des Elsaßkanals oberhalb Fessenheim an die Atmosphäre übergeht. Das ist höchstens 1/5 der Abwärmemengen, die die punktierte Häufigkeitsverteilung in Abb. 17 erfaßt.

Bei allen anderen Kraftwerksplanungen ist zumindest die Möglichkeit der nassen Kühlturmkühlung, wenn nicht sogar ausschließlich Kühlturmkühlung (Kaiseraugst), vorgesehen. Die Investitionskosten für die Möglichkeit der Frischwasserkühlung werden bei Kernkraftwerken der heutigen Generation unrentabel, wenn die verfügbare Kühlleistung des Flusses kleiner als 15 % der Gesamtkühlleistung ist /57/. Diese Aussage ist praktisch unabhängig davon, ob nur Wechselbetrieb zwischen Frischwasser-, Ablauf- und Rückkühlung möglich ist oder ob auch ein echter Mischbetrieb sich als praktikabel erweist. Man sieht an Abb. 18, daß es bis 1980 (30 GW) wahrscheinlich rentabel sein wird, bei Neuinstallationen alle drei Kühlarten vorzusehen, wenn die installierte Leistung ungefähr gleichmäßig verteilt wird. Betrachtet man sämtliche bekannten Planungen (60 GW), so sieht man ebenfalls an Abb. 18, daß sich für einen größeren Teil der Installationen die Möglichkeit der Frischwasserkühlung nicht mehr lohnt. Die Stromgestehungskosten für diese Kraftwerke werden damit um 7-8 % höher liegen als bei Kraftwerken mit reiner Frischwasserkühlung.

Der größte Teil der Abwärme, die vom Fluß an die Atmosphäre abgegeben wird, gelangt durch zusätzliche Verdunstung in die Atmosphäre. Es erhebt sich die Frage, ob diese zusätzliche Verdunstung nicht eine Erhöhung der Luftfeuchte im Rheintal mit sich bringt, die wegen verstärkter Nebelbildung u.ä. untragbar ist. Es steht fest, daß die natürliche Verdunstung des Rheins einen deutlichen Einfluß auf Nebelhäufigkeit und -dauer in Flußnähe ausübt. So wird aufgrund einer 5-Jahres-Statistik in /58/ berichtet, daß die Zahl der Nebelbeobachtungen mit Sichtweite < 250 m am Pegel Maxau doppelt so groß war wie an der Wetterstation Karlsruhe. Wenn daher die zusätzliche Verdunstung nicht klein gegen die natürliche Verdunstung ist, so ist mit einem merklichen Einfluß der Wärmeeinleitungen auf die Nebelbildung zumindest in



Gesamtabwärme 30 GW

$\Delta T_0 = 1.5^\circ\text{C}$  ,  $\Delta T_{\text{max}} = 3^\circ\text{C}$

Abb. 19 Verdunstung aus dem Rhein bei Karlsruhe bei natürlicher bzw. künstlich erhöhter Flußwassertemperatur

Flußnähe zu rechnen. Abb. 19 zeigt die mittlere pro Stunde und  $m^2$  verdunstete Wassermenge unter natürlichen Verhältnissen bzw. bei einer Erwärmung, die sich aus einer Gesamtleistung von 30 GWth (entsprechend der Abwärmeprognose für 1980) bei Karlsruhe ergibt. Es wurden wieder die meteorologischen und hydrologischen Daten der Jahre 1961 - 70 verwendet. Vorausgesetzt wurde dabei  $\Delta T_0 = 1.5^\circ C$ . Wenn  $\Delta T_0 = 0$  gesetzt wird, ist jedoch die zusätzlich verdunstete Wassermenge nur unwesentlich kleiner, weil in beiden Fällen die künstliche Aufwärmung bei Karlsruhe fast immer  $3^\circ C$  beträgt. Wenn auch die der Rechnung zugrundeliegenden Formeln nur Näherungscharakter haben (s. Anhang A), so zeigt die Abbildung doch, daß die zusätzlich verdunstete Wassermenge in derselben Größenordnung liegt wie die natürlich verdunstete Wassermenge. In den nebelreichen Wintermonaten ist dabei die prozentuale Zunahme sogar am größten. Demnach ist eine merklich verstärkte Nebelbildung infolge der Flußaufheizung zumindest in Flußnähe nicht auszuschließen. Diese Schlußfolgerung steht im Widerspruch zu der abschließenden Aussage des Gutachtens von DIEM /58/. Auf jeden Fall sollte dieses Problem näher untersucht werden.

Einen Anhaltspunkt für die Beurteilung der mehr großräumigen Auswirkungen der zukünftigen Abwärmequellen am Oberrhein bietet ein Vergleich der insgesamt aus Kühltürmen und der Flußoberfläche zusätzlich verdunsteten Wassermenge mit der natürlicherweise im Oberrheingraben verdunsteten Wassermenge. Nimmt man an, daß die Verdunstung (verdunstete Wassermenge pro Zeit- und Flächeneinheit) über Land im Jahresmittel halb so groß ist wie die Verdunstung aus der freien Wasserfläche des Rheins /59/ (s. Abb. 18), so ergibt sich für die Oberrheinebene ( $40 \times 300$  km) eine Verdunstungsmenge von  $150 m^3/sec$ . Andererseits werden im selben Gebiet bei einer Gesamtabwärmelieferung von 30 GW (Prognose 1980) ca.  $10 m^3/sec$  verdunstet, wenn man die nicht unrealistische Annahme macht, daß 80 % der Abwärme über Verdunstung an die Atmosphäre abgegeben werden. D.h. die zusätzliche Verdunstung macht ungefähr 7 % der natürlicherweise im Oberrheintal verdunsteten Wassermenge aus. Dieser Prozentsatz ist sicher nicht klein genug, als daß man ihn ohne weiteres vernachlässigen könnte. Insbesondere für den weiteren Ausbau nach 1980 müßte das Problem der regionalen Auswirkungen der zusätzlichen Verdunstung genauer untersucht werden.

Die dem Rhein entzogene Wassermenge bei einer Gesamtinstallation von 30 GWth beträgt nur 3 % des niedrigsten jemals beobachteten Abflusses bei Maxau. Ernste Auswirkungen auf den möglichen Tiefgang der Rheinschiffe sind also nicht zu erwarten.

Die Folgen einer künstlichen Rheinerwärmung für die biologischen Vorgänge im Fluß lassen sich, ebenso wie die Auswirkungen auf das Klima, nur schwer abschätzen. Die direkten Auswirkungen der Temperaturerhöhung sind wegen der ohnehin gegebenen Artenverarmung (infolge der chemischen Verschmutzung) wahrscheinlich gering. Die Temperaturerhöhung bewirkt jedoch eine Beschleunigung der im wesentlichen mikrobiologischen Selbstreinigungsvorgänge, wodurch sich die Basis der Nahrungskette und der Sauerstoffgehalt beträchtlich ändern. Auf diese Weise besteht ein wesentlicher, mittelbarer Einfluß der Temperaturerhöhung auf die höhere Flora und Fauna des Flusses.

Abb. 20 zeigt anhand eines mathematischen Selbstreinigungsmodells für den Rhein zwischen Mannheim und der holländischen Grenze den Einfluß einer Temperaturerhöhung von  $5^{\circ}\text{C}$  auf das Selbstreinigungsgeschehen /60/. Aufgetragen sind als Funktion der Fließstrecke die Schmutzkonzentration, gemessen als Sauerstoffverbrauch bei vollständiger Oxidation der unbelebten organischen Substanzen (COD), die Bakterienmassenkonzentration, die Massendichte der bakterienfressenden Protozoen und die Sauerstoffkonzentration.  $Q$  bedeutet die Abflußmenge,  $MQ$  den langjährigen Mittelwert von  $Q$ . Man sieht, daß durch die gesteigerte Selbstreinigungskraft (als Folge der Temperaturerhöhung) die Schmutzkonzentration abnimmt, daß aber auch die Sauerstoffkonzentration stellenweise sehr viel geringer wird. Während der erste Effekt, besonders im Hinblick auf die Trinkwassergewinnung, positiv zu bewerten ist, stellt die Abnahme der Sauerstoffkonzentration eine Gefahr für die höheren aquatischen Organismen dar. Die Folgen der Temperaturerhöhung für den Sauerstoffgehalt werden zwar bei der Ablaufkühlung durch die Anreicherung des Kühlwassers mit Sauerstoff gemildert, aber die Sauerstoffaufnahmekapazität des Kühlwassers ist wegen der hohen Temperatur geringer als die des Flußwassers, außerdem liegt das Minimum des Sauerstoffgehalts i.a. nicht in der Nähe der Kühlwassereinleitungsstelle.

Insgesamt erscheinen die biochemischen Auswirkungen der Flußwassererwärmung so gravierend, daß die o.a. Festsetzung  $\Delta T_{\text{max}} = 3^{\circ}\text{C}$  auch von daher gerechtfertigt erscheint.

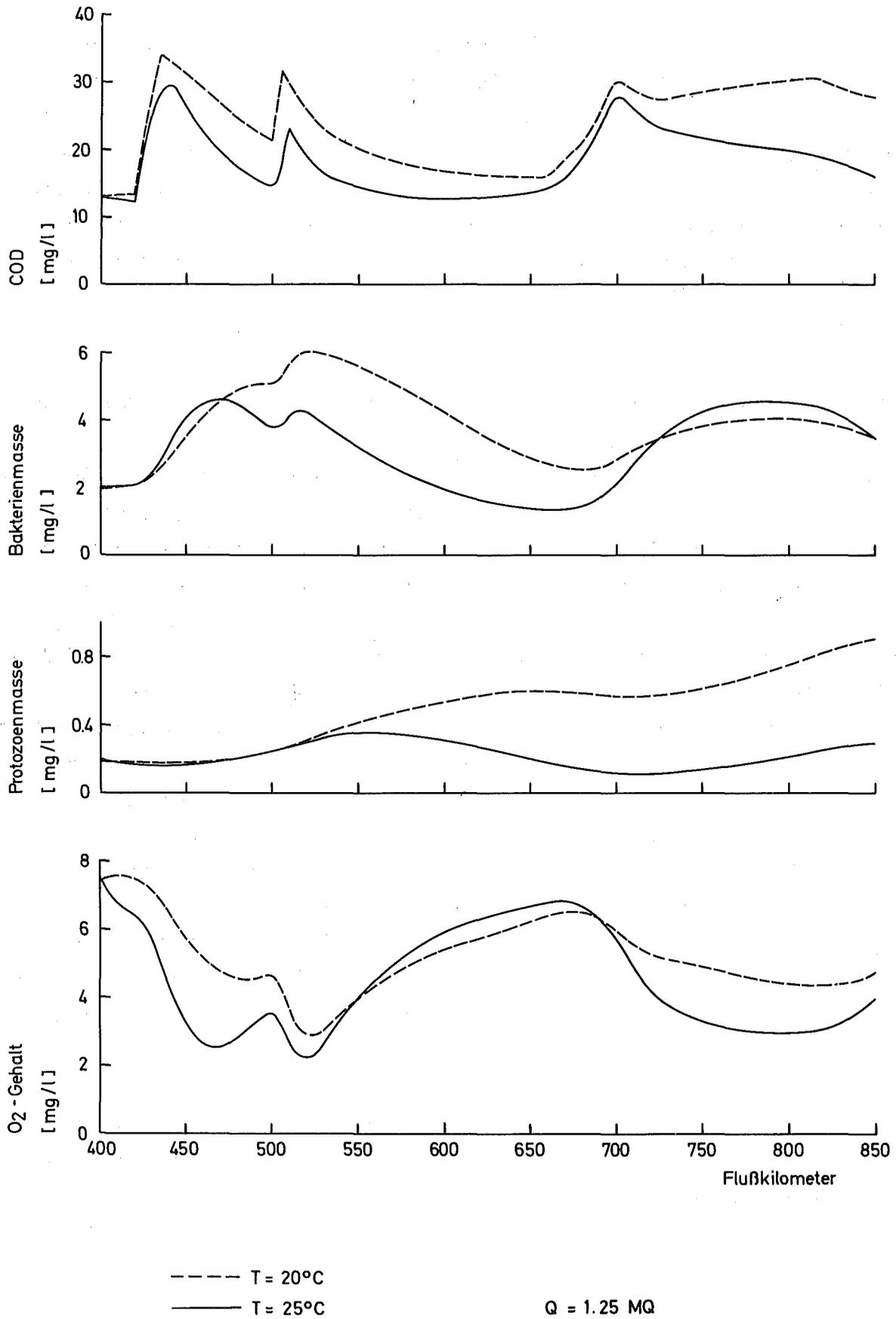


Abb. 20 Veränderungen im Selbstreinigungsverhalten des Rheins bei Temperaturerhöhung

#### 4.3 Die Auswirkungen von Naßkühltürmen mit Naturzug

Zur Beurteilung der möglichen Auswirkungen nasser Rückkühlung ist eine Abschätzung der Feuchte- und der Wärmeimmission (Enthalpieimmission) erforderlich. Diese Abschätzung wurde mittels eines Rechenverfahrens, das im Anhang näher beschrieben ist, durchgeführt. Als Eingabedaten sind Kühlturm- und Wetterdaten nötig. Die Kühlturmdaten sind mit hinreichender Genauigkeit bekannt; sie variieren in Abhängigkeit vom Kühlturmtyp. Die hier gefundenen Abschätzungen beruhen auf Kühlturmdaten, die als typische Werte gelten könnten. Die Wetterdaten beeinflussen einerseits die Enthalpieemission des Kühlturms und sind andererseits zur Beurteilung der Immissionswirkungen heranzuziehen. Notwendig sind Beobachtungen zur Temperatur, zur relativen Feuchte und zu den Windverhältnissen. Diese Beobachtungen sollten als Höhenprofile und über einen langen Zeitraum vorliegen. Zur Länge dieses Zeitraums werden aus meteorologischer Sicht keine einstimmigen Angaben gemacht. Jedoch sollten Beobachtungen aus mehreren aufeinanderfolgenden Jahren für eine zuverlässige Beschreibung ausreichen. Bis zur Stunde gibt es kein derartig umfangreiches Datenmaterial. Damit fehlt vorerst noch die Grundlage für eine genügend genaue Beurteilung der Auswirkungen nasser Kühltürme.

Andererseits erfordert die Standortplanung für nasse Kühltürme eine Vorhersage der Umweltverträglichkeit. Diese Vorhersage ist mit den vorhandenen Daten zwar möglich, kann jedoch nur mit beschränkter Genauigkeit getroffen werden.

Eine Möglichkeit zur Umweltbeeinflussung liegt vor, weil nasse Kühltürme feuchtwarme Luft ausstoßen. Anfänglich erscheint diese Emission als sichtbare Fahne, die ihrerseits zu einer "Beschattung" des unter der Fahne befindlichen Gebietes führen kann.

##### 4.3.1 Beschattung

Unter Beschattung wird die Unterbindung der Sonneneinstrahlung verstanden; bei Nacht, und falls der Himmel bedeckt ist, wird nicht von zusätzlicher Beschattung gesprochen.

Bei kühler und feuchter Witterung ist die Luft nur zu eingeschränkter Feuchtaufnahme fähig. Für den Betrieb eines Naßkühlturmes sind solche Wetterlagen, zumindest aus ökologischer Sicht, als "kritische" Wetterlagen anzusehen. Die beschattete Fläche wurde für solche "kritischen" Wetterbedingungen ermittelt. Als Temperaturbereich wurde hierfür der Bereich zwischen  $-17^{\circ}$  und  $+17^{\circ}$  gewählt. Die relative Feuchte wurde im Bereich zwischen 50 und 100 % gewählt. Solche Wetterbedingungen sind vorwiegend im Winterhalbjahr gegeben.

Als Eingabedaten wurden die Beobachtungen der Wetterstationen Freiburg (269 m) und Feldberg (1486 m) verwendet. Unter der Annahme, daß die auf dem Feldberg beobachteten Werte für die freie Atmosphäre über dem Rheintal bei Freiburg zutreffen, konnte die Ausbreitung der Kühlturmflamme in der Höhe ermittelt werden. Die u.U. durch diese Annahme induzierten Fehler müssen noch durch eine weiterführende Analyse der Stuttgarter Radiosondendaten abgeschätzt werden.

Für einen Naßkühlturm der Leistung 1 GWth im Freiburger Raum zeigt Abb. 21 die Summenhäufigkeit der Längen der sichtbaren Fahne als Funktion der Fah-

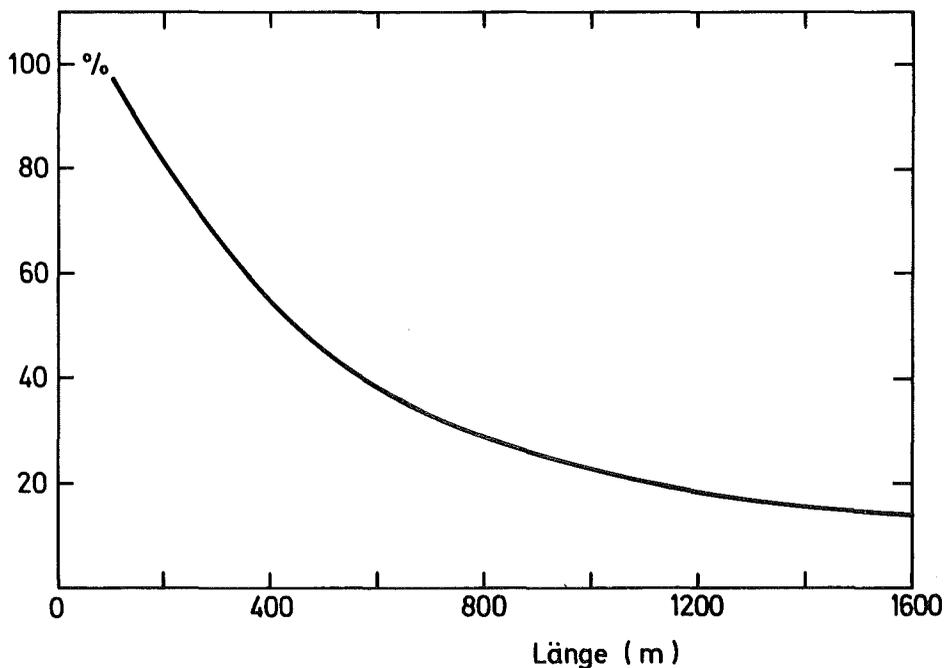


Abb. 21 Summenhäufigkeit der Längen von Kühlturmflammen (sichtbarer Anteil) im Freiburger Raum für "kritische" Wetterlagen (Kühlturmleistung 1 GWth)

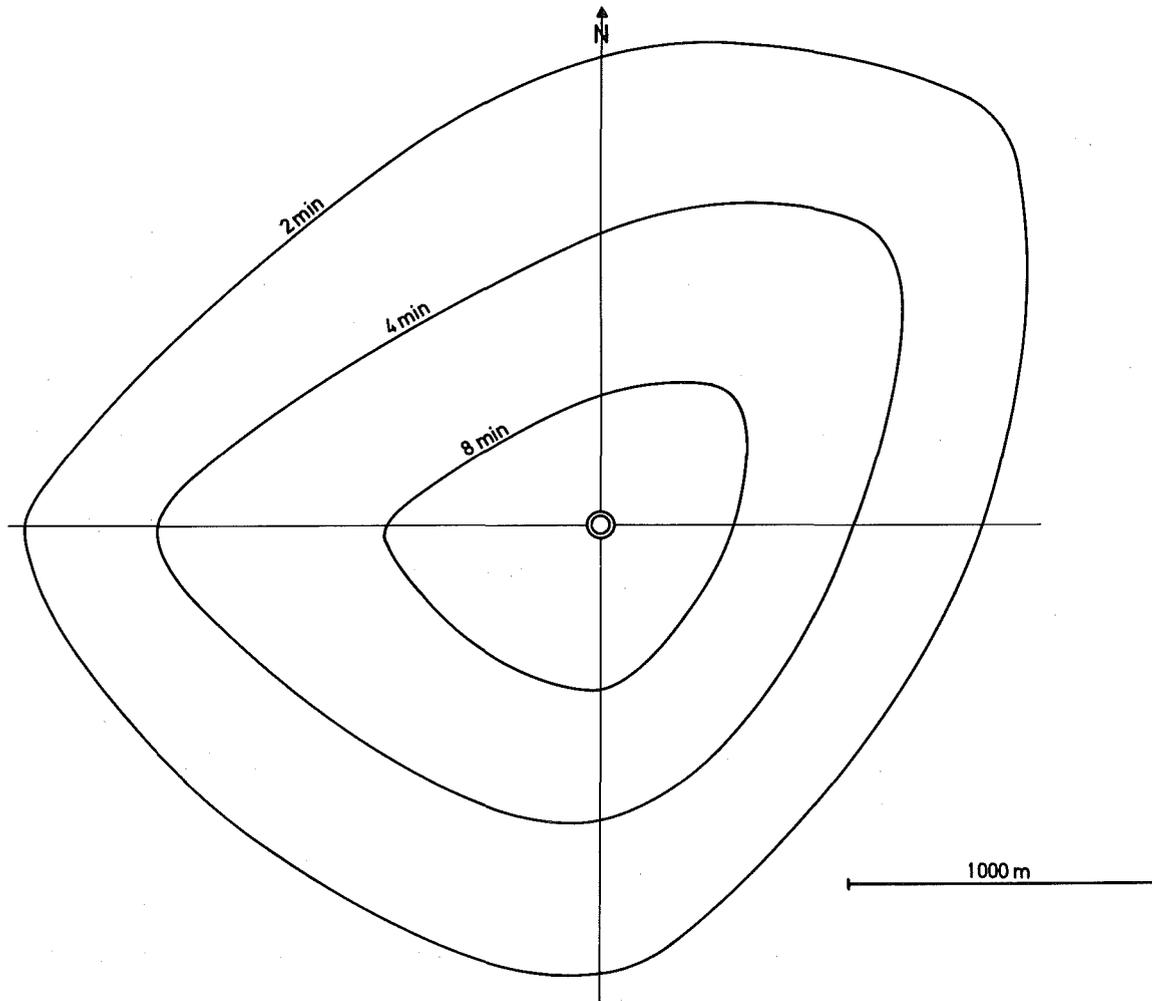


Abb. 22 Durch sichtbare Kühlturmflaggen hervorgerufene Beschattung für den Freiburger Raum und eine Kühlturmleistung von 1 GWth ("kritische" Wetterlagen)

nenlänge. Die Hälfte aller bei "kritischen" Wetterlagen vorkommenden Fälle zeigt eine Fahnenlänge unter 450 m; ein Viertel dieser Fälle besitzt eine Fahnenlänge unter 950 m.

Abb. 22 zeigt eine flächenhafte Verteilung von Fahnenlängen; die Verteilung gilt für Vollastbetrieb. Für die Verteilung der Windrichtungen wurden Angaben der Station Feldberg verwendet. Die eingetragenen Isolinien begrenzen beschattete Gebiete und sind mit der mittleren täglichen Beschattungsdauer bezeichnet. Die mittlere tägliche Beschattungsdauer für Regionen der Größe  $1 \text{ km}^2$  liegt bei wenigen Prozent der durchschnittlichen Sonnenscheindauer (2.8 h/d). Abschätzungen und Annahmen sind so gewählt, daß die Ergebnisse als obere Grenzwerte anzusehen sind.

Entsprechende Rechenergebnisse für einen nassen Kühlturm der Leistung 2 GWth führen zu dreifacher Beschattung.

Im Vergleich zum Winterhalbjahr liegen im Sommerhalbjahr höhere Temperaturen und geringere relative Feuchten vor. Deshalb wird sich der sichtbare Anteil der Kühlturmfläche schneller auflösen, und damit die beschattete Fläche kleiner werden. Eine erste Abschätzung ergibt für diese Verkleinerung einen Faktor 4. Andererseits erhöht sich die mittlere tägliche Sonnenscheindauer im Sommerhalbjahr auf 7.0 h/d, also um einen Faktor 2.5. Der Übergang vom Winter- zum Sommerhalbjahr führt bei konstant gehaltener beschatteter Fläche zu verminderter Beschattung, die dann ebenfalls in der Größenordnung von einigen Minuten liegt.

Wetterbeobachtungen der Station Sommerberg/Wildbad zeigen deutlich den Einfluß des Lokalklimas, charakterisieren also nicht den Zustand der freien Atmosphäre über dem nördlichen Oberrheintal. Deswegen liegen für den Karlsruher Raum Beobachtungen, wie sie für den Freiburger Raum mittels der Station Feldberg gegeben sind, nicht vor. Eine angestrebte Untersuchung der Beschattung, die zur Untersuchung im Freiburger Raum analog gewesen wäre, war somit für den Karlsruher Raum nicht möglich.

Bis geeignete Beobachtungen verfügbar sein werden, könnte eine Übertragung der für den Freiburger Raum ermittelten Verhältnisse auf den Karlsruher Raum versucht werden. Z.Zt. kann sich eine solche Übertragung nur an einem Vergleich der Wetterbeobachtungen der Bodenstationen Freiburg und Karlsruhe orientieren.

Im Jahresmittel zeigt Karlsruhe gegenüber Freiburg etwas geringere Temperaturen, etwa gleiche relative Feuchtwerte und weniger Sonnenschein. Die Witterungsunterschiede sind im Vergleich zu den Annahmen, die in das Verfahren zur Ermittlung der Beschattung und in diese Übertragung eingehen, geringfügig. Deswegen erscheint es z.Zt. nicht sinnvoll, die erwähnten Unterschiede der Witterung exakt zu berücksichtigen. In einer ersten Näherung sollten die für den Freiburger Raum ermittelten Beschattungen auch für den Karlsruher Raum zutreffen und als repräsentativ für das Oberrheintal angesehen werden können.

#### 4.3.2 Bodennebelbildung

Es wurde bereits erwähnt, daß die Wärmeabfuhr durch nasse Kühltürme mit einer Feuchteemission von etwa  $300 \text{ l}/(\text{s} \times \text{GWth})$  verbunden ist. In Abhängigkeit von den Wetterverhältnissen kann diese Feuchteemission zu Immissionen mit entsprechender Bodennebelbildung führen. Hinsichtlich der Feuchteimmission stellt sich vor allem die Frage nach der Überhöhung. Sowohl die derzeitig verfügbaren Eingabedaten wie auch die modelltheoretischen Vorstellungen sind für eine hinreichend genaue Berechnung der Überhöhung unzulänglich. Es wird versucht, für mögliche Wetterverhältnisse Abschätzungen zu ermitteln.

Falls sich die Kühlturmfahne nicht in der gewohnten Weise von der Mündung löst, kommt es zu dem sogenannten "Herunterreißen" der Fahne. Zwei Fälle sind zu betrachten.

Einmal kann es zur Feuchteimmission in unmittelbarer Umgebung des Kühlturms kommen. Diese wird immer dann eintreten, wenn Windgeschwindigkeit und Kühlturmgebäude zu einer solchen Sogwirkung führen, daß die Fahne den Boden erreicht. Sofern davon ausgegangen wird, daß möglicherweise bereits eine Windgeschwindigkeit, die das Dreifache der Fahnaustrittsgeschwindigkeit (etwa  $4 \text{ m/s}$ ) beträgt, zu einem "zu-Boden-Herunterreißen" der Fahne führt, so sind alle Wetterlagen mit Windgeschwindigkeiten über  $12 \text{ m/s}$  als "kritisch" anzusehen. Messungen am meteorologischen Mast des KFZ Karlsruhe (NESTER /47/) zeigen, daß in  $100 \text{ m}$  Höhe Windgeschwindigkeiten größer oder gleich  $12 \text{ m/s}$  mit einer Häufigkeit von  $2 \%$  bis  $3 \%$  auftreten. Wird berücksichtigt, daß Wetterlagen mit hohen Windgeschwindigkeiten kaum nebelträchtig sind, so ergibt sich insgesamt, daß eine zusätzliche Nebelbildung durch dieses "Herunterreißen" der Fahne nur mit geringer Wahrscheinlichkeit auftreten kann.

Selbstverständlich wird für diesen Fall der Bodenberührung die sichtbare Fahne in der Umgebung des Kühlturms (in Windrichtung) als "Nebel" in Erscheinung treten. Wegen der (vorausgesetzten) hohen Windgeschwindigkeit wird die sichtbare Fahne jedoch in verhältnismäßig kurzer Zeit aufgelöst sein.

Der zweite zu betrachtende Fall liegt vor, falls die Fahne zwar herunterge-

rissen wird, aber nicht den Boden erreicht; damit wird die Fahne Überhöhung einbüßen, die Ausbreitung wird bei entsprechend geringer Quellhöhe einsetzen, und somit wird die Feuchteimmission am Boden - im Vergleich zum "Normalfall" - größer sein. Aber auch in diesem Fall wird wegen der hohen Windgeschwindigkeit zumeist keine Nebelträchtigkeit vorliegen und somit keine zusätzliche Nebelbildung induzierbar sein.

Insgesamt dürften die beiden letztgenannten Fälle der Feuchteimmission zur großräumigen Nebelbildung verhältnismäßig wenig beitragen.

Inversionswetterlagen können die Überhöhung der Kühlturmmission beeinflussen. Die bisher durchgeführten Rechnungen zeigen, daß die Emissionen nasser Kühltürme der Leistung 1 GWth mindestens eine Überhöhung von 200 m erfahren. Dabei wurde vorausgesetzt, daß sich die Fahne von der Mündung in gewohnter Weise absetzt. Unter Berücksichtigung der Höhe des Kühlturbauwerkes (größer als 100 m) ergibt sich, daß die horizontale Fahnausbreitung in einer Höhe von etwa 350 m erfolgt. Andere Untersuchungen (EIDGENÖSSISCHE KÜHLTURMKOMMISSION /61/) ermitteln als Mindestüberhöhungen, die sich für Emissionen nasser Kühltürme der Leistung 1 bis 2 GWth ergeben, mehrere hundert Meter. Es erscheint unwahrscheinlich, daß bodennahe Inversionen mit Obergrenzen bis 300 m die Ausbreitung von Kühlturmfahnen wesentlich beeinflussen können.

Inversionen mit Obergrenzen bei mehr als 300 m über Grund können die Ausbreitung der Kühlturmfahnen behindern und möglicherweise in Bodennähe zu vermehrter Feuchteimmission führen. Diese Frage wird bei der Auswertung von Daten des Flughafens Bremgarten wieder aufgegriffen werden.

Nachstehend wird versucht, abzuschätzen, ob die Feuchteimmission, die sich bei "normalen" Wetterverhältnissen ergibt, zu Bodennebelbildung führen kann. Die Kühlturmmission findet in einer Höhe von etwa 100 m über dem Erdboden statt. Um von der Emission zur Immission zu gelangen, wird wieder die "Gaußsche Formel" unter Verwendung der Ausbreitungsparameter nach KLUG (1969) eingesetzt. Die bereits genannten Annahmen gehen hierbei in verschärfter Form ein, weil sich die Ausbreitungsrechnung - anders als bei der Ermittlung der Beschattung - über größere Entfernungen erstreckt.

Die Abb. 23 bis 30 zeigen Bodenfeuchteimmissionen für verschiedene Ausbreitungskategorien. Die den Isolinien beigefügten Angaben vermerken die immit-

tierte Feuchte in g pro m<sup>3</sup> Luft. Die Kühlturmleistung beträgt 1 GWth. Als effektive Quellhöhe der Feuchteemission wurden 350 m über Grund, als mögliche Windgeschwindigkeiten 2 m/s bzw. 4 m/s angenommen. Die maximale Immission ändert sich mit der Ausbreitungskategorie sowohl quantitativ als auch lokal. Unter der Annahme, daß tagsüber die Ausbreitungsverhältnisse des Karlsruher Raumes für das gesamte Oberrheintal zutreffen, wobei mit zunehmender Höhe über Grund die Wetterklasse III<sub>2</sub> (Einteilung nach KLUG /52/) dominieren könnte, ergibt sich die in Abb. 28 gezeigte Feuchteimmission. Die maximale Immission, die in einer Entfernung von etwa 6 km auftritt, beträgt etwa 0.1 g Feuchte pro m<sup>3</sup> Luft. Dies wäre mit den natürlichen Tagesschwankungen des Feuchtegehaltes, die bei einigen Gramm H<sub>2</sub>O pro m<sup>3</sup> Luft liegen können, zu vergleichen.

Am Flugplatz Bremgarten wurden u.a. Beobachtungen zu Feuchteverhältnissen durchgeführt. Diese Daten dürften näherungsweise für nebelträchtige Regionen des südlichen Oberrheintalgebietes charakteristisch sein. Bisher konnten diese Beobachtungen für die Jahre 1970 bis 1972 ausgewertet werden. Die Feuchteimmission eines nassen Kühlturms der Leistung 1 GWth würde in Bremgarten zu einer Bodennebelhäufigkeit führen, die maximal einige Prozent über der natürlichen Bodennebelhäufigkeit liegen könnte. Diese Abschätzung berücksichtigt auch erhöhte Feuchteimmissionen, die sich ergeben könnten, falls die Ausbreitung der Kühlturmemission durch Inversionswetterlagen beeinflusst wird. Dabei wurde angenommen, daß die Freiburger Häufigkeitsverteilung der Ausbreitungskategorien (MANIER /46/) auch für das südliche Oberrheintal gilt, die mittlere Quellhöhe bei 350 m liegt und die Windgeschwindigkeit 4 m/s beträgt. An dieser Stelle soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß die Unvollkommenheit der z.Zt. verfügbaren Ausbreitungsmodelle und insbesondere der Ausbreitungsparameter sich auf Prognosen der oben genannten Zunahme der Bodennebelhäufigkeit voll auswirkt.

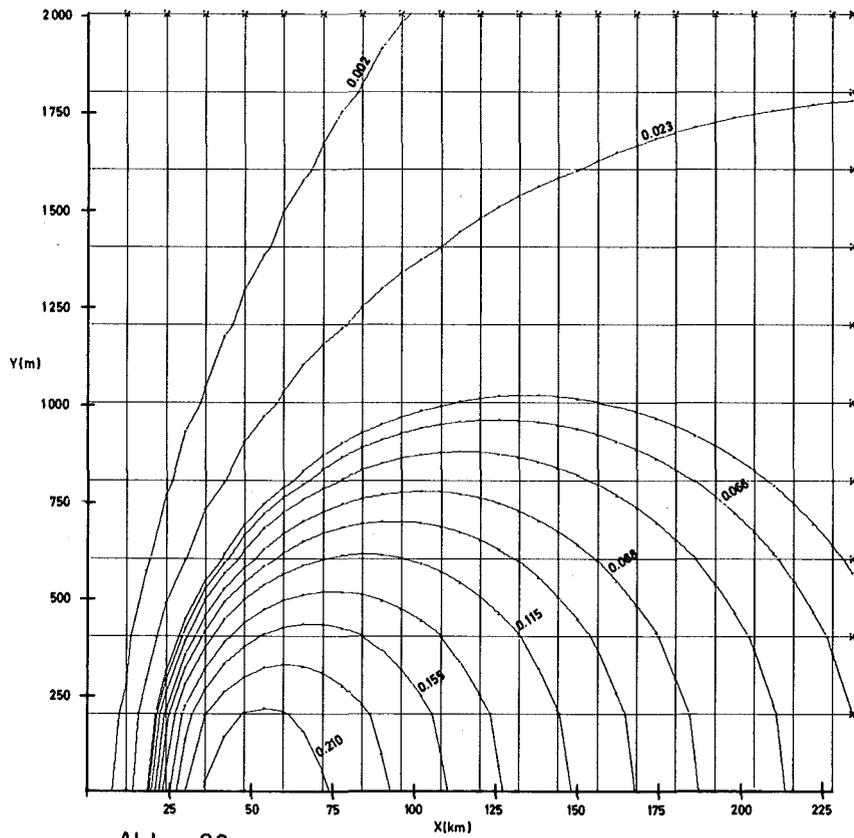


Abb. 23 Feuchteimmission bei der Ausbreitungskategorie II und einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s.

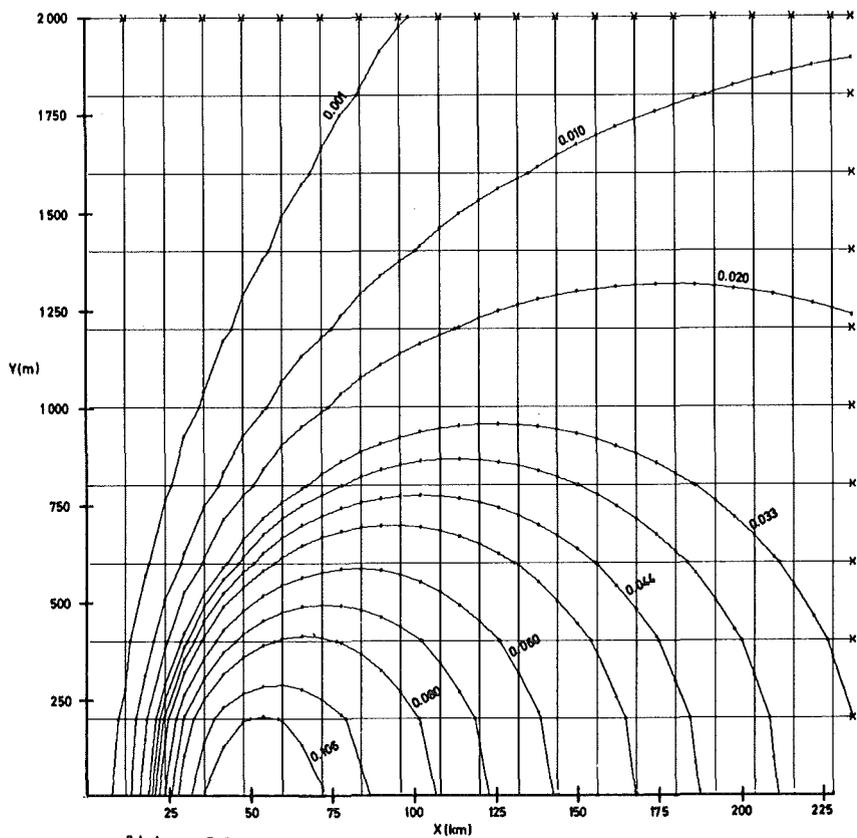


Abb. 24 Feuchteimmission bei der Ausbreitungskategorie II und einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s.

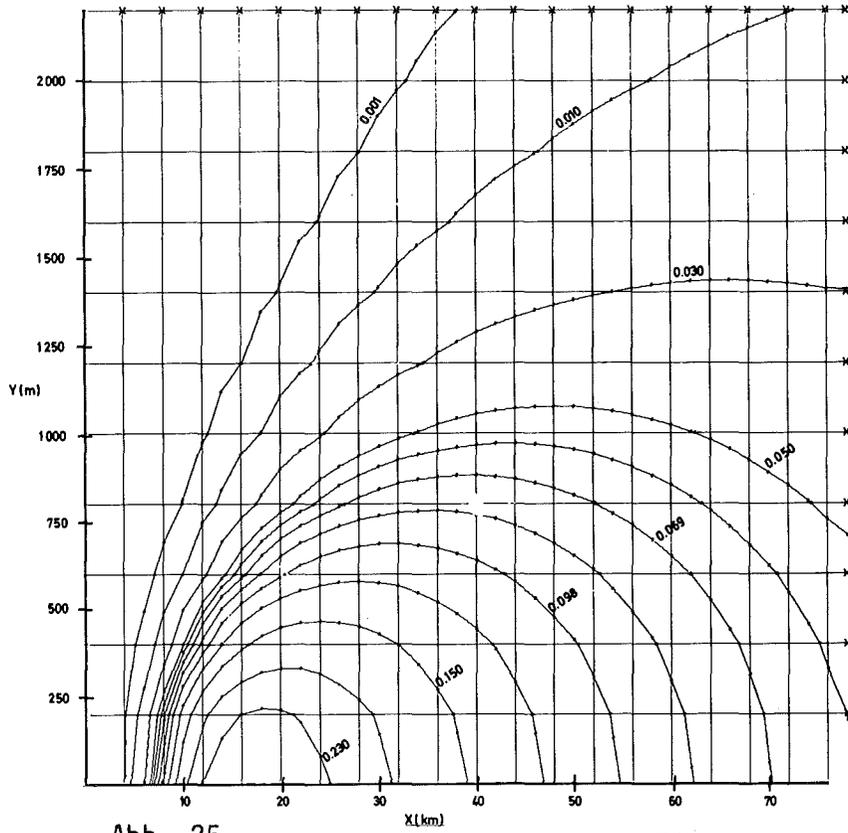


Abb. 25

Feuchteimmission bei der Ausbreitungskategorie III,1  
und einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s.

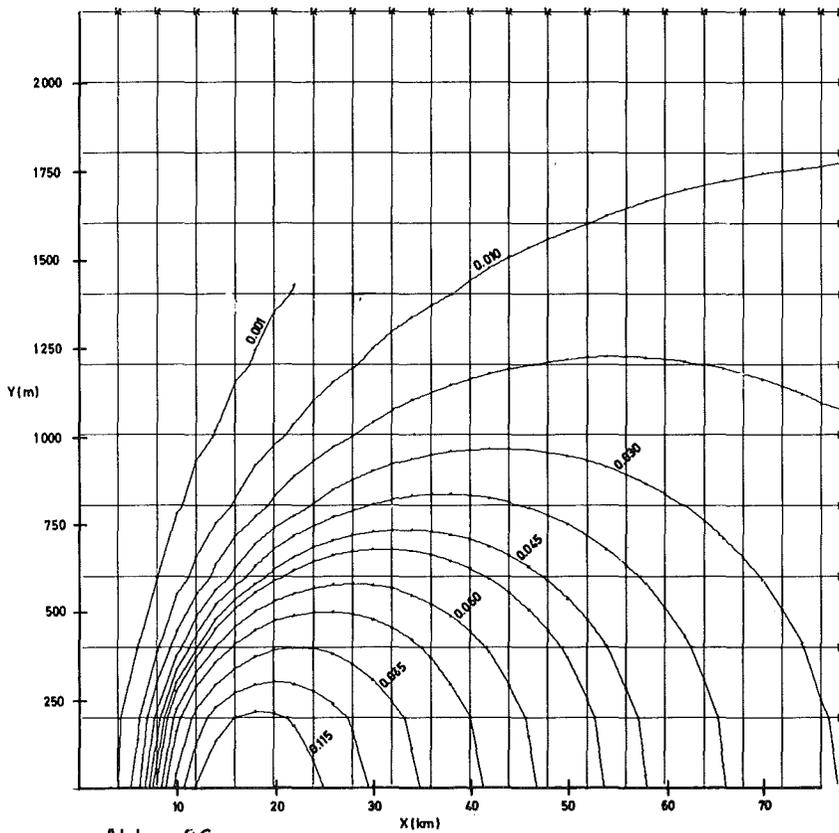


Abb. 26

Feuchteimmission bei der Ausbreitungskategorie III,1  
und einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s.

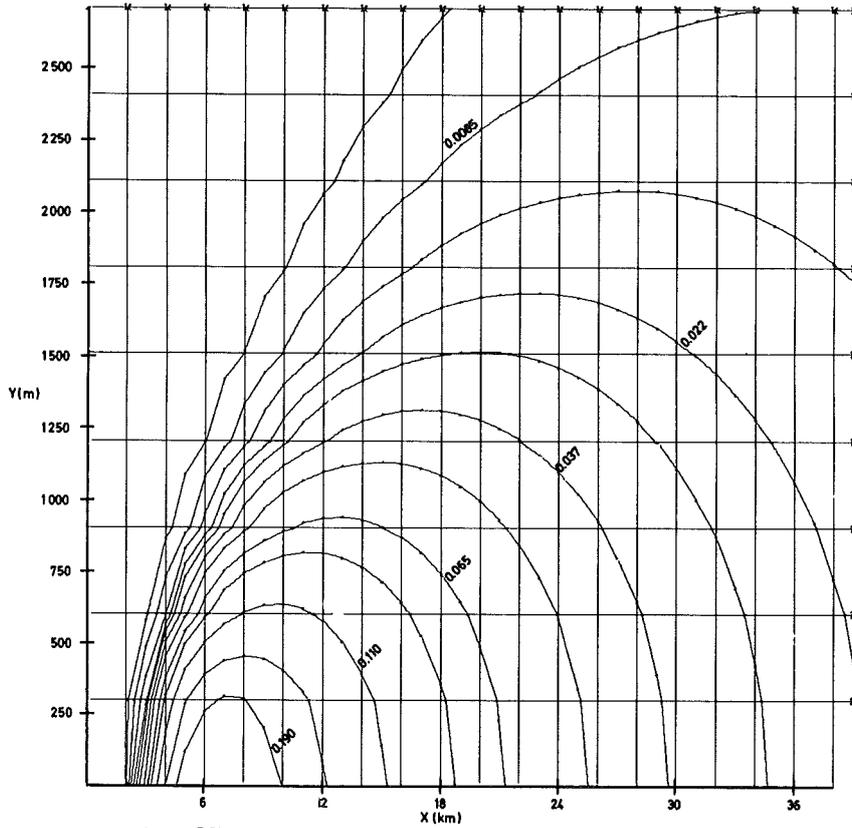


Abb. 27 Feuchteimmission bei der Ausbreitungskategorie III,2 und einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s.

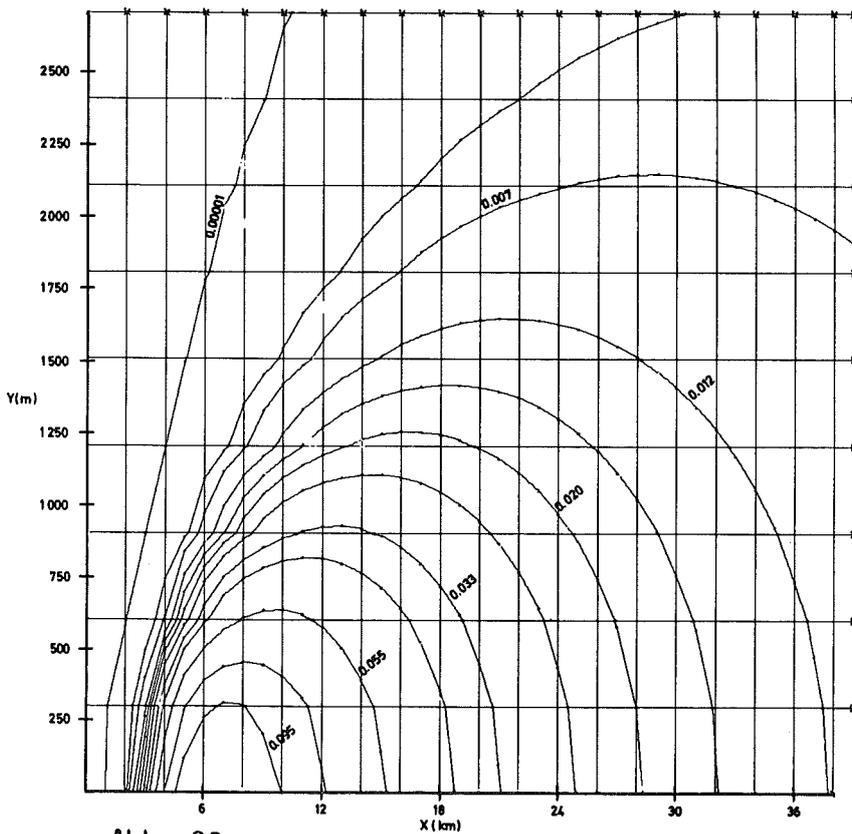


Abb. 28 Feuchteimmission bei der Ausbreitungskategorie III,2 und einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s.

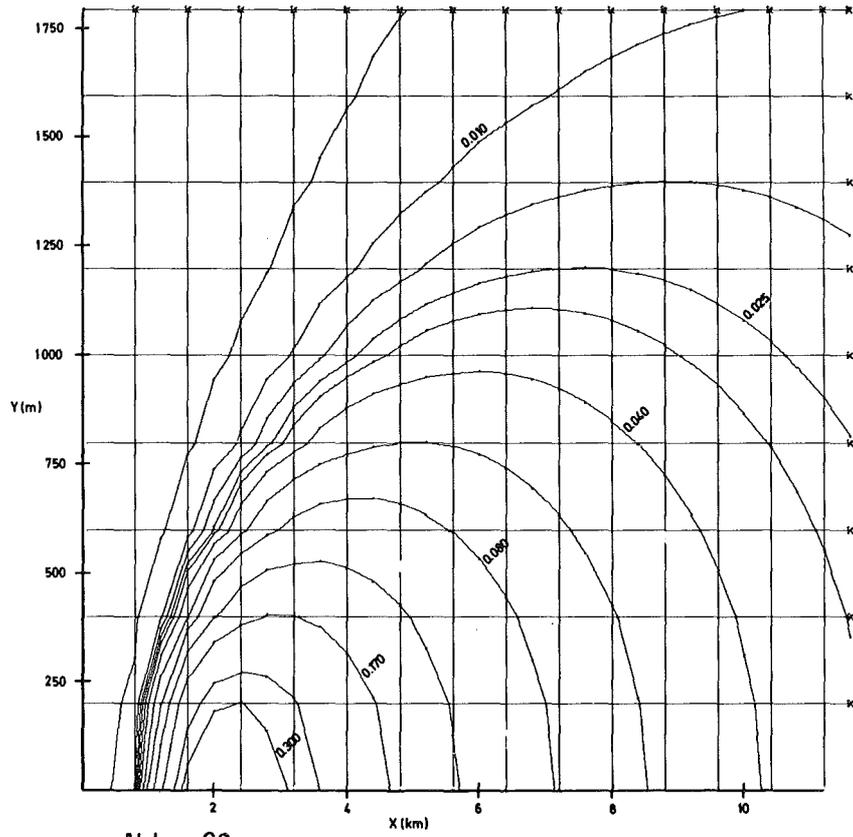


Abb. 29 Feuchteimmission bei der Ausbreitungskategorie IV und einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s.

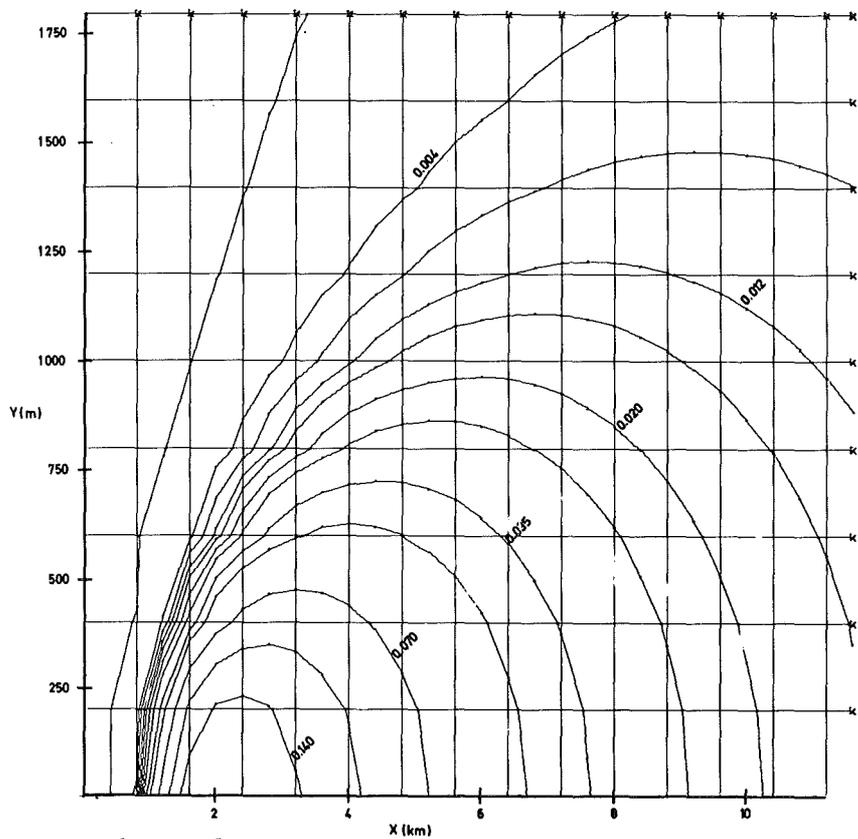


Abb. 30 Feuchteimmission bei der Ausbreitungskategorie IV und einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s.

#### 4.4 Die radiologische Belastung im Oberrheingebiet

Die im Normalbetrieb von kerntechnischen Anlagen an die Atmosphäre und Hydrosphäre abgegebenen radioaktiven Substanzen erfahren durch Transportvorgänge eine Verbreitung in die Umgebung. Bei entsprechend langen Halbwertszeiten kann die Verbreitung globale Entfernungen erreichen. Die radioaktiven Substanzen führen beim Menschen über verschiedene Wege - äußere Bestrahlung, direkte Aufnahme in den Körper durch Einatmen, Aufnahme von Nahrungsmitteln mit eingelagerten Radionukliden - zu einer radiologischen Belastung.

Diese radiologische Belastung wird im allgemeinen mit Hilfe der Dosisrate beschrieben:

$$\text{Dosisrate} = \text{Dosisfaktor} \cdot \text{Ausbreitungsfaktor} \cdot \text{Ausflußrate}$$

Die Ausflußrate von kerntechnischen Anlagen gibt an, welche Menge - meist in der Einheit "Curie" pro Zeiteinheit - an die Umgebung abgegeben wird (Emission). Die Multiplikation mit dem atmosphärischen oder hydrosphärischen Ausbreitungsfaktor ergibt die Konzentration, die sich an einem bestimmten Ort auf Grund der ortsüblichen Ausbreitungsvorgänge einstellt (Immission). Die weitere Multiplikation mit dem Dosisfaktor, der den Vorgang der Inkorporation der radioaktiven Substanzen und die Akkumulation in "kritischen" Organen berücksichtigt, ergibt dann die Dosisrate. Letztere wird meist in der Einheit rem/a bzw. mrem/a angegeben.

Da die Dosisrate der Konzentration proportional ist, wird zum Teil auch letztere zur Beschreibung der zu erwartenden Belastung herangezogen.

$$\text{Konzentration} = \text{Ausbreitungsfaktor} \cdot \text{Ausflußrate}$$

Das Produkt aus Ausflußrate und Dosisfaktor wird als Gefährdungs-Ausflußrate bezeichnet und ist ein Maß für die radiotoxikologische Bedeutung eines Radionuklids.

Im folgenden werden für die im Oberrheingebiet im Bau befindlichen bzw. geplanten Kernkraftwerke die radiologischen Belastungen durch

Tritium in Wasser  
 Edelgase in Luft  
 Jod in Luft

ermittelt. Für diese Stoffe werden in Deutschland folgende Grenzwerte für die Belastung durch kerntechnische Anlagen vorgeschlagen /62, 63/:

Tritium:

max. Konzentration in Flüssen ("Flußstandard"):  $3 \mu\text{C}/\text{m}^3$

Edelgase:

max. Ganzkörper-Dosisrate: 30 mrem/a

Jod:

max. Schilddrüsen-Dosisrate bei Kleinkindern 90 mrem/a

Eine Zusammenstellung der im Bau befindlichen bzw. geplanten Kernkraftwerke im Einzugsgebiet des Oberrheins (einschl. Hochrhein) ist in Tab. 29 gegeben /64 -66/. Die heute im Bau befindlichen bzw. fest geplanten Anlagen,

Tab. 29 Standortangaben von Kernkraftwerken im Einzugsgebiet des Oberrheins

Standort Bezeichnung	Land	Fluß	Typ	Leistung	Inbetr.-nahme	Standort Bezeichnung	Land	Fluß	Typ	Leistung	Inbetr.-nahme
Anlagen am Oberrhein						Anlagen am Hochrhein, Vorderrhein und Nebenflüssen					
Kernforschungs-zentr. Karlsruhe	D	Rhein	MZFR KNK	60 MWe 20 MWe	1966 1973	Beznau-1	CH	Aare	DWR	350 MWe	1969
Biblis-1	D	Rhein	DWR	1200 MWe	1974	Beznau-2	CH	"	DWR	350 MWe	1971
Biblis-2	D	"	DWR	1300 MWe	1976	Mühleberg	CH	Saane	SWR	310 MWe	1972
Biblis-3	D	"	DWR <sup>a)</sup>	1300 MWe		Kaiseraugst	CH	Rhein	SWR	900 MWe	1979
Philippsburg-1	D	Rhein	SWR	900 MWe	1974	Leibstadt	CH	Rhein	SWR	955 MWe	1979
Philippsburg-2	D	"	SWR	900 MWe	1977	Gösgen-Däniken	CH	Aare	DWR	920 MWe	1978
Philippsburg-3	D	"	SWR <sup>a)</sup>	900 MWe		Rüthi	CH	Rhein	DWR	900 MWe	1979
BASF-1	D	Rhein	DWR	600 MWe <sup>c)</sup>	1978	Graben-1	CH	Aare	SWR	1100 MWe	1980/81 1983/84
BASF-2	D	"	DWR	600 MWe <sup>c)</sup>		Graben-2	CH	"	SWR	1100 MWe	
Breitsach-Wyhl-1	D	Rhein	DWR	1300 MWe	1979	Schwörstadt-1	D	Rhein		1200 MWe	
Breitsach-Wyhl-2	D	"	DWR	1300 MWe		Schwörstadt-2	D	"		1200 MWe	
Wörth-1 <sup>d)</sup>	D	Rhein		1000 MWe <sup>b)</sup>		Schwörstadt-3	D	"		1200 MWe	
Wörth-2	D	"		1000 MWe <sup>b)</sup>		Anlagen am Neckar					
Fessenheim-1	F	Rhein	DWR	900 MWe	1975	Obrigheim	D	Neckar	DWR	300 MWe	1969
Fessenheim-2	F	"	DWR	900 MWe	1976	Neckarwestheim	D	Neckar	DWR	800 MWe	1976
Fessenheim-3	F	"	DWR	1200 MWe	1981						
Fessenheim-4	F	"	DWR	1200 MWe	1983						
Gambsheim	F	Rhein		1200 MWe							

a) angenommener Typ  
 b) angenommene Blockgröße

c) äquivalente elektrische Leistung  
 d) möglicherweise fossil

bei denen der Reaktortyp bereits festliegt, werden bis etwa 1980 in Betrieb gehen. Darüberhinaus sind weitere Kernkraftwerks-Planungen bekannt, bei denen noch keine offiziellen Entscheidungen vorliegen. Bei diesen Projekten kann jedoch angenommen werden, daß es sich um Leichtwasserreaktor-Kernkraftwerke handeln wird und daß ihre Inbetriebnahme bis "um 1985" erfolgt sein dürfte. Über "1985" hinaus existieren keine konkreten Standortangaben. Hier lassen sich nur auf Grund von Energiebedarfsvorhersagen und des prognostizierten Einsatzes von Kernkraftwerken sehr pauschale Aussagen machen. Weitere Unbekannte für den Zeitraum nach "1985" sind eine sich eventuell wandelnde Standortphilosophie und der Einsatz fortgeschrittener Reaktortypen.

Für die radioaktiven Emissionen wurden die in Abschnitt 2.1.2 genannten Werte verwendet. Bei Standorten, für die der Reaktortyp noch nicht festliegt, wurde jeweils der Mittelwert aus Druck- und Siedewasserreaktoren angenommen, was bei der Annahme eines zukünftigen Marktanteils von 50:50 und über mehrere Standorte integriert eine gerechtfertigte Mittelung ist. Mit einbezogen in die Untersuchungen wurden neben dem Kernkraftwerk Neckarwestheim das Kernkraftwerk Obrigheim sowie das Kernforschungszentrum Karlsruhe (MZFR, WAK). Hierfür wurden folgende Abgaberaten angesetzt:

	KKW Obrigheim (Ci/a)	KFZ Karlsruhe (Ci/a)
Tritium	350	2 200
Xenon-133	3 000	-
Krypton-85	600 <sup>+) </sup>	350 000
Argon-41	-	150 000
Jod-131	0.04	0.5

+) Kr-85 und Xe-135

Die Angaben für KKW Obrigheim sind Mittelwerte über mehrere Jahre Betriebszeit (zusammengestellt in /10-12/); zu den Werten für das KFZ Karlsruhe ist im einzelnen folgendes zu bemerken:

Die Tritiumabgabe entspricht der vom KFZ im Jahre 1972 effektiv abgegebenen Menge /67/. Das Tritium entstammt etwa je zur Hälfte den Anlagen MZFR und WAK. Beide Anlagen geben ihre radioaktiven Abwasser zur weiteren Behandlung an das KFZ ab. Die zukünftige Entwicklung der Tritiumabgabe hängt daher einmal vom Anfall in diesen beiden Anlagen, zum andern von der weiteren Behandlung im KFZ ab: eine Stilllegung des MZFR in den kommenden Jahren würde zur

Verminderung der Tritiumabgabe führen, bei vollem Normalbetrieb der WAK würde der Tritiumanfall um 10 000 Ci/a betragen. Da andererseits im KFZ Forschungsvorhaben zur Tritiumrückhaltung durchgeführt werden /68/, kann angenommen werden, daß sich die Tritiumabgabe aus dem KFZ in der Zukunft nicht wesentlich erhöhen wird. Aus diesem Grund wird der gegenwärtige Wert auch für die Zukunft angenommen.

Der Wert für Krypton-85 entspricht der für die WAK angemeldeten Abgabemenge /69/. Er wird heute nicht erreicht, entspricht jedoch in etwa dem Abgabewert im Normalbetrieb und stellt somit eine obere Abschätzung dar. Das gleiche gilt für den Wert für Jod-131: auch hier handelt es sich um einen (rechnerisch ermittelten) Abgabewert für die WAK im Normalbetrieb.

Mit hinzugenommen bei den Emissionen des KFZ wurde die Abgabe von Argon-41; hier handelt es sich um eine effektiv abgegebene Menge aus dem Forschungsreaktor FR2 /67/.

#### 4.4.1 Tritium

Die für den Oberrhein zu erwartende Tritium-Belastung aus Kernkraftwerken ist aus den Abb. 31 und 32 ersichtlich. Abb. 31 zeigt die "um 1985" zu erwartenden Tritiumfrachtraten im Oberrhein von Basel bis Mainz, sowie die sich daraus ergebenden Tritiumkonzentrationen, die anhand der Abflußraten nach /70/ bestimmt wurden. Die entsprechende Vorbelastung bei Basel aufgrund von geplanten Kernkraftwerken am Hochrhein und dessen Nebenflüssen wurde mit berücksichtigt. Die höchsten Belastungen treten bei Mainz auf; bei mittlerem Niedrigwasser wird eine Konzentration von  $1 \mu\text{C}/\text{m}^3$  erreicht. In Abb. 32 ist für einige ausgewählte Orte der zeitliche Anstieg der lokalen Tritiumkonzentrationen aus Kernkraftwerken ersichtlich. Hierbei wurde die mittlere Abflußrate MQ zugrundegelegt. Diese durch Tritiumabgaben von lokalen kerntechnischen Anlagen im Flußwasser erzeugten Konzentrationen werden zur Zeit und in naher Zukunft völlig überdeckt durch Tritium das aus oberirdischen Kernwaffenversuchen herrührt. In Abb. 33 sind die Tritiumkonzentrationen im Flußwasser gezeigt, die aus oberirdischen Kernwaffenexplosionen, aus der natürlichen Tritiumproduktion und aus der globalen Freisetzung von Tritium durch kerntechnische Anlagen bis zum Jahr 2000 zu erwarten sind.

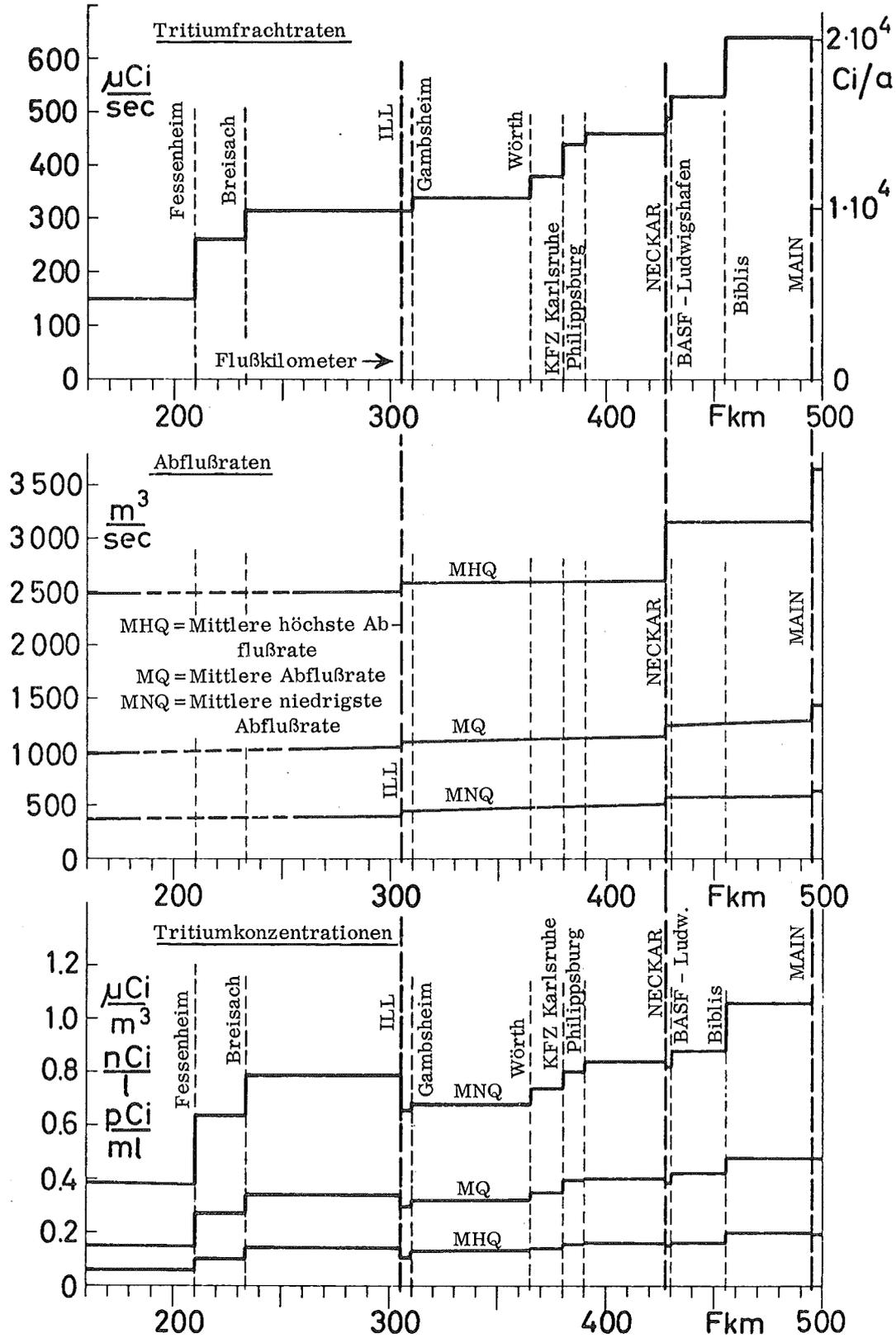


Abb. 31 Tritiumfrachtraten, Abflußraten und Tritiumkonzentrationen des Oberrheins im Jahr "1985" durch kerntechnische Anlagen im Einzugsgebiet des Oberrheins

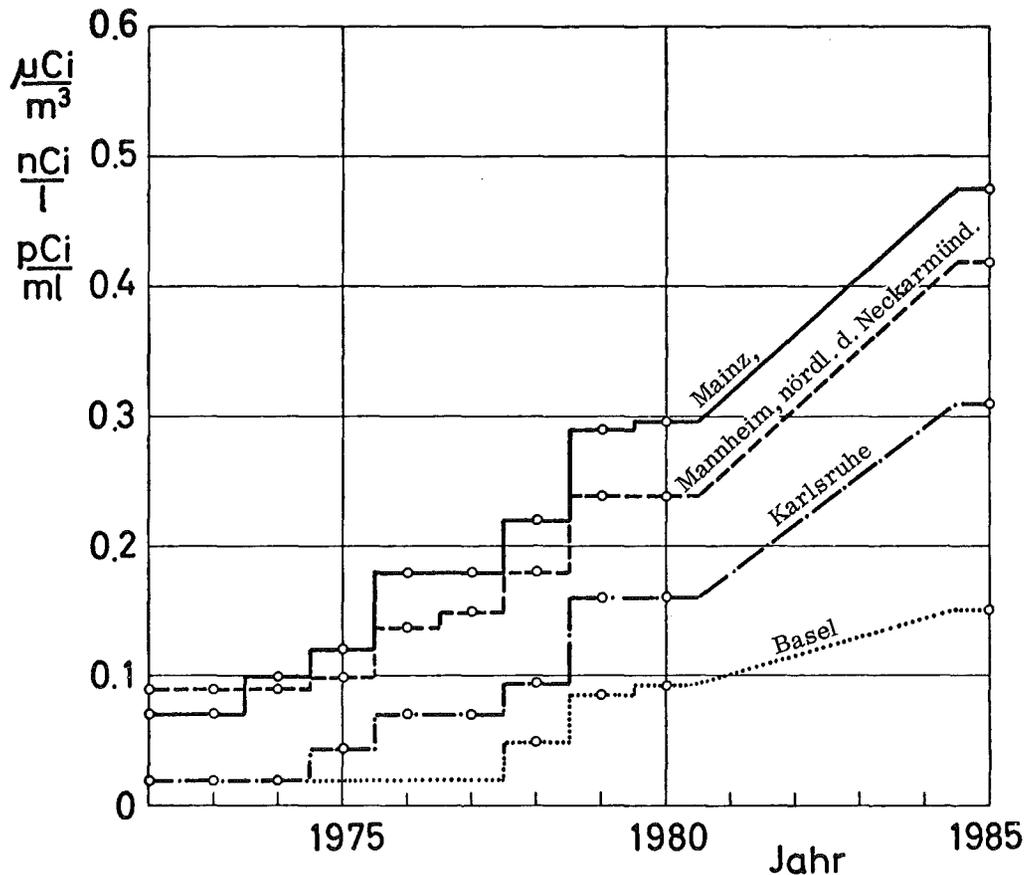


Abb. 32 Zeitliche Zunahme der Tritiumkonzentration bis zum Jahr "1985" durch kerntechnische Anlagen im Einzugsgebiet des Oberrheins bei mittlerer Abflußrate (MQ)

Die Aufsummierung dieses global freigesetzten Tritiums mit dem lokal im Oberrhein freigesetzten Tritium ergibt Konzentrationen wie sie aus Abb. 34 ersichtlich sind. Etwa bis zu den Jahren 1975 bis 1980, je nach Standort, ist mit einem Absinken der jetzigen Gesamtkonzentration zu rechnen, hauptsächlich auf Grund des Zerfalls des Kernwaffentritiums. Dann setzt jedoch ein Anstieg ein, der bei linearer Extrapolation der Zunahme der Tritiumabgabe im Jahr 2000 bei Mainz etwa  $1 \mu\text{C}/\text{m}^3$  erreichen kann. Berücksichtigt man mit einem Faktor zwei den Übergang von mittlerer Wasserführung zu mittlerer Niedrigwasserführung, so ergibt sich bei Mainz im ungünstigsten Fall eine Konzentration von insgesamt  $2 \mu\text{C}/\text{m}^3$ .

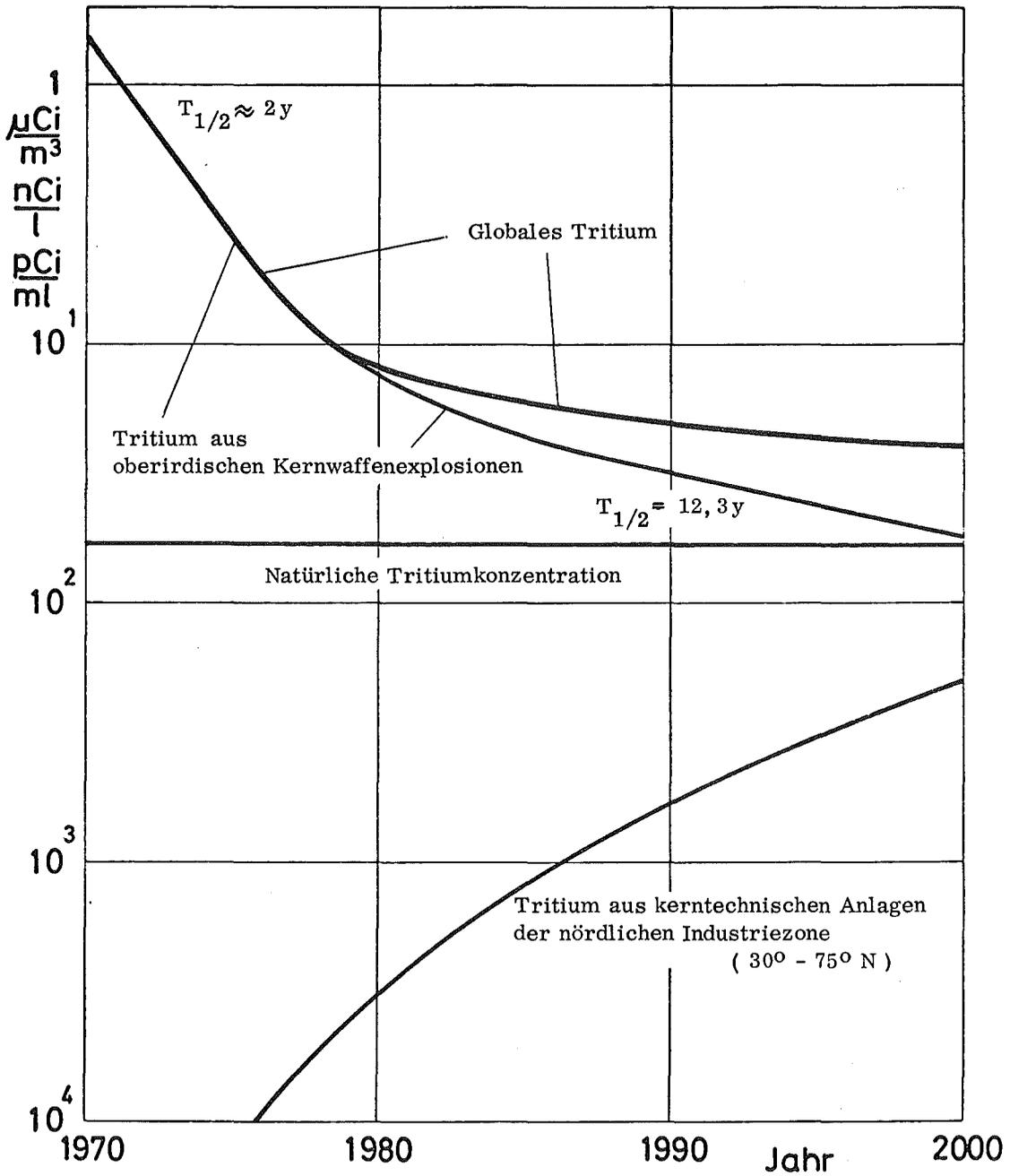


Abb. 33 Tritiumkonzentrationen durch oberirdische Kernwaffenexplosionen, natürliche Tritiumproduktion und Freisetzung aus kerntechnischen Anlagen der nördlichen Industriezone ( $30^\circ - 75^\circ \text{N}$ ) bis zum Jahr 2000

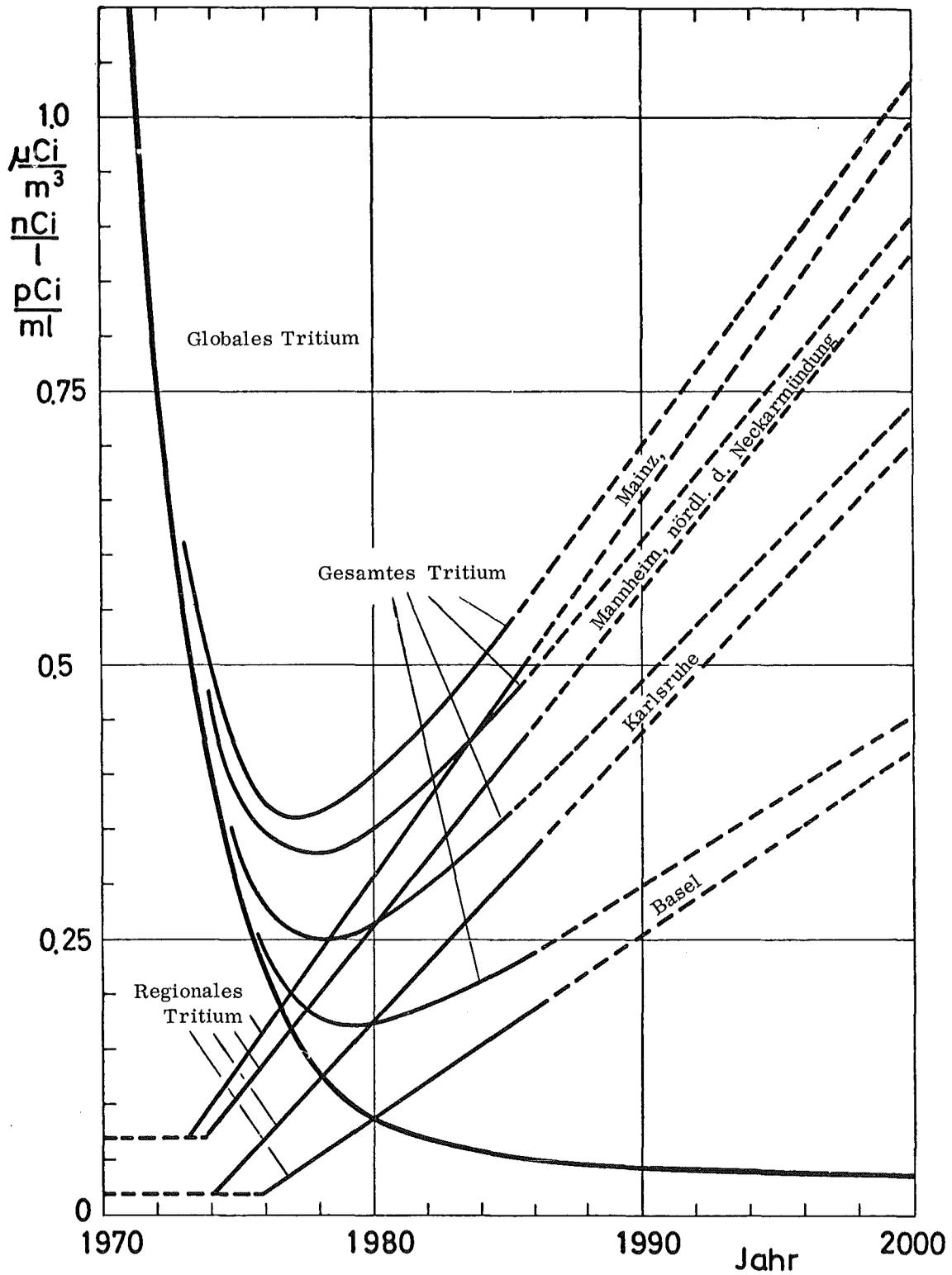


Abb. 34 Die Gesamt-Tritiumkonzentration bis zum Jahr "1985" und bis zum Jahr 2000 (linear extrapoliert) durch globales Tritium und regionales Tritium (Tritium aus kerntechnischen Anlagen im Einzugsgebiet des Oberrheins) bei mittlerer Abflußrate (MQ)

#### 4.4.2 Edelgase

Von den radioaktiven Edelgasen, die von kerntechnischen Anlagen an die Atmosphäre abgegeben werden, gelten Argon-41, Krypton-85 und Xenon-133 als die wichtigsten Isotope. Radioaktive Edelgase wirken über die  $\gamma$ -Strahlung fast homogen auf den ganzen Körper und über die  $\beta$ -Strahlung von außen, innerhalb einer gewissen Eindringtiefe auf die äußeren Körperteile und auf die Lunge. Es gelten folgende Dosisfaktoren /71/

Argon-41:	0.491	$\frac{\text{rem}\cdot\text{m}^3}{\text{Ci}\cdot\text{sec}}$
Krypton-85:	0.073	"
Xenon-133:	0.044	"

Aus den Abb. 35 und 36 sind die in den Jahren 1980 bzw. "um 1985" zu erwartenden Dosen durch Edelgase ersichtlich. Die Angaben sind Ergebnisse von Modellrechnungen, die in Anlehnung an das in Anhang C beschriebene Vorgehen durchgeführt wurden. Die Abbildungen zeigen, daß die Ganzkörper-Dosisrate durch Edelgase in der unmittelbaren Umgebung von Kernkraftwerken 0.20 mrem/a nicht übersteigt; lediglich durch die angenommenen Abgaberaten der Anlagen des KFZ Karlsruhe werden Werte bis zu 20 mrem/a erreicht.

#### 4.4.3 Jod

Von den Jodisotopen, die von kerntechnischen Anlagen abgegeben werden, gilt Jod-131 als das wichtigste Isotop. Es wird zum größten Teil mit der Abluft abgegeben und gelangt teilweise über die Atemwege direkt in den menschlichen Körper. Der größere Teil des vornehmlich in der Schilddrüse angesammelten Jods erreicht den menschlichen Körper allerdings über den sogenannten "Weide-Kuh-Milch-Pfad". Das in der Abluft enthaltene Jod lagert sich teilweise auf der Grasnarbe ab, wird von den Milchtieren aufgenommen und gelangt schließlich in die Milch. Das Konzentrationsverhältnis von Jod in Milch zu Jod in Luft ist etwa  $10^6$ .

Sowohl für die Inhalation als auch für die Milchingestion wurden altersabhängige Dosisfaktoren aufgestellt /72/. Für Kleinkinder, die am meisten gefährdete Altersgruppe, gilt ein Summen-Dosisfaktor (Inhalation + Ingestion)

$$\text{Jod-131} : 90\,000 \frac{\text{rem}\cdot\text{m}^3}{\text{Ci}\cdot\text{sec}}$$

Die Abb. 37 und 38 zeigen die in den Jahren 1980 und "um 1985" zu erwartenden örtlichen Schilddrüsendosen für Kleinkinder im Fall von "Eigenversorgung". "Eigenversorgung" bedeutet die Annahme, daß an dem betrachteten Ort Kleinkinder mit Milch von Kühen ernährt werden, die ausschließlich an dieser Stelle grasen. Es handelt sich also hierbei um eine obere Abschätzung. Bei Zentralversorgung über Molkereien und Milchzentralen findet eine Mittelung über einen gewissen Einzugsbereich statt. Die entsprechenden Mittelwerte liegen dann um einen Faktor 10 bis 100 unter den Maximal-Werten für "Eigenversorgung" /73/. Die Werte wurden wie im Falle der Edelgase durch Modellrechnungen ermittelt. In unmittelbarer Nähe von Kernkraftwerken ergeben sich Werte, die bis auf 10 mrem/a ansteigen können.

#### 4.4.4 Belastungen aus Wiederaufarbeitungsprozessen

Die bisherigen Betrachtungen betrafen noch nicht den Prozeßschritt der Brennstoff-Wiederaufarbeitung. Die WAK Karlsruhe ist als Versuchsanlage für eine kommerzielle Wiederaufarbeitung nicht repräsentativ.

Konkrete Pläne für eine große kommerzielle Wiederaufarbeitungsanlage existieren z.Z. in Deutschland nicht, und es ist auch nicht wahrscheinlich, daß eine solche Anlage im Oberrhein gebaut werden wird. Trotzdem erscheint es notwendig, die Wiederaufarbeitung kurz zur Sprache zu bringen.

Für eine große kommerzielle Wiederaufarbeitungsanlage ist eine Leistung von ca. 1500 t/a  $UO_2$ -Brennstoff erforderlich, um den Brennstoff aus Kernkraftwerken mit insgesamt etwa 40000 MWe Leistung aufzuarbeiten; d.h. sie wäre mit den in Tab. 29 angegebenen Kernkraftwerken im Einzugsgebiet des Oberrheins (etwa 28000 MWe) etwa zu 3/4 ausgelastet.

Mit den in Tab. 12 angegebenen Werten für den Wiederaufarbeitungsschritt würden die in Tab. 29 genannten Kernkraftwerke zu Emissionen von 10 000 000 Ci/a Krypton-85 und 500 000 Ci/a Tritium (insgesamt) führen. Diese Emissionen fallen an einem Ort an - die Zahlen sind in Relation zu den Emissionen aus Kernkraftwerken zu sehen. Sie zeigen, daß die Frage der radiologischen Belastung bei der Wiederaufarbeitung eine andere Dimension erhält als bei Kernkraftwerken. Die bereits angesprochenen Möglichkeiten der Rückhaltung von Tritium sind Ansatzpunkte zu einer Lösung.







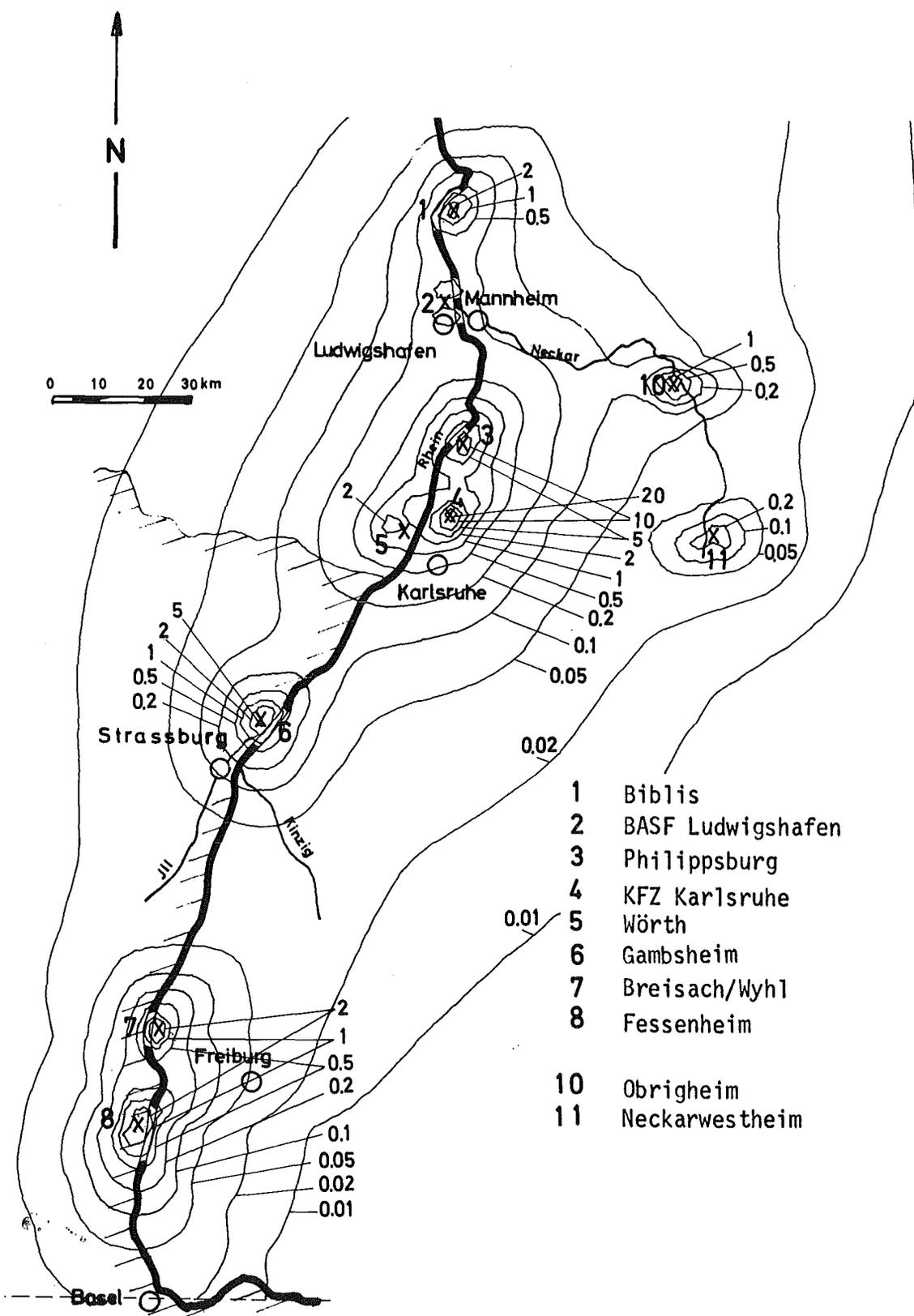


Abb. 38 Schilddrüsen-Dosisraten (mrem/a) durch Jod bei Kleinkindern im Jahr "1985"

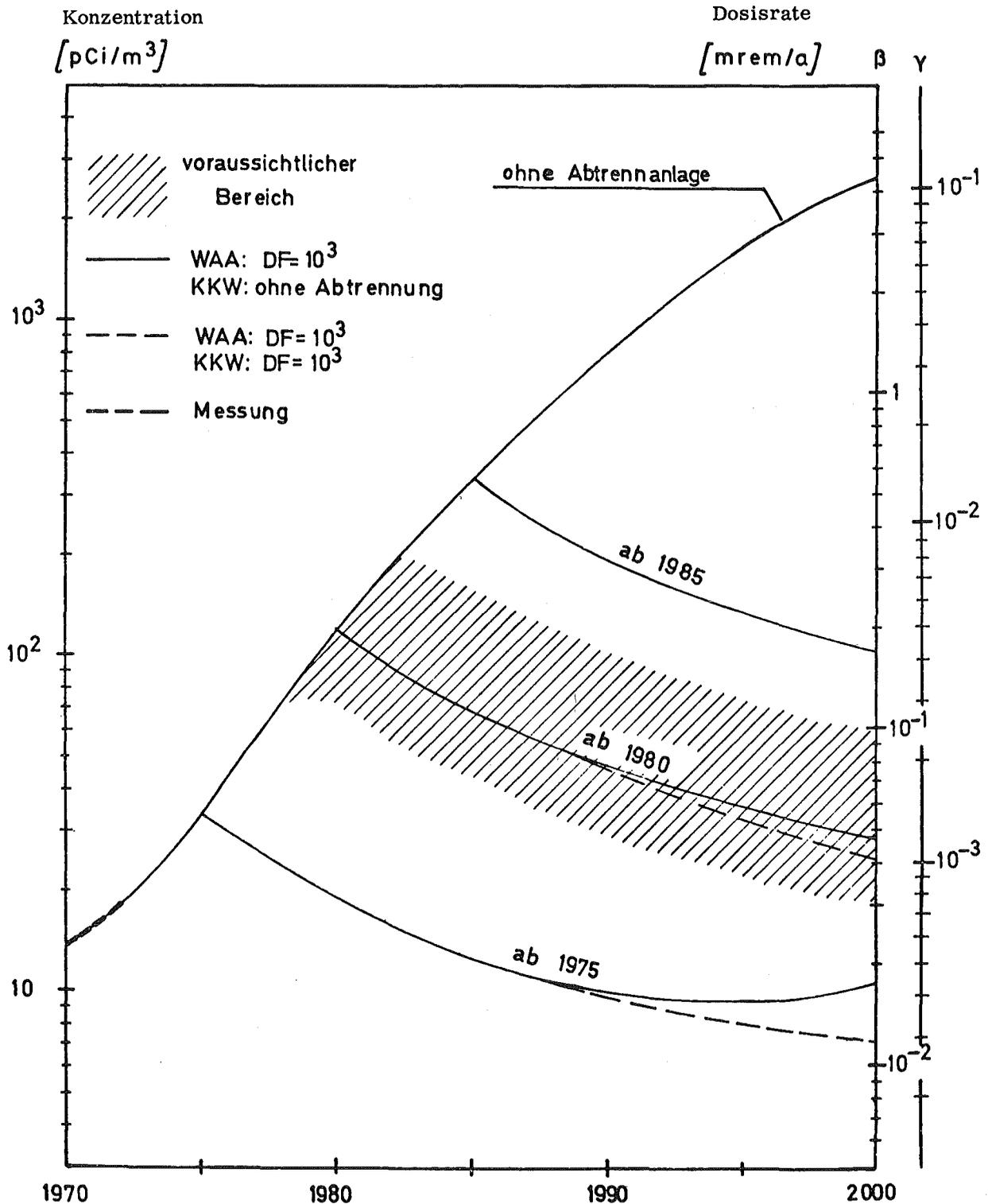


Abb. 39 Krypton-85-Konzentrationen und -Dosisraten in der nördlichen Industriezone (30° - 75°) durch Freisetzung aus kerntechnischen Anlagen bis zum Jahr 2000 unter Berücksichtigung des Einsatzes von Abtrennanlagen.

KKW = Kernkraftwerke  
WAA = Wiederaufarbeitungsanlagen  
DF = Dekontaminationsfaktor

Das gleiche gilt für Krypton. Das langlebige Krypton-85 wird vor allem durch Freisetzung in Wiederaufarbeitungsanlagen verteilt und akkumuliert. Abb. 39 zeigt eine Abschätzung der Entwicklung der globalen Kr-85-Konzentrationen und -Dosisraten durch den Einsatz der Kernenergie insgesamt, und zwar einmal ohne und zum anderen mit einem zu erwartenden Einsatz von Edelgasabtrennanlagen. Unter der Annahme, daß ab 1980 solche Abtrennanlagen eingesetzt werden, würde die globale Krypton-85-Dosisrate bis auf 0.2 mrem/a ansteigen und dann entsprechend wieder abfallen.

#### 4.5 Die atmosphärische Schadstoffbelastung (SO<sub>2</sub>) am Beispiel der Modellregion "Nördlicher Oberrhein"

##### 4.5.1 Das Gebiet - die Energiesituation - die Emissionen

Eine regionale Untersuchung der atmosphärischen Schadstoffbelastung im Oberrheingebiet ist vor allem für die Verdichtungsräume Mannheim (-Ludwigs-hafen) und Karlsruhe interessant, die zu den Gebieten mit den höchsten Energieumsetzungen in Baden-Württemberg zählen. Die hier behandelte Region "Nördlicher Oberrhein" soll diese Schwerpunkte mit dem dazugehörigen Um-land umfassen. Erfassungseinheiten zur Bestimmung des regionalen Energieverbrauchs sind dabei folgende Stadt- bzw. Landkreise (in der Verwaltungseinteilung vor dem 1.1.1973):

Stadtkreis Karlsruhe  
Stadtkreis Heidelberg  
Stadtkreis Mannheim  
Landkreis Bruchsal  
Landkreis Heidelberg  
Landkreis Karlsruhe  
Landkreis Mannheim  
Landkreis Sinsheim  
Stadtkreis Baden-Baden  
Landkreis Rastatt

Die so zusammengefaßte Region "Nördlicher Oberrhein" entspricht bis auf geringe, in diesem Zusammenhang nicht bedeutende Abweichungen den Gebieten

Regionalverband Mittlerer Oberrhein  
+ Rhein-Neckar-Kreis mit den Stadtkreisen  
Mannheim und Heidelberg

in der neuen Verwaltungseinteilung nach dem 1.1.1973.

Wie bereits in Abschnitt 3.3 erwähnt, wird diese Region "Nördlicher Oberrhein" durch Emissionen aus angrenzenden Gebieten (Rheinland/Pfalz, Frankreich) beeinflusst. In die Modellregion "Nördlicher Oberrhein" in einem erweiterten

Sinne sollen deshalb die angrenzenden Stadt- und Landkreise von Rheinland-Pfalz sowie das hier angrenzende Gebiet Frankreichs mit einbezogen werden.

Die Angaben in Abschnitt 4.5.1 beziehen sich auf den engeren Bereich, diejenigen in den Abschnitten 4.5.2 und 4.5.3 auf den erweiterten Bereich "Nördlicher Oberrhein".

In Abb. 2 ist die Ausdehnung dieser Region angegeben; Tab. 30 enthält einige Angaben über die wirtschaftliche und soziale Struktur. Alle Angaben in diesem Abschnitt beziehen sich auf das Jahr 1971. Bemerkenswert ist, daß die Region "Nördlicher Oberrhein" 10 % der Fläche Baden-Württembergs ausmacht, dagegen nahezu übereinstimmend mit 20 % zur Wirtschafts- und Sozialstruktur beiträgt.

Tab. 30 Einige Angaben über die Struktur der Modellregion "Nördlicher Oberrhein"

(Die Zahlen in Klammern geben jeweils den prozentualen Anteil an Baden-Württemberg an)

	Stadt Karlsruhe	Stadt Mannheim	Obriges Gebiet	Gesamt Nördl. Oberrhein	Zum Vergleich: Gesamt Baden- Württ.
Fläche (km <sup>2</sup> ) (%)	133,4 (0.4)	145,0 (0.4)	3 104,3 (8.7)	3 382,7 (9.5)	35 750 <sup>*</sup> (100)
Einwohner (%)	261 748 (2.9)	330 635 (3.6)	1 132 900 (12.5)	1 725 283 (19.0)	9 055 114 (100)
Wohnungen (%)	100 979 (3.4)	121 930 (4.1)	389 770 (13.0)	612 679 (20.5)	2 985 352 (100)
Fahrzeuge					
PKW (%)	74 380 (3.2)	88 137 (3.8)	289 281 (12.5)	451 798 (19.5)	2 320 457 (100)
LKW (%)	5 350 (3.6)	7 503 (5.1)	16 625 (11.3)	29 478 (20.0)	147 309 (100)
Beschäftigte in der Industrie (%)	40 394 (2.5)	84 075 (5.3)	163 253 (10.3)	287 722 (18.1)	1 587 657 (100)
Umsatz in der Industrie *) (Mio DM) (%)	3 992 (4.2)	6 698 (7.1)	8 567 (9.0)	19 257 (20.3)	94 947 (100)

\*) als Ersatzgröße für die Industrieproduktion

Die Ermittlung der SO<sub>2</sub>-Belastung setzt eine genaue Kenntnis der gesamten Energieumsetzungen voraus. Hierbei werden - wie bereits in den Abschnitten 1 und 3 - Energieumwandlungsbereich und Endenergieverbrauch getrennt behandelt.

Im Umwandlungsbereich wurden die Energieumsetzungen und die daraus resultierenden SO<sub>2</sub>-Emissionen für jede Anlage einzeln erfaßt. Neben den in Abschnitt 1.1 bereits genannten Wärmekraftwerken und Mineralöl-Raffinerien sind hier zusätzlich zwei kleinere Heizkraftwerke sowie acht Fernheizwerke in den Stadtkreisen Karlsruhe, Mannheim und Heidelberg zu nennen. Tab. 31 zeigt zusammenfassende Daten. Die entsprechenden Einzelangaben wurden von den jeweiligen Betreibern zur Verfügung gestellt; einige ergänzende Angaben wurden aus /7, 74/ herangezogen.

Tab. 31 Energieumsatz und SO<sub>2</sub>-Emissionen 1971 des Energieumwandlungsbereichs im "Nördlichen Oberrhein"

	Brennstoffeinsatz			Energieerzeugung		SO <sub>2</sub> -Emission (t)
	Kohle (10 <sup>3</sup> t SKE)	Heizöl (10 <sup>3</sup> t SKE)	Gas, Sonstiges (10 <sup>3</sup> t SKE)	Strom (GWh)	Fernwärme (Tcal)	
<u>Wärmekraftwerke</u>						
Stadt Karlsruhe	513	826	0	3 973	440	31 600
Stadt Mannheim	1 168	560	213	5 296	1 016	29 700
Übriges Gebiet	48	14	150	332	341	1 200
Gesamt	1 729	1 400	363	9 601	1 797	62 500
Mineralöl-Raffinerien	-	420	572	-	-	21 000

Im Bereich des Endenergieverbrauchs existieren statistische Angaben über den Energieverbrauch auf regionaler Ebene nur für den Sektor Industrie /75/. In den Sektoren Haushalte und Kleinverbrauch, sowie Verkehr gibt es nur Gesamtverbrauchsangaben für Baden-Württemberg. Eine Abschätzung für Teilgebiete erhält man, indem man diese Angaben mit Hilfe von Schlüsselzahlen, die für den jeweiligen Verbrauch charakteristisch sind, regional aufteilt.

Nach diesem Vorgehen wurde im Sektor Haushalte und Kleinverbrauch der Verbrauch an festen Brennstoffen und leichtem Heizöl über den Wohnungsbestand, der Stromverbrauch über die Einwohnerzahl eines jeden Kreises ermittelt. Entsprechend wurde im Sektor Verkehr der Verbrauch an Vergaser- bzw. Dieselmotorkraftstoff über den PKW- bzw. LKW-Bestand kreisweise ermittelt. Der Gasverbrauch sowie der Verbrauch an Fernwärme wurden aus /74, 76/ entnommen. Tab. 32 zeigt den so ermittelten Endenergieverbrauch im "Nördlichen Oberrhein", Tab. 33 die entsprechenden SO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund der in Abschnitt 2.1.3 angegebenen spezifischen Emissionsfaktoren.

Tab. 32 Endenergieverbrauch 1971 im "Nördlichen Oberrhein"  
(in 1000 t SKE)

	Stadt Karlsruhe	Stadt Heidelberg	Stadt Mannheim	Land Bruchsal	Land Heidelberg	Land Karlsruhe	Land Mannheim	Land Sinsheim	Stadt- Baden-Baden	Land Rastatt	"Nördlicher Oberrhein"
<u>Industrie</u> a)											
Feste Brennstoffe	10	1	99	3	9	18	36	3	1	17	197
Heizöl HEL	28	15	54	22	35	28	67	15	3	23	290
Heizöl HS	168	4	424	69	181	87	126	27	0	200	1286
Strom	50	8	142	27	34	45	42	9	1	60	418
Gas	4	2	42	18	1	8	15	0	2	4	96
Gesamt	260	30	761	139	260	186	286	54	7	304	2287
<u>Haushalt + Kleinverbrauch</u>											
Feste Brennstoffe	43	17	51	22	30	34	34	14	9	23	277
Heizöl HEL	247	96	291	126	173	198	195	83	49	132	1590
Strom	42	18	50	21	28	32	30	14	6	21	262
Gas	50	27	60	1	2	5	9	0	10	6	170
Fernwärme b)	54	38	129	0	0	0	0	0	0	0	221
Gesamt	436	196	581	170	233	269	268	111	74	182	2520
<u>Verkehr</u> c)											
Vergaserkraftstoff	127	55	150	56	82	92	91	35	19	63	770
Dieselmotorkraftstoff	84	33	118	33	39	47	44	22	12	32	464
Gesamt	211	88	268	89	121	139	135	57	31	95	1234
Endenergieverbrauch Gesamt	907	314	1610	398	614	594	689	222	112	581	6041

a) einschl. industrielle Stromerzeugung

b) einschl. industriellem Fernwärmeverbrauch, der nicht gesondert zu ermitteln war

c) ohne Luft-, Schiffs- und elektrischen Bahnverkehr

Tab. 33 SO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Endenergieverbrauch  
1971 im "Nördlichen Oberrhein (in t)

	Industrie	Haushalt + Kleinverbrauch	Verkehr	Gesamt
Stadt Karlsruhe	3 740	2 220	370	6 330
Stadt Heidelberg	200	870	150	1 220
Stadt Mannheim	10 750	2 620	520	13 890
Land Bruchsal	1 580	1 130	150	2 860
Land Heidelberg	4 020	1 560	180	5 760
Land Karlsruhe	2 270	1 780	220	4 270
Land Mannheim	3 650	1 760	200	5 610
Land Sinsheim	700	740	100	1 540
Stadt Baden-Baden	40	450	50	540
Land Rastatt	4 480	1 190	150	5 820
"Nördlicher Oberrhein"	31 430	14 320	2 090	47 840

In erster Näherung und insbesondere für die Modellregion "Nördlicher Oberrhein" als ganzes sind die Angaben ausreichend. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß Einzelangaben mit Unsicherheiten behaftet sein können. So ist keineswegs gesichert, daß das Verhältnis von Kohle- und Ölverbrauch im ganzen Land gleich ist. Auch können unterschiedliche Lebensgewohnheiten und damit unterschiedliche Heizgewohnheiten zwischen städtischen und ländlichen Bereichen zu Abweichungen im Brennstoffverbrauch führen. In noch stärkerem Maße sind Abweichungen im Energieverbrauch des Kraftfahrzeugverkehrs möglich.

#### 4.5.2 Eine Modellsimulation der SO<sub>2</sub>-Immissionsbelastung

##### Kurzbeschreibung des Vorgehens

Die ökologische Leistungsfähigkeit einer Region, speziell auf dem Luftsektor, ergibt sich aus den meteorologischen und orographischen (die Reliefstruktur der Landschaft beschreibenden) Verhältnissen. Diese Verhältnisse sind die bestimmenden Größen für die auf Grund vorgegebener Emissionen auftretenden Immissionen. Für künftige Raumplanung, vor allem die Planung größerer Investitionsvorhaben, ist es angebracht, mit Modellen zu arbeiten,

die unter Berücksichtigung der meteorologischen und orographischen Verhältnisse und der Emissionsstruktur Aussagen über die Immissionen erlauben. Die Qualität dieser Modelle muß durch Immissionsmessungen geprüft werden. Modelle, die Meßergebnisse befriedigend reproduzieren, stellen ein wirkungsvolles Planungsinstrument dar. Ihre Vorteile sind:

- 1.) Immissionskonzentrationen lassen sich an beliebigen Punkten einer Region ermitteln. Ein Meßnetz, das vergleichbare Aussagen liefern könnte, würde enorme Investitionskosten verursachen.
- 2.) Die Möglichkeit der Zurechnung des Anteils einer Einzelemission zu der Immission an einem bestimmten Ort.
- 3.) Die Möglichkeit von Immissionsprognosen. Diese Möglichkeit stellt eine bedeutende Entscheidungshilfe, etwa für die Beurteilung von Investitionsvorhaben bezüglich der Auswirkungen auf die Ökologie einer Region dar.

Auf Grund dieser Vorteile ist es von den Kosten her zu rechtfertigen, solche Modelle zu entwickeln, auch wenn man sich entschlossen hat, Meßnetze zu installieren; die Kosten für Entwicklung und Benutzung der Modelle sind vergleichbar mit Installation und Betrieb einer einzigen Meßstelle.

Mit dem im Anhang C beschriebenen Ansatz werden mit Hilfe der in Abschnitt 4.5.1 zusammengestellten SO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Emissionsstruktur der Region "Nördlicher Oberrhein" die Immissionen ermittelt.

Es wird unterschieden zwischen punktförmigen großen Emittenten (Punktquellen), die vor allem aus dem Energieumwandlungsbereich und dem Sektor Industrie stammen, und den Flächenquellen des Sektors Haushalte und Kleinverbrauch (Hausbrand). Die Untersuchungen in diesem Abschnitt beziehen sich vor allem auf die Auswirkungen der punktförmigen Großemittenten (Quellstärke > 50 kg/h SO<sub>2</sub>); in einem speziellen Fall (Stadt Karlsruhe) wurde der Sektor Haushalte und Kleinverbrauch mit berücksichtigt.

Als Eingangsgrößen für die Rechnungen sind für jede einzelne Punktquelle die Kenntnis der geographischen Lage und der  $\text{SO}_2$ -Quellstärke sowie der Wärmeemission aus Schornstein und die Schornsteinhöhe notwendig. Eine Datenzusammenstellung in dieser ausführlichen Form, ein "Emissionskataster" für  $\text{SO}_2$  existiert für die Region "Nördlicher Oberrhein" nicht. Erste Ansätze dazu gibt es für Teilgebiete im Bereich der Gewerbeaufsichtsämter; die entsprechenden Angaben wurden für die Rechnungen zur Verfügung gestellt. Allerdings beruhen diese Angaben auf Erhebungen, die jüngeren Datums als 1971 sind.

Für Anlagen aus dem Energieumwandlungsbereich wurden entsprechende Einzelangaben der Betreiber herangezogen. In einigen Gebieten Baden-Württembergs sowie insbesondere in den Randgebieten von Rheinland-Pfalz standen keine oder nur sehr unvollständige Angaben über die Emissionsstruktur zur Verfügung. In diesen Fällen wurde auf die pauschal ermittelten  $\text{SO}_2$ -Emissionen in Abschnitt 4.5.1 zurückgegriffen und für die übrigen Eingangsgrößen vernünftige Mittelwerte angenommen; für entsprechende Abschätzungen in Rheinland-Pfalz wurden Angaben über den industriellen Energieverbrauch nach /77/ herangezogen. Insgesamt tragen die Quellen aus den an Baden-Württemberg angrenzenden Gebieten der Region, die für die Simulationsrechnungen verwendet wurden, mit 55 000 t  $\text{SO}_2$  im Jahr zur  $\text{SO}_2$ -Emission bei.

Eine andersgeartete, flächenhafte Quellstruktur ist im Sektor Haushalte und Kleinverbrauch gegeben. Am Beispiel der Stadt Karlsruhe wurden die Auswirkungen dieses Sektors untersucht. Hierbei wurde die entsprechende in Abschnitt 4.5.1 ermittelte  $\text{SO}_2$ -Menge mit einer Dichte von 4 Einzelquellen pro  $\text{km}^2$  der bewohnten Fläche von Karlsruhe zugeordnet. Dabei wurde der Bereich der Innenstadt stärker bewertet als die bewohnten Randzonen. Die unmittelbar nördlich gelegenen Orte wurden ebenfalls berücksichtigt. Vergleichsrechnungen ergaben, daß 4 Quellpunkte pro  $\text{km}^2$  eine ausreichende Annäherung an die tatsächliche Vielquellverteilung ergibt.

Mit Ausnahme der Fernheizwerke wurden bei allen Großemittenten für die  $\text{SO}_2$ -Emissionen Jahresmittelwerte verwendet; für die Fernheizwerke und auch für die Emissionen aus dem Hausbrand wurde in Anlehnung an entsprechende Ermittlungen nach /78, 79/ für das Winterhalbjahr (November - März) 5/6 und für das Sommerhalbjahr (April - Oktober) 1/6 des Jahresmittelwerts angenommen.

Eine detaillierte und wirklichkeitsgetreue Erfassung der  $\text{SO}_2$ -Emissionsstruktur im "Nördlichen Oberrhein" ist nur durch die Erstellung eines "Emissionskatasters" möglich. Die hier für die Rechnungen verwendeten Emissionsstrukturdaten sind ein erster Ansatz in dieser Richtung. Sie beschreiben in ihrer Gesamtheit die Verhältnisse im "Nördlichen Oberrhein" richtig; lokale Abweichungen von einigen 10 % sind jedoch nicht auszuschließen.

Eine weitere Kategorie von Eingangsgrößen für die Rechnungen sind meteorologische Daten. Hierzu wurde eine Dreijahres-Wetterstatistik (1.12.1967 - 30.11.1970) aus Meßwerten am 200 m Mast des Kernforschungszentrums Karlsruhe verwendet (NESTER /47/).

Sowohl die Häufigkeitsverteilungen der errechneten Immissionswerte wie auch die sich daraus ergebenden Jahresmittelwerte oder typischen Sommer- und Wintermittelwerte, lassen sich mit Messungen an entsprechenden Aufpunkten vergleichen und gestatten eine Beurteilung über die Güte der Rechnung. Die Häufigkeitsverteilungen lassen sich nicht nur bezüglich Mittelwertbildung auswerten, sondern lassen auch die Ermittlung von Überschreitungshäufigkeiten von Grenzwerten oder die Häufigkeit von extremen Spitzenwerten zu. Die Immissionen werden für ein enges Aufpunktraster im Raum Karlsruhe (1 x 1 km) und für ein weiteres, das die gesamte Region von Offenburg bis Mannheim erfaßt (5 x 5 km), berechnet.

#### Ermittlung der Grundbelastung an $\text{SO}_2$

Die folgenden rechnerischen Simulationen der Immissionsbelastungen im "Nördlichen Oberrhein" sollen einige Zusammenhänge aufzeigen und Planungshinweise geben.

#### Beeinflussung benachbarter Verdichtungsräume:

Abb. 40 und 41 dienen der Klärung der Frage, wie stark der gegenseitige Einfluß benachbarter Verdichtungsräume auf die Immissionsbelastung ist. Da eine weiträumige Belastung im Wesentlichen nur von den Großemittenten herrührt, zeigt Abb. 40 nur den Einfluß der Großemittenten des Raumes Karlsruhe (21 Quellen) auf das Gebiet des Oberrheingrabens von Mannheim bis Offenburg. Die gezeichneten Linien sind Linien gleicher Immission für  $\text{SO}_2$  (Isolinien) als Jahresmittelwerte.

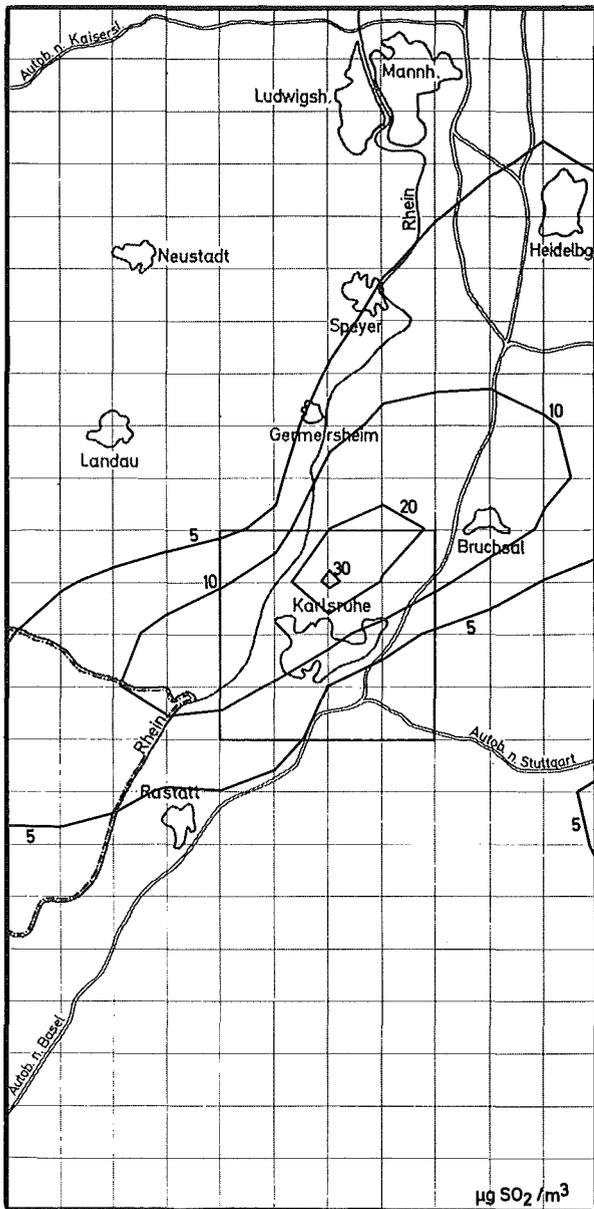


Abb. 40

Errechneter Beitrag zu den Jahresmittelwerten der SO<sub>2</sub>-Immission im Nördlichen Oberrheingebiet

Emissionsquellen: Großemittenten im Karlsruher Raum

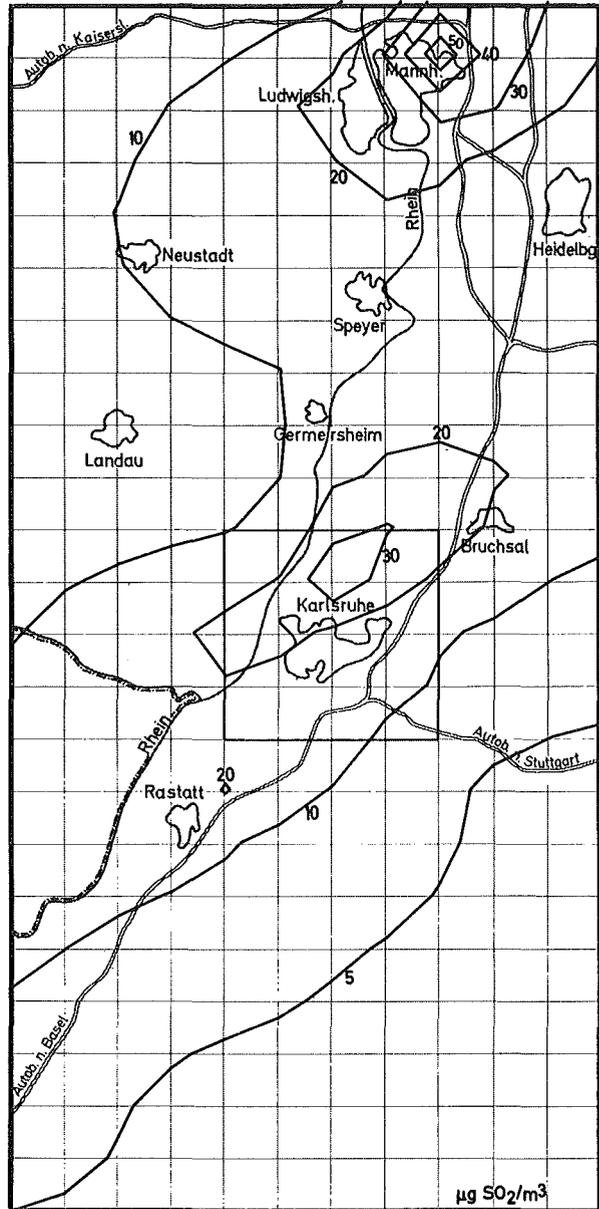


Abb. 41

Errechneter Beitrag zu den Jahresmittelwerten der SO<sub>2</sub>-Immission im Nördlichen Oberrheingebiet

Emissionsquellen: Großemittenten im Nördlichen Oberrheingebiet

Zu erkennen ist die von der Hauptwindrichtung Süd/West geprägte Immissionsstruktur mit dem Maximum nördlich Karlsruhe mit  $30 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ .

Abb. 41 zeigt die Immissionen bei Berücksichtigung aller Großemittenten im "Nördlichen Oberrhein" (62 Quellen). Der Bereich mit Konzentrationen größer als  $20 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  im Karlsruher Raum hat sich durch den Einfluß entfernterer Quellen vergrößert. Die Immissionsbelastung hat sich rechnerisch im Jahresmittel um ca.  $6 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  erhöht. Die Bereiche der Verdichtungsräume mit Konzentrationen aus Großemittenten größer als  $20 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  sind deutlich getrennt.

#### Unterschied Sommer-, Winterhalbjahr:

Abb. 42 und 43 stellen typische Sommerhalbjahr/Winterhalbjahr-Unterschiede der Immissionen für Großemittenten im "Nördlichen Oberrhein" dar. Abb. 42 gibt die Mittelwerte über das Sommerhalbjahr an, Abb. 44 über das Winterhalbjahr. Der Vergleich zeigt, daß im Sommerhalbjahr höhere Spitzenwerte in den Haupteinflußgebieten auftreten, im Winterhalbjahr aber die Bereiche mit Konzentrationen über  $20 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  sich vergrößern. Ursachen hierfür sind, daß im Winterhalbjahr die Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen stabiler Wetterlagen größer und die mittlere Windgeschwindigkeit höher ist.

#### Einfluß von Haushalte und Kleinverbrauch (Hausbrand):

Eine weitere  $\text{SO}_2$ -Quelle ist der Hausbrand. Abb. 44 und 45 zeigen deren Immissionsbeitrag im Raum Karlsruhe im Sommer bzw. Winter. Es sind starke Sommer/Winter-Unterschiede zu verzeichnen. Im Winterhalbjahr treten in der Karlsruher Innenstadt rechnerisch Halbjahresmittelwerte von mehr als  $70 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  auf.

#### Gesamtbelastung und Häufigkeitsverteilung:

Abb. 46 zeigt Immissionshäufigkeitsverteilungen für die Orte einer innerstädtischen (Karlsruhe Kaiserallee) und einer ländlichen Meßstelle (Eggenstein). Es sind Häufigkeitshistogramme (untere Kurven) aufgetragen, d.h. über je  $20 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ -Bereiche summierte Häufigkeitswerte. Aus diesen Werten lassen sich Summenhäufigkeiten (obere Kurven) bilden, die die Wahrscheinlichkeit dafür angeben, daß ein bestimmter Immissionswert nicht über-

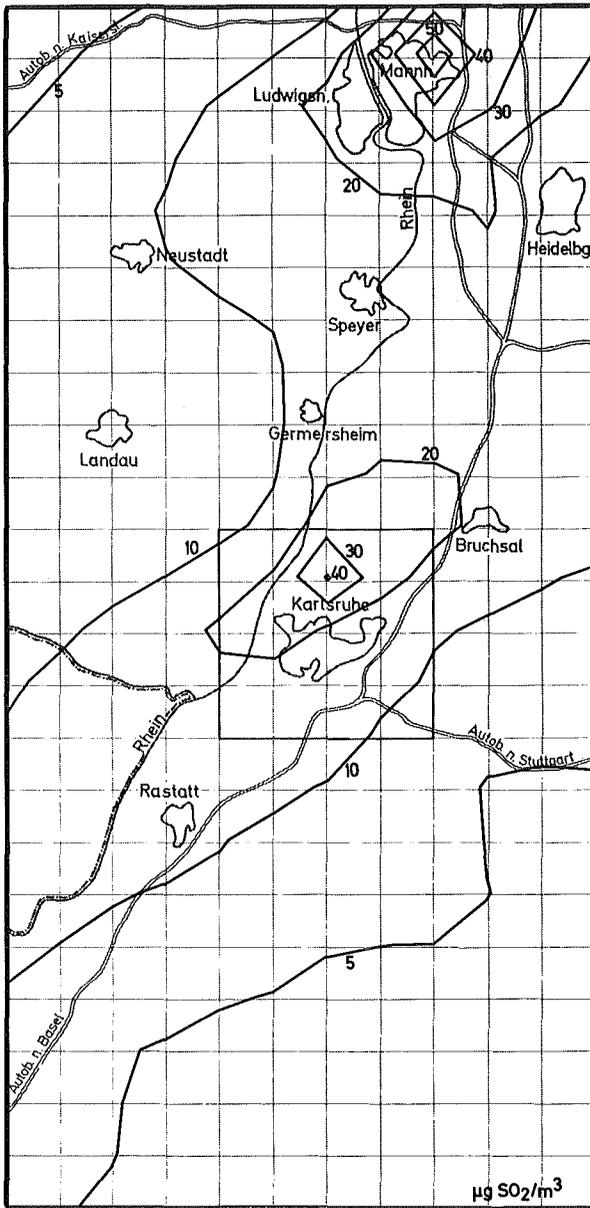


Abb. 42

Errechneter Beitrag zu den Sommermittelwerten der SO<sub>2</sub>-Immission im Nördlichen Oberrheingebiet

Emissionsquellen: Großemittenten im Nördlichen Oberrheingebiet

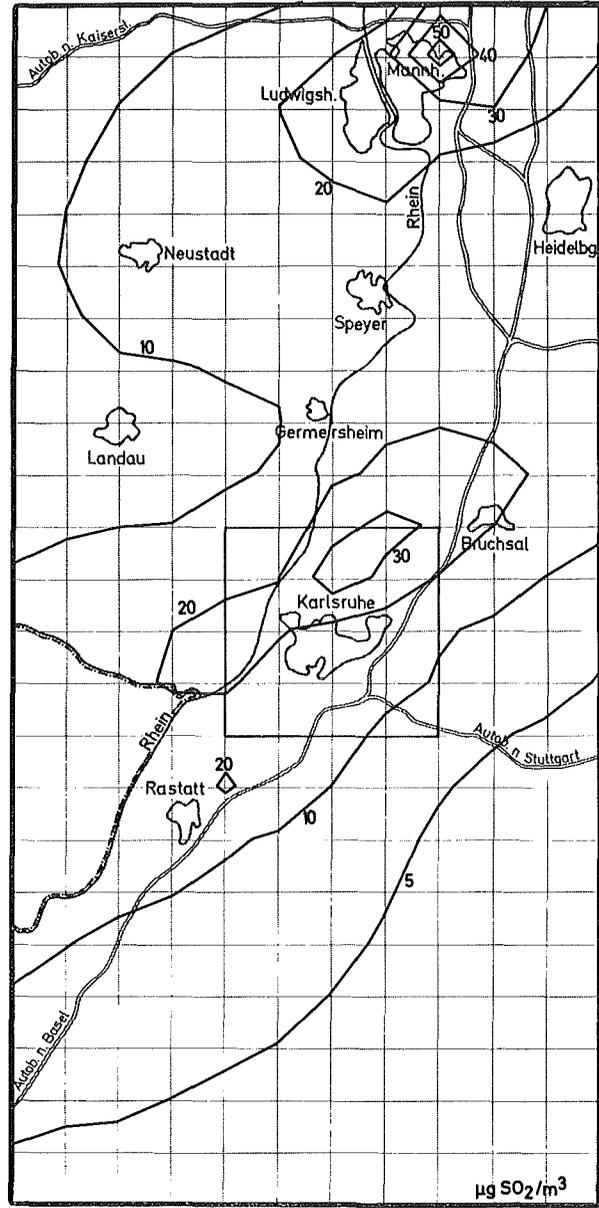


Abb. 43

Errechneter Beitrag zu den Wintermittelwerten der SO<sub>2</sub>-Immission im Nördlichen Oberrheingebiet

Emissionsquellen: Großemittenten im Nördlichen Oberrheingebiet

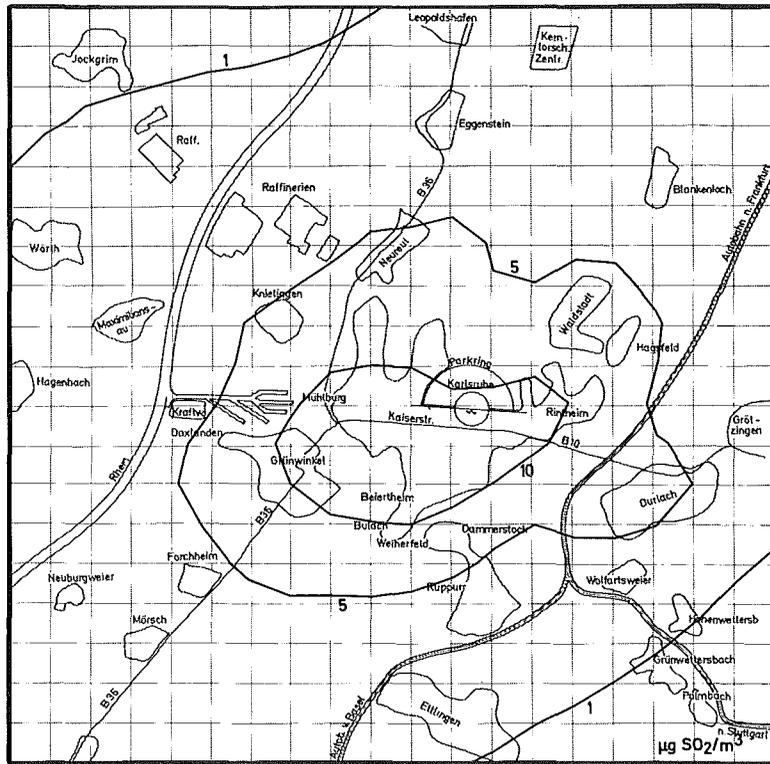


Abb. 44 Errechneter Beitrag zu den Sommermittelwerten der  $\text{SO}_2$ -Immission im Karlsruher Raum  
Emissionsquellen: Haushalte und Kleinverbrauch

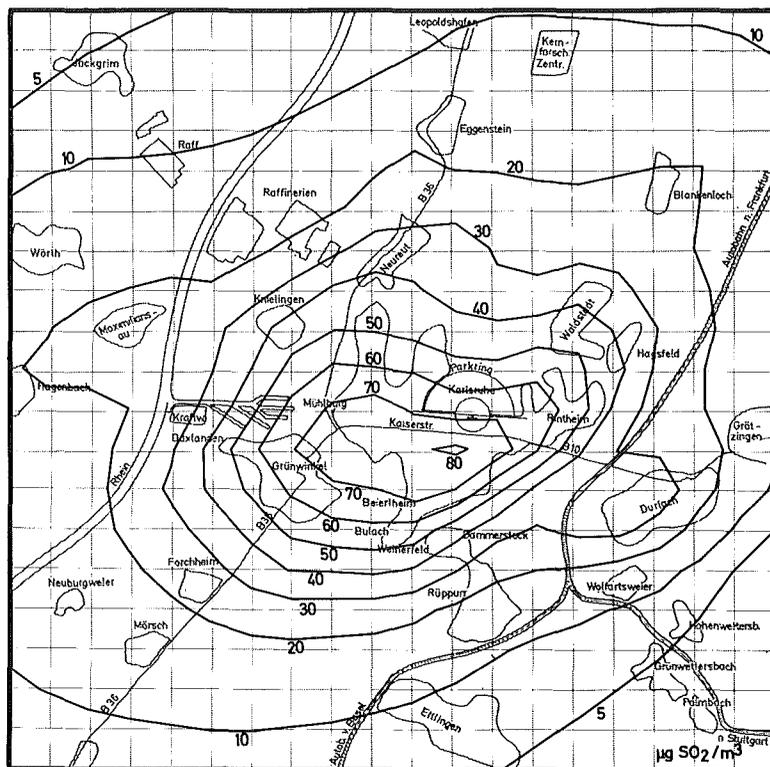


Abb. 45 Errechneter Beitrag zu den Wintermittelwerten der  $\text{SO}_2$ -Immission im Karlsruher Raum  
Emissionsquellen: Haushalte und Kleinverbrauch

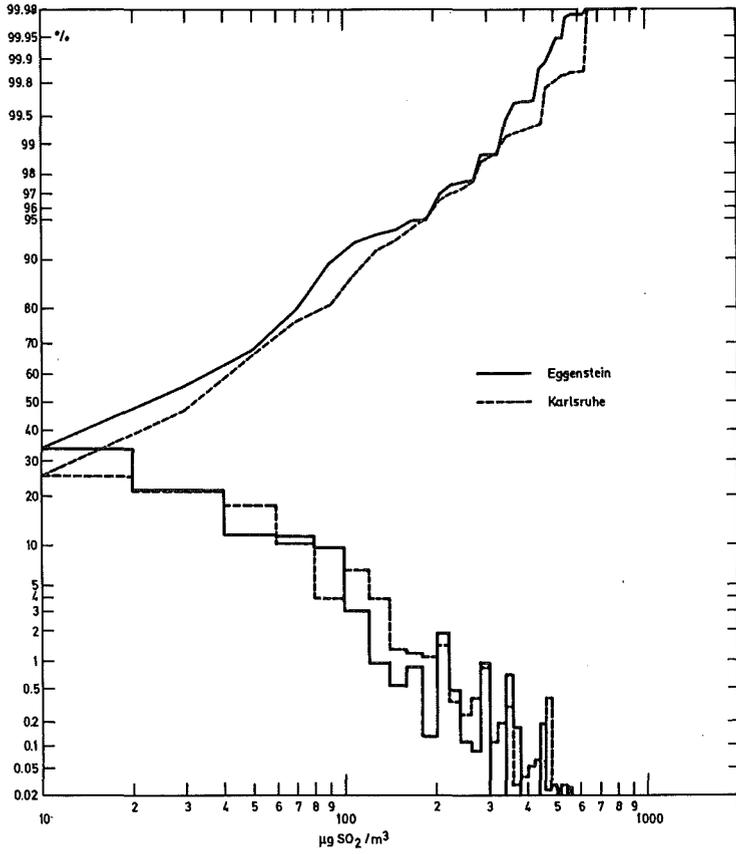


Abb. 46  
Immissionshäufigkeitsverteilungen an den Meßorten Karlsruhe und Eggenstein für ein ganzes Jahr

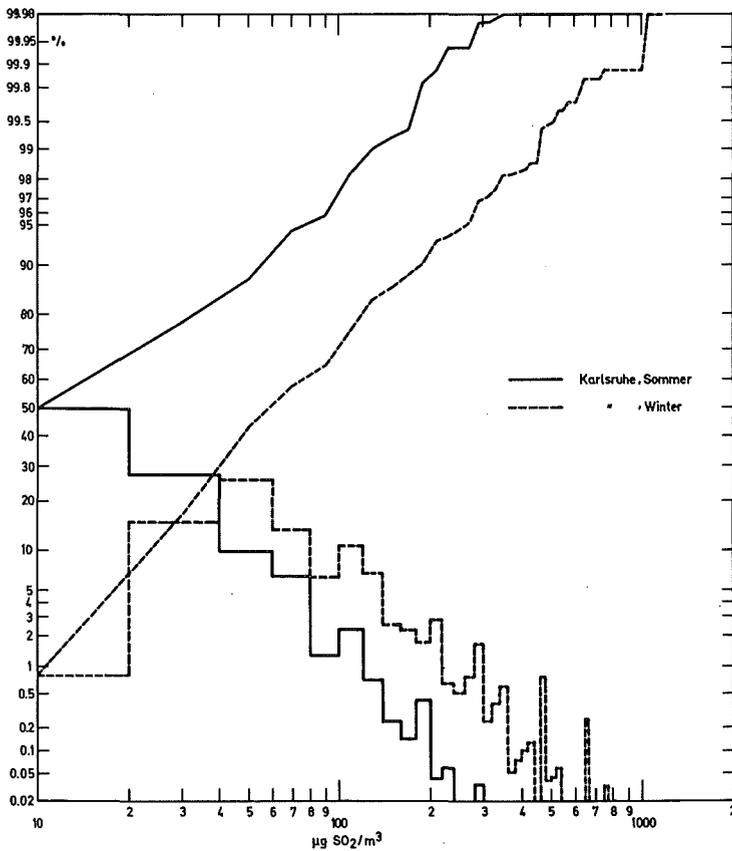


Abb. 47  
Immissionshäufigkeitsverteilungen am Meßort Karlsruhe für Sommer und Winter

schritten wird. Sowohl die Häufigkeitshistogramme als auch die Summenhäufigkeiten zeigen, daß die für Karlsruhe geltenden Verteilungen gegenüber Eggenstein zu höheren Immissionswerten verschoben sind. Aus den Summenhäufigkeiten läßt sich ablesen, daß z.B. zu 50 % der Zeit in Karlsruhe Immissionswerte kleiner  $30 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  und in Eggenstein Werte kleiner  $20 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  vorliegen.

Umgekehrt läßt sich ablesen, daß ein Wert von z.B.  $100 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  in Karlsruhe zu etwa 20 % der Zeit überschritten wird, in Eggenstein zu etwa 10 %.

Abb. 47 zeigt vergleichend Verteilungen für das Sommer- und Winterhalbjahr an der Meßstelle Karlsruhe. Sehr ausgeprägt ist die Verschiebung der Verteilungen von Sommer zu Winter in Richtung höherer Werte. So liegen zu 50 % der Zeit im Sommer Werte kleiner  $20 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  vor, im Winter liegt dieser Wert bei etwa  $55 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ .

#### Aussagekraft des Modells

Die Aussagekraft des Ausbreitungsmodells läßt sich durch Vergleich der berechneten mit gemessenen Werten abschätzen. Tab. 34 zeigt eine Zusammenstellung der berechneten Werte mit Meßwerten der Jahre 1970, 1971, 1972 /80, 81/.

Einerseits ist bei den derzeitigen Möglichkeiten, Ausbreitungen rechnerisch zu erfassen, der in Tab. 34 gezeigte Fehler von bis zu 50 % zu erwarten, andererseits weisen die Meßwerte einer Meßstelle für die verschiedenen Jahre eine große Schwankungsbreite auf. Es ist unklar, ob die deutlich erkennbare Tendenz zu kleineren Immissionen auf das typische Wettergeschehen der einzelnen Jahre oder auf das geänderte Verhalten der Emittenten zurückzuführen ist. Die Genauigkeit der Rechnungen könnte bei Verwendung der Wetter-, Emissions- und gemessenen Immissionsdaten aus ein und demselben Jahr noch verbessert werden. Dies scheitert jedoch zur Zeit an der Datenbeschaffung. Die Vermutung, daß die Aussagekraft verbessert werden kann, zeigt sich auch daran, daß die Rechenergebnisse systematisch unter den Meßwerten liegen. Dies kann folgende Gründe haben:

- 1.) Eine vollständige Erfassung der Emissionsstruktur war nicht gegeben. Allerdings stimmen die Emissionsannahmen gut mit der Gesamt-Emissionsbilanz der Region überein.

Tab. 34 Vergleich von Meßwerten mit Werten der Ausbreitungsrechnung  
(in  $\mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ )

Meßstelle	Einzelaufstellung						Vergleichende Zusammenstellung		
	Sommer			Sommer			Meßwerte Mittelwerte 1970 - 1972	berechnete Werte* Gesamt	Abweichung (%)
1970	1971	1972	Indu- strie	Haus- brand	Gesamt				
Karlsruhe	50	60	40	14	13	27	50	27 (47)	- 46 (-6)
Knielingen	50	90	60	30	6	36	67	36 (56)	- 46 (-16)
Neureut			40**)	30	6	36	40**)	36 (56)	- 10 (+40)
Eggenstein	50	70	52	38	2	40	57	40 (60)	- 30 (+5)
Kern- forschungs- zentrum		86	57	33	2	35	72	35 (55)	- 51 (-24)
	Winter						Winter		
	1970	1971	1972	Indu- strie	Haus- brand	Gesamt	Meßwerte Mittelwerte 1970 - 1972	berechnete Werte* Gesamt	Abweichung (%)
Karlsruhe	110	130	70	13	80	93	103	93 (113)	- 10 (+10)
Knielingen	140	120	90	29	36	65	117	65 (85)	- 44 (-27)
Neureut			85**)	29	41	70	85**)	70 (90)	- 18 (+6)
Eggenstein	110	110	65	37	17	54	95	54 (74)	- 43 (-22)
Kern- forschungs- zentrum		98	80	38	14	52	89	52 (72)	- 42 (-19)
	Jahresmittel						Jahresmittel		
	1970	1971	1972	Indu- strie	Haus- brand	Gesamt	Meßwerte Mittelwerte 1970 - 1972	berechnete Werte* Gesamt	Abweichung (%)
Karlsruhe	80	90	60	13	47	60	77	60 (80)	- 22 (+4)
Knielingen	95	105	75	30	21	51	92	51 (71)	- 45 (-23)
Neureut			55**)	30	23	53	55**)	53 (73)	- 4 (+33)
Eggenstein	80	90	58	37	10	47	76	47 (67)	- 38 (-12)
Kern- forschungs- zentrum		92	68	36	8	44	80	44 (64)	- 45 (-20)

\*) Werte in Klammern berücksichtigen den Immissionsanteil von fernen Quellen

\*\*\*) Meßwerte lagen erst ab Juli 1972 vor

- 2.) Es kann sein, daß bei einer detaillierteren Untersuchung der Dunstschichtobergrenzen niedrigere Werte angenommen werden müssen.
- 3.) Das Modell geht von homogenen Windverhältnissen aus, d.h. Immissionen die durch Winddrehungen und einem möglichen Rücktransport von Schadstoff verursacht sind, werden nicht berücksichtigt. Für das Oberrheintal mit seiner ausgeprägten Vorzugswindrichtung wird der hierdurch verursachte Fehler allerdings geringer sein, als in anderen Regionen der BRD.
- 4.) Der Einfluß entfernterer Quellen wurde nicht berücksichtigt.

Der Versuch, den Beitrag der Quellen außerhalb des nördlichen Oberrheingraben für die  $\text{SO}_2$ -Konzentrationen mit abzuschätzen, bringt eine weit bessere Übereinstimmung der gemessenen mit den gerechneten Immissionen.

Die bestimmenden Größen für diese Abschätzung sind: Mittlere Verweildauer des  $\text{SO}_2$  in der Luft, die durchschnittliche Höhe der Schicht innerhalb derer sich die vertikale Ausbreitung vollziehen kann, der Prozeß der zunehmenden vertikalen Ausbreitung innerhalb dieser Schicht, sowie horizontale Richtungsänderungen während des Transports über Entfernungen von einigen hundert Kilometern.

Die Abschätzungen ergeben eine Grundbelastung des nördlichen Oberrheingraben von etwa  $20 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  durch ferne Quellen, wobei die Unsicherheit mit einem Faktor 2 - 3 zu veranschlagen ist.

Wenn man diese Grundbelastung von  $20 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  zu den errechneten Werten hinzuzählt, ergeben sich für den Raum Karlsruhe Jahresmittelwerte der  $\text{SO}_2$ -Immission, wie sie in Abb. 48 dargestellt sind.

Insgesamt ergibt sich für Karlsruhe und den Ort Eggenstein (ca. 7 km nördlich von Karlsruhe) ein Bild, das in Tab. 35 zusammengestellt ist. Tab. 35 gibt Hinweise auf die Verursacherstruktur der  $\text{SO}_2$ -Konzentrationen in den beiden Orten und erlaubt einen Vergleich der gemessenen und errechneten Jahresmittelwerte der Konzentrationen.

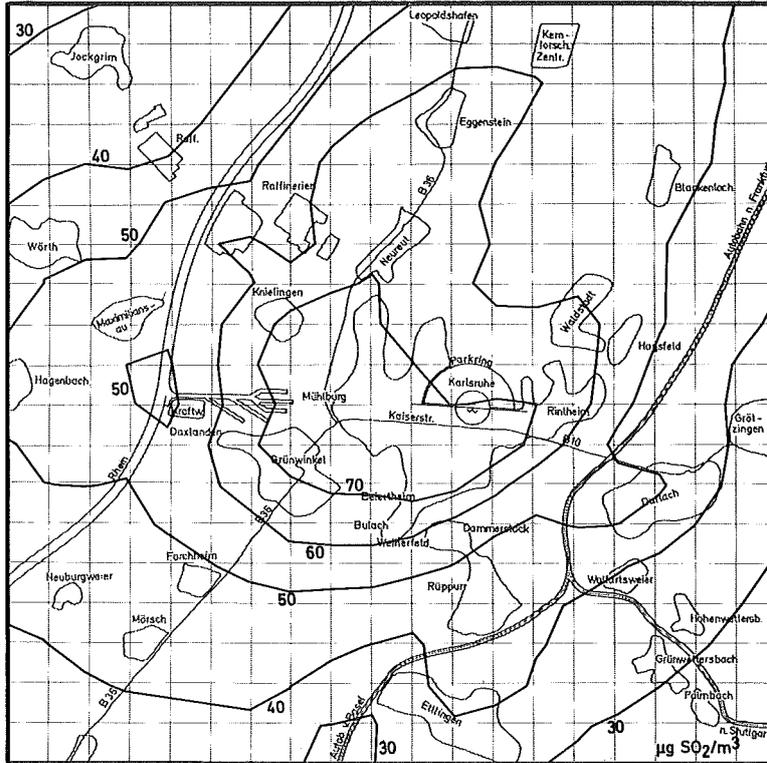


Abb. 48 Errechnete Jahresmittelwerte der  $\text{SO}_2$ -Immission im Karlsruher Raum (einschl. Beitrag von fernen Quellen)

Emissionsquellen: Großemittenten im Nördlichen Oberrheingebiet + Haushalte und Kleinverbrauch im Karlsruher Raum

Tab. 35  $\text{SO}_2$ -Konzentration in Karlsruhe und Eggenstein - aufgeteilt nach Verursachergruppen (in  $\mu/\text{cm}^3$ )

	Karlsruhe	Eggenstein
natürliche Emission	1	1
Großemittenten im Karlsruher Raum	8	32
Haushalte + Kleinverbrauch	46	10
Fremdemittenten zwischen Offenburg und Mannheim	5	5
ferne Emittenten	20	20
Summe	80	68
Messungen 1970 - 1972	60 - 90	58 - 90

Eine Prüfung der Aussagekraft der Immissionshäufigkeitsverteilungen (Abb. 46 und 47 fand noch nicht statt, da bisher keine entsprechenden Meßergebnisse vorlagen. Zur abschätzenden Beurteilung kann bisher nur neben dem Mittelwert der Wert für die 97,5 % der Summenhäufigkeit herangezogen werden. Dies ergibt eine befriedigende Übereinstimmung. Es ist anzunehmen, daß die errechneten Verteilungen zu niedrigeren Immissionswerten gegenüber den tatsächlichen verschoben sind, da in der Rechnung Interpolationen stattfinden.

Zu betonen ist, daß solche Emissions-Immissionsmodelle, da sie sehr komplexe und noch ungenügend erforschte Naturvorgänge vereinfacht beschreiben, nur als Orientierungs- und Entscheidungshilfen zu verstehen sind. Für diesen Zweck erweisen sich die Ergebnisse der Rechnungen als ausreichend genau.

#### 4.5.3 Analyse zukünftiger Entwicklungen der SO<sub>2</sub>-Immissionsbelastung

##### Simulation einiger Handlungsalternativen

Mit dem Instrumentarium der Emissions-Immissionsrechnung ist nicht nur eine Beschreibung des augenblicklichen Zustandes möglich, sondern auch eine Beurteilung der Folgen möglicher Handlungen. Es werden einige Alternativ-Rechnungen für die Immissions-Mittelwerte des Winterhalbjahres aufgezeigt:

1. Den für das Jahr 1980 vorausberechneten Immissionszustand bei Realisierung der bisher bekannten, bis zu diesem Zeitpunkt geplanten Investitionsvorhaben und bei Ausbleiben restriktiver Maßnahmen wie Heizöl- bzw. Rauchgasentschwefelung zeigt Abb. 49 für die Belastung durch Großemittenten. Die Zone von Immissionen größer  $20 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  umschließt jetzt den Mannheimer und Karlsruher Raum und setzt sich auch bis zum Gebiet der elsässischen Raffinerien fort. Im Karlsruher Haupteinflußgebiet nordöstlich der Stadt ist die Konzentration von  $30$  auf  $40 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  gestiegen (vgl. Abb. 43). Das Mannheimer Maximum ist von  $50$  auf  $70 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  angestiegen. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Immissionen, verursacht durch den Hausbrand, ergibt sich für Karlsruhe-Stadt eine mittlere Winterkonzentration von  $100 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  und für das nördliche Umland von etwa  $60 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ .

2. Annahme wie unter 1., allerdings Einführung der Restriktion, daß durch eine geeignete Kombination von Verfahren der Heizöl- und Rauchgasentschwefelung Emissionsbedingungen erreicht werden, die einem Schwefelgehalt von 1 % im schweren Heizöl äquivalent sind ( Abb. 50). Für den Raum Karlsruhe ergibt sich durch Großemittenten eine Konzentration von  $20 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  d.h. eine Verbesserung sogar gegenüber dem jetzigen Zustand. Das Gleiche gilt für den Raum Mannheim, als Maximalwert treten nur noch  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auf, im Vergleich zu  $70 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  für Alternative 1 und  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  heute.
  
3. Annahme wie unter 1., allerdings Einführung der Restriktion, daß für alle Anlagen im Energieumwandlungsbereich Schornsteinhöhen von 250 m vorgeschrieben sind (Abb. 51).  
Dieser Fall zeigt eine ähnliche Verbesserung des Immissionszustandes wie Alternative 2. Es ist allerdings zu bedenken, daß die Emissionen im Gegensatz zu Fall 2 nicht reduziert sind, sondern nur günstiger verteilt werden.
  
4. Als Alternative zum Hausbrand aus Einzelfeuerungen wurde Wärmeversorgung aus zentralen Heizwerken angenommen.  
Für Karlsruhe wurde angenommen, daß die bisher in Einzelfeuerungen (Heizöl bzw. Kohle) erzeugten 2 000 Tcal/a in zwölf typischen Heizwerken mit je etwa 170 000 Gcal/a erzeugt werden. Diese Kraftwerke emittieren dann aus 50 m Kaminen im Wintermittel je  $40 \text{ kg SO}_2/\text{h}$  und im Sommermittel  $8 \text{ kg SO}_2/\text{h}$ . Abb. 52 zeigt den erheblich verbesserten Immissionszustand im Wintermittel gegenüber der Heizung aus Einzelfeuerungen (vgl. Abb. 45). Für die Hausbrandalternative ergeben sich mit den Heizkraftwerken Maximalwerte von  $5 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ , für Einzelfeuerung von  $70 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ . Für den Sommermittelwert der Immissionen mit den Heizkraftwerken ergeben sich Werte unterhalb  $1 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ , bei Einzelfeuerung etwa  $10 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ .
  
5. Bei gegebener Industriestruktur 1972 wurde die Auswirkung eines zusätzlichen Großprojektes (Annahme einer Raffinerie mit 10 Mill. to Rohöl Jahresdurchsatz oder eines fossilen Kraftwerkes von 600 MWe) mit einer  $\text{SO}_2$ -Emission von etwa  $3 \text{ to}/\text{h}$  für einige alternative Standorte untersucht (53 a - f). Die Auswirkungen dieses Projektes wurden bei Annahme alternativer Standorte Karlsruhe, Rastatt, Germersheim, Landau, Minfeld (Pfalz) und Blankenloch anhand der Immissionsmittelwerte für das Winterhalbjahr untersucht.

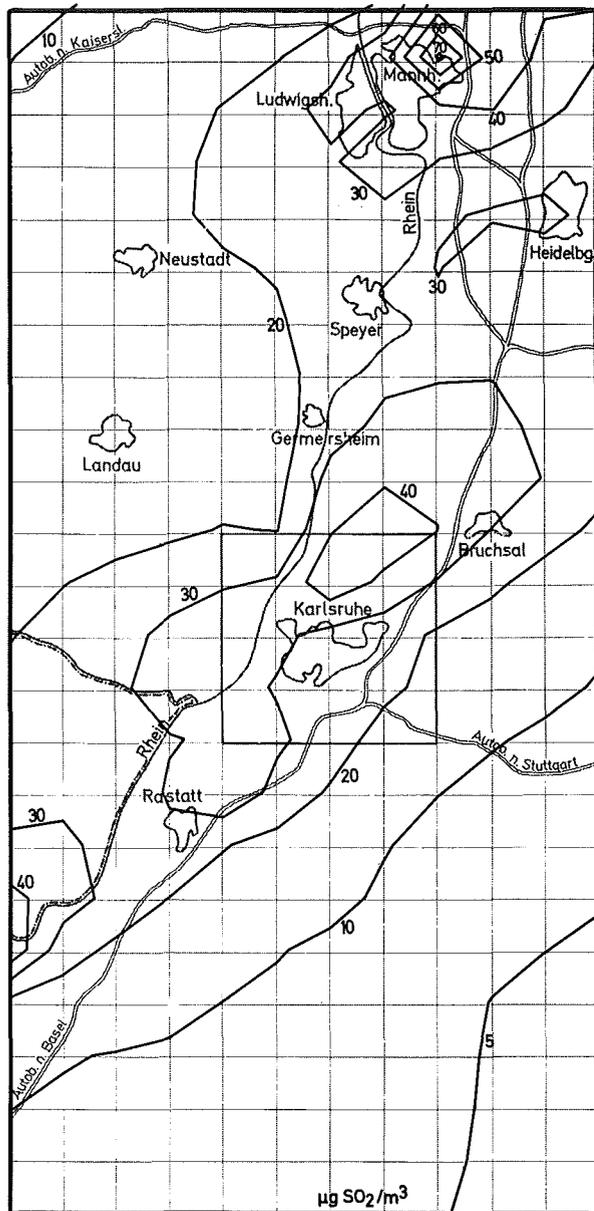


Abb. 49

Errechneter Beitrag zu den Wintermittelwerten 1980 der SO<sub>2</sub>-Immission im Nördlichen Oberrheingebiet

Emissionsquellen: Großemittenten im Nördlichen Oberrheingebiet

Alternative 1)

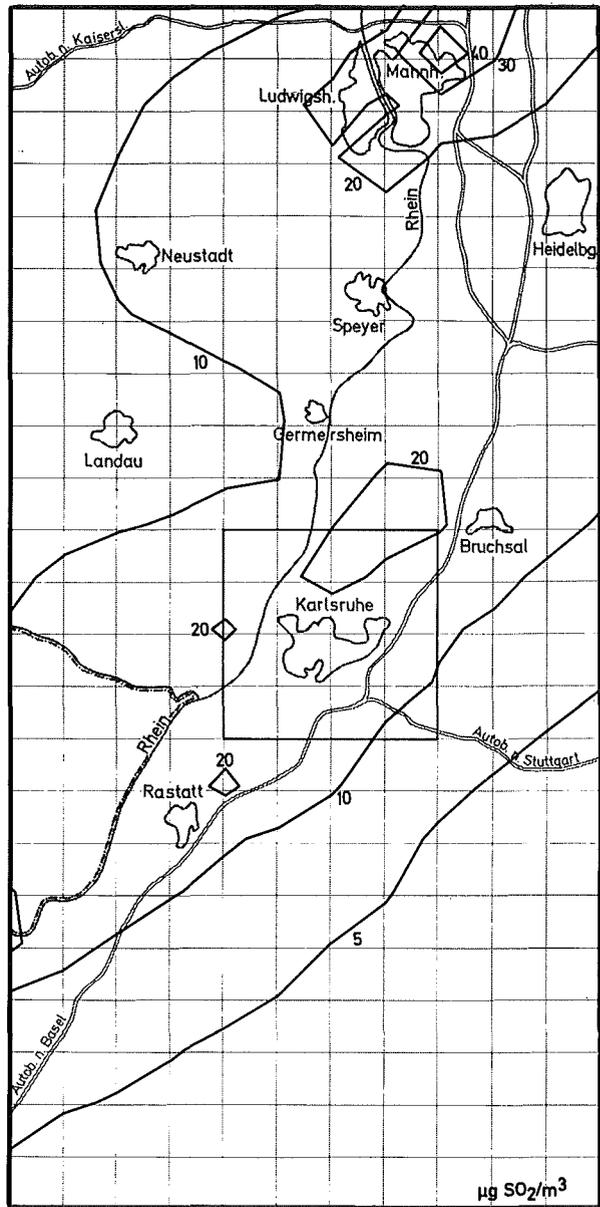


Abb. 50

Errechneter Beitrag zu den Wintermittelwerten 1980 der SO<sub>2</sub>-Immission im Nördlichen Oberrheingebiet

Emissionsquellen: Großemittenten im Nördlichen Oberrheingebiet

Alternative 2)

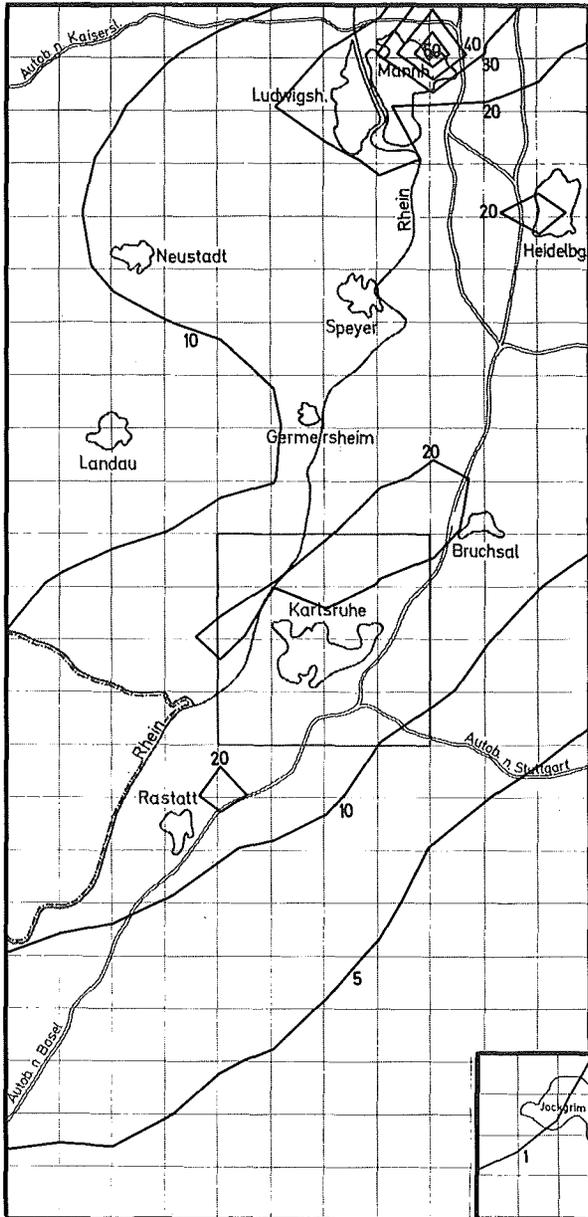


Abb. 51

Errechneter Beitrag zu den Wintermittelwerten 1980 der SO<sub>2</sub>-Immission im Nördlichen Oberrheingebiet

Emissionsquellen: Großemittenten im Nördlichen Oberrheingebiet

Alternative 3)

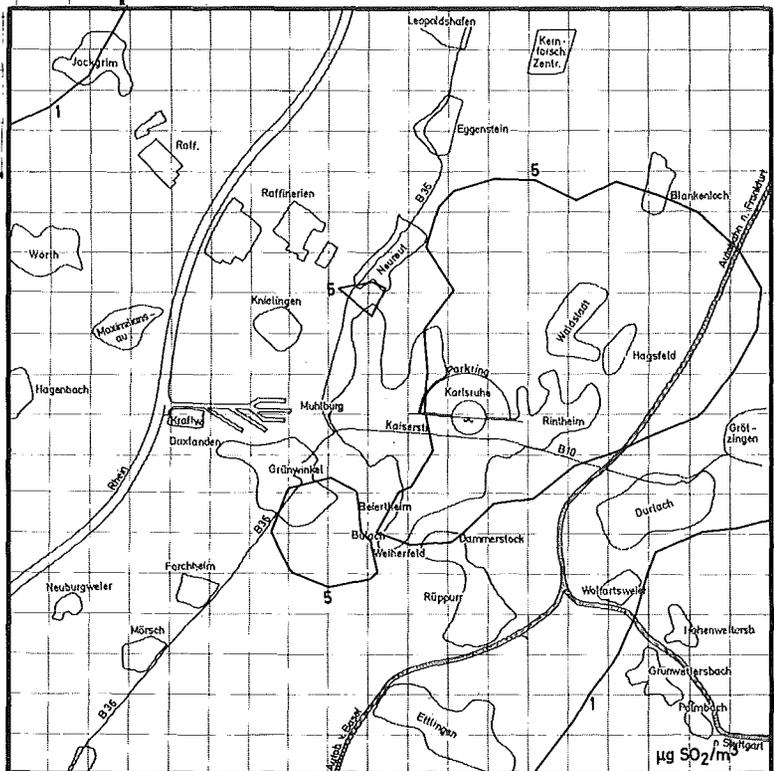


Abb. 52

Errechneter Beitrag zu den Wintermittelwerten der SO<sub>2</sub>-Immission im Karlsruher Raum

Emissionsquellen: Haushalte und Kleinverbrauch

Alternative 4)

Der Standort Karlsruhe (Abb. 53 a) bringt insbesondere für die bereits jetzt am stärksten belasteten Gebiete im Norden der Stadt eine weitere Steigerung; der auftretende Maximalwert steigt um  $10 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  auf  $40 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ . Der Standort Rastatt (Abb. 53 b) führt zu einer Ausdehnung des Karlsruher Haupteinflußgebietes, dargestellt an der  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -Isolinie nach Süden. Ähnliches ergibt sich bei der Wahl des Standortes Germersheim im Norden (Abb. 53 c). Diese Standortalternative bringt eine Verschmelzung der Haupteinflußgebiete von Karlsruhe und Mannheim. Die beschriebenen drei Standorte liegen alle am Rhein.

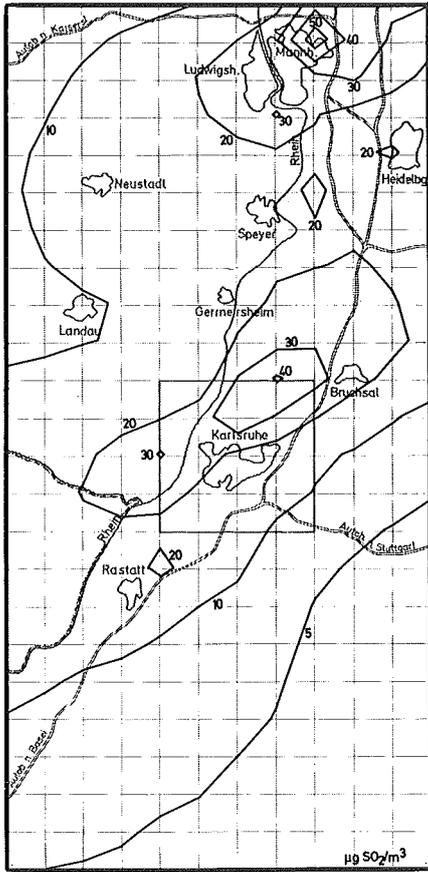
Beim Standort Landau (Abb. 53 d) läßt sich eine geringe Ausdehnung des Mannheimer Haupteinflußgebietes nach Süden erkennen. Die Standorte Minfeld (Pfalz) (Abb. 53 e) und Blankenloch (Abb. 53 f) ergeben eine im Vergleich zu den anderen Alternativen geringere Vergrößerung des Karlsruher Haupteinflußgebietes im nordöstlichen Bereich.

#### Problematik der Standortbewertung

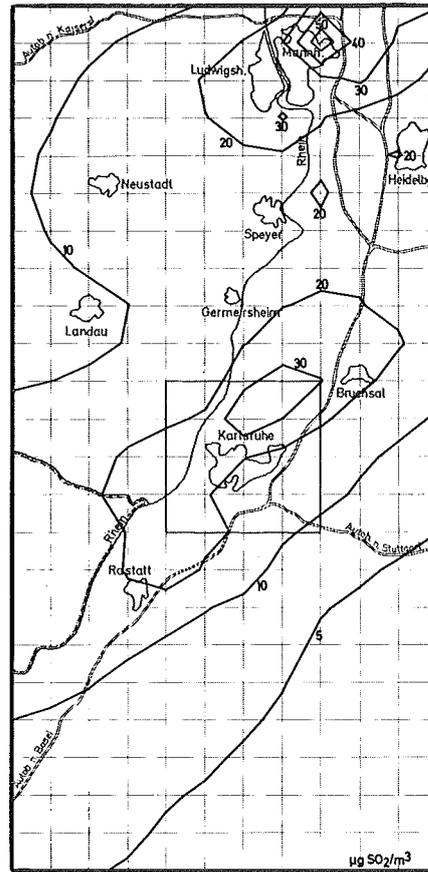
Der in Alternative 5 beschriebene etwas umständliche Prozeß des Standortvergleichs (Abb. 53 a - f) von Großprojekten, sollte sich durch Erweiterung des Ausbreitungsmodells zum Planungsmodell erleichtern lassen. Es liegt nahe, als typische Indexzahl, die die Auswirkungen eines Standorts beschreibt, die Summe über alle Produkte Immission x Bevölkerungszahl an allen Rasterpunkten, die im Einflußbereich geplanter Projekte liegen, zu verwenden. Man kann den Istzustand mit 100 bewerten, die darauf bezogenen Indexzahlen der verschiedenen Alternativen drücken dann die relative Verschlechterung für die Gesamtheit der betroffenen Bevölkerung aus.

Gegen diese Bewertung ergeben sich jedoch folgende Einwände:

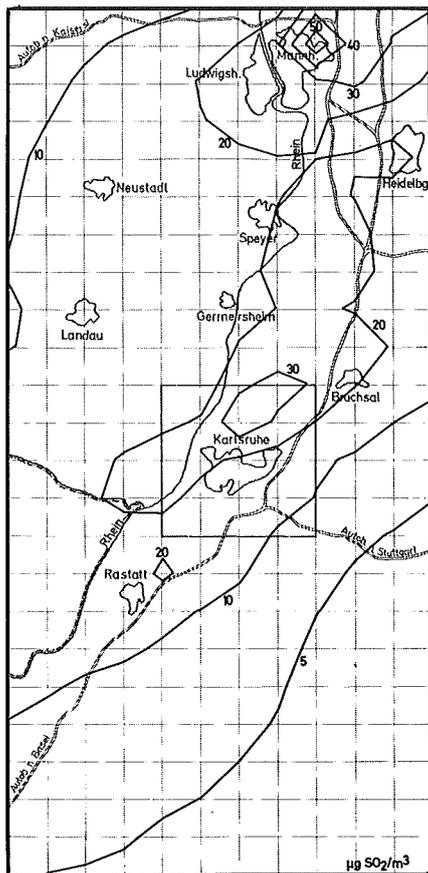
- 1.) Mit dem berechneten Bewertungsindex läßt sich zwar im Mittel ein optimaler Standort bezüglich der Auswirkungen für die Gesamtbevölkerung finden, dieses Optimum kann aber auf Kosten unzumutbarer Konzentrationen für Einzelne bzw. kleinere Bevölkerungsgruppen zustande kommen.
- 2.) Die Bewertung über einen Mittelwert ist darüberhinaus so lange fragwürdig, wie in den Bewertungsindex die Schadstoffkonzentrationen nur linear eingehen bzw. die Dosis-Wirkung-Beziehung nicht hinreichend bekannt ist.



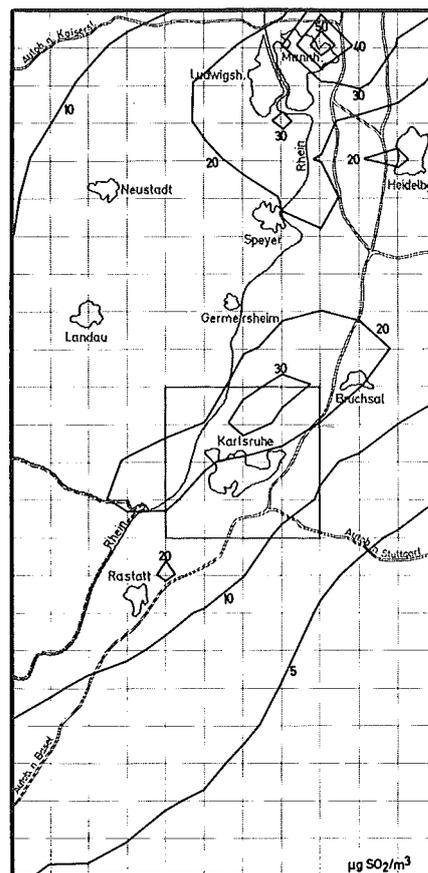
a) Karlsruhe



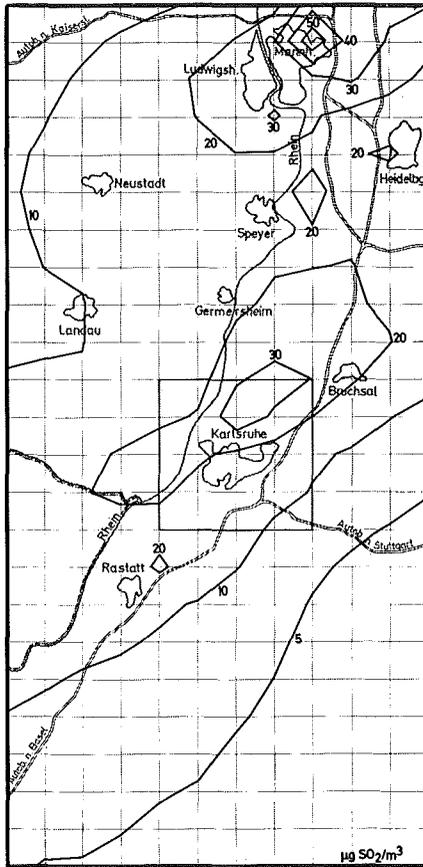
b) Rastatt



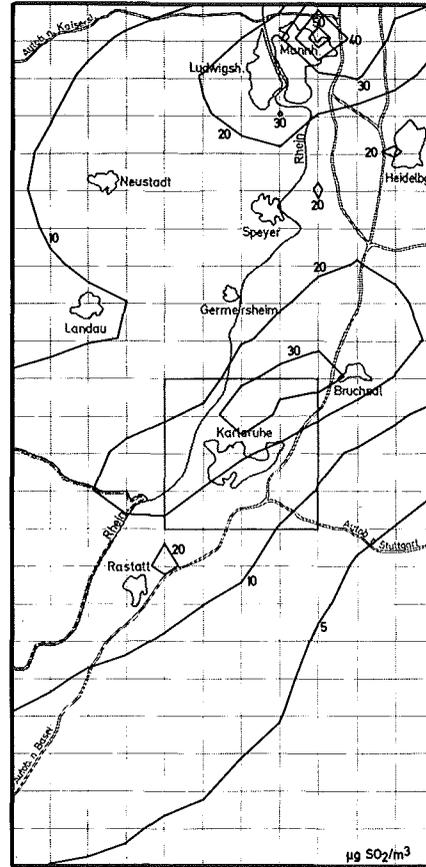
c) Germersheim



d) Landau



e) Minfeld (Pfalz)



f) Blankenloch

Abb. 53 Errechneter Beitrag zu den Wintermittelwerten der  $\text{SO}_2$ -Immission im Nördlichen Oberrheingebiet

Emissionsquellen: Großemittenten Oberrheingebiet

+ 1 angenommener Großemittent an den Standorten a) bis f)

3.) Die Forderung, daß zwischen den Verdichtungsgebieten Räume geringerer Schadstoffbelastung zur Regeneration des gesamten Naturhaushaltes liegen sollen, kann mit diesem Verfahren nicht berücksichtigt werden.

Eine solche Indexzahl zu errechnen, kann daher nur dann zulässig sein, wenn zusätzlich sichergestellt ist, daß maximal zulässige Konzentrationen für Verdichtungs- und Erholungsräume an keinem Ort überschritten werden. Von dieser Annahme wird ausgegangen.

Für die sechs berechneten Standortalternativen ergibt sich dann folgende Aufstellung für die relative Verschlechterung bezogen auf den Istzustand (= 100 %).

Bewertungsindizes von Standorten

<u>Standort</u>	<u>Bewertungsindex (%)</u>
Minfeld (Pfalz)	106
Blankenloch	106
Karlsruhe	107
Landau	107
Rastatt	108
Germersheim	108

Wenn man es dann unter der genannten Voraussetzung in erster Näherung für zulässig hält, eine lineare Dosis-Wirkung-Beziehung anzunehmen, so zeigen die geringen Unterschiede der Indexzahlen für die sechs Standortalternativen möglicherweise auf, daß der Schadensbetrag von der Standortwahl innerhalb einer Region nicht stark abhängt. Die Rechnungen müßten evtl. für einen größeren Raum ausgeführt werden, um signifikante Unterschiede zu ergeben.

In jedem Fall ist aber für jeden Standort die Zumutbarkeit der maximal auftretenden Immissionsbelastung zu prüfen.

Es erscheint erforderlich, in Zukunft verbesserte Planungsmodelle zu entwickeln. Ansätze hierfür sind bereits vorhanden und können auf den derzeitigen Emissions-, Immissionsrechnungen aufbauen.

## 5. Auswertungen und Schlußfolgerungen

Aus dem in diesem Gutachten zusammengestellten Material kann bedingt die Beeinflussung der Umweltsituation durch Energieumwandlung und Energienutzung und die Tendenz in der Veränderung der Belastung der Umwelt durch Veränderungen im Energieeinsatz erkannt werden. Eine abschließende Beurteilung kann jedoch nicht abgeleitet werden, da hierfür Kosten, Nutzen und Risiken des Energieeinsatzes in Relation gesetzt werden müßten.

### 5.1 Ergebnisse der Analysen

Die im folgenden dargestellten Ergebnisse sind im Zusammenhang mit den entsprechenden Abschnitten der Studie zu sehen. Die in einer Zusammenfassung notwendig verkürzte Darstellung soll einige Punkte der Analyse nochmals ins Gedächtnis rufen. Während in den vorangehenden Abschnitten eine Darstellung von Sachverhalten angestrebt wurde, enthalten die Schlußfolgerungen Bewertungen durch die Autoren.

#### 5.1.1 Der Ist-Zustand

a) Zur Beurteilung der Luftbelastung durch chemische Schadstoffe wurde als "Leitsubstanz"  $\text{SO}_2$  herangezogen. Damit ist ein wesentlicher Teil der Luftbelastung durch Energiewandlung und Energienutzung erfaßt. (Auf diese Weise ist allerdings der Sektor Verkehr ausgenommen.) Es ergibt sich am Beispiel des nördlichen Oberrheingebietes,

- 1.) daß die Belastung durch Großemittenten im Jahresmittel kleiner ist als  $50 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ ,
- 2.) daß von einer Entkopplung benachbarter Verdichtungsräume gesprochen werden kann (gegenseitiger Einfluß Mannheim/Karlsruhe ca. 20 % im Jahresmittel),
- 3.) daß im Winterhalbjahr in Verdichtungsräumen der Hauptbeitrag der Immission vom Haushalt und Kleinverbrauch herrührt (mehr als  $70 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  im Wintermittel),
- 4.) daß die Gesamtbelastung in Verdichtungsräumen im Jahresmittel bis zu  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$  beträgt, und in den dazwischenliegenden Gebieten mindestens  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  als Jahresmittel auftreten. Mit diesen Werten sind die z.Z.

gültigen Standards noch nicht erreicht. Die Belastung liegt allerdings in Verdichtungsräumen zum Teil über den von der Environmental Protection Agency (EPA) für die Langzeitbelastung vorgeschlagenen Grenzwerten. Bei der Beurteilung dieser Werte ist zu bedenken, daß nach heutiger Kenntnis auch unterhalb dieser Standards gesundheitsschädigende Wirkungen nicht auszuschließen sind. Von daher erscheinen Bemühungen um eine Verringerung der Belastung wichtig, wobei über die gesundheitsschädigenden Wirkungen hinaus allgemeinere ökologische Aspekte sowie auch Nutzenerwägungen bezüglich der schadstoff-erzeugenden Aktivitäten einbezogen werden müssen.

- b) Für die radiologische Belastung ergibt sich im Oberrheintal zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch keine Luftbelastung aus dem energiewirtschaftlichen Einsatz von Kernenergie. Auch in der Umgebung des Kernforschungszentrums sind, gemessen an der Schwankungsbreite der natürlichen radiologischen Belastung, nur geringe Dosisraten ermittelbar (kleiner 20 mrem/a). Die lokale Gewässerbelastung durch Tritium erreicht nur ca.  $0.1 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$  (bei Mainz).
- c) Die Belastung des Oberrheins mit Abwärme (ca. 5 GW) ist gegenwärtig so, daß die zulässigen Höchsttemperaturen nicht überschritten, in Engpaßzeiten jedoch nahezu erreicht werden.

#### 5.1.2 Tendenzen

- a) Für die Luftbelastung, gemessen an der  $\text{SO}_2$ -Belastung, zeichnet sich unter der Annahme der Realisierung der heute bekannten Investitionsvorhaben im nördlichen Oberrheingebiet bei gleichbleibender Technologie für 1980 ab,
  - 1.) daß die Luftbelastung durch Großemittenten in Verdichtungsräumen um ca. 1/3 wächst (Spitzen bis auf ca.  $70 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ ),
  - 2.) daß die Belastung durch Großemittenten zwischen den Verdichtungsräumen um ca. die Hälfte wächst (bis auf ca.  $30 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ ),
  - 3.) daß also die Entkoppelung der Verdichtungsräume, bedingt durch die

großen Emissionshöhen und die Standortwahl der Großemittenten abnimmt.

- b) Die radiologische Luftbelastung durch Kernkraftwerke wird 1980 und ebenso 1985 gering sein. Für ein 1000 MWe-Kraftwerk liegt die maximale Belastung durch Edelgase lokal unter 0.1 mrem/a. Entsprechend gilt für Jod-131 eine Belastung der Schilddrüse von maximal 5 mrem/a mit einer Abnahme auf 0.2 mrem/a nach 10 km Entfernung. Kernkraftwerke werden also bezüglich der radiologischen Luftbelastung auch in größerer Zahl keine Gefahren bringen. Die Tritium-Belastung des Rheins wird 1985 bei Mainz mit  $0.5 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$  in den Bereich des für die BRD festgelegten "Flußstandards" von  $3 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$  kommen.
- c) Unter der Annahme, daß die bis 1980 vorgesehenen Kraftwerksinstallationen eine den jeweiligen Kühlbedingungen anpaßbare Kombination aus Frischwasserkühlung, Ablaufkühlung und nasser Rückkühlung vorsehen, wird eine für den Rhein zulässige Aufwärmespanne von  $3^{\circ}\text{C}$  am unteren Oberrhein fast ständig voll ausgenutzt. Die Verdunstung aus dem Rhein wird dann nahezu doppelt so hoch sein wie unter natürlichen Bedingungen. Eine dadurch verursachte merkliche Erhöhung der Nebelhäufigkeit in Flußnähe läßt sich nicht ausschließen. Auch die Folgen der Erwärmung für den Sauerstoffgehalt des Rheins können, insbesondere unterhalb Mannheim/Ludwigshafen, u.U. bedenklich sein. Die Umgebungsbelastung aus der Naßkühlturmkühlung durch Feuchte und Nebelbildung erscheint bei geeigneter Standortwahl nicht gravierend:

für ca. 1 - 2 GWth Kühlturmleistung beträgt die mittlere tägliche Beschattung durch sichtbare Fahnen für Gebiete, die sich mit einem Radius von 1 km um den Kühlturm erstrecken, einige Minuten der mittleren täglichen Sonnenscheindauer;

Die Zunahme der Bodennebelhäufigkeit kann bei 1 - 2 GWth Kühlturmleistung maximal einige Prozent der natürlichen Bodennebelhäufigkeit betragen.

Insgesamt wird 1980 die Wassermenge, die in der Oberrheinebene für Kühlzwecke verdunstet wird, rund 10 % der natürlicherweise in diesem

Gebiet verdunsteten Wassermenge betragen. Die klimatischen Folgen dieser Erhöhung sind ungewiß. Die durch den Wasserentzug bedingte Verringerung der Rheinwasserführung hat 1980 noch keine nennenswerten Folgen für den Schiffsverkehr auf dem Oberrhein.

## 5.2 Empfehlungen

Es ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich, Empfehlungen für die langfristige Planung der Energieversorgung zu geben, da die mit wirtschaftspolitischen Aspekten rückgekoppelte Konzeption von alternativen Energiesystemen einer ferneren Zukunft noch nicht geleistet ist. Unterstellt man bis etwa 1985 eine in den Grundzügen unveränderte Energieversorgungskonzeption, so können einige Maßnahmen als sinnvoll ausgewiesen werden.

### 5.2.1 Energiewirtschaftliche Aspekte

Der Ausbau der Energieversorgung auf der Basis von Öl wird ohne zusätzliche technologische Maßnahmen zu einer laufend steigenden  $\text{SO}_2$ -Belastung führen. Auch versorgungspolitische Gesichtspunkte werden den Anteil des Öls am Primärenergieverbrauch begrenzen. (Im Vergleich zur BRD (55 %) weist Baden-Württemberg 1971 mit 70 % einen überproportionalen Anteil des Öls am Primärenergieverbrauch auf.)

Ein stärkerer Einsatz der Kohle bringt beim heutigen Stand der Technik neben erhöhter  $\text{SO}_2$ -Belastung noch Staubbelastung, die zusammen zu synergistisch erhöhten Belastungen führen.

Es erscheint unter dem Aspekt der Umweltbelastung und der Versorgungssicherheit empfehlenswert, Kernenergie sowohl in verstärktem Maße zur Elektrizitätserzeugung einzusetzen, als auch ihre Möglichkeiten bei der Erzeugung von Nutzwärme (Prozesswärme, Raumheizung) zu beachten. Diese Empfehlung gilt unter der Voraussetzung, daß das Störfallrisiko beim Einsatz der Kernenergie sorgfältig verfolgt wird und dann als genügend gering angesehen werden kann.

### 5.2.2 Technologische Aspekte

- a) Aufmerksamkeit muß bei der Einführung der Kernenergie dem Brennstoffzyklus gewidmet werden. Bei der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoff im großen Stil müssen Rückhaltevorrichtungen für insbesondere Krypton-85 und Tritium vorgesehen werden. Auf Sicht wird die Tritium-Rückhaltung im Abwasser auch bei den Kernkraftwerken notwendig werden.
- b) Werden durch eine geeignete Kombination von Verfahren der Heizöl- und Rauchgasentschwefelung Emissionsbedingungen erreicht, die einem Schwefelgehalt von 1 % im schweren Heizöl äquivalent sind, erreicht man einen Rückgang der  $\text{SO}_2$ -Immission in den Haupteinflußgebieten der Großemittenten um  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Für die nächsten 10 Jahre kann im nördlichen Oberrheingebiet die Zunahme der  $\text{SO}_2$ -Immission auf Grund des geplanten Industriewachstums durch eine derartige Maßnahme kompensiert werden.

Auch durch Emissionshöhen ( $> 250 \text{ m}$ ) bei den Anlagen des Energieumwandlungsbereiches wäre eine Reduzierung der Belastung im "Nördlichen Oberrhein" um diesen Wert erreichbar. Zu bedenken ist hierbei, daß jedoch keine Verringerung der emittierten Schadstoffmenge stattfindet, sondern diese am Boden erst in weiterer Entfernung und daher in geringeren Konzentrationen wirkt.

Die vollständige Deckung des Raumheizungsbedarfs durch Fernheizwerke brächte eine Reduktion der  $\text{SO}_2$ -Belastung in Verdichtungsräumen durch Hausbrand für das Winterhalbjahr auf etwa 1/10 (Rückgang von maximal  $70 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  auf maximal  $5 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  als Wintermittel in Karlsruhe).

- c) Bei der Energieumwandlung anfallende Abwärme stellt langfristig ein Problem dar, dessen Lösung schon heute in Angriff genommen werden sollte. Zunächst ist durch eine international abgestimmte Kühlregie (laufende Abstimmung des Einsatzes von Frischwasserkühlung, Ablaufkühlung und nasser Rückkühlung) dafür zu sorgen, daß die Kühlkapazität der Fließgewässer bestmöglich genutzt wird. Langfristig wird die Einführung von Trockenkühltürmen notwendig sein. Die klimatischen Folgen eines verstärkten Einsatzes dieser Kühlmöglichkeiten sind zur Zeit noch nicht

hinreichend bekannt. Die technologische Entwicklung dieser Kühlverfahren sowie die Analyse ihrer Auswirkungen ist dringend erforderlich. Anzustreben ist auch eine Erhöhung des Wirkungsgrades von Kraftwerken, die bessere Nutzung der Abwärme sowie eine Verbesserung der Nutzung der Energie im Endverbrauch.

### 5.2.3 Raumordnungspolitische Aspekte

Die Ballung von Anlagen sowohl des Energieumwandlungs- als auch des Energienutzungsbereichs im nördlichen Oberrheingraben und im mittleren Neckarraum ist unverkennbar. Auch ist die enge Korrelation zwischen Bevölkerungsdichte, Dichte der Energiefreisetzung und  $\text{SO}_2$ -Belastung zu sehen.

Bei der Standortplanung weiterer Großanlagen ist zu berücksichtigen:

1. daß schwach belastete Gebiete zwischen Verdichtungsräumen als Regenerationsräume für Mensch, Tier und Pflanze eine wichtige Funktion haben können,
2. daß eine Erhöhung der Schornsteine in größeren Entfernungen vom Quellpunkt (z.B. in den Regenerationsräumen) keine wesentliche Verbesserung der Belastung bringt, sondern lediglich lokal im Umkreis von einigen zehn Kilometern,
3. daß Emissionen in 150 - 200 m Höhe im Jahresmittel nach etwa 10 km Entfernung vom Quellpunkt das Maximum der Belastung haben. Bei mehreren nahe beieinander liegenden Großemittenten kann sich durch Überlagerungseffekte der Abstand des Maximums wesentlich ändern, weshalb hierzu im Einzelfall gesonderte Betrachtungen notwendig sind. (Für fünf Großemittenten immerhalb eines Kreises eines Durchmessers von 7 km im Raum Karlsruhe liegt das errechnete Maximum des Jahresmittelwertes der Immission nur 3 km vom Kreisrand entfernt.),
4. daß die Möglichkeit der Frischwasserkühlung nur durch eine Ausnutzung der zulässigen Aufwärmespanne am Hochrhein und eine gleichmäßige Verteilung der Abwärmeeinleitungen am Oberrhein bestmöglich genutzt wird.

Insgesamt erscheint eine Verstärkung der Bemühungen um eine sorgfältige Standortbeurteilung und eine vorausschauende Standortreservierung wünschenswert.

### 5.3 Ausblick

Die Durchführung der Studie hat gezeigt, daß zu einer Bearbeitung des Problems "Energie und Umwelt" neben der Weiterentwicklung von Methoden auch ein wesentlich umfangreicheres Datenmaterial als gegenwärtig vorhanden zur Verfügung stehen muß. Dies betrifft insbesondere:

- die meteorologischen Gegebenheiten einer Region (korrelierte Daten von Feuchte, Temperatur, Strahlung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit für verschiedene Höhen),
- systematische Angaben über Emissionen für verschiedene Schadstoffe einschließlich der zugehörigen Emissionsbedingungen (wie Kaminhöhe, Temperatur) einer Region,
- Angaben über Immissionen durch Aufstellung von Meßnetzen, um etwa Modelle zur Standortbeurteilung besser testen zu können und ein laufendes Überwachungssystem bezüglich der Emissionsangaben zu haben.

Nach den derzeitigen Kenntnissen sind für die Umweltbeeinflussung durch Energieumwandlung und Energienutzung (der Verkehrssektor ist nicht in die Betrachtungen mit eingeschlossen) in einigen Bereichen Belastungsgrenzen erreicht. Es ist abzusehen, daß diese Belastungsgrenzen auch in anderen Bereichen erreicht werden. Es sollen deshalb diejenigen Problemkomplexe angesprochen werden, die eine intensive Beobachtung verdienen und weitere Entwicklungen und Maßnahmen erfordern. Die Anwendung und Weiterentwicklung der in dieser Studie erarbeiteten Modelle bietet hierfür Unterstützung.

1. Es ist Kenntnis zu nehmen von den laufend ansteigenden Ansprüchen an die Umweltqualität. Die Erfüllung der elementaren Ansprüche der Bevölkerung (erreichter Lebensstandard) vergrößert die Bereitschaft, sich weitergehende Ansprüche zu eigen zu machen. Anpassung von Umweltqualitäts-

normen an diese sich ändernden Ansprüche unter differenzierten Gesichtspunkten ist deshalb ein Problemkomplex.

2. In diesem Zusammenhang ist die Analyse der Wirkungen von Schadstoffbelastungen auf spezielle Bevölkerungsgruppen (wie Kinder, Alte, Kranke) von Bedeutung und die Eigenart eines Raumes (Erholungsraum gegenüber Industriegebieten) mit einzubeziehen.
3. Forschung ist auch bezüglich der medizinischen Langzeitwirkungen niedriger Belastungen und der synergistischen Wirkungen mehrerer Umweltbelastungen notwendig.
4. Frühzeitig sollen Überlegungen angestellt werden, wie durch politische Maßnahmen erreicht werden kann, daß das wirtschaftliche Wachstum mit der ökologischen Leistungsfähigkeit einer Region in Einklang zu bringen ist.
5. Eine bedeutsame Frage ist die Risikoeinschätzung und die Risikobereitschaft in der Bevölkerung. Es erscheint wesentlich, eine methodische und sachliche Basis für die Behandlung dieser Problematik zu schaffen. Hierher gehört die Behandlung der Risiken durch atmosphärische Schadstoffbelastungen, nicht nur durch  $\text{SO}_2$ , wie auch eine Diskussion der potentiellen Gefahren durch den Kernenergieeinsatz, insbesondere durch den Brennstoffzyklus.
6. Detailuntersuchungen sind insbesondere über Abbaumechanismen von Schadstoffen notwendig.
7. Die technologischen Möglichkeiten zur Emissionsreduktion und besseren Energienutzung sind eingehender zu untersuchen.
8. Schließlich sind vor allem heute noch futuristisch erscheinende alternative Energiesysteme zu entwerfen und auf ihre Verwirklichungsmöglichkeiten zu prüfen.

Anhang A zu Abschnitt 4.2:

Grundlagen für die Untersuchungen zur Belastbarkeit des Oberrheines mit Abwärme

Die natürliche Temperatur  $T(t,x)$  eines Flusses ergibt sich, wenn man vollständige Homogenität des Flusses quer zur Fließrichtung voraussetzt, aus der Differentialgleichung /60/

$$(1) \quad \frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{y_0}{c \cdot F} \cdot f(T, WB)$$

mit Randbedingungen von der Art

$$T(t,0) = \tau_1(t) \quad , \quad T(0,x) = \tau_2(x) \quad , \quad 0 \leq t,x.$$

Dabei bedeutet  $t$  die Zeit,  $x$  die Ortskoordinate in Fließrichtung,  $v(x,Q)$  die Fließgeschwindigkeit,  $y_0(x,Q)$  die Flußbreite,  $Q(t,x)$  die Abflußmenge,  $c$  die (volumen-) spezifische Wärme des Wassers,  $F$  den Querschnittsflächeninhalt des Wasserkörpers und  $f$  die pro Zeit- und Oberflächeninhalt aus dem Fluß entweichende Wärmemenge.  $WB(t,x)$  umfaßt alle für die Wassertemperatur relevanten Wetterbedingungen. Der Wärmeübergang ans Gewässerbett wird in (1) vernachlässigt /82/.

Bei antropogenem Wärmeeintrag pro  $x$ - und  $t$ -Einheit in Höhe von  $\lambda(t,x)$  ergibt sich die Flußtemperatur  $T'$  analog aus der Gleichung

$$(2) \quad \frac{\partial T'}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial T'}{\partial x} = \frac{\lambda}{c \cdot F} - \frac{y_0}{c \cdot F} \cdot f(T', WB).$$

Dabei wurde dieselbe Funktion  $WB(t,x)$  angenommen wie in Gleichung (1). Dies bedeutet die Vernachlässigung der Einwirkungen der Flußtemperaturänderung auf die meteorologischen Bedingungen.

Die Restriktionen für Abwärmeeinleitungen orientieren sich im wesentlichen an den Abweichungen  $\Delta T = T' - T$  von der natürlichen Flußtemperatur. (Die zusätzliche Festlegung einer  $T$ -Obergrenze von z.B.  $28^{\circ}\text{C}$  für den Rhein wirkt sich kaum als Restriktion aus /83/.) Für die Bestimmung der Belastbarkeit des Flusses bei vorgegebenem  $\Delta T_{\max}$  wird daher lediglich die folgende Gleichung für  $\Delta T$  benötigt, die sich durch Differenzbildung aus den Gleichungen (1) und (2) nach Division durch  $v$  ergibt:

$$(3) \frac{1}{V} \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial t} + \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = \frac{\lambda}{c \cdot Q} - \frac{y_0}{c \cdot Q} \cdot (f(T + \Delta T, WB) - f(T, WB)).$$

Die Lösung ergibt sich aus den Lösungen der gewöhnlichen Differentialgleichung

$$(4) \frac{d\Delta T}{ds} = \frac{\lambda}{c \cdot Q} - \frac{y_0}{c \cdot Q} \cdot (f(T + \Delta T, WB) - f(T, WB))$$

mit

$$x = s \quad \text{und} \quad t \quad \text{aus} \quad \frac{dt}{ds} = \frac{1}{v(t, x)}.$$

Die Funktion  $f(T, WB)$  setzt sich additiv aus 7 Anteilen zusammen /82/:

direkte Sonnenstrahlung I,  
diffuse Himmelsstrahlung H,  
an der Oberfläche reflektierte Strahlung R,  
Wärmestrahlung der Atmosphäre G,  
Wärmeabstrahlung des Wassers A,  
Verdunstung (bzw. Kondensation) L,  
Konvektion K.

Bei der Differenzbildung auf der rechten Seite von Gleichung (4) fallen alle Summanden heraus, die nicht von T abhängen. (Dies gilt auch für die Wärmeerzeugung infolge der Abnahme der potentiellen Energie des Wassers, die in (1) nicht aufgeführt wurde.) Für die verbleibenden Terme wurden folgende Ansätze gemacht:

$$(5) \quad A = 0.97 \cdot 5.7 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 \quad [W/m^2] \quad (T \text{ in } ^\circ K),$$

$$(6) \quad L = 5.54 \cdot (1+w) \cdot (e - e_L) \quad [W/m^2],$$

$$(7) \quad K = 0.5 \cdot 5.54 \cdot (1+w) \cdot (T - T_L) \quad [W/m^2].$$

Dabei ist w die Windgeschwindigkeit in m/sec, e der (durch T bestimmte) Dampfdruck des Wassers in mm Hg,  $e_L$  der Partialdruck des Wasserdampfes in

der Luft,  $T_L$  die Lufttemperatur. Für die meteorologischen Daten ist dabei eine Meßhöhe von 2 m über Grund vorausgesetzt. Die Ausdrücke für A und für das Verhältnis L/K sind theoretisch ableitbare, recht genaue Näherungsformeln für das tatsächliche Geschehen /82/. Der Term  $5.54 \cdot (1+w)$  in (6) und (7) ergab sich rein empirisch aus dem Bestreben, gemessene Temperaturverläufe im Rhein möglichst gut zu beschreiben /84/.

Einsetzen von (5), (6) und (7) in Gleichung (4) liefert die Gleichung

$$(8) \quad \frac{d\Delta T}{ds} = \frac{\lambda}{c \cdot Q} - \frac{y_0}{c \cdot Q} \cdot (5.53 \cdot 10^{-8} \cdot ((T+\Delta T)^4 - T^4) + 5.54 \cdot (1+w) \cdot (e(T+\Delta T) - e(T) + 0.5 \cdot \Delta T)),$$

in der von den meteorologischen Daten nur noch die Windstärke verblieben ist. Da das Oberrheintal klimatisch weitgehend einheitlich ist und nur probabilistische Aussagen über die Belastbarkeit des Flusses mit Abwärme angestrebt werden, braucht man die Änderungen von w mit der Fließstrecke nicht im einzelnen zu berücksichtigen. Für die Berechnung etwa der pro Tag einleitbaren Wärmemenge kann ein repräsentativer Wert als gültig für das ganze Oberrheintal und den ganzen Tag angesehen werden. Eine weitere Vereinfachung kann man durch den Ansatz

$$(9) \quad f(T+\Delta T, WB) - f(T, WB) \approx \varphi(T, w) \cdot \Delta T$$

erreichen. Sie fällt wegen der großen Glätte der Funktion  $f(T+\Delta T, WB) - f(T, WB)$  als Funktion von T und wegen der Kleinheit der zulässigen  $\Delta T$ -Werte ( $\Delta T_{\max} = 3$  K) kaum ins Gewicht. Mit (9) wird die Lösung der Gleichung (8)

$$(10) \quad \Delta T(s) = e^{-\phi} \cdot (\Delta T(0) + \int_0^s \frac{\lambda}{c \cdot Q} \cdot e^{\phi} ds')$$

mit  $\phi(s) = \int_0^s \frac{y_0 \cdot \varphi}{c \cdot Q} ds'$ .

Sie vereinfacht sich, wenn man annimmt, daß  $\lambda$ , Q und  $y_0$  abschnittsweise konstant sind, für den k-ten Abschnitt zu

$$(11) \quad \Delta T(s) = \frac{\lambda_k}{\varphi \cdot y_{0k}} + (\Delta T(s_k) - \frac{\lambda_k}{\varphi \cdot y_{0k}}) \cdot e^{-\frac{\varphi \cdot y_{0k}}{c \cdot Q_k} \cdot (s - s_k)}$$

$s_k$  ist dabei die Ortskoordinate des Anfangs des k-ten Abschnitts. Der Ausdruck (11) wurde in Abschnitt 4.2 benutzt, um die Auslastbarkeit der Abwärmeproduzenten am Oberrhein und die zusätzlich verdunstete Wassermenge zu bestimmen.

Für die numerische Rechnung wurde der Rhein zwischen der Aaremündung und Worms in 6 Abschnitte unterteilt, innerhalb derer  $\lambda$ ,  $y_0$  und die pro s-Einheit installierte Kühlturmkapazität  $\lambda_0$  als konstant angesehen wurde. Die  $y_0$ -Werte, die aus bekannten Daten über mittlere Tiefe und Fließgeschwindigkeit bei verschiedenen Abflüssen /84/ ermittelt wurden, waren:

Rhein-km	$y_0$ [m]
102 - 174	160
174 - 227	170
227 - 296	240
296 - 362	200
362 - 428	240
428 - 443	290

Die Q-Abhängigkeit von  $y_0$ , die nur bei extremen Abflüssen merklich ist, wurde nicht berücksichtigt. Sie ließ sich aus den vorliegenden Daten nicht eindeutig ermitteln.

Für den Rhein im Bereich des großen Elsaßkanals wurde eine Breite von 250 m angenommen. Wärmeeinleitungen in diesen Abschnitt wurden nicht zugelassen, weil er sehr häufig (wenn  $Q \leq 1130 \text{ m}^3/\text{sec}$ ) praktisch ein stehendes Gewässer darstellt. (Wenn  $Q \leq 1130 \text{ m}^3/\text{sec}$  ist, bleiben  $30 \text{ m}^3/\text{sec}$  im Rhein, wenn Q größer ist, verbleibt dem Rhein der Überschuß.) Die weiter unten gelegenen Rheinseitenkanäle wurden nicht berücksichtigt.

Q wurde als konstant auf der ganzen Strecke angenommen; es wurden die Meßwerte von Maxau benutzt.

Die verwendeten T-Werte stammen von der Meßstelle Plittersdorf; wenn für einen Tag kein Meßwert vorlag, wurde der entsprechende Wert von Waldshut genommen /85/. (Wegen der Differenzbildung in Gleichung (4) sind die Ergebnisse

sehr unempfindlich gegen Fehler in der T-Werten. Die T-Änderungen im Verlauf der Fließstrecke, die insbesondere von der Tagesperiodik herrühren, sind daher ohne Belang.)

Die benutzten  $w$ - und  $e_L$ -Werte sind Mittelwerte der 7,00, 14,00 und 21,00 Uhr-Meßwerte der Wetterstationen in Karlsruhe und Freiburg /86/.

Die mit häuslichen Abwässern eingebrachte Wärmemenge wurde zu  $0.5 \cdot F$  MW pro  $10^3$  Einwohner angesetzt. Für den Faktor F wurden für die 12 Monate folgende Werte angenommen /55/:

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0.96	1.05	0.9	0.7	0.3	-0.1	-0.4	-0.4	-0.25	0.0	0.4	0.9

Es wurde von 3 Mill. Einwohnern am untersuchten Rheinabschnitt ausgegangen. Für den Wärmeeintrag durch den Schiffsverkehr wurden 0.5 GW angesetzt /55/. Die Wasserkraftwerke wurden durch einen Wärmeentzug von 1.3 GW berücksichtigt. Von allen drei genannten Wärmequellen (bzw. -senken) wurde angenommen, daß sie gleichmäßig am Oberrhein verteilt sind und daß sie sich in Zukunft nicht ändern. Sie sind klein im Vergleich zu den Abwärmeeinleitungen von Kraftwerken und Industrien.

## Anhang B zu Abschnitt 4.3

### Rechenverfahren

Beim nassen Kühlturm führt die Verdunstungskühlung zu einer Emission, die relativ zur Umgebungsluft feuchtwarm ist, also eine erhöhte Enthalpie aufweist. Damit ist naheliegend, eine solche Emission im Temperatur-Enthalpie-Diagramm zu untersuchen. Eine Untersuchung dieser Art wurde erstmals in ausführlicher Form von WESSELS und WISSE /87/ für einen Kühlturm der Leistung 500 MWth und mit Radiosondendaten der Station De Bilt/Niederlande durchgeführt. Eine experimentelle Bestätigung der genannten Untersuchung steht bisher noch aus. Dennoch erschien es sinnvoll, auch in dieser Studie ein Rechenverfahren anzuwenden, das die Ausbreitung der Kühlturmmission hinsichtlich ihrer Enthalpieänderung verfolgt.

Als Eingabedaten wurden für das in dieser Untersuchung entwickelte Rechenprogramm neben Kühlturmdaten Wetterbeobachtungen der Stationen Freiburg und Feldberg verwendet. Die Beobachtungen entstammen dem Zeitraum zwischen 1961 und 1970; es wurde täglich dreimal beobachtet (Klimadaten). Für die Rechnungen wurde vorausgesetzt, daß die Beobachtungen der Station Feldberg näherungsweise die freie Atmosphäre über dem Rheintal bei Freiburg charakterisieren. Damit sollten die hier getroffenen Aussagen in erster Näherung für den Freiburger Raum bzw. das südliche Oberrheintal gültig sein. Mit Vorsicht können die Aussagen, die für das südliche Oberrheintal gefunden wurden, auf das gesamte Oberrheintal angewendet werden.

Das Rechenprogramm bereitet zuerst die aus den Wetterbeobachtungen vorliegenden Daten auf und berechnet die Enthalpien der Umgebungsluft und der Kühlturmmission. Die Kühlturmmission wird mittels der "Gauß'schen Formel" (siehe unter Ausbreitungsmodell) ausgebreitet und damit die Immission für vorgewählte Aufpunkte berechnet. Die Ausbreitungsparameter wurden einer Arbeit von KLUG /52/ entnommen. Aufpunkte, deren Enthalpie-Immission die Enthalpie der Umgebungsluft in die Sättigungsenthalpie überführen, stellen die Einhüllende der sichtbaren Fahne dar. Diese Einhüllende diente zur Ableitung der "Beschattung".

Die Überhöhung der Kühlturmmission wurde mit in der Literatur (BRIGGS /88/, HANNA /89, 90/) angegebenen Formeln berechnet; für diese Rechnungen wurde immer die neutrale Wetterlage vorausgesetzt. Die Ausdehnung der Kühlturmmündung ist durch Einführung einer virtuellen Quelle berücksichtigt worden.

Unter den genannten Voraussetzungen ergibt sich ein Rechenverfahren, dessen Genauigkeit wesentlich durch drei Annahmen beeinflusst ist:

1. Die vorgegebenen Wetterdaten beschreiben die Wetterlage mit ausreichender Genauigkeit.
2. Die Parameter für vertikale und horizontale Ausbreitung der Kühlturmmission dürfen verwendet werden.
3. Die Formeln zur Berechnung der Überhöhung liefern genügend genaue Resultate.

Punkt 1 wurde bereits erörtert. Die in Punkt 2 angesprochenen Ausbreitungsbedingungen, die vom Bedeckungsgrad und von der Windgeschwindigkeit abhängen, führen zu Ausbreitungsparametern, die auf feste Schadstoffe anwendbar sein sollen. Hierzu liegt auch eine gewisse experimentelle Bestätigung vor. In dieser Studie wird nun versucht, diese Ausbreitungsparameter auf ein Wasserdampf-Luft-Gemisch anzuwenden, wobei daran erinnert sei, daß sich das Mischungsverhältnis der Partner (nämlich der Luft und des "Schadstoffes" Wasserdampf) auch wegen des Phasenwechsels ändert. Damit liegt aber ein andersartiges Turbulenzverhalten vor, das nicht - wie im Falle der Ausbreitung fester Schadstoffe - durch experimentelle Beobachtung gestützt ist. Es handelt sich hier also um ein Verfahren, das aus Mangel an besserer Information gewählt wurde. Diese Einschränkungen gelten auch für Punkt 3.

## Anhang C zu Abschnitt 4.5

### Ausbreitungs-Modell

Die Immissionen einer Region werden durch die Emissionsstruktur und durch die meteorologischen und orographischen (die Reliefstruktur der Region beschreibenden) Gegebenheiten bestimmt. Sowohl die Emissionen als auch die meteorologischen Größen (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Stabilität der atmosphärischen Schichtung und Obergrenzen der Ausbreitung) haben statistischen Charakter. Bei den Emissionen wurde von den Jahresmittelwerten bei Dauerbetrieb einer Anlage ausgegangen. Die Meteorologie wird durch 432 Kombinationen von Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Stabilitätsklassen je eines Sommer- bzw. Winterhalbjahres beschrieben. Für jeden Emittenten wird für jeden der o.g. Fälle die Immission  $XHI(x,y,z)$  an bestimmten Aufpunkten  $x, y, z$  nach (1) errechnet, und im vorgegebenen Aufpunktraster aufaddiert /96, 100%.

$$XHI(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \cdot \exp\left(-\frac{x}{TAU}\right) \quad (1)$$

Q Quellstärke ( $\mu\text{g}/\text{sec}$ )

u Windgeschwindigkeit ( $\text{m}/\text{sec}$ )

H Emissionshöhe (m)

$\sigma_y$  Ausbreitungsparameter für die horizontale Ausbreitung senkrecht zur Windrichtung (m)

$\sigma_z$  Ausbreitungsparameter für die vertikale Ausbreitung senkrecht zur Windrichtung (m)

TAU mittlere Verweildauer des Schadstoffs (sec)

Koordinatenursprung ist jeweils der Emissionspunkt.

Der Ansatz berücksichtigt neben dem Abtransport des Schadstoffs durch Wind die turbulente Diffusion in horizontaler und vertikaler Richtung jeweils senkrecht zur Windrichtung. Es wird Reflexion des Schadstoffs am Boden angenommen. Die Umwandlung durch chemische bzw. photochemische Reaktionen wird pauschal durch die Einführung der mittleren Verweildauer der Schadstoffe berücksichtigt. Für den Umwandlungsprozeß wird in bereits verunreinigter Atmosphäre (innerhalb Ballungsräumen) eine mittlere Verweildauer von 6 h, in weniger verunreinigter Atmosphäre (zwischen Ballungsräumen) von 24 h angenommen. Diese Annahme orientiert sich an Aussagen von JUICE /91/, GARTRELL

/92/ und WEBER /93/. Diese Autoren bestätigen, daß die Verweilzeit eine Funktion der vorhandenen Schadstoffkonzentration ist. Die sich aus Formel (1) ergebenden Konzentrationen  $XHI(x, y, z)$  stellen Gleichgewichtswerte der Schadstoffkonzentrationen für den stationären Fall bei der entsprechenden Wetterlage dar. Ein zeitabhängiger Ansatz war für die vorliegende Studie aus Gründen der Datenbeschaffung für eine meteorologische Statistik mit Angaben über die Häufigkeiten der Andauerzeiten von Wetterlagen nicht möglich. Mit diesen Gleichgewichtswerten wird entsprechend der Wetterstatistik eine Immissionsstatistik erstellt. Der Beitrag jeder einzelnen Quelle wird in einem vorgegebenen festen Aufpunktraster aufaddiert.

Die Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  ändern sich mit dem Turbulenzzustand der Atmosphäre, der Zeitdauer der Mittlungsintervalle, für die die Immission abgeschätzt wird, und der Entfernung von Quelle zu Aufpunkt. In den Rechnungen wurde die Kategorieneinteilung der atmosphärischen Schichtungen nach PASQUILL /51/ verwandt. Die Ausbreitungsparameter wurden in den USA experimentell ermittelt. Eine Übertragung der Parameter auf mitteleuropäische Verhältnisse ist nur bedingt möglich. Die Rechenergebnisse lassen den Schluß zu, daß der Parametersatz in Richtung intensiverer Turbulenz verschoben werden müßte. Die Ausbreitungsparameter werden für jede Ausbreitungsstufe für mehrere Entfernungsintervalle (Quelle - Aufpunkt) näherungsweise durch Potenzfunktionen beschrieben.

Da die Windrichtungsstatistik von  $30^\circ$ -Sektoren ausgeht, ergibt die Berechnung der horizontalen Diffusion innerhalb eines  $30^\circ$ -Sektors ein ausgeprägtes Maximum auf der  $30^\circ$ -Sektor-Mittellinie und dies besonders bei stabilen Schichtungen mit kleinen  $\sigma_y$ -Werten. Für große Entfernungen vom Quellpunkt verstärkt sich die Ausprägung dieses Maximums. Um diesen Effekt zu vermeiden, ist eine feinere Unterteilung der Windrichtungssektoren notwendig. FORTAK /94/ schlägt  $2^\circ$ -Windrichtungssektoren vor. Diese führen zu sehr hohen Rechenzeiten. Im Rahmen der Aussagen, die in dieser Studie erarbeitet werden sollen, erscheint es hinreichend, zwischen den mittleren Immissionswerten der  $30^\circ$ -Sektoren zu interpolieren. Damit entfällt die Berechnung der y-Diffusion. Diese Interpolation geht von den Annahmen aus, daß die Änderung der Windverteilung innerhalb eines  $30^\circ$ -Sektors gering ist und, daß die y-Diffusion eines  $30^\circ$ -Sektors auf andere  $30^\circ$ -Sektoren vernachlässigbar ist.

Der Anteil jedes Aufpunktes wird von den beiden ihn einschließenden Sektor-  
mittellinien aus interpoliert.

Aus Formel (1) wird dann

$$XHI(x, y, z) = \frac{Q \cdot (y_4 - y_3) / y_4}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z \cdot u \cdot \frac{\pi}{6} \cdot r} \cdot \left\{ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \cdot \exp\left(-\frac{r/u}{T A u}\right) \quad (2)$$

- r Abstand Quellpunkt zu Aufpunkt (m)
- y<sub>4</sub> Abstand zwischen zwei Sektormittellinien auf dem Kreis um den  
Quellpunkt mit Radius r (m)
- y<sub>3</sub> Abstand Aufpunkt-Sektormittellinie auf dem Kreis um den Quellpunkt  
mit Radius r (m)

Die Ausbreitungsparameter  $\sigma_z$  wurden nur für Entfernungen im Bereich von  
wenigen km vom Quellpunkt experimentell gemessen. Für größere Entfernungen  
wird die Ausbreitung im wesentlichen durch die Ausbreitungsobergrenzen be-  
stimmt. Es wurde daher für größere Entfernungen von Quelle zum Aufpunkt  
Gleichverteilung des Schadstoffs zwischen Erdoberfläche und Ausbreitungs-  
obergrenze angenommen. Obergrenzen werden durch stabilere atmosphärische  
Schichten bestimmt, die sich oberhalb unstabileren befinden. Für jede Wet-  
terklasse wird eine Entfernungen  $x_H$  errechnet, die sich aus der Annahme  
ergibt, daß an der Obergrenze die Konzentration ein Zehntel des Wertes am  
Ort der Rauchfahnenachse erreicht hat. Bis zur Entfernung  $x_H$  wird mit For-  
mel (2) gerechnet, ab Entfernung  $2x_H$  wird Gleichverteilung zwischen Boden  
und Ausbreitungsobergrenze H angenommen:

$$XHI(x, y, z) = \frac{Q \cdot (y_4 - y_3) / y_4}{u \cdot H \cdot \frac{\pi}{6} \cdot r} \cdot \exp\left(-\frac{r/u}{T A u}\right) \quad (3)$$

Im Bereich von  $x_H$  bis  $2x_H$  wird eine logarithmische Interpolation der  
Grenzwerte  $XHI(x_H)$  und  $XHI(2x_H)$  durchgeführt.

Für die Ermittlung der bei Rauch- und Wärmeemission auftretenden Überhöhung  
 $h'$  wurde ein Ansatz von BRIGGS /88/ verwendet:

$$h' = 1.6 \cdot \frac{F^{1/3} \cdot X^{2/3}}{u} \quad (4)$$

x Entfernung Quellpunkt-Aufpunkt (m)

u Windgeschwindigkeit (m/sec)

$$F = \frac{g \cdot Q_H}{\pi \cdot c_p \cdot s \cdot T} = 3,7 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{\text{m}^4/\text{sec}^3}{\text{cal}/\text{sec}} \right] \cdot Q_H$$

Parameter des Auftriebsflusses

$Q_H$  Wärmeemission (cal/sec)

Formel (4) gilt für Kamine bis etwa 300 m Höhe bis zur Entfernung

$$x' = 2,16 \left[ \frac{\text{sec}^{6/5}}{\text{m}^{6/5}} \right] \cdot F^{2/5} \cdot h^{3/5}$$

h Kaminhöhe (m)

Für Entfernungen größer  $x'$  werden Näherungen verwandt und gleich der Endüberhöhung gesetzt. Formel (4) gilt für neutrale Schichtung der Atmosphäre. Gemäß einem Vorschlag von HOLLAND /95/ wurde bei labiler Schichtung  $1.2 \cdot h'$  und bei stabiler Schichtung  $0.8 \cdot h'$  gewählt.

Die Wetterstatistik geht von Windgeschwindigkeiten aus, die in 60 m Höhe gemessen wurden. Die Emissionshöhen liegen meist höher, die entsprechenden Geschwindigkeiten wurden mit einem Potenzansatz ermittelt (NESTER /47/):

$$u(z) = u(z_0) \cdot \left( \frac{z - z_1}{z_0 - z_1} \right)^p$$

$u(z_0)$  Windgeschwindigkeit in Bezugsanemometerhöhe  $z_0$

$z_1$  Nullpunktverschiebung (10 m)

p Aus dem Windprofil gewonnener Exponent

Für jede Ausbreitungsklasse ergibt sich ein typisches p, wobei p von labilen Schichtungen ( $p \sim 0.04$ ) zu stabilen hin ( $p \sim 0.5$ ) anwächst.

Die Ausbreitung innerhalb einer typischen Geländeform z.B. das Anstoßen der Schadstofffahne an Berghängen, die ein Tal begrenzen, wird durch die Annahme der Reflexion des Schadstoffs an der Begrenzung berücksichtigt. Der Ausbreitungssektor, der in unserem Fall  $30^\circ$  beträgt, wird sich ab der Entfernung, bei der die Sektorgrenzen die Talbegrenzung des Oberrheingrabens erreichen nicht mehr weiter vergrößern, sondern in konstanter Breite weiterlaufen.

Bei den Berechnungen der Immissionen aus Hausbrand- und Kleinindustrieemissionen wurde die Vielquellenverteilung mit vier Quellpunkten pro  $1 \text{ km}^2$ -Rasterfläche angenähert. Rechnungen mit mehr als 4 Quellpunkten führten zu ähnlichen Ergebnissen. Auf die Errechnung von Überhöhungen wurde für diesen Fall verzichtet. Als Emissionshöhe wurde für städtische Gebiete 20 m für Hochhausbebauung 40 m und für Gebiete mit einstöckigen Bauten 15 m angenommen.

## Anhang D zu Abschnitt 4.5

### Abschätzungen der Belastung Baden-Württembergs durch ferne Emissionsquellen am Beispiel $\text{SO}_2$

---

#### Allgemeines

Die in Abschnitt 4.5 beschriebenen detaillierten Berechnungen der  $\text{SO}_2$ -Konzentration beschränken sich sowohl hinsichtlich der Emissionsquellen als auch hinsichtlich des betrachteten Belastungsgebiets auf das nördliche Oberrheintal. Bei einer mittleren Verweilzeit in der Luft in der Größenordnung von einem oder mehreren Tagen kann das  $\text{SO}_2$  jedoch über viele hundert Kilometer verfrachtet werden. Daher erhebt sich die Frage nach der gegenseitigen Belastung zwischen der betrachteten Modellregion und ihrer näheren und ferneren Umgebung. Zur Beantwortung dieser Frage ist das oben beschriebene Rechenverfahren überfordert, da bei Luftströmungen über größere Entfernungen deutliche Änderungen der Windrichtung- und Geschwindigkeit auftreten. \*) Eine genaue Antwort auf diese Fragen würde u.a. eine Statistik der Windtrajektorien in verschiedenen Höhen erfordern, die es gegenwärtig nicht gibt. Die nachstehend kurz beschriebenen Abschätzungen haben nur orientierende Aussagen zur Belastung durch weiter entfernte Emissionsquellen zum Ziel. Sie bilden eine Grundlage der Aussagen über den Beitrag von Quellen außerhalb des nördlichen Oberrheingebietes in Abschnitt 4.5.2.

#### Vertikale Ausbreitung bei größeren Quellabständen

Mit wachsendem Quellabstand verbreiten sich luftfremde Stoffe in vertikaler Richtung immer gleichmäßiger über die zur Verfügung stehende Ausbreitungsschicht, die durch Höheninversionen nach oben begrenzt wird. Die Entfernung, ab der die vertikale Ausbreitungsschicht weitgehend gleichmäßig durchmischt ist, hängt ab von der Dicke der Ausbreitungsschicht, von der Emissionshöhe und vom Turbulenzzustand der Luft (vgl. Abschnitt 4.1), der durch Zuordnung zu einer Stabilitätsklasse charakterisiert wird. Die starke Abhängigkeit dieser Entfernung von der jeweils vorherrschenden Stabilitätsklasse verdeutlicht Abb. 54. Dort sind Abstandsfunktionen  $f(R)$  aufgetragen, die angeben, um welchen Faktor sich die jeweilige Konzentration in Bodennähe von derjenigen unterscheidet, die bei gleichmäßiger vertikaler Durchmischung

\*) Die ausgeprägte Bodenreliefstruktur betont diese Problematik in Baden-Württemberg.

herrschen würde.

Die Funktionen wurden aus Gl. (5) berechnet,

$$f_2(R) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{H}{\sigma_z(R)} \left\{ e^{-\frac{R^2}{2\sigma_z^2(R)}} + \sum_{n=0}^{\infty} \left[ e^{-\frac{(2nH-h)^2}{2\sigma_z^2(R)}} + e^{-\frac{(2nH+h)^2}{2\sigma_z^2(R)}} \right] \right\} \quad (5)$$

wobei Pasquill's /51/ Kurve für den stabilitätsklassenabhängigen Zusammenhang zwischen vertikalem Ausbreitungsparameter  $\sigma_z$  und Quellentfernung  $R$  benutzt wurden. Gl. (5) beschreibt einen Durchmischungsvorgang, der sich über wiederholte Reflexionen auseinanderdifferenzierender Konzentrationswolken an der Untergrenze der Höheninversion und am Boden vollzieht /96/.

Die Ablagerung der luftfremden Stoffe am Boden wird hier noch nicht berücksichtigt.

Abb. 54 bezieht sich auf eine (nach Abb. 16 häufig vorkommende) Dicke der Ausbreitungsschicht von  $H \approx 700$  m und eine für Großemittenten typische (effektive) Emissionshöhe von  $h = 210$  m.

Bei der am häufigsten vorkommenden Stabilitätsklasse D erreicht die sich ausbreitende Schadstofffahne mit ihren Randgebieten den Boden bei etwa 3 km, bei etwa 20 km ist das Verhältnis  $f(R)$  zwischen bodennaher Konzentration und über die Höhe der Ausbreitungsschicht gemittelter Konzentration am größten, bei Entfernungen um 300 km ist eine gleichmäßige vertikale Durchmischung erfolgt. \*) Dieser Prozeß vollzieht sich wesentlich rascher bei den labilen Klassen.

Nach Wichtung der in Abb. 54 dargestellten Einzelfunktionen mit der Häufigkeit des Auftretens der zugehörigen Wetterklassen erhält man ein Bild für die Verhältnisse im Jahresdurchschnitt (Abb. 55). Aus dieser Abbildung ist zu ersehen, daß das Verhältnis zwischen Konzentration in Bodennähe und über die vertikale Ausbreitungsschicht gemittelter Konzentration für typische Emissionshöhen von Großemittenten und für typische Inversionshöhen im Jahresdurchschnitt schon ab Entfernungen von 10 bis 20 km nicht mehr stark von 1 abweicht (Im norddeutschen Raum, wo die neutrale Klasse D noch häufiger auftritt /46/, würde sich das Bild etwas in Richtung auf eine stärkere Betonung des zu dieser Klasse gehörigen Maximums bei etwa 20 km verschieben).

\*) Die Entfernungen sind hier als möglicherweise gekrümmte Wegstrecken beim Lufttransport zu verstehen.

Die Konzentration in Bodennähe ist dann bei diesen und größeren Entfernungen angenähert umgekehrt proportional zur Höhe der vertikalen Ausbreitungsschicht. Bei der Bestimmung einer repräsentativen Inversionshöhe ist es daher sinnvoll, nicht die Inversionshöhen selbst, sondern den Kehrwert der Inversionshöhen mit der zugehörigen Häufigkeitsverteilung zu wichten. Es solches Verfahren liefert mit den in Abb. 16 dargestellten Häufigkeitsverteilungen eine (zunächst für den Karlsruher Raum) repräsentative Höhe der Ausbreitungsschicht von 650 m für das Winterhalbjahr, 920 m für das Sommerhalbjahr und 760 m im Jahresmittel. Abweichungen von diesen Verhältnissen in anderen Gegenden Deutschlands bzw. Mitteleuropas werden für den hier interessierenden Zweck einer Schätzung nicht berücksichtigt.

#### Windrichtungsänderungen während des Ausbreitungsvorganges

Während des Transports eines Luftpaketts über viele Stunden treten aus verschiedenen Gründen Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsänderungen auf: die großräumige Höhenwindverteilung bedingt im allgemeinen gekrümmte Trajektorien. Davon sind auch die Trajektorien in Bodennähe beeinflusst. Die bodennäheren Transportwege werden deutlich durch Gebirgszüge beeinflusst. Im allgemeinen hat man es sowohl mit einer höhenabhängigen Windgeschwindigkeit, als auch mit einer höhenabhängigen Windrichtung zu tun, wobei der Grad der Änderungen orts- und wetterlagenabhängig ist.

Als Hilfsgröße zur Beschreibung durchschnittlicher Änderungen des Windvektors auf den Lufttransportwegen eignet sich die Lagrange-Korrelationsfunktion  $K(\tau)$ , die angibt, wie stark der Windvektor zum Zeitpunkt  $t+\tau$  durchschnittlich mit dem Vektor zum Zeitpunkt  $t$  korreliert ist. Pasquill /97/ weist darauf hin, daß mehrere Auswertungen von Windtrajektorien, die aus Wetterkarten und Ballonverfolgungen ermittelt wurden, zu einer annähernd exponentiellen Form

$$K(\tau) \approx e^{-\tau/\tau_k} \quad (6)$$

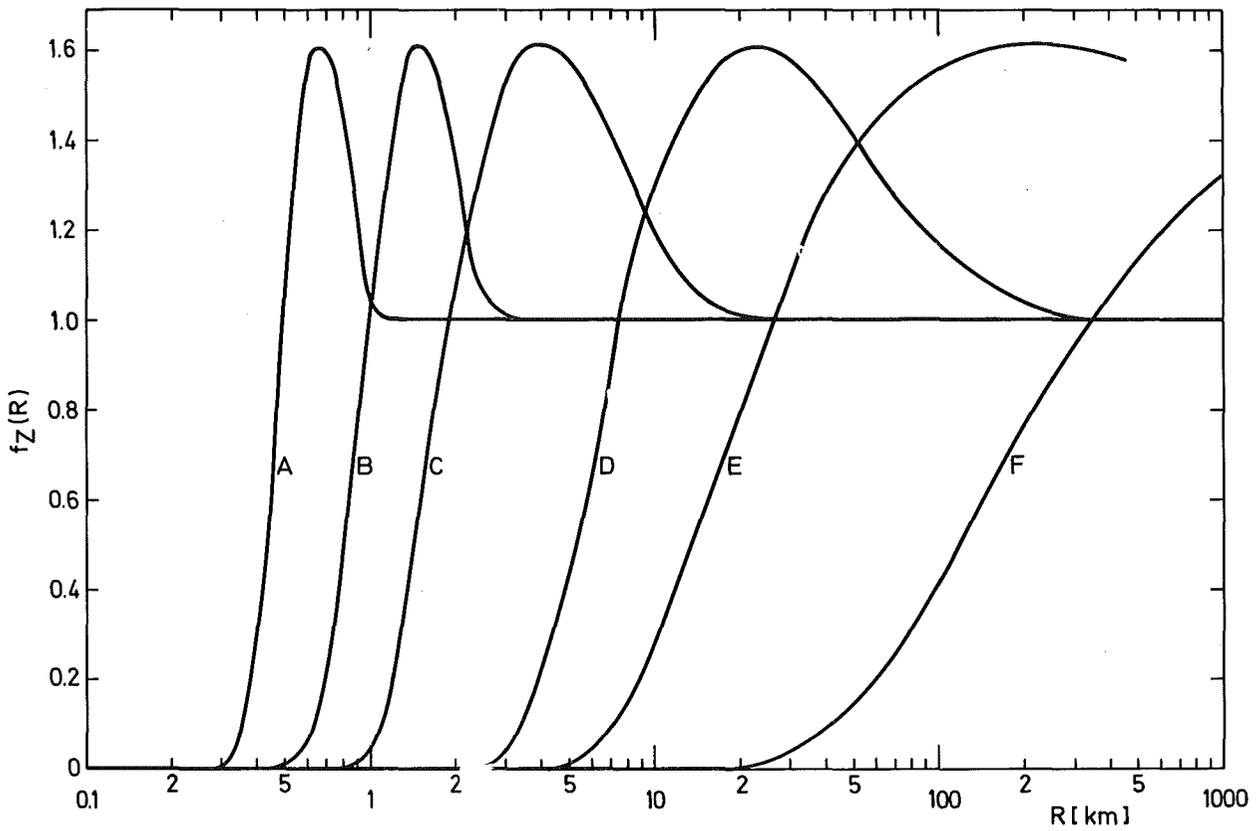


Abb. 54 Vertikaler Verteilungsfaktor als Funktion des Quellabstandes  $R$  für verschiedene Stabilitätsklassen.  $H = 700$  m,  $h = 210$  m

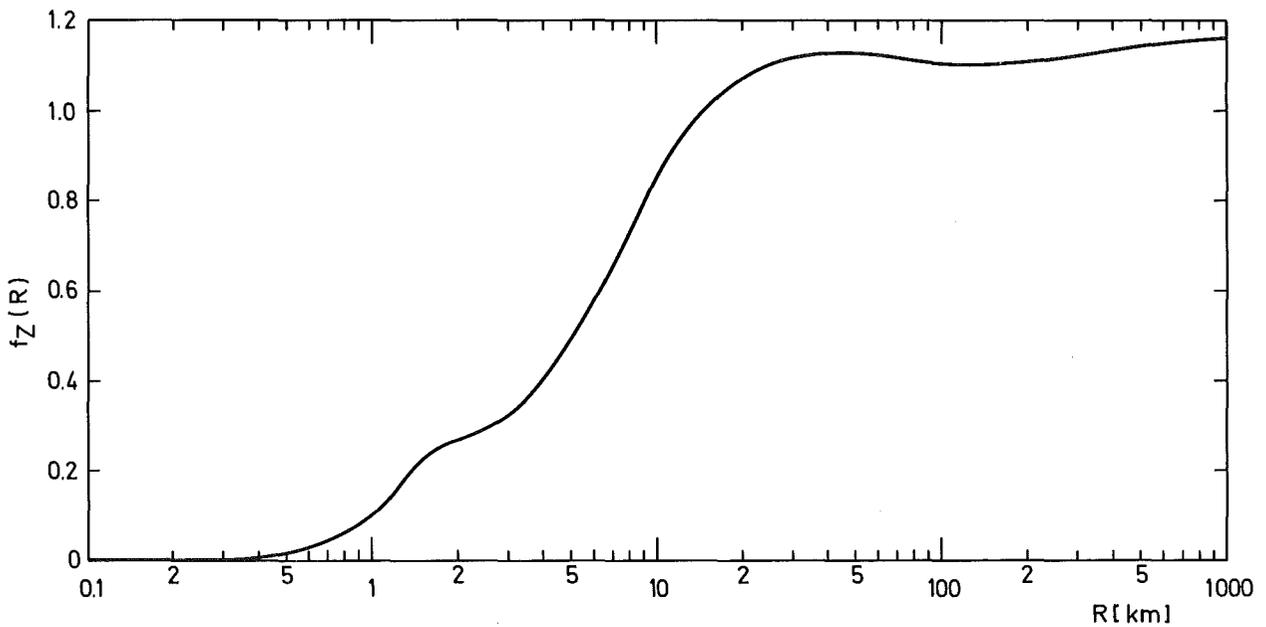


Abb. 55 Vertikaler Verteilungsfaktor  $f_z(R)$  im Jahresmittel für Ausbreitungshöhe 700 m, Emissionshöhe 210 m

führen<sup>\*)</sup>, wobei für die Zeitkonstante  $T_K$  Werte in der Größenordnung von 10 Stunden gefunden wurden.

Mit (6) läßt sich die Beziehung /97/ zwischen mittlerem quadratischem Abstand  $\bar{R}^2$  von einem Startpunkt, Transportzeit  $t$  und der Korrelationsfunktion:

$$\bar{R}^2 = 2\bar{u}^2 \int_0^t dt' \int_0^{t'} K(\tau) d\tau \quad (7)$$

konkretisieren zu

$$\bar{R}^2 \approx 2\bar{u}^2 t T_K \left[ 1 - \frac{T_K}{t} (1 - e^{-t/T_K}) \right] \quad (8)$$

$\bar{u}^2$

ist hier das mittlere Quadrat des Betrages des Windgeschwindigkeitsvektors.

Aus (8) erhält man

$$\sqrt{\bar{R}^2} = \sqrt{\bar{u}^2} \cdot t \cdot C(t) \quad (8a)$$

$$\text{mit } C(t) = \left\{ 2 \frac{T_K}{t} \left[ 1 - \frac{T_K}{t} (1 - e^{-t/T_K}) \right] \right\} \quad (8b)$$

Der Korrekturfaktor  $C(t)$  beschreibt die mit wachsender Zeit bedeutsamer werdende Abweichung von einer linearen Beziehung zwischen  $\sqrt{\bar{R}^2}$  und  $t$ .  $C(t)$  ist in Abb. 56 als Funktion von  $t/T_K$  dargestellt. Für  $t \lesssim T_K$  ist

$$C(t) \approx 1 - \frac{1}{6} \frac{t}{T_K} + \frac{1}{36} \frac{t^2}{T_K^2}$$

$\sqrt{\bar{R}^2}$  unterscheidet sich im allgemeinen von  $\bar{R}$ . Für  $t \ll T_K$  ist

$$\sqrt{\bar{R}^2} / \bar{R} = \sqrt{\bar{u}^2} / \bar{u} \quad (9)$$

Im folgenden wird die Beziehung (9) im Sinne einer Approximation auch für größere Ausbreitungszeiten verwendet:

$$\bar{R} \approx \bar{u} t \cdot C(t) \quad (9a)$$

<sup>\*)</sup> Von gewissen Unterschieden zwischen zonalem und meridionalem Transport kann im Rahmen dieser Abschätzungen abgesehen werden.

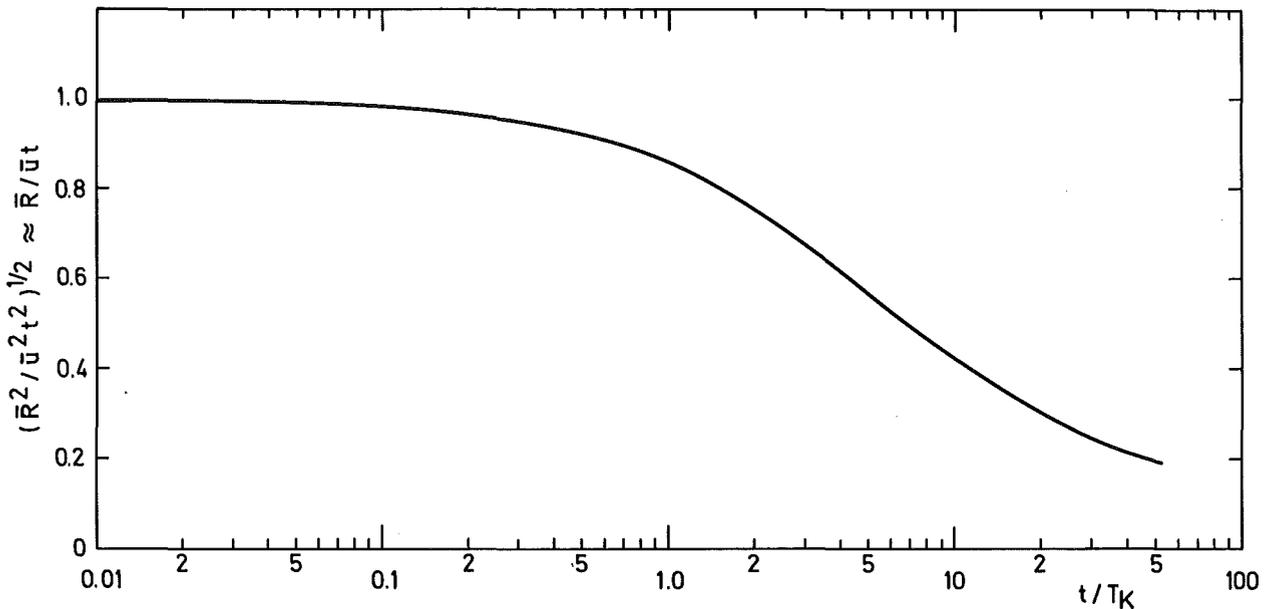


Abb. 56 Abstands - Korrekturkurve für Windrichtungsänderungen  $T_K = 10$  h

Hierdurch einfließende Fehler dürften gegenwärtig in der Unsicherheit für  $C(t)$  untergehen. Es wird ferner von der zu erwartenden Abhängigkeit des Korrekturfaktors  $C(t)$  von der Startrichtung abgesehen. Für Ausbreitungszeiten in der Größenordnung der Andauer einer Großwetterlage ( $\approx 1$  Woche) oder darüber ist das nicht gerechtfertigt, da dann die Vorzugsrichtungen des Windes die Beziehung (9a) modifizieren. Bei der Anwendung von (9a) interessieren jedoch Ausbreitungszeiten in der Größenordnung der mittleren Verweildauer von Schadstoffen (Größenordnung 1 Tag für  $SO_2$ ).

Bisher ist nur auf den Einfluß großräumiger Windrichtungsänderungen auf die Transportwege eingegangen worden. Die hierfür maßgebende Beziehung (8b) stützt sich vorwiegend auf Messungen in Höhen von einigen km.

Für Höhen von einigen hundert Metern, in denen die Ausbreitung luftfremder Stoffe von Großemittenten vorwiegend erfolgt, werden zusätzliche Richtungsänderungen durch die Reliefstruktur des Bodens erzwungen, die im einzelnen schwer zu überblicken sind. Eine einfache Abschätzung der Verhältnisse im Hinblick auf das Verhältnis zwischen Ausbreitungszeit und Quellabstand läßt sich auf folgende Argumentation stützen, die zunächst von den oben angesprochenen großräumigen Richtungsänderungen des Windes in der freien Atmosphäre absieht:

Richtungsdifferenzen von über  $90^\circ$  zwischen der Luftströmung in Tälern und der freien Atmosphäre darüber sind selten und dauern gewöhnlich nicht lange an, wenn sie vorkommen. Im allgemeinen liegen sie zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ . Bei gegebenem Abstand ist die durch Gebirgszüge erzwungene Weglänge umso größer, je größer die durchschnittlichen erzwungenen Richtungsänderungen sind. In extremen Fällen wird dann der erreichte Quellabstand durch  $\bar{R} = \bar{u}_t / \sqrt{2}$  gegeben sein (Richtungs- und Windstärkeänderungen in der freien Atmosphäre werden nach obiger Abschätzung gesondert berücksichtigt. Von lokalen Zirkulationen mit Richtungsdifferenzen über  $90^\circ$  wird hier abgesehen). Abwesenheit von Gebirgszügen würde der Beziehung  $\bar{R} = \bar{u}_t$  entsprechen. Eine mittlere Beziehung  $\bar{R} = (1 + \frac{1}{\sqrt{2}}) \frac{1}{2} \bar{u}_t \approx 0,85 \bar{u}_t$  wird danach nicht besonders falsch sein, wenn man Entfernungen betrachtet, die größer als die Längsausdehnung von Gebirgszügen sind. (Hier interessieren insbesondere Mittelgebirgszüge mit Längsausdehnungen in der Größenordnung 100 km).

Der so für den Spezialfall fehlender Windrichtungsänderungen in größeren Höhen abgeschätzte Korrekturfaktor 0.85 wird im folgenden auch als Näherung für den allgemeineren Fall verwendet; d.h. es wird nicht (9a) sondern

$$\bar{R} \approx 0.85 \bar{u}_t \cdot C(t) \quad (9b)$$

benutzt. Natürlich ist dieser Faktor nicht für kleine Quellabstände gerechtfertigt. Es interessieren hier jedoch die weiträumigen Verhältnisse.

Bisher wurde stillschweigend davon ausgegangen, daß sich eine für die Ausbreitungsschicht repräsentative Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$  angeben läßt. Innerhalb dieser Schicht nimmt die Windstärke im Jahresmittel mit der Höhe zunächst rasch, dann schwächer zu. Nach fortgeschrittener vertikaler Durchmischung ist es sinnvoll, von der über der Ausbreitungsschicht gemittelten Windgeschwindigkeit auszugehen, die sich jedoch während des Transports ändert. Als Schätzwert wird im folgenden  $\bar{u} = 6.5$  m/s benutzt. Dies ist ungefähr die mittlere Windgeschwindigkeit, die im Kernforschungszentrum Karlsruhe in 150 m Höhe gemessen wurde / 47/.

#### Beziehung zwischen Bodenkonzentration und Quellabstand für eine Einzelquelle

Die Fremdstoffkonzentration beim mittleren Quellabstand  $R$  läßt sich näherungsweise aus einer Bilanzgleichung (10) berechnen, die für isotrope Ausbreitungsbedingungen gilt:

$$\overline{2\pi R u_R \int_0^H X(R, z) dz} \approx 2\pi \bar{R} \bar{u}_R \int_0^H X(\bar{R}, z) dz = Q e^{-\lambda t} \quad (10)$$

Hier ist  $u_R$  die Geschwindigkeitskomponente in R-Richtung,  $X(\bar{R}, z)$  ist die Stoffkonzentration in der Höhe  $z$  beim zur Reisezeit  $t$  gehörigen mittleren Abstand  $\bar{R}$ ,  $Q$  ist die Emissionsquellstärke und  $\frac{1}{\lambda}$  ist die mittlere Verweilzeit des Fremdstoffs in der Luft. Auf der linken Seite von (10) steht der mittlere Fremdstoffstrom durch die Oberfläche  $2\pi\bar{R}H$ , der bis auf den inzwischen aus der Ausbreitungsschicht entfernten Anteil der als zeitlich konstant angenommenen Quellstärke entsprechen muß.

Der Faktor  $2\bar{R}\bar{u}_R = d\bar{R}^2/dt$  läßt sich aus (8) berechnen, woraus man auch  $\bar{u}_R = \bar{R}u_R/\bar{R}$  erhält.

Die mittlere Konzentration in Bodennähe läßt sich über den oben beschriebenen vertikalen Verteilungsfaktor

$$f_z(\bar{R}) = \frac{X(\bar{R}, 0)}{\frac{1}{H} \int_0^H X(\bar{R}, z) dz} \quad (11)$$

berechnen, woraus man mit (10)

$$\frac{X(\bar{R}, 0)}{Q} = \frac{f_z(\bar{R}) e^{-\lambda t}}{2\pi \bar{R} \bar{u}_R H} \quad (12)$$

erhält. Dieses Verhältnis ist in Abb. 57 für eine mittlere Verweilzeit  $1/\lambda = 24$  h als Funktion von  $R$  dargestellt.

Fremdstoffkonzentration durch flächenhaft verteilte Quellen in der Umgebung

Abb. 57 demonstriert den raschen Abfall der mittleren Fremdstoffkonzentration ab etwa 15 km Entfernung von einer Einzelquelle. Bei Entfernungen zwischen 50 und 100 km beträgt die zugehörige mittlere Konzentration nur noch etwa 10 % des Maximalwertes bei einigen Kilometern. Allerdings hält sich der größte Teil der Fremdstoffe, die von einer einzelnen Quelle emittiert werden in Gebieten auf, die mehr als 100 km von der Quelle entfernt sind; jedenfalls wenn die mittlere Verweildauer in der Luft in der Größenordnung

von einem Tag (wie bei  $\text{SO}_2$ ) oder mehr liegt. In diesen Gebieten wird dann auch (bei annähernd konstanter Bevölkerungsdichte) der größte Teil der Fremdstoffe eingeatmet, die überhaupt eingeatmet werden.

Im folgenden sollen aus den Abschätzungen für eine Einzelquelle Schlüsse auf die Konzentration an einem gegebenen Ort durch sehr viele, annähernd flächenhaft verteilte Einzelquellen in der Umgebung des Ortes gezogen werden. Die "Verschmierung" der einzelnen Punktquellen zu Flächenquellen entsprechender Gesamtstärke ist umso mehr vertretbar, je weiter entfernt sich die Quellen vom betrachteten Ort befinden.

Liegt in einem Abstandsgebiet zwischen  $R_0$  und  $R_1$  eine konstante Flächenquellstärke  $q$  vor und sind die Windverhältnisse im zeitlichen Mittel isotrop, so läßt sich die zugehörige Konzentration am betrachteten Ort durch Integration von (12) berechnen, wobei Quellpunkt und Aufpunkt in (12) vertauscht gedacht werden.

$$\bar{X}_{R_0, R_1} = \int_{R_0}^{R_1} d\bar{R} 2\pi \bar{R} q \frac{X(\bar{R}, 0)}{Q} = \frac{q}{H} \int_{R_0}^{R_1} d\bar{R} \frac{f_2(\bar{R}) e^{-\lambda t}}{\bar{u}_R} \quad (13)$$

Die Auswertung (13) liefert für das Verhältnis  $X_{0,R_1}/q$  Ergebnisse, die als Funktion von  $R_1$  in Abb. 58 dargestellt sind.

In der BRD wurden 1970 etwa  $3.7 \cdot 10^6$  t  $\text{SO}_2$  emittiert. Das entspricht einer mittleren Quelldichte  $Q = 1.7 \text{ kg}/(\text{km}^2 \text{ h})$ . Läge eine solche Quelldichte überall in einem Umkreis von 600 km um einen Ort in Mitteleuropa vor, so würde sie nach Abb. 58 zu einer mittleren Jahreskonzentration von  $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$  führen. In Baden-Württemberg ist eine geringere Konzentration deshalb zu erwarten, weil die Quelldichte westlich und südlich des Landes (über größere Gebiete Frankreichs und der Alpen gemittelt) geringer als im Bundesdurchschnitt ist.

Abschätzungen hierfür erhält man durch getrennte Anwendungen von (13) für verschiedene Richtungssektoren  $j$ , aus denen die luftfremden Stoffe in das betrachtete Gebiet transportiert werden:

$$\bar{X}_{R_0, R_1} = \sum_j p_j \frac{q_j}{H} \int_{R_0}^{R_1} d\bar{R} \frac{f_2(\bar{R}) e^{-\lambda t}}{\bar{u}_R} \quad (14)$$

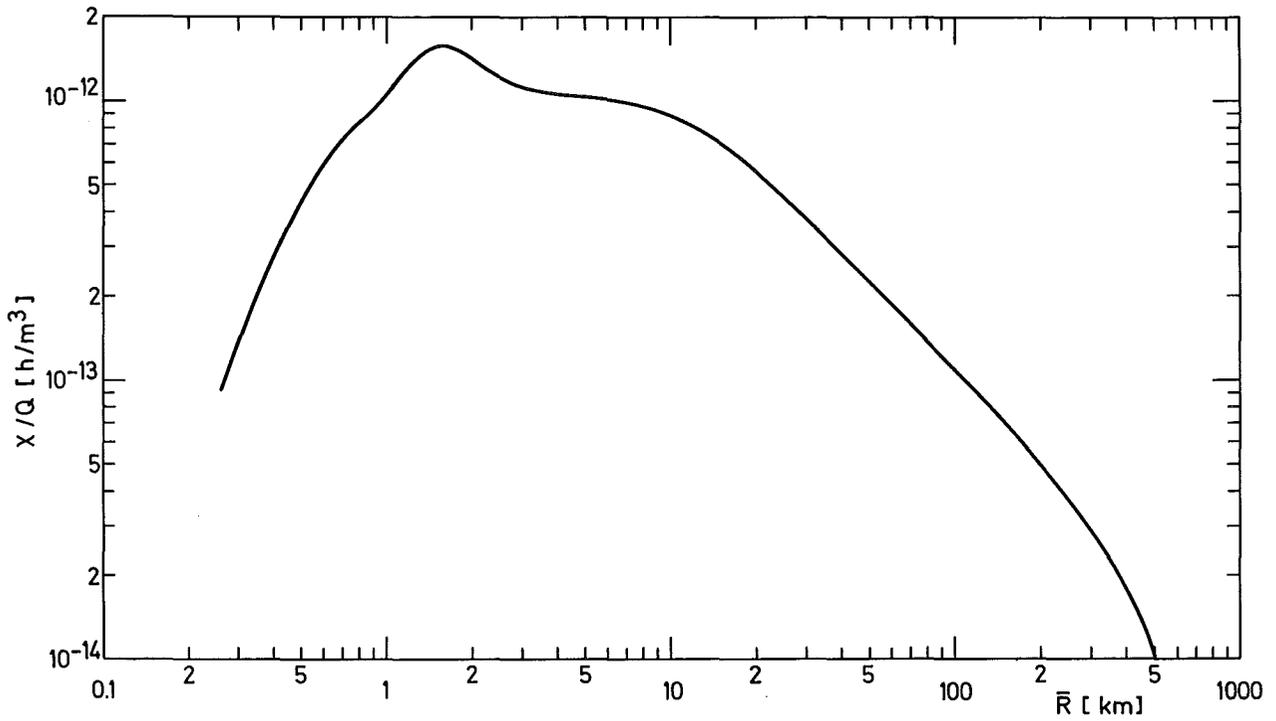


Abb. 57 Mittlere Bodenkonzentration als Funktion des Abstandes von einer Punktquelle (normiert auf die Quellstärke 1)

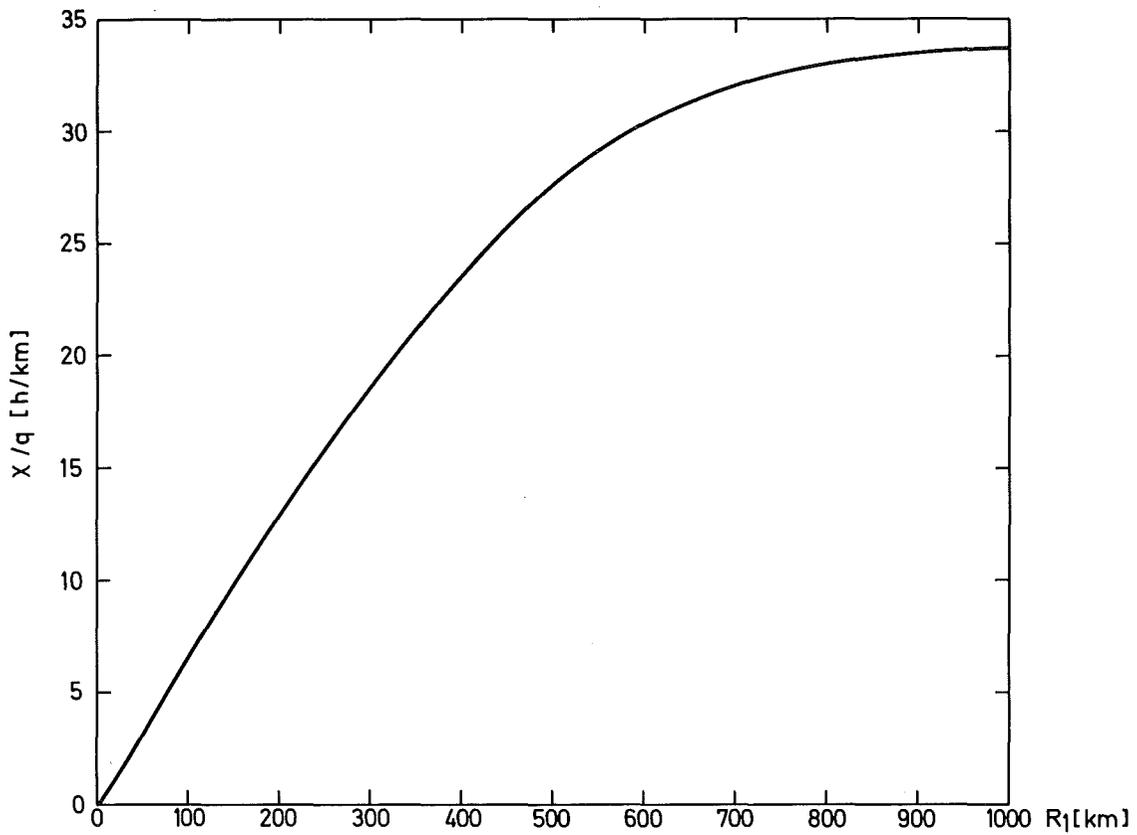


Abb. 58 Fremdstoffkonzentration  $\chi$  als Funktion des Abstandes  $R_1$  bis zu dem eine konstante Flächenquelle  $q$  vorliegt.  
 $1/\lambda = 24$  h

In (14) ist  $q_j$  die mittlere Quelldichte im Richtungssektor  $j$ ,  $p_j$  ist die Wahrscheinlichkeit, mit der der Lufttransport aus diesem Sektor erfolgt, und  $R_j$  ist der Abstand im Sektor  $j$ , bis zu dem nennenswerte Quellen vorliegen.

Relativ grobe Schätzungen für diese Daten für das Oberrheintal sind in Tab. 36 zusammengestellt.

Tab. 36 Geschätzte Quelldichten

Richtungssektor	$q_j$ (kg/km <sup>2</sup> h)	$p_j$	$R_j$ (km)
Nord	2.0	0.17	550
Ost	1.5	0.17	800
Süd	0.5	0.20	600
West	0.7	0.46	700

Die Quelldichten wurden, ausgehend vom Mittelwert für die BRD, über die Bevölkerungsdichte abgeschätzt, die  $p_j$ -Werte aus der Richtungsverteilung des Windes in 1500 m Höhe bei Wiesbaden /98/.

Da die mittlere Verweildauer  $1/\lambda$  des SO<sub>2</sub> in der Luft sehr ungenau bekannt ist, wurde (14) für drei Werte von  $1/\lambda$  ausgewertet (jeweils für  $R_0 = 50$  km). Die Ergebnisse zeigt Tab. 37.

Tab. 37 Anteile ferner Quellen zur Schadstoffkonzentration bei verschiedener Verweildauer

Richtungssektor	$\bar{x}$ (µg/m <sup>3</sup> )		
	$1/\lambda = 24$ h	$1/\lambda = 18$ h	$1/\lambda = 12$ h
Nord	8.9	6.1	4.8
Ost	7.6	5.6	3.6
Süd	2.7	2.1	1.4
West	9.3	6.9	4.6
Summe	28.5	20.7	14.4

Die Verweildauer des  $\text{SO}_2$  hängt von atmosphärischen Bedingungen, von Bewuchs oder Bebauung der Bodenoberfläche und von Fremdstoffkonzentrationen in der Luft ab. Nordø/99/ schätzt eine Relation zwischen  $\lambda$  und der  $\text{SO}_2$ -Konzentration nach Gl. (15):

$$\frac{1}{\lambda} \approx \frac{278 \text{ h}}{1 + \frac{1}{4} X [\mu\text{g}/\text{m}^3]} \quad (15)$$

Danach gehören die  $1/\lambda$ -Werte 24 h, 18 h, 12 h zu mittleren  $\text{SO}_2$ -Konzentrationen von 42, 58 und 88  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Das ist ein Bereich, in dem die mittlere  $\text{SO}_2$ -Konzentration in großen Teilen Mitteleuropas liegen dürfte.

Tab. 37 legt nahe, für das Oberrheingebiet rund 20  $\mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  zu schätzen, die von fernen Quellen (Abstand > 50 km) herrühren. In Abschnitt 4.5.2 wird diese Zahl den Beiträgen aus näher gelegenen Quellen am Beispiel Karlsruhe und Eggenstein gegenübergestellt.

Literatur

- /1/ Energiebilanz Baden-Württemberg 1971  
Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und  
Verkehr, Baden-Württemberg (1972)
- /2/ K.F. Ebersbach  
Versuch einer Nutzenergiebilanz der BRD  
Brennstoff-Wärme-Kraft 23 (1971), Nr. 8, S. 388
- /3/ Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland  
für das Jahr 1971  
herausgegeben von der Arbeitsgemeinschaft  
Energiebilanzen  
VWEW-Verlag, Frankfurt (1972)
- /4/ Energieprogramm für Baden-Württemberg  
Entwurf des Wirtschaftsministeriums (Stand  
22. Februar 1972)  
Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (1972)
- /5/ Statistik der Elektrizitätswerke in Baden-  
Württemberg für das Jahr 1971  
Verband der Elektrizitätswerke Baden-Württemberg e.V.  
(1972)
- /6/ Die Elektrizitätswirtschaft in der Bundesrepublik  
Deutschland im Jahre 1971 - Statistischer Bericht  
des Referats Elektrizitätswirtschaft im Bundes-  
ministerium für Wirtschaft und Finanzen  
Elektrizitätswirtschaft Jg. 71 (1972), Heft 20
- /7/ VDEW-Statistik für das Jahr 1971  
VWEW-Verlag, Frankfurt (1972)
- /8/ U. Dolinski, H.J. Ziesing  
Die regionalen Entwicklungstendenzen des  
Energieverbrauchs in Baden-Württemberg und  
seinen Regierungsbezirken bis 1980  
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung,  
Sonderheft 87 (1970)  
Verlag Duncker + Humblot, Berlin

und

H. Kummer  
Entwicklungstendenzen des Energieverbrauchs  
in Baden-Württemberg bis 1985 (Eine  
Überprüfung und Fortschreibung der Untersuchung  
von 1970)  
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung,  
Berlin (Februar 1972)

- /9/ H. Büker, P. Jansen, W. Sassin, W. Schikarski  
Kernenergie und Umwelt  
Studie im Auftrag des Bundesministeriums für  
Forschung und Technologie  
Jül-929-HT-WT, KFK-1366 (März 1973)
- /10/ G. Grathwohl  
Erzeugung und Freisetzung von Tritium durch  
Reaktoren und Wiederaufbereitungsanlagen und die  
voraussichtliche radiologische Belastung bis zum  
Jahre 2000  
Externer Bericht KFK-4/73-36 (1973)
- /11/ F. Hilbert  
Erzeugung und Freisetzung von radioaktiven  
Edelgasen durch Kernreaktoren und Wiederauf-  
bereitungsanlagen und die voraussichtliche  
radiologische Belastung bis zum Jahr 2000  
(KFK Bericht in Vorbereitung)
- /12/ F. Porz  
Erzeugung und Freisetzung von radioaktiven Jod-  
Isotopen durch Kernreaktoren und Wiederaufbe-  
reitungsanlagen und die voraussichtliche radio-  
logische Belastung bis zum Jahr 2000  
KFK-1912 (1973)
- /13/ Environmental Survey of the Nuclear Fuel Cycle  
USAEC, Directorate of Licensing, Fuels and  
Materials (November 1972)
- /14/ W. Brocke, H. Schade  
Die Luftverunreinigung durch Abgase aus der  
Verbrennung von Brennstoffen in stationären  
Anlagen der Bundesrepublik Deutschland  
Teil I und II  
Staub-Reinhaltung Luft 31 (1971), S. 473 und  
32 (1972), S. 20
- /15/ W. Brocke  
Schwerpunkte der SO<sub>2</sub>-Emissionen  
VDI-Berichte Nr. 149 (1970)
- /16/ Die Emission von Schwefelverbindungen  
VDI-Berichte Nr. 186 (1972)
- /17/ Energiewirtschaft und Umweltbeeinflussung in  
der Bundesrepublik Deutschland  
Forschungsstelle für Energiewirtschaft,  
München (September 1972)
- /18/ M. Rudolph  
Vergleich verschiedener Raumheizungssysteme  
bezüglich Primärenergieaufwand und Schadstoff-  
emissionen im Jahre 1980  
Brennstoff-Wärme-Kraft 25 (1973), S. 105

- /19/ ENIS, Energiesektorales Informationssystem  
2. Zwischenbericht (Januar 1973)  
Zentrum Berlin für Zukunftsforschung
- /20/ J. Meinecke  
Untersuchung der Umweltbelastung durch Energie-  
erzeugung in Nordrhein-Westfalen  
Diplomarbeit an der Rheinisch-Westfälischen  
Technischen Hochschule Aachen (Januar 1972)
- /21/ Emissionskataster Köln  
Herausgegeben vom Minister für Arbeit, Gesundheit  
und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen (1972)
- /22/ Report and Conclusions of the Joint ad-hoc Group  
on Air Pollution from Fuel Combustion in Stationary  
Sources  
OECD, Paris (1973)
- /23/ E. Robinson, R.C. Robbins  
Sources, Abundance and Fate of Gaseous Air  
Pollutants  
SRI-Project PR-6755 (April 1971)
- /24/ W. Jacobi  
Die Grenzen der Strahlenbelastung  
in: Allgemeine Strahlenbelastung des modernen  
Menschen, Informationstagung der Schweizerischen  
Vereinigung für Atomenergie (SVA) in Zusammenarbeit  
mit dem Fachverband für Strahlenschutz e.V.,  
Zürich-Oerlikon (23. März 1973)
- /25/ O. Hug, K.R. Trott  
Die Wirkung ionisierender Strahlen auf den Menschen  
in: Kernenergie - Nutzen und Risiko  
Deutsche Verlags-Anstalt,  
Stuttgart (1970)
- /26/ F. Alder  
Sicherheit und Risiko von Kernkraftwerken  
Informationstagung der Schweizerischen Vereinigung  
für Atomenergie (SVA) über die Sicherheit von Kern-  
kraftwerken und die Probleme der Radioaktivität,  
Bern (4.-6. November 1970)
- /27/ H. Fritz-Niggli  
Strahlenwirkungen auf biologische Objekte,  
insbesondere die Menschen  
Informationstagung der Schweizerischen Vereinigung  
für Atomenergie (SVA) über die Sicherheit von Kern-  
kraftwerken und die Probleme der Radioaktivität,  
Bern (4.-6. November 1970)

- /28/ K. Aurand  
Natürliche und künstliche radioaktive Stoffe in  
der Biosphäre  
in: Kernenergie - Nutzen und Risiko  
Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart (1970)
- /29/ Protection against Ionizing Radiation from External  
Sources  
International Commission on Radiological Protection,  
London (1970)
- /30/ The Assessment of Internal Contamination Resulting  
from Recurrent or Prolonged Uptakes  
International Commission on Radiological Protection,  
London (1971)
- /31/ H.-W. Schlipkötter et al.  
Tierexperimentelle Befunde zur Kombinationswirkung  
Proc. Internat. Clean Air Congress,  
Düsseldorf (1973)
- /32/ R. Rylander, R. Bergström  
Particles and SO<sub>2</sub>-Synergistic Effects for  
Pulmonary Damage<sup>2</sup>  
Proc. Internat. Clean Air Congress,  
Düsseldorf (1973)
- /33/ L.J. Brassler et al.  
Sulfur Dioxide - To What Level is it Acceptable?  
Research Inst. for Public Health Engineering,  
Delft (1967)
- /34/ L. Greenburg et al.  
Intermittent Air Pollution Episode in New York City  
Public Health Reports 78 (1963)
- /35/ M. Clifton et al.  
Morbidity and Mortality from Bronchitis in  
Sheffield in Four Periods of Severe Air Pollution  
Proc. Internat. Clean Air Conference,  
London (1959)
- /36/ C. Starr, M. Greenfield  
Public Health Risks of Thermal Power Plants  
UCLA-ENG-7242 (1972)
- /37/ L.B. Lave, E.P. Seskin  
Air Pollution and Human Health  
Science, Vol. 169, No. 3947 (1970)
- /38/ A.P. Altshuller  
Atmospheric Sulfur Dioxide and Sulfate -  
Distribution of Concentration at Urban and  
Nonurban Sites in United States  
Environmental Science and Techn., Vol. 7, No. 8 (1973)

- /39/ Air Quality Criteria for Sulfur Oxides  
U.S. Department of Health, Education, and Welfare,  
AP-50 (1969)
- /40/ A.S. Fairbairn, D.D. Reid  
Air Pollution and Other Local Factors in  
Respiratory Disease  
Brit. J. Prev. Soc. Med., Vol. 12 (1958)
- /41/ Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft  
Gem. Min. Bl. 15 (1964), Nr. 26
- /42/ Das Energieprogramm der Bundesregierung  
Der Bundesminister für Wirtschaft,  
Bonn (26. September 1973)
- /43/ H.J. Löblich  
Mineralölprodukte und Umweltschutz  
ESSO A.G., Presse- und Informationsabteilung,  
Hamburg (März 1973)
- /44/ J. Kayser  
Regionalisierte Umweltbelastung durch Energie-  
erzeugung und Energieverbrauch in Baden-Württemberg  
und angrenzenden Regionen von Hessen und Rhein-  
land-Pfalz  
Bonnenberg + Drescher Ingenieurgesellschaft m.b.H.,  
Jülich (Dezember 1973)
- /45/ Deutsches Meteorologisches Jahrbuch  
Deutscher Wetterdienst,  
Offenbach/Main (1960 - 1969)
- /46/ G. Manier  
Untersuchungen über meteorologische Einflüsse  
auf die Ausbreitung von Schadgasen  
Berichte DWD, Nr. 124 (1971)
- /47/ K. Nester  
Statistische Auswertungen der Windmessungen  
im Kernforschungszentrum Karlsruhe aus den  
Jahren 1968/69  
KFK-1606 (1972)
- /48/ M. Kleiss  
Inversionen in der unteren Troposphäre im Raum  
Karlsruhe - Stuttgart  
Berichte DWD, Nr. 90 (1963)
- /49/ M. Diem  
Gutachten zum Kernkraftwerk Rheinschanzinsel  
Philippsburg  
Meteorologische Unterlagen (1970)
- /50/ Deutscher Wetterdienst  
Private Mitteilungen  
Offenbach/Main (1973)

- /51/ F. Pasquill  
The Estimation of the Dispersion of Windborne  
Material  
Met. Mag. 90 (1961), p. 33-49
- /52/ W. Klug  
Ein Verfahren zur Bestimmung der Ausbreitungs-  
bedingungen aus synoptischen Beobachtungen  
Staub-Reinhaltung-Luft 29 (1969), S. 143-147
- /53/ K. Nester  
persönliche Mitteilungen  
Kernforschungszentrum Karlsruhe (1973)
- /54/ Klima-Atlas von Baden-Württemberg  
Deutscher Wetterdienst,  
Bad Kissingen (1953)
- /55/ Studie über die thermische Belastbarkeit  
des Rheins - im Auftrag der RWE  
MOTOR-COLUMBUS Ingenieurunternehmen AG,  
Baden, Schweiz (Dezember 1971)
- /56/ Ministerkonferenz über die Verunreinigung des  
Rheins, 25. und 26. Oktober 1972, Den Haag  
Abschlusskommunique  
GWf - Wasser/Abwasser 114 (1973), S. 197-198
- /57/ Optimierungsstudie für das Kraftwerk  
Breisach im Auftrag des Badenwerks  
MOTOR-COLUMBUS Ingenieuruntersuchung AG,  
Baden, Schweiz
- /58/ M. Diem  
Gutachten "Nebelbildung bei Einleitung von  
erwärmtem Kühlwasser in den Rhein"  
Karlsruhe (Januar 1972)
- /59/ S. Uhlig  
Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen  
Daten  
Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes,  
Nr. 6 (Januar 1954)
- /60/ H. Stehfest  
Modelltheoretische Untersuchungen zur  
Selbstreinigung von Fließgewässern  
KFK-1654 UF (August 1973)
- /61/ Bericht über den heutigen Stand der Kenntnisse und  
die entwickelte Arbeitsmethode zur Abschätzung der  
meteorologischen Auswirkungen von Kühltürmen  
Eidgenössische Kühlturmkommission (1972)

- /62/ K. Aurand, M. Ruf, W. Schikarski, J. Schwibach  
Environmental Exposure by Radionuclides in Gaseous  
and Liquid Effluents from Nuclear Power Plants in  
the Federal Republic of Germany  
Fourth United Nations International Conference on  
the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva (1971),  
P/339
- /63/ J. Schwibach  
Strahlenschutzrichtwerte für die Genehmigung der  
Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen  
Anlagen  
aus: 7. IRS Fachgespräch, Köln 1971, Bericht IRS-T-23  
(1972)
- /64/ Neue Kernkraftwerke in Europa  
Atomwirtschaft-Atomtechnik 18 (1973), S. 127-142
- /65/ Neue Kernkraftwerke in Deutschland  
Atomwirtschaft-Atomtechnik 18 (1973), S. 179-190
- /66/ G. Guck  
Standorte für Kernkraftwerke  
Atomwirtschaft-Atomtechnik 18 (1973), S. 396-391
- /67/ H. Kiefer, W. Koelzer  
ASS-Jahresbericht 1972  
KFK-1818 (1973)
- /68/ W. Hild  
Beseitigung tritiumhaltiger Abwässer durch Einpressen  
in poröse Schichten des tiefen Untergrundes  
aus: Projekt Nukleare Sicherheit,  
1. Halbjahresbericht 1973  
KFK-1859 (1973)
- /69/ W. Hübschmann, D. Papadopoulos  
Die maximal zu erwartende Strahlenbelastung der  
Umgebung des Kernforschungszentrums Karlsruhe im  
Jahr 1972  
KFK-1608 (1972)
- /70/ Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Rheingebiet 1968  
Landesamt für Gewässerkunde, Mainz (1973)
- /71/ W. Comper  
Berechnung der Dosisfaktoren radiologisch wichtiger  
Nuklide  
KFK-1615 (1972)
- /72/ A. Bayer  
Die altersabhängigen Ingestions-Dosisfaktoren  $g_G$  und  
 $g_{G1}$  von J-131  
KFK-1582 (1972)

siehe auch:

- A. Bayer  
Dose and Risk Considerations for the Release of  
I-131 at Special Sites  
Bericht IAEA/SM-169/8 (1973)
- /73/ A. Bayer  
Die ortsabhängige spezifische Dosis d von J-131  
KFK-1661 (1972)
- /74/ Hauptbericht 1971 über die Fernwärmeversorgung im  
Bundesgebiet einschließlich Berlin (West)  
Fernwärme International 1 (1972), Heft 3
- /75/ Statistik von Baden-Württemberg  
Die Industrie 1971  
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg,  
Stuttgart (1972)
- /76/ Verband der Deutschen Gas- und Wasserwerke e.V.,  
93. Gasstatistik, Berichtsjahr 1971  
ZfGW-Verlag, Frankfurt (1972)
- /77/ Statistische Berichte des Statistischen Landesamtes  
Rheinland-Pfalz  
Die Industrie im Jahre 1972  
E I 1-j/72 Bad Ems (7. März 1973)
- /78/ Emissionskataster Köln  
siehe /21/, Bild 19, S. 52
- /79/ Energie und Umweltbeeinflussung in der  
Bundesrepublik Deutschland  
siehe /17/, Bild 17, S. 61
- /80/ Schwefeldioxid Immissions-Messungen 1972  
Landesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin,  
Immissions- und Strahlenschutz, Karlsruhe  
Bericht Nr. 13 (1973)
- /81/ E. Lahmann, G. Sankowsky, W. Fett  
Gutachten über die lufthygienischen Auswirkungen  
der geplanten Erweiterung der Raffinerie der  
Oberrheinischen Mineralölwerke in Karlsruhe  
Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene  
des Bundesgesundheitsamtes, Berlin-Dahlem (1972)
- /82/ Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastungen  
von Gewässern  
Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA),  
Mainz (Oktober 1971)
- /83/ P. Jansen, W. Schikarski, H. Stehfest  
Beitrag zur Analyse der zulässigen Kraftwerksbelegung  
des Rheins im Hinblick auf die thermische Belastung  
KFK-1511 (Dezember 1971)

- /84/ Fleig  
persönliche Mitteilung  
Landesstelle für Gewässerkunde und wasserwirtschaftliche  
Planung, Karlsruhe (1973)
- /85/ Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch  
Abflußjahre 1961 - 1971  
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- /86/ Wetterdaten der Stationen Karlsruhe, Freiburg, Feldberg  
und Wildbad (auf Magnetband) 1961 - 70  
Deutscher Wetterdienst,  
Offenbach/Main (1973)
- /87/ H.R.A. Wessels, J.A. Wisse  
A Method for Calculating the Size of Cooling Tower  
Plumes  
Atmospheric Environment 5 (1971) p. 143-150
- /88/ G.A. Briggs  
Plume rise  
U.S. Atomic Energy Commission (1969)
- /89/ S.R. Hanna  
Meteorological Effects of Cooling Tower Plumes  
Talk presented at the Cooling Tower Institute Winter  
Meeting, Houston (1971)
- /90/ S.R. Hanna  
Cooling Tower Plume Rise and Condensation  
Proc. Air Pollution, Turbulence, and Diffusion  
Symp., Las Cruces (1971)
- /91/ C.E. Junge  
Sulfur in the Atmosphere  
J. Geophys. Res. 65 (1960), p. 227-237
- /92/ F.E. Gartrell, L.F. Thomas, S.B. Carpenter  
Report on Full Scale Study of Dispersion of  
Stack Gases  
Public Health Service and Tennessee Valley Authority  
(1964)
- /93/ E. Weber  
Contribution to the Residence Time of Sulfur Dioxide  
in a Polluted Atmosphere  
J. Geophys. Res. 75 (1970), p. 2909-2914
- /94/ H. Fortak  
Anwendungsmöglichkeiten von mathematisch-  
meteorologischen Diffusionsmodellen zur Lösung  
von Fragen der Luftreinhaltung  
Herausgegeben vom Minister für Arbeit, Gesundheit  
und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen,  
Düsseldorf (1972)

- /95/ J.Z. Holland  
A Meteorological Survey of the Oak Ridge Area  
U.S. Atomic Energy Commission,  
Washington, Report ORO-99 (1953)
- /96/ D.B. Turner  
Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates  
U.S. Dep. of Health, Education, and Welfare,  
Cincinnati (1970)
- /97/ F. Pasquill  
Atmospheric Diffusion  
D.Van Nostrand Company Ltd. (1962)
- /98/ H. Guss, R. Holzappel  
Über den Höhenwind im Rhein-Main-Gebiet  
Ber. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 42 (1952)
- /99/ F.J. Nordø  
Meso-Scale and Large-Scale Transport of Air  
Pollutants  
Proc. Int. Clean Air Congress, Düsseldorf (1973)
- /100/ D.H. Slade  
Meteorology and Atomic Energy  
U.S. Atomic Energy Commission, Division of  
Technical Information (July 1968)