

1994 724.270.1D

Materialien zu PACER

# Externe Kosten von Luftverschmutzung und staatlichen Leistungen im Wärmebereich

Walter Ott  
Reto Dettli  
Jürg Heldstab  
Barbara Jäggin  
Anita Sigg  
Saskia Willemse  
Heidi Ramseier  
Margrit Schaal



PACER

Bundesamt für Konjunkturfragen

---

# Materialien zu PACER

---

## Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich:

### Neue Argumente für Investitionsentscheide

Die Strom- und Wärmeversorgung verursacht Kosten, die in den Energiepreisen nicht enthalten sind und für die die jeweiligen KonsumentInnen nichts bezahlen: Das sind sogenannte **externe Kosten**, wie zum Beispiel die Kosten der Luftverschmutzung, die nicht versicherten Risiken von Grossunfällen, die Beeinträchtigung von Naturräumen, etc. Solange diese Kosten extern bleiben und nicht in die Wirtschaftlichkeitskalküle der InvestorInnen und KonsumentInnen einbezogen werden, solange werden diese Umweltressourcen verschwendet, was zu übermässiger Umweltbelastung führt.

Erstmals wurden für die Schweiz die häufig diskutierten externen Kosten für den Strom- und Wärmebereich auf solider wissenschaftlicher Basis ermittelt. Die Arbeit ist für die Schweiz eine Pionierleistung, welche die energie- und umweltpolitische Diskussion bereichert. Die Studie identifiziert die wichtigsten externen Effekte der Strom- und Wärmeversorgung quantifiziert ihr Ausmass und monetarisiert soweit möglich die resultierenden Kosten: Externe Kosten der Luftverschmutzung (Waldschäden, landwirtschaftliche Produktionsausfälle, Gesundheitsschäden, Gebäudeschäden), externe Kosten der ölbedingten Meeres- und Bodenverschmutzung, Kosten des Treibhauseffektes, extreme Kosten der Elektrizitätsproduktion und -verteilung (Beeinträchtigung von Gewässern und der Landschaft, Grossrisiken bei KKW und Staudämmen). Pro Energieträger und pro Ener-

giesystem (z.B. Gasheizungen, Ölheizungen, Gas-WKK-Anlagen, etc.) werden daraus **kalkulatorische Energiepreiszuschläge (Rp./kWh)** berechnet, welche den in der Studie monetarisierten externen Kosten entsprechen.

Die Risiken eines KKW-Grossunfalles oder eines Staudammbruches werden separat behandelt. Die spezielle Risikosituation bei solchen Grossereignissen - sehr kleine Eintretenswahrscheinlichkeit aber extrem grosse Auswirkungen - wirft heikle methodische Probleme auf. Die externen Kosten der Grossrisiken werden in der Form von **Risikozuschlägen** ausgewiesen.

Die kalkulatorischen Energiepreiszuschläge und die Risikozuschläge können für eine erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung verwendet werden, welche externe Kosten integriert. Sie bilden eine gute Grundlage für die Evaluation von energie- und umweltpolitischen Massnahmen (Kosten/Nutzen-Überlegungen bei Sparmassnahmen, etc.).

Die Arbeit richtet sich an öffentliche und private InvestorInnen sowie an Interessierte aus Planungs-, Architektur-, Ingenieur- und Beratungsbüros, die bei ihren Projekten umfassende Wirtschaftlichkeitsüberlegungen anstellen, aber auch an Vollzugsfachleute in den Bereichen Energie und Umwelt, an Energie- und UmweltpolitikerInnen sowie generell an den Kreis von energie- und umweltpolitisch Interessierten.

(Synthese-Bericht, Bestell-Nr. 724.270 d)

# Externe Kosten von Luftverschmutzung und staatlichen Leistungen im Wärmebereich

Teilbericht 1 des Projektes

<<Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge  
für den Strom- und Wärmebereich in der Schweiz>>

Walter Ott (Projektleitung)

Reto Dettli

Jürg Heldstab

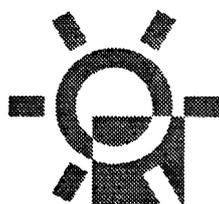
Barbara Jaggin

Anita Sigg

Saskia Willemse

Heidi Ramseier (Textbearbeitung)

Margrit Schaal (Textbearbeitung)



PACER

Bundesamt für Konjunkturfragen

## Impressum

Herausgeber: Bundesamt für Konjunkturfragen  
Belpstrasse 53  
3003 Bern

Programmleiter: PACER Dr. Jean-Bernard Gay  
c/o EPFL-LESO  
1015 Lausanne

Ressortleiterin: Oekonomische Aspekte  
Irene Wuiliemin  
Bundesamt für Konjunkturfragen,  
Bern

AutorInnen: Walter Ott  
Reto Dettli  
Jürg Heldstab  
Barbara Jaggin  
Anita Sigg  
Saskia Willemse  
Heidi Ramseier  
Margrit Schaal

Diese Studie gehört zu einer Reihe von Untersuchungen, welche zu Händen des Bundesamtes für Konjunkturfragen im Rahmen von PACER sowie im vorliegenden Fall zu Händen des Bundesamtes für Energiewirtschaft und des Amtes für Bundesbauten, von Dritten erarbeitet wurden. Die Bundesämter und die vom BFK eingesetzte PACER-Programmleitung geben die vorliegende Studie zur Veröffentlichung frei. Die inhaltliche Verantwortung liegt bei den AutorInnen.

Copyright: Bundesamt für Konjunkturfragen  
3003 Bern

Auszugsweiser Nachdruck unter Quellenangabe erlaubt. Zu beziehen bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.

Form.724.270.1 d 4.94 500

Bestellnummern:  
Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich in der Schweiz.

Teilbericht 1:  
Externe Kosten von Luftverschmutzung und staatlichen Leistungen im Wärmebereich  
1994,724.270.1 d

Teilbericht 2:  
Die externen Kosten der Stromerzeugung aus Kernenergie  
1994, 724.270.2d

Teilbericht 3:  
Externe Kosten der fossilen Ressourcennutzung im Wärmebereich  
1994, 724.270.3d

Teilbericht 4:  
Die externen Kosten der Stromerzeugung aus Wasserkraft  
1994, 724.270.4d

Teilbericht 5:  
Die externen Kosten der Übertragung und Verteilung von Elektrizität  
1994, 724.270.5d

Teilbericht 6:  
Externe Kosten von Photovoltaik-Anlagen, Sonnenkollektoren, Fenstern und Wärmedämmstoffen  
1994, 724.270.6d

# Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| <b>Begriffe, Abkürzungen</b>   | iv |
| <b>1. Einleitung</b>   | 1  |
| 1.1 Ausgangslage und Fragestellung   | 1  |
| 1.2 Stellenwert dieses Berichtes   | 4  |
| 1.3 Prozessketten mit externen Effekten und relevante Auswirkungsbereiche                  | 4  |
| 1.4 Vorgehen und Inhalt  | 5  |
| 1.5 Externe Kosten und Nutzen  | 6  |
| 1.5.1 Was sind externe Kosten?   | 6  |
| 1.5.2 Systemabgrenzung   | 8  |
| 1.5.3 Technologische und pekuniäre externe Effekte   | 9  |
| 1.5.4 Gibt es externe Nutzen?  | 9  |
| <b>2. Kosten der Waldschäden in der Schweiz</b>  | 11 |
| 2.1 Einleitung, Vorgehen   | 11 |
| 2.2 Stand und Ursachen der Waldschadenentwicklung  | 12 |
| 2.2.1 Entwicklung der Waldschäden von 1986-1991  | 12 |
| 2.2.2 Hypothesen zu den Ursachen neuartiger Waldschäden                                    | 13 |
| 2.2.3 Folgerungen  | 17 |
| 2.3 Die Funktionen des Waldes  | 18 |
| 2.3.1 Der Wald als Ressource   | 18 |
| 2.3.2 Die Schutzfunktion des Waldes  | 18 |
| 2.3.3 Die Erholungsfunktion der Wälder   | 18 |
| 2.3.4 Übrige Funktionen  | 19 |
| 2.4 Die Kosten luftschadstoffbedingter Waldschäden in der Schweiz                          | 19 |
| 2.4.1 Einleitung, Grundlagen, Methodik   | 19 |
| 2.4.2 Kosten der Waldschäden nach Schadensbereichen  | 21 |
| 2.4.3 Verminderung des Erholungswertes stadtnaher Wälder                                   | 25 |
| 2.5 Folgerungen: Die Kosten der luftschadstoffbedingten Waldschäden in der Schweiz um 1990 | 26 |
| <b>3. Landwirtschaftliche Produktionsausfälle infolge der Luftverschmutzung</b>            | 29 |
| 3.1 Einleitung   | 29 |
| 3.2 Die Wirkung der Luftschadstoffe auf landwirtschaftliche Kulturen                       | 30 |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 3.2.1     | Wirkungswege der Luftverschmutzung auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion       | 30        |
| 3.2.2     | Welche Luftschadstoffe sind für die Ertragseinbussen relevant?                          | 32        |
| 3.3       | Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die landwirtschaftlichen Kulturen in der Schweiz | 32        |
| 3.3.1     | Einleitung  | 32        |
| 3.3.2     | Die Wirkungen von Ozon auf die Kulturpflanzen   | 33        |
| 3.3.3     | Die untersuchten Regionen in der Schweiz, ihre Kulturen und ihre Immissionen            | 34        |
| 3.4       | Monetare Kosten der luftschadstoffbedingten Produktionsausfälle in der Landwirtschaft   | 37        |
| 3.4.1     | Vorgehen, Methode   | 37        |
| 3.4.2     | Die Ertragsausfälle infolge der Ozonemissionen  | 38        |
| 3.4.3     | Monetare Kosten der ozonbedingten Ertragsausfälle                                       | 40        |
| 3.5       | Zusammenfassung und Folgerungen   | 43        |
| <b>4.</b> | <b>Kosten luftschadstoffbedingter Gesundheitsschäden in der Schweiz</b>                 | <b>45</b> |
| 4.1       | Einleitung, Vorgehen  | 45        |
| 4.2       | Gesundheitlich relevante Luftschadstoffe und ihre Wirkungen                             | 45        |
| 4.3       | Ermittlung immissionsbedingter Gesundheitsschäden                                       | 50        |
| 4.4       | Kosten luftschadstoffbedingter Gesundheitsschäden in der Schweiz                        | 54        |
| 4.4.1     | Vorgehen, Methode   | 54        |
| 4.4.2     | Übertragung der immissionsbedingten Gesundheitskosten auf die Schweiz                   | 54        |
| 4.4.3     | Zurechnung der Gesundheitskosten auf die einzelnen Schadstoffe                          | 57        |
| 4.5       | Zusammenfassende Bemerkungen  | 58        |
| <b>5.</b> | <b>Gebäudeschäden durch Immissionen der Strom- und Wärmeversorgung</b>                  | <b>59</b> |
| 5.1       | Einleitung, Vorgehen, Abgrenzungen  | 59        |
| 5.2       | Schadenmechanismen und Kosten im Bereich der Gebäudeschäden                             | 60        |
| 5.2.1     | Die Luftschadstoffbelastung in der Schweiz  | 60        |
| 5.2.2     | Wie beeinflussen Luftschadstoffe die Gebäudehülle?                                      | 62        |
| 5.2.3     | Kosten von Immissionsschäden  | 63        |
| 5.3       | Die luftschadstoffexponierte Gebäudehülle der Schweiz                                   | 66        |
| 5.3.1     | Fassadenfläche total  | 66        |
| 5.3.2     | Der verkehrsexponierte Anteil   | 67        |
| 5.4       | Kosten von Gebäudeschäden infolge von Feuerungsimmissionen                              | 69        |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| 5.4.1  | Einleitung  | 69         |
| 5.4.2  | Zusätzliche Renovationskosten infolge von Feuerungs-<br>immissionen   | 69         |
| 5.4.3  | Zusätzliche Reinigungskosten infolge der Luftverschmut-<br>zung   | 76         |
| 5.5  | Zusammenfassung und Folgerungen   | 78         |
| 5.5.1  | Sensitivitäts- und Fehlerrechnung   | 78         |
| <b>6.</b>  | <b>Öffentliche Leistungen für die Strom- und Wärmeversorgung</b>  | <b>81</b>  |
| 6.1  | Einleitung, Vorgehen  | 81         |
| 6.2  | Übersicht über die wichtigsten staatlichen Ausgabenbereiche bei der<br>Strom- und Wärmeversorgung   | 82         |
| 6.2.1  | Durch staatliche Stellen bereitgestellte Güter und Dienstlei-<br>stungen (Subventionen als Sachleistungen)                                    | 83         |
| 6.2.2  | Monetare öffentliche Subventionen   | 85         |
| 6.3  | Bewertung der öffentlichen Leistungen   | 87         |
| 6.3.1  | Öffentliche Ausgaben für die Umweltschutzverwaltung und<br>Kontrolltätigkeiten  | 87         |
| 6.3.2  | Öffentliche Subventionen für Forschung und Entwicklung  | 90         |
| 6.4  | Schlussbemerkungen - Folgerungen  | 92         |
| <b>7.</b>  | <b>Zuordnung der monetarisierten Kosten auf die Verursacher - Ermitt-<br/>lung von Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen</b> | <b>93</b>  |
| 7.1  | Vorgehen, Methodik  | 93         |
| 7.1.1  | Grenzschadenkosten als Grundlage für die Ableitung von<br>Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen                              | 93         |
| 7.1.2  | Relative Schädlichkeit der Luftschadstoffe  | 97         |
| 7.1.3  | Räumliche und zeitliche Differenzierung der Emissions- und<br>kalkulatorischen Energiepreiszuschläge  | 97         |
| 7.2  | Emissionszuschläge (EMZ)  | 98         |
| 7.3  | Kalkulatorische Energiepreiszuschläge (KEPZ)  | 100        |
| <b>8.</b>  | <b>Schlussbemerkungen - Folgerungen für das weitere Vorgehen</b>  | <b>103</b> |
| 8.1  | Resultate   | 103        |
| 8.2  | Problembereiche und Unsicherheiten  | 106        |
| 8.2.1  | Quantifizierung der Schäden, Monetarisierung der<br>Kosten  | 106        |
| Anhang 1: Internalisierung und Quantifizierung von externen Kosten |   | A-1        |
| Anhang 2: Ermittlung der schadenverursachenden Emissionen          |   | A-3        |
| Literaturverzeichnis   |   | L-1        |

## Begriffe, Abkürzungen

|  |   |
|--|---|
| AFB  | Amt für Bundesbauten  |
| BAU  | Business As Usual (unbeeinflusste Entwicklung)  |
| BEW  | Bundesamt für Energiewirtschaft   |
| BFK  | Bundesamt für Konjunkturfragen  |
| Bilgenöl   | Ölverluste in den Kielraum (Bilge) des Schiffes, wo es sich mit dem Bilgenwasser vermischt                            |
| BUWAL  | Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft   |
| CH <sub>4</sub>                                      | Methangas   |
| CO, CO <sub>2</sub>                                  | Kohlenmonoxid, Kohlendioxid   |
| DK   | Durchschnittskosten (z.B. Gesamtkosten: Emissionsmenge -> Fr./kg)   |
| EMZ  | Emissionszuschläge, d.h. externe Kosten pro emittierte Menge eines Schadstoffes in Fr./kg                             |
| FCKW   | Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe  |
| GK   | Grenzkosten, Kosten für eine zusätzlich emittierte (verbrauchte) Schadstoffeinheit (Energieeinheit) [Fr./kg; Fr./kWh] |
| GWa  | Gigawattjahre -> 8'760 GWh = 1 GWa  |
| GWP  | Global Warming Potential; Treibhauspotential eines Treibhausgases   |
| HEL, HM/S  | Heizöl extraleicht; Heizöl mittel/schwer  |
| IPCC   | International Panel on Climate Change   |
| K  | Gesamtkosten [Fr.; Fr./a]   |
| KEPZ   | Kalkulatorische Energiepreiszuschläge   |
| KW   | Kraftwerk   |
| LNG  | Liquefied Natural Gas, verflüssigtes Erdgas   |
| LPG  | Liquefied Petroleum Gas; verflüssigtes Propan/Butan   |
| lt   | Liter   |
| NMVOC/NMHC   | Flüchtige Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe  |
| N O <sub>x</sub> N O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O | Stickstoffoxide; Stickstoffdioxid; Lachgas  |
| PACER  | Programme d'Action pour les Energies Renouvelables, Aktionsprogramm für erneuerbare Energien des BFK                  |
| ppb  | Parts per Billion: (1 : 10 <sup>9</sup> )   |
| ppm  | Parts per Million: (1 : 10 <sup>6</sup> )   |
| ppt  | Parts per Trillion: (1 : 10 <sup>12</sup> )   |
| SO <sub>2</sub>                                      | Schwefeldioxid  |
| TOE  | Tonnen Erdöläquivalent  |
| Trsp   | Transport   |

# 1. Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Fragestellung

Im Rahmen marktwirtschaftlicher Konzepte zur Lösung der Umweltproblematik spielen externe Kosten eine wichtige Rolle. Falls es gelingen würde, diese Kosten zu quantifizieren und - mindestens teilweise - in die Preise der Rohstoffe und Güter einzuschliessen, könnte der Markt zu einer ökologisch besseren Allokation führen. Die ungefähre Kenntnis der externen Kosten wäre eine wichtige Voraussetzung, um bei der Evaluation von alternative Projekten und bei Investitionsrechnungen zu volkswirtschaftlich und ökologisch besseren Entscheiden zu kommen. Informationen über das Ausmass der externen Kosten bieten zudem eine Grundlage zur Begründung von Abgaben und zur Abschätzung ihrer Wirkungen.

Zurzeit werden nicht nur in der Schweiz Bemühungen zur Quantifizierung der externen Kosten im Energiebereich unternommen. Auch in der EG und in Deutschland laufen entsprechende Arbeiten. In den USA wird seit vielen Jahren an verschiedenen Hochschulen und Institute an diesem Problem gearbeitet

In der Vorstudie zu diesem Projekt wurde darauf hingewiesen, dass die Ermittlung der externen Kosten eine äusserst komplexe und methodisch schwierige Aufgabe darstellt. Trotzdem wäre es falsch, aufgrund der dabei zu erwartenden Schwierigkeiten diese Forschungsarbeiten zu unterlassen. Auch wenn die Ergebnisse unscharf ausfallen werden, so erlauben sie gegenüber der aktuellen Situation, in der die externen Kosten einfach nicht berücksichtigt werden, eine Verbesserung. Zudem wird erwartet, dass die Auseinandersetzung mit den Umweltwirkungen der Strom- und Wärmeversorgung, mit den Problemen ihrer Quantifizierung und Monetarisierung einen Beitrag an die Umweltpolitik leistet und mannigfaltige Hinweise für ökologischeres Wirtschaften bietet.

Im Auftrag des BFK (PACER), des BEW und des AFB bearbeitet die Arbeitsgemeinschaft INFRAS/PROGNOS die folgenden Fragenkomplexe:

- Identifizierung externer Effekte der Strom- und Wärmeversorgung
- Quantifizierung der resultierenden Effekte/Schäden
- Monetarisierung der resultierenden Schäden/Kosten
- Ableitung von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen für diverse Energieträger bzw. -systeme und für ausgewählte Energiesparmassnahmen.

Das Gesamtprojekt wird zur Bearbeitung durch die beiden Auftragnehmer in folgende Teilprojekte gegliedert:

| I N F R A S  | P R O G N O S  |
|--|--|
| <b>Teilbericht 1 (TB1):</b><br>Externe Kosten der Luftverschmutzung<br>- Waldschäden<br>- Gesundheitsschäden<br>- Landwirtschaftliche Produktionsausfälle<br>- Gebäudeschäden<br><br>Öffentliche Leistungen als Externalität                     | <b>TB2:</b><br>Externe Kosten der Kernenergienutzung<br>- Normalbetrieb<br>- Störfälle   |
| <b>TB3:</b><br>Externe Kosten der fossilen Ressourcennutzung<br>- Verschmutzungen/Unfälle bei Transport, Raffination und Lagerung von Öl und Gas<br>- Kosten des Treibhauseffektes<br>- Intertemporale Verteilungsgerechtigkeit als Externalität | <b>TB4:</b><br>Externe Kosten der Wasserkraftnutzung<br>- Speicherkraftwerke<br>- Laufkraftwerke<br>- Übertragung und Verteilung |
| <b>TB5:</b><br>Anwendung von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen auf<br>- Dämmaterialien<br>- Fenster<br>- Solarzellen, Sonnenkollektoren<br>Auswirkungen von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen auf Investitionsentscheide             |  |
| <b>SB: Synthesebericht</b>   |  |

Figur 1-1: Arbeitsaufteilung und Teilberichte (TB). Teilberichte 1-5 sind Materialbände zum Schlussbericht (SB6)

Das Gesamtprojekt wird in zwei Phasen unterteilt. INFRAS und PROGNOSE bearbeiten dabei die folgenden Themenbereiche:

## INFRAS

- Phase 1: Teilbericht 1:** Quantifizierung und Bewertung von:
- immissionsbedingten Waldschäden
  - immissionsbedingten Gesundheitsschäden
  - luftschadstoffbedingten Produktionsausfälle in der Landwirtschaft
  - immissionsbedingten Gebäudeschäden
  - öffentlichen Leistungen für die Strom- und Wärmeversorgung

Ermittlung eines ersten Entwurfs von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen für Heizsysteme mit Heizöl EL, Heizöl S, Gas, Kohle, Holz.

- Phase 2:** Teilbericht 3: Quantifizierung und Bewertung von:
- Vermeidung von Klima-, CO<sub>2</sub>-Schäden
  - Gewässerverschmutzung
  - Grossrisiken
  - intertemporalen Effekten bei der fossilen Ressourcennutzung
- Ermittlung von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen für die wichtigsten Systeme/ Energieträger und für einzelne Energiesparmassnahmen.  
Illustration der Ergebnisse an einigen konkreten Beispielen.

## PROGNOS

- Phase 1:** **Teilbericht 2:** Quantifizierung und Bewertung der externen Effekte der Kernenergie. Erster Entwurf für entsprechende kalkulatorische Energiepreiszuschläge.
- Phase 2:** **Teilbericht 4:** Quantifizierung und Bewertung der externen Effekte von Wasserkraft und Transmissions-/Verteilungen.  
Ermittlung von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen.

## 1.2 Stellenwert dieses Berichtes

Der hier vorliegende Bericht (Teilbericht 1 des Projektes) enthält die Ergebnisse der Untersuchungen von INFRAS in Projektphase 1. Er hat den Stellenwert eines Gesamtprojekt-Zwischenberichtes. Der Bericht soll einen Einblick in das Vorgehen, in die bei den diversen Arbeitsschritten erfolgten Annahmen sowie in die bestehenden Probleme und Unsicherheiten vermitteln und anhand erster vorläufiger Schätzungen Hinweise auf die Art der zu erwartenden kalkulatorische Energiepreiszuschläge geben.

Aufgrund dieses Berichtes sollen für die 2. Phase der Arbeit allfällige methodische Korrekturen angeregt und die thematischen Prioritäten neu evaluiert werden.



## 1.3 Prozessketten mit externen Effekten und relevante Auswirkungsbereiche

In der Vorstudie zu diesem Projekt wurden die wichtigsten Prozessketten der Wärme- und Stromversorgung mit Externalitäten sowie die in diesem Zusammenhang relevanten Prozessstufen bzw. Aktivitäten identifiziert (INFRAS/EWI AG, Dez. 1990). Einbezogene Prozessketten (die Prozessketten, die im hier vorliegenden Bericht behandelt oder tangiert werden, sind fett gedruckt):

- **Erdöl** --> Ölheizung mit HEL und mit HS/M, ev. Öl-Kraftwerk
- **Erdgas** --> Gasheizung, Gas-WKK, ev. Gas-Kraftwerk
- **Holzheizung**
- **Elektrizität** --> KKW, Speicher- und Lauf-Kraftwerke, Transmission und Verteilung
- **Solaranlagen** --> Sonnenkollektoren und Solarzellen dezentral
- **Wärmeschutzmassnahmen** --> Wärmedämmung, Fenster

Die Aktivitäten und Prozesse der Strom- und Wärmeversorgung verursachen in verschiedenen Bereichen Externalitäten. Die folgenden Auswirkungsbereiche wurden in der Vorstudie im Hinblick auf Externalitäten als relevant erachtet und sollen im Hauptprojekt bearbeitet werden (Auswirkungsbereiche, die im hier vorliegenden Bericht bearbeitet werden, sind fett gedruckt):

- **Luft**
  - **Waldschäden**
  - **Landwirtschaftliche Produktionsausfälle**
  - **Gesundheitsschäden**
  - **Gebäudeschäden**
- **Klima** - Treibhauseffekt
- **Gewässer**
  - Restwasserproblematik
  - Kühlwasserentnahme/-einleitung
  - Gewässerverschmutzung
- **Boden**
  - Entsorgung/Endlagerung/Deponien
  - Verschmutzung durch Öl, ev. Schwermetalle
- **Landschaft** - Veränderung von Landschaftsbildern/Landschaften
- **Intertemporale Effekte der Ressourcennutzung, intertemporale Verteilungsgerechtigkeit**
- **Öffentliche Leistungen, Subventionen**

## 1.4 Vorgehen und Inhalt

Das Vorgehen bei der Erarbeitung des Berichtes zur Phase 1 von INFRAS richtet sich nach dem in der Vorstudie (INFRAS/EWI, 1990) und in der Offerte (INFRAS, 20.2. 1992) vorgeschlagenen Ablauf:

- In den **Kapiteln 2 bis 5** werden die monetären Kosten der immissionsbedingten Schäden in den Bereichen Wald, Gesundheit, landwirtschaftliche Produktion und Gebäude ermittelt. Dabei werden keine neuen Daten erhoben, sondern die Resultate bestehender in- und ausländischer Studien auf die Schweiz im Referenzjahr 1990 übertragen. Bei den Wald- und Gesundheitsschäden sowie bei den landwirtschaftlichen Produktionsausfällen werden die Schäden infolge der gesamtschweizerischen Luftverschmutzung ermittelt. Im Gebäudebereich wird nur der Anteil der Strom- und Wärmeversorgung an den Schäden ermittelt.
- Kapitel 6 weist die öffentlichen Ausgaben und Leistungen - soweit überhaupt Informationen verfügbar sind - für die Strom- und Wärmeversorgung aus. Sie stellen einen methodischen Grenzfall dar. Diese Leistungen widerspiegeln sich zwar nicht in den Energiepreisen, sie dürfen aber als öffentliche Güter nicht unbesehen externen Effekten gleichgesetzt werden (vgl. W. Hediger, PSI, 1992).
- In Kapitel 7 werden die Schäden von Kapitel 2 bis 5 in **Emissionszuschläge** für die SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und Nichtmethan-Kohlenwasserstoff- (NMVOC-)-Emissionen umgerechnet. Zur Illustration werden mittels typischer Emissionsfaktoren für Feuerungen mit Heizöl EL, Gas, Holzschnitzel und Schweröl sowie für Gas-WKK-Anlagen **kalkulatorische Energiepreiszuschläge** ermittelt. Diese Zuschläge sind aber provisorisch und enthalten erst einen Teil der gesamthaft zu untersuchenden externen Effekte. Die aus den öffentlichen Leistungen und Ausgaben resultierenden Zuschläge werden separat ausgewiesen.
- In **Kapitel 8** werden die Ergebnisse zusammengefasst und im Hinblick auf ihren Stellenwert sowie auf das weitere Vorgehen kommentiert.

## 1.5 Externe Kosten und Nutzen

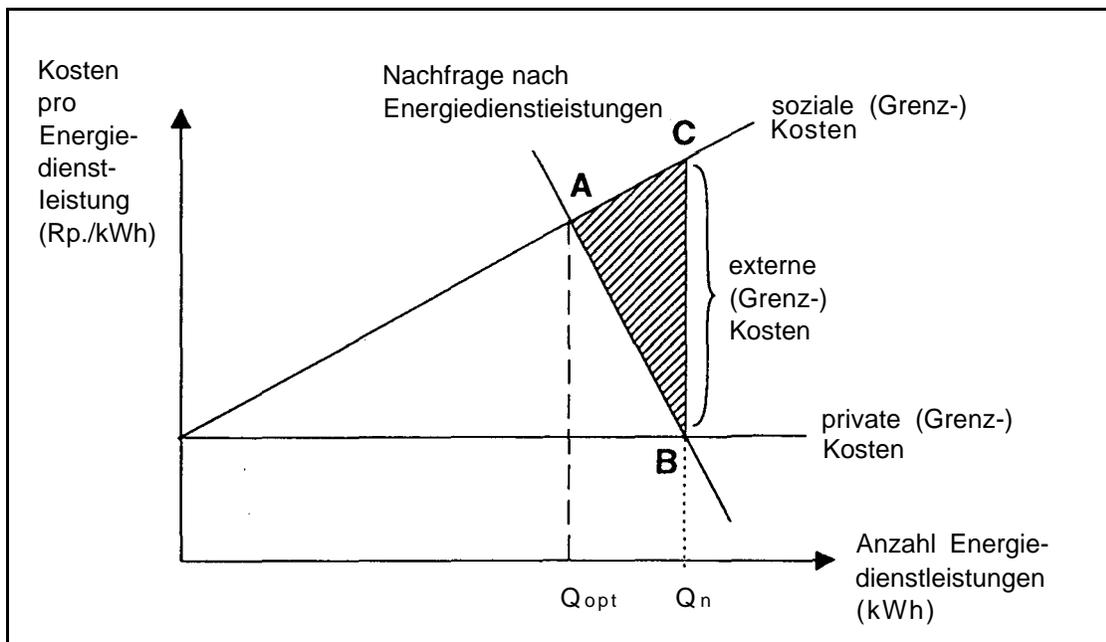
### 1.5.1 Was sind externe Kosten?

In der individuellen Heizkostenabrechnung werden die Kosten ausgewiesen, die die MieterInnen für die Heizung ihrer Wohnung zu bezahlen haben. In der Rechnung enthalten sind die Kosten für den Brennstoffverbrauch und für die Kapital- und Betriebskosten der Heizungsanlage. Für diese Kosten haben die MieterInnen aufzukommen, sie werden auch private Kosten genannt. Das Heizen der Wohnung verursacht aber noch zusätzliche Kosten. Die saubere Luft wird als Auffangbecken für die Abgase der Feuerung verbraucht. Dadurch entstehen Kosten, welche die Allgemeinheit in der Form von Luftverschmutzung trägt. Diese Kosten werden externe Kosten genannt, weil die VerursacherInnen sie nicht bezahlen. Zusammen mit den privaten Kosten entsprechen sie den sozialen Kosten.

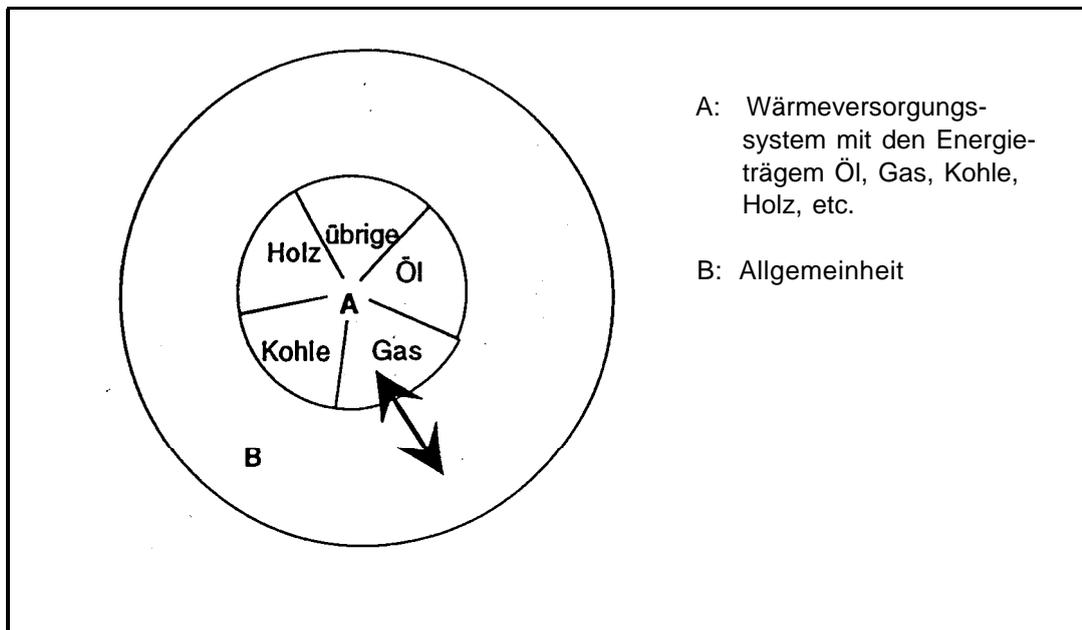
$$\text{private Kosten} + \text{externe Kosten} = \text{soziale Kosten}$$

Auf dem Markt werden Angebot und Nachfrage eines Gutes über den Preis ins Gleichgewicht gebracht. Der Preis ist ein Indikator für die Knappheit eines Gutes. Obwohl saubere Luft immer mehr ein knappes Gut wird - die einen brauchen saubere Luft zum Atmen, die andern als Abfallbecken für Schadstoffe - ist sie gratis, sie wird daher vergeudet. Auf unser Beispiel angewandt: Heizen ist zu billig, weil der Ressourcenverbrauch saubere Luft nicht im Preis enthalten ist. Wir sprechen in diesem Zusammenhang von Fehlallokationen aufgrund verzerrter Preise. Nur wenn die Preise alle verursachten Kosten widerspiegeln, werden die Ressourcen volkswirtschaftlich optimal genutzt. Figur 1-1 stellt diese Zusammenhänge grafisch dar.

Die Figur zeigt, dass die Vernachlässigung externer Kosten zu Fehlallokationen (zu grosse Nachfrage) und damit zu Wohlfahrtsverlusten führen. Von Bedeutung beim Entscheid über die optimale Menge an Energiedienstleistungen ist die Betrachtung der zusätzlichen Kosten und Nutzen einer zusätzlichen Energiedienstleistung, der sogenannten Grenznutzen und Grenzkosten. Der Verbrauch von Energiedienstleistungen lohnt sich solange, wie der (Grenz-)Nutzen (bestimmt durch die Nachfragekurve) daraus mindestens so gross ist wie die (Grenz-) Kosten, die dadurch entstehen. Bei  $Q_{opt}$  ist die Wohlfahrt der Gesellschaft maximiert. Werden über  $Q_{opt}$  hinaus Energiedienstleistungen verbraucht, so werden Ressourcen verschwendet, weil hier die Grenzkosten höher sind als die Grenznutzen. Die schraffierte Fläche A-B-C in der Figur 1-1 stellt die Ressourcenverschwendung oder den Wohlfahrtsverlust für die Gesellschaft dar, wenn ihre Mitglieder nur die privaten (Grenz-)Kosten in ihre Konsum- und Investitionsentscheide einbeziehen.



Figur 1-2: Soziale, externe und private (Grenz-)Kosten von Energiedienstleistungen sowie die Nachfrage nach Energiedienstleistungen: Werden die privaten und die externen (Grenz-) Kosten addiert, resultieren die sozialen (Grenz-) Kosten. Die Existenz externer Kosten führt dazu, dass Energiedienstleistungen in der Höhe von  $Q_n$  statt  $Q_{opt}$  nachgefragt werden. Die Fläche A-B-C entspricht der resultierenden Ressourcenverschwendung bzw. dem Wohlfahrtsverlust (es werden konstante private und steigende externe Grenzkosten der Energiedienstleistung unterstellt)



Figur 1-3: Die Systemabgrenzung spielt eine wichtige Rolle bei der Definition externer Effekte. Für diese Studie ist die Abgrenzung Energieträger - Allgemeinheit relevant. Externalitäten zwischen den EnergiekonsumentInnen werden in dieser Studie nicht betrachtet

#### 1.5.2 Systemabgrenzung

Ziel der Studie ist die Berechnung von energieträgerspezifischen Preiszuschlägen, welche pro Energieträger bzw. pro System die externen Kosten widerspiegeln. Dadurch ist die relevante Abgrenzung gegeben, wir berücksichtigen diejenigen externen Effekte, welche durch den Einsatz eines Energieträgers/-systems der Allgemeinheit angelastet werden. Externe Effekte zwischen EnergienachfragerInnen - zum Beispiel zwischen einzelnen StromkonsumentInnen<sup>1)</sup> - werden in dieser Studie nicht betrachtet.

1) Analog zu den Staukosten im Verkehr können bei leitungsgebundenen Energieträgern an der Kapazitätsgrenze "Black-out" -Kosten entstehen.

### 1.5.3 Technologische und pekuniäre externe Effekte

Eine weitere wichtige Unterscheidung ist diejenige zwischen technologischen externen Effekten und Markteffekten auch pekuniäre externe Effekte genannt). Technologische bzw. "wirkliche" externe Effekte entsprechen einem Ressourcenverbrauch, der nicht vom Marktprozess erfasst wird und deshalb nicht von den VerursacherInnen bezahlt wird. Dies führt dazu, dass externe Kosten verursachende Güter zu billig gehandelt werden, weil die externen Kosten auf Dritte, nicht am Tausch Beteiligte, abgewälzt werden. Dieses Marktversagen kann korrigiert werden, indem die technologischen externen Effekte internalisiert werden, d.h. indem diese externen Effekte den VerursacherInnen angelastet werden (z. B. über Abgaben). Damit kann eine optimale Nutzung der Ressourcen erreicht werden.

Der Wärmebereich produziert externe Kosten wie Luftverschmutzung. Saubere Luft ist eine natürliche Ressource, sie wird bei der Wärmeproduktion verbraucht. Da saubere Luft gratis ist, wird sie tendenziell verschwendet - es lohnt sich nicht, für immissionsarme Technologies zusätzliche Mittel aufzuwenden. Die volkswirtschaftlichen Kosten dieser Fehlallokation werden beispielsweise in zusätzlichen Gesundheitskosten und Produktionsausfällen der Landwirtschaft sichtbar.

Oft werden Markteffekte (pekuniäre externe Effekte) fälschlicherweise mit technologischen Externalitäten verwechselt: Falls sich die Energie infolge eines effizient ausgebauten, grossen Energieversorgungssystems für einen einzelnen Produzenten verbilligt, kann er einen Produktivitätsfortschritt erzielen. Er kann nämlich zu gleichen Kosten mehr Energie einsetzen und dadurch schneller und/oder mehr produzieren. Der Konsument seinerseits profitiert unter Umständen von tieferen Produktpreisen und/oder verbesserten Produkten. Markteffekte sind demnach Nutzenübertragungen (bzw. Kostenüberwälzungen) an die Nachfrager, welche über den Markt vermittelt werden, marktintern und nicht extern sind!

Technologische Externalitäten sind demgegenüber Nutzen- oder Kosten, welche nicht über Marktprozesse vermittelt werden, welche marktextern sind. Sie finden deshalb im System der relativen Preise keinen Niederschlag, sind nicht Gegenstand des Ausgleichs von Angebot und Nachfrage. Man spricht in diesen Fällen auch von Marktversagen. Zur Korrektur werden neu festgesetzte staatliche Rahmenbedingungen, und/oder Eingriffe ins Gefüge der Marktpreise (zur Integration/internalisierung der externen Kosten) gefordert.

### 1.5.4 Gibt es externe Nutzen?

In der öffentlichen Diskussion der letzten Jahre standen fast ausschliesslich die negativen externen Effekte, die externen Kosten der Energieversorgung im Vordergrund.

Insbesondere die Energiewirtschaft selbst hat hier immer wieder darauf hingewiesen, dass dies eine zu einseitige Sicht der Dinge sei, weil die externen Nutzen unzulässigerweise nicht "gegengerechnet" würden.

Tatsächlich müssen Externalitäten der Energieversorgung nicht notwendigerweise negativ sein, sich also in Schäden oder Kosten ausdrücken, die von Dritten oder von der Allgemeinheit und nicht von den verursachenden Produzenten und Verbrauchern von Wärme und Strom getragen werden. Denkbar sind auch externe Effekte mit positiven Rückwirkungen auf die Allgemeinheit oder unbeteiligte Dritte (beispielsweise besserer Hochwasserschutz durch Speicherseen). Bevor jedoch weiter auf allfällige externe Nutzen der Strom- und Wärmeversorgung eingegangen wird, soll zuerst präziser definiert werden was überhaupt externe Nutzen sind. Es wird sich weisen, dass eine exakte Umschreibung des externen Nutzens viele Missverständnisse in der öffentlichen (politische) Diskussion ausräumen hilft und dabei der Stellenwert allfälliger externer Nutzen sehr relativiert wird.

Selbstverständlich werden die Strom- und Wärmeproduzenten und -konsumenten versuchen, sich die Nutzen der Strom- und Wärmeversorgung sowie des Strom- und Wärmekonsums anzueignen und möglichst viele Kosten nach Möglichkeit auf andere abzuschieben - zu externalisieren.

Der Energieversorgung werden sehr grosse Nutzen im Zusammenhang mit Rationalisierungen, technischem Fortschritt und dem Wirtschaftswachstum zugeschrieben. Diese Nutzen werden jedoch über den Markt - über das Spiel von Angebot und Nachfrage - vermittelt. Durch Energieeinsatz ermöglichte Rationalisierungen und Preissenkungen bzw. Qualitätssteigerungen von Produkten ergeben für die unbeteiligten Konsumenten Nutzen in Form günstigerer Produkte. Diese Nutzen sind aber nicht (markt-) extern sondern das übliche Resultat von Marktprozessen. Die allgemeine Interdependenz der über den Markt vermittelten Nutzen und Kosten ist ein Wesenselement des Wirtschaftssystems, der Tausch auf den Märkten dient ja gerade dazu, dass der Gesamtnutzen mindestens der Tauschenden steigt. Wenn durch diese über den Markt vermittelten Prozesse auch nicht direkt Beteiligte bzw. die Allgemeinheit profitieren, ist das noch kein externer Nutzen. Auch die Arbeitsplätze, die durch die Existenz der Strom- und Wärmeversorgung in den Strom- und Wärme konsumierenden Betrieben angeboten werden sind keine externen Nutzen der Strom- und Wärmeversorgung. Es liegt in der Natur der Marktwirtschaft, dass Anbieter durch den geschickten Einsatz der Produktionsfaktoren (Arbeit, Know How, Kapital, Ressourcen) versuchen, günstigere und/oder bessere Produkte anzubieten und dass damit Nutzen an unbeteiligte Konsumenten übertragen werden. Wesentlich ist dabei, dass diese Nutzen über den Markt vermittelt werden. Diese Markteffekte (oft auch pekuniäre - unechte - externe Nutzen genannt), müssen klar von (externen) Nutzenübertragungen unterschieden werden, welche nicht über den Markt vermittelt werden. Markteffekte müssen daher nicht entschädigt werden, das Resultat der Marktprozesse ist optimal. Es wäre unsinnig, wenn ein Unternehmen, welches durch geschickten Energieeinsatz günstiger anbieten kann und dadurch einen Konkurrenzvorteil sowie zusätzliche Marktanteile gewinnt,

dafür zu entschädigen, dass die Konsumenten seiner Güter vom tieferen Preis profitieren.

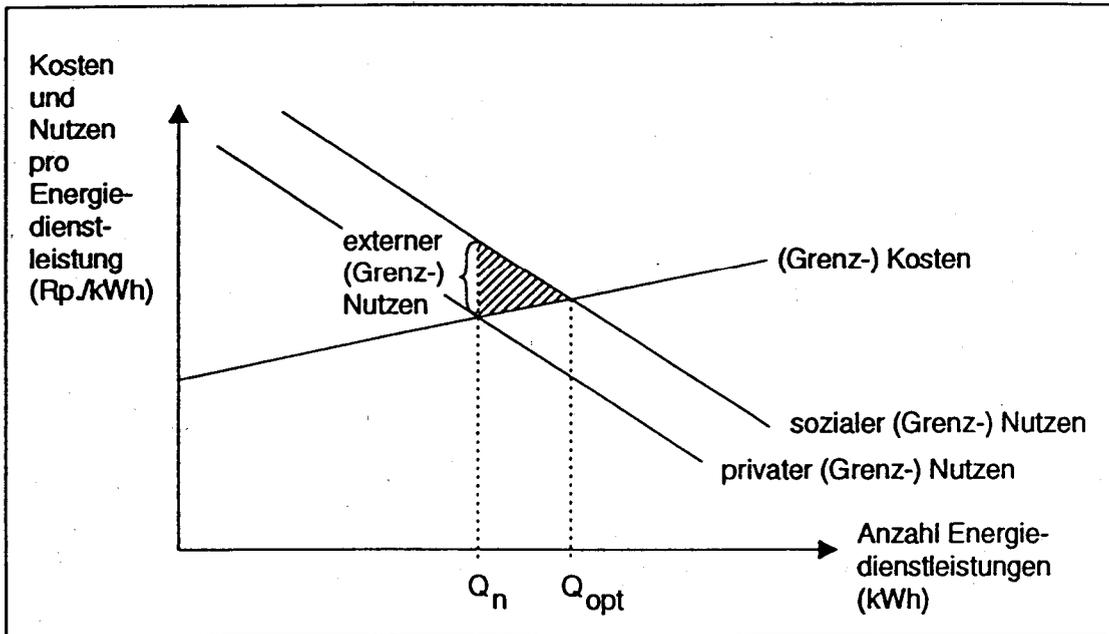
Bei echten (technologischen) externen Nutzen, werden die Nutzen direkt an die Allgemeinheit bzw. an unbeteiligte Dritte übertragen. Wesentlich ist dabei, dass diese Uebertragung nicht über Marktprozesse erfolgt (d.h. nicht über einen Tausch zwischen Anbieter und Nachfrager, welcher über den Preis vermittelt wird). In solchen Fällen kann der Nutzenproduzent der Strom- und Wärmeversorgung für den produzierten Nutzen keine Vergütung von den Nutzniessern verlangen, er wird daher in der Regel diesen Nutzen nicht produzieren, auch wenn dies aus gesamtwirtschaftlicher Sicht durchaus erwünscht wäre. In solchen Fällen müsste der Nutzenproduzent von den Nutzniessern entschädigt werden, um das volkswirtschaftlich optimale Angebot zu erzielen.

*Speicherseen weisen unter Umständen externe Nutzen auf, wenn sie in den für Hochwasser massgeblichen Zeiten übermässige Abflüsse zurückhalten und dadurch zu einer Entlastung der unterliegenden Gewässer beitragen. Es ist möglich, dass ein Speichersee erst dann gebaut würde oder dass er noch etwas höher gebaut würde, wenn der Stromproduzent für den durch den Speichersee verbesserten Hochwasserschutz eine Entschädigung bei den Nutzniessern einfordern könnte.*

*Es ist denkbar, dass bei den jeweils erforderlichen Konzessionsverhandlungen zur Nutzung einer Gewässerstrecke diesen externen Nutzen indirekt, bei der Festsetzung der Konzessionsbedingungen und der Vergütung für die Nutzung des Gewässers Rechnung getragen wird.*

Abschliessend kann festgehalten werden, dass es äusserst schwer fällt, externe Nutzen der Strom- und Wärmeversorgung zu identifizieren - ganz im Gegensatz zur Situation bei den externen Kosten. Allfällige externe Nutzen sind im Rahmen der hier vorgenommenen Ueberlegungen nicht relevant und können vernachlässigt werden. Die meisten in der (politischen) Diskussion aufgeführten externen Nutzen beruhen auf einem Missverständnis, indem Markteffekte (pekuniare, unechte externe Nutzen) mit (technologischen, echten) externen Nutzen verwechselt werden. Nur bei echten externen Nutzen müssten die Preise durch Beiträge der Allgemeinheit (bzw. der Nutzniesser) reduziert werden, um das aus volkswirtschaftlicher Sicht optimale Preissignal für die Anbieter und Nachfrager am Markt zu gewährleisten. Bei Markteffekten ergibt sich hingegen das volkswirtschaftlich optimale Resultat von selbst, auch wenn nicht nur die am Tausch Beteiligten vom Tausch profitieren (immer vorausgesetzt, dass keine anderen Marktverzerrungen vorliegen).

Figur 1-3 illustriert die Situation mit (echten, technologischen) externen Nutzen und zeigt, dass auch externe Nutzen zu volkswirtschaftlichen Verlusten führen. Im Fall von externen Nutzen von Figur 1-3 kommt ein suboptimales Angebot zustande, weil die NachfragerInnen anstatt aufgrund der sozialen (Grenz-) Nutzen nur aufgrund der privaten (Grenz-) Nutzen entscheiden.



Figur 1-4: Soziale, externe und private (Grenz-) Nutzen der Energiedienstleistungen, sowie ihre (Grenz-) Kosten. Die Existenz von externen Nutzen führt dazu, dass eine geringere Menge nachgefragt wird als volkswirtschaftlich optimal wäre. Die schraffierte Fläche stellt den Wohlfahrtsverlust dar. Bei der Menge  $Q_n$  sind die sozialen Nutzen größer als die Kosten, es lohnt sich bis zur Menge  $Q_{opt}$  Energiedienstleistungen zu konsumieren. In  $Q_{opt}$  ist die Wohlfahrt maximiert.

## 2. Kosten der Waldschäden in der Schweiz

### 2.1 Einleitung, Vorgehen

In den folgenden Ausführungen wird der Versuch unternommen, die immissionsbedingten Waldschäden zu monetarisieren. Es kann dabei nicht darum gehen, die Waldschäden zu beziffern, sondern nur darum, die Grössenordnungen einiger im Zusammenhang mit dem Waldsterben relevanter Schadensbereiche. Wie im nächsten Abschnitt dargelegt wird, gehen wir davon aus, dass bei der Waldschadenentwicklung kein Anlass zur Entwarnung besteht, dass die jüngsten veröffentlichten Schadenmeldungen eher wieder auf eine Zunahme der Schäden hindeuten. Die Unsicherheiten über die Ursachen der Schadenentwicklung sind gross. Dennoch gehen wir von der Hypothese aus, dass die Luftverschmutzung als mitverursachender oder auslösender Faktor eine Voraussetzung für die zurzeit sich abzeichnende Schadenentwicklung ist. Die Monetarisierung der Waldschäden und der Nutzeneinbussen infolge der Waldschäden beruht auf vier Arbeiten aus den Jahren 1986-1992 (Ahwegg, 1988; B+P, 1986 und Pfister, 1987 zu den Schadenkosten sowie Nielsen 1991 bzw. 1992 zu den Nutzeneinbussen), welche zu diesem Problemkreis Grundlagen für die schweizerische Situation bereitstellen.

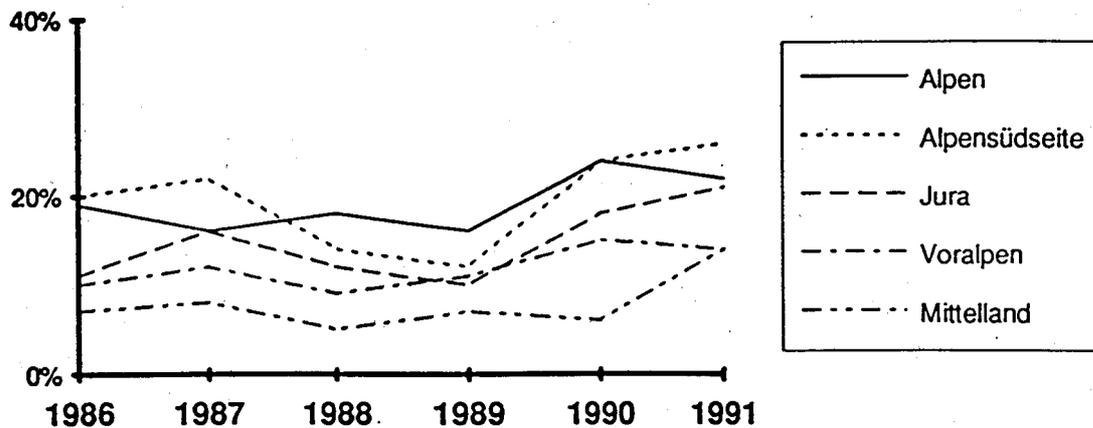
In Abschnitt 2.2 wird die Entwicklung der Waldschäden in der Schweiz dargestellt. Danach werden die möglichen Ursachen beleuchtet. Abschnitt 2.3 ist den verschiedenen Funktionen des Waldes aus anthropogener Sicht gewidmet. In Abschnitt 2.4 werden dann die Kosten immissionsbedingter Waldschäden bereichsweise monetarisiert. In Abschnitt 2.5 werden die bereichsweisen Kostenschätzungen zusammengefasst und Überlegungen zur Zuteilung der immissionsbedingten Kosten auf die Feuerungen der Wärme- und Stromversorgung angestellt.

## 2.2 Stand und Ursachen der Waldschadenentwicklung

### 2.2.1 Entwicklung der Waldschäden von 1986-1991

Die Sanasilva-Waldschadeninventur erfasst die aktuelle Schadenssituation sowie die Schadensentwicklung im Schweizer Wald in Form einer Stichprobenerhebung (703 Probenflächen zu 4 x 4 km, 8068 Bäume). Die Schadensentwicklung wird anhand des Benadelungs- bzw. Belaubungszustandes der Bäume beurteilt. Dabei werden fünf Schadstufen unterschieden:

|              |                     |                                   |
|--------------|---------------------|-----------------------------------|
| 0% bis 14%   | Nadel-/Blattverlust | ohne Schaden                      |
| 15% bis 25%  |                     | schwach geschädigt                |
| 30% bis 60%  |                     | mittelstark geschädigt            |
| 65% und mehr |                     | stark geschädigt oder abgestorben |



Figur 2-1: Entwicklung der Waldschäden (Nadel-/Blattverluste von 30-100 %) in den verschiedenen Regionen der Schweiz von 1986-1991 (Werte aus WSB, 1991)

Die Beurteilung der Schadensentwicklung aufgrund einer Messperiode von nur fünf Jahren ist nicht eindeutig möglich. 1990 und 1991 nahmen die Schäden aber wieder zu - eine Tendenz, die sich auch im Ausland (BRD) abzeichnet.

## 2.2.2 Hypothesen zu den Ursachen neuartiger Waldschäden

Nach der Häufung von Waldschadensmeldungen in der BRD und in der Schweiz anfangs der achtziger Jahre wurde von neuartigen Waldschäden gesprochen. Der Versuch, diese neuartigen Waldschäden zu erklären, ist dagegen extrem schwierig, da

- durch die Komplexität des Ökosystems Wald eine monokausale Beweisführung nicht möglich ist und auch andere schlüssige Aussagen erschwert werden,
- die Beobachtungs- und Versuchszeiten (Labor) im Vergleich zu einem Baumleben sehr kurz sind,
- die Laborpflanzen im Vergleich zu Feldpflanzen sehr unterschiedliche Lebensdauern haben,
- die Versuchsbedingungen im Freien (Temperature, Licht, Bodenzustand, Konzentration der Luftschadstoffe etc.) nicht kontrollierbar bzw. veränderbar sind,
- die meisten Schäden an Pflanzen durch mehrere Belastungsfaktoren ausgelöst werden,
- mehrere Belastungsfaktoren in Kombination miteinander sich auch verstärken oder abschwächen können,
- die Symptome für eine Verschlechterung des Gesundheitszustandes einerseits unsichtbar sein können, andererseits zeitlich, geographisch und bezüglich ihrer Ausprägung sehr heterogen sind,
- verschiedene Standorteigenschaften (Witterung, Bestand, Boden, Immissionslage etc.) vorliegen, welche teilweise räumlich und zeitlich variabel sind.

Die intensivierete Forschung brachte zwar viele neue Einzelerkenntnisse, diese sind aber oft nicht auf andere Regionen, Standorte, ZeitRäume oder Bestände übertragbar. Diese neuen Einzelerkenntnisse lassen sich in das bestehende Erklärungsmodell - Ursachenkomplex aus abiotischen und biotischen Faktoren mit wesentlicher Beteiligung von Luftschadstoffen - gut einpassen, teilweise sind aber Korrekturen notwendig. Dies gilt vor allem für die Gewichtung der einzelnen Faktoren: Nach einer Abkehr von multifaktoriellen Hypothesen zu eher monokausalen Erklärungen hat eine Rückkehr zu ersteren stattgefunden, wobei vor allem die Faktoren Witterung und Klima wieder stärker in den Vordergrund getreten sind (AFZ 50/1988).

- Direkte Schadenwirkungen auf oberirdische Pflanzen-/Baumteile (s. Fig. 2-2)  
Die direkt schädigende Wirkung von Schwefeldioxid ist erwiesen, diejenige von Ozon ist aufgrund experimenteller Begasungsversuche wahrscheinlich. Bei den landwirtschaftlichen Kulturpflanzen wird Ozon sogar als Leitschadstoff für die Schadenswirkung der Luftverschmutzung verwendet (INFRAS, April 1992). Die Kombination der Belastung durch die Luftschadstoffe Schwefeldioxid, Ozon und Stickstoffoxid verstärkt die Schadenswirkung (UBA, 1991). Die Schadenswirkung resultiert sowohl aufgrund der Dauerbelastung der Baumorgane durch Luftschadstoffe als auch aufgrund der kurzzeitigen Belastungsspitzen. Unter anderem werden folgende Auswirkungen postuliert (INFRAS, Okt. 1992, S. 12f.):

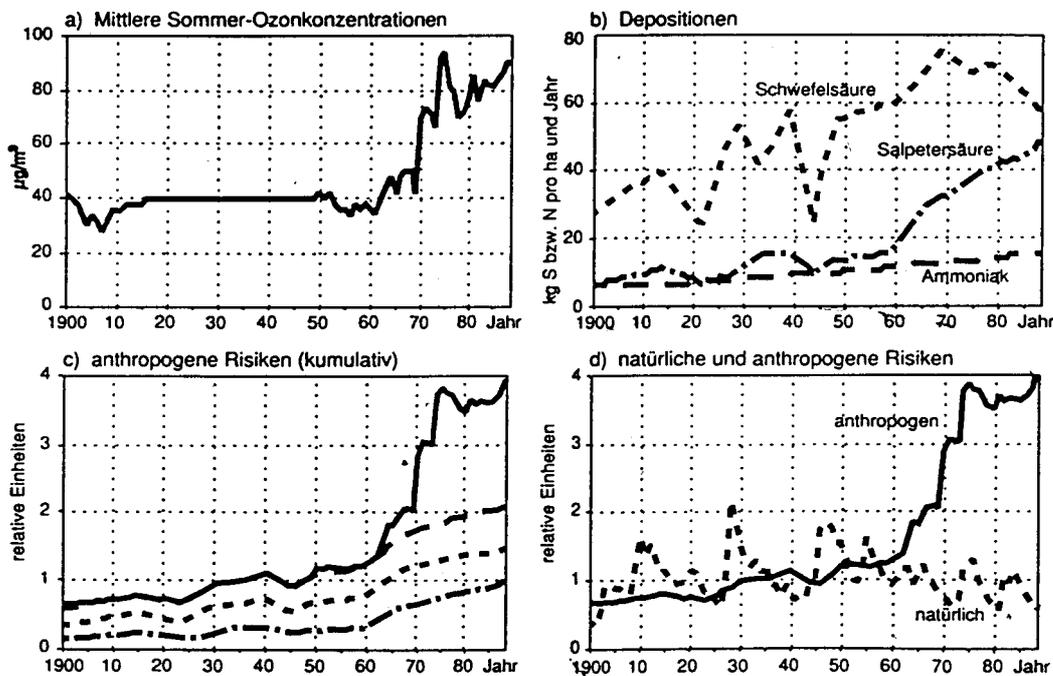
- Hemmung der Photosynthese -> Verminderung des Wuchses  
Schädigung der Wachsschicht und der Schliesszellen der Blätter -> gestörter Wasserhaushalt
- Auswaschung von Nährstoffen aus Blättern und Nadeln
- Schäden an Blattmembranen und Leitbündeln
- Verringerung der Frostresistenz durch erhöhte Stickstoff- und Ozonbelastungen

■ **Indirekte Schadenwirkungen über die Bodenbelastung** (s. Fig. 2-3)

Die Schwefeldioxid- und die Stickstoffoxiddimmissionen erhöhen den Säureeintrag in den Boden. Durch diese Schadstoffeinträge entstehen Nährstoffungleichgewichte, welche für diverse negative Folgewirkungen verantwortlich sind: Dadurch wird im pflanzlichen Organismus Kalium durch Ammonium ausgetauscht, was zu einem scheinbaren Kaliumstress führt. Die Uebersorgung mit Stickstoff führt andererseits zu einer Ueberdüngung, wonach dem Bäumen oft nicht mehr genug Wasser zur Verfügung steht. Zudem wachsen die Wurzeln dem Stickstoff nach, d.h. bei Stickstoffdeposition aus der Luft, wachsen sie zunehmend nach oben (NZZ, 27.1. 1992). Damit steigt aber die Anfälligkeit auf Trockenstress und Windwurf (infolge der Flachwurzeln). Durch die Versauerung der Boden können die für die Nährstoffaufnahme wichtigen Mykorrhiza absterben (Wurzelpilz, der in Symbiose mit den Wurzeln des Baumes lebt und dabei dem Wirt Nährstoffe zuführt). Die Aufnahme-fähigkeit der Wurzeln für Nährstoffe sinkt dadurch, während die Auswaschung der Nährstoffe durch die Versauerung der Böden zunimmt.

Diese Ursachenhypothesen wurden teilweise experimentell bestätigt (Kreutzer, 1990 aus Prognos, 1992, Bd. 1, BMFT, 1993; bezüglich Zusammenhang Kronenschäden-Windfallholzanteils. Latt, 1991).

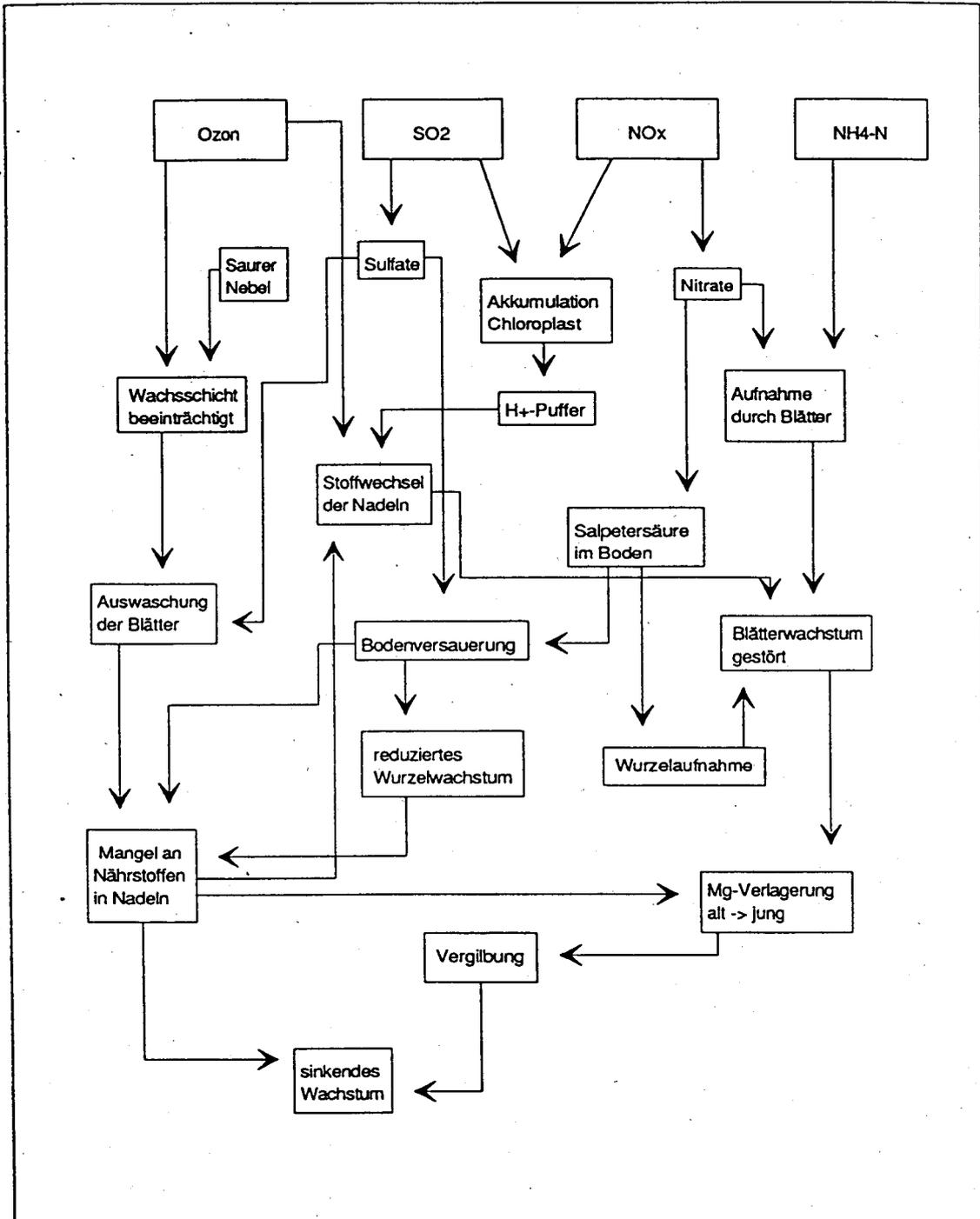
Die verschiedenen Effekte wirken teilweise als Stressoren und teilweise als Schadensauslöser. Für das Auftreten der Schäden dürfte aber immer das Zusammenspiel vielfältiger Einzelwirkungen verantwortlich sein, die je nach Standort, Bestand, Bewirtschaftung und Klima schadenauslösend wirken. Die folgende Figur illustriert die Zunahme der anthropogenen Risiken für die Waldbestände:



a) Mittlere Sommer-Ozonkonzentrationen von 1901 bis 1990, ergänzt aufgrund der Zusammenstellung von Montsouris, Arkona, Fichtelberg und Hohenpeissenberg (nach BUWAL, 1989)  
 b) Depositionen von Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ), Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) nach Schulze (1990) und von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) nach BUWAL (1987), von 1901 bis 1990, je in kg Stickstoff (N)/ha und Jahr bzw. kg Schwefel (S)/ha und Jahr  
 c) Normierte und integrierte Risikomomente der anthropogenen Einträge von a) und b) kumulativ aufgezeichnet  
 d) Gegenüberstellung der anthropogenen Stressoren aus c) und der natürlichen aus Abbildung 67c; die zunehmende Dominanz der anthropogenen Risiken im Verlaufe des 20. Jahrhunderts und die relativ geringe natürliche Belastung während der achtziger Jahre sind gut erkennbar.

Figur 2-2: Zeitliche Entwicklung von natürlichen und anthropogenen Risiken

Neben der Schadenswirkung für Waldökosysteme werden auch Auswirkungen auf den Wasser- und Lufthaushalt des Bodens und seine mechanische Stabilität erwartet (s. Prognos, 1992, Bd. 1, S. 69). Besonders bemerkenswert sind die mit andauernder Schadstoffbelastung der Wälder steigenden Auswaschungen von überflüssigem Stickstoff (Nitraten) aus Waldböden ins Grundwasser. Laut BMFT überschreitet in vielen deutschen Waldregionen mit hoher Stickstoffbelastung die Nitratkonzentration im Grundwasser den für Trinkwasser geltenden Grenzwert von 50 mg  $\text{NH}_3$  pro Liter (BMFT, 1993, S.3)



Figur 2- 3 Auswirkungen der wichtigsten Luftschadstoffe auf ober- und unterirdische Pflanzenteile

### 2.2.3 Folgerungen

Die neuartigen Waldschäden haben in der Schweiz zwar nicht zu einem grossflächigen Absterben ganzer Walder geführt, geben in ihrem Ausmass aber dennoch Anlass zur Besorgnis. Die leicht rückläufige Tendenz der Waldschäden gegen Ende der achtziger Jahre setzte sich 1990 und 1991 nicht fort, sondern wurde durch eine deutliche Verschlechterung des Waldzustandes abgelöst. Die diskutierten Ursachen sind vielfältig:

Klimaextrema, Immissionen (hohe Dosen) oder gewisse Bodenfaktoren führen zu vereinzelt Schäden an Pflanzen. Durch die Kombination solcher Faktoren können auch bei tiefen Belastungen Schäden auftreten. Da Extremwerte bzw. Extremdosen im Freiland aber zeitlich und örtlich meist begrenzt sind, können die grossflächigen Waldschäden weder durch das Klima oder einzelne Luftschadstoffe noch durch einzelne Bodenfaktoren allein hinreichend erklärt werden. Die Waldschäden sind deshalb nur durch komplexe Wirkungsmechanismen zu beschreiben; dabei können Immissionen direkt oder indirekt negativ wirken (Christ, 1988). Der Umstand, dass die Schäden nicht monokausal mit spezifischen Faktoren verknüpft werden können und in verschiedenen Bereichen noch ein grosser Forschungsbedarf vorhanden ist, erschwert die Beurteilung der Rolle von Luftschadstoffen als Ursache der neuartigen Waldschäden.

Gemäss der vorherrschenden Meinung kann allerdings gesagt werden, dass die energiebedingten Luftschadstoffe (Ozon, Schwefeldioxid, Stickoxide) an den neuartigen Waldschäden mitbeteiligt sind. Am besten wird dieser Umstand durch das Öko-Stress-Modell erklärt, wonach die Luftschadstoffe sogar wesentlich dazu beitragen, einer systemspezifischen Schadensschwelle näher zu kommen bzw. diese zu überschreiten. Jahrringanalysen an rund 900 Fichten und Tannen unterstützen die Hypothese, dass in den letzten 20 bis 30 Jahren ein zusätzlicher Stressfaktor wirksam geworden ist. Es muss weiterhin angenommen werden, dass dieser durch Luftschadstoffe bedingt ist (WSB, 1987). Mit Hilfe dieses Modelles sind auch die sehr vielfältigen Untersuchungsergebnisse in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften, klimatischen Verhältnissen, Baumbestand, Bewirtschaftung etc. erklärbar.

Wir gehen deshalb im weiteren davon aus, dass die energiebedingte Luftverschmutzung an den grossflächigen und andauernden Schädigungen der Wälder wesentlich mitbeteiligt ist.

## 2.3 Die Funktionen des Waldes

Bevor die Kosten der Waldschäden abgeschätzt werden, soll kurz auf die wichtigsten Funktionen oder Nutzen des Waldes hingewiesen werden. Folgende Bereiche stehen im Vordergrund:

- der Wald als Ressource
- die Schutzfunktion des Waldes
- die Erholungsfunktion des Waldes
- die Existenzfunktion des Waldes.

### 2.3.1 Der Wald als Ressource

Die intensivste Waldbewirtschaftung und Holznutzung erfolgt im schweizerischen Mittelland und im Jura. Die dezentrale Produktion hat eine grosse regionalwirtschaftliche Bedeutung. Holz ist einer der wenigen inländischen Rohstoffe für die Energieversorgung und die Bauwirtschaft.

### 2.3.2 Die Schutzfunktion des Waldes

Die Intensivierung der Nutzung des Berggebietes für Verkehrs-, Tourismus-, Energiegewinnungs- und Energietransportzwecke hat die Bedeutung der Schutzfunktion der Bergwälder vor Lawinen, Steinschlägen, Erdbeben und Hochwasser stark aufgewertet. Viele Siedlungen und Infrastrukturanlagen im Berggebiet (u.a. die alpenquerenden Verkehrsverbindungen) sind nur im Schutz von Bannwäldern möglich.

### 2.3.3 Die Erholungsfunktion der Wälder

Agglomerationsnahe Wälder spielen eine nicht zu unterschätzende Rolle für die Erholung nahe am Wohnort oder Arbeitsplatz. In den Bergwäldern überschneiden sich oft die Schutzfunktion und die Erholungsfunktion für die Touristen.

### 2.3.4 Übrige Funktionen

Neben den oben erwähnten Funktionen existieren noch viele Waldfunktionen, die je nach Situation bedeutsam sind:

- Ausgleichende Wirkung auf das Mikroklima (Schonstein, 1985, S. 141)
- Globale und regionale Klimaverhältnisse: Veränderung der Strahlungsabsorption und der Niederschlagsverhältnisse (Menge und Verteilung (Schonstein, 1985, S. 141f.))
- Verminderung von Lärm- und Luftbelastung (Staubfilter)
- Vor allem im Flachland bremst der Wald die starken Winde ab und bietet Siedlungen geschützte Standorte in seiner Nähe (Würmli, 1984, S. 116)?
- Lebensraum für Tiere und Pflanzen (Arterhaltung und -regulierung, Bioindikation sowie Objekt von Lehre und Forschung), Existenzfunktion
- Erhaltung von Trinkwasserreserven
- Landschaftsbild und Vermittlung von Naturwerten (Existenzfunktion)

## 2.4 Die Kosten luftschadstoffbedingter Waldschäden in der Schweiz

### 2.4.1 Einleitung, Grundlagen, Methodik

Die Auswirkungen der luftschadstoffbedingten Waldschäden werden hier den kostenrelevanten Schadensbereichen bzw. den Waldfunktionen zugeordnet und anschließend bewertet. Die Quantifizierung der Schäden in den verschiedenen Schadensbereichen erfolgt mit Hilfe der drei folgenden, zurzeit in der Schweiz verfügbaren Arbeiten. Ausländische Arbeiten (z. B. aus der BRD) können für die Kostenschätzungen nicht sinnvoll verwendet werden. Zu stark ist der Einfluss der lokalen Verhältnisse auf das Resultat (Art der Immissionen, der Böden, der Wälder (kaum Gebirgswälder in der BRD) und der Bewirtschaftung).

- Altwegg D., "Die Folgekosten von Waldschäden" (Altwegg, 1988)
- Basler & Partner, "Die wirtschaftlichen Folgen des Waldsterbens in der Schweiz" (B&P, 1986)
- Pfister F., "Walderhaltung und Schutzaufgaben im Berggebiet" (Pfister, 1987)

Die drei Arbeiten unterscheiden sich bezüglich Untersuchungsgegenstand, Annahmen, Randbedingungen und Methode zum Teil relativ stark. Ihre Resultate werden hier so-

---

2) Der Schutz vor Lärmbelastung ist nur bei ganzjährigen, nicht hochstämmigen Beständen gewährleistet; nach dem Laubfall geht diese Wirkung auf ungefähr einen Drittel zurück (Würmli, S. 117).

weit wie möglich auf eine gemeinsame Basis (Annahmen, Bezugsjahr etc.) gebracht, so dass sie miteinander verglichen werden können.

#### ■ **Altwegg, 1988**

Altweggs Untersuchung beschränkt sich auf die Folgekosten von Waldschäden durch die Beeinträchtigung der Schutzfunktion von Gebirgswäldern in der Schweiz. Als Gefahren werden insbesondere Lawinenabgänge, aber auch Überschwemmungen, Steinschläge und Erosion betrachtet.

? Altwegg geht von zwei Schadensszenarien aus:

- **Szenario A:** Vollständige Entwaldung im ersten Jahr nach dem Auftreten sichtbarer Schäden.
- **Szenario B:** Trendmässiger Verlauf; bis 2036 weisen rund 95% der Bäume äusserlich sichtbare Schadsymptome auf. Von den geschädigten Bäumen sterben 50% zehn Jahre nach Erkennbarkeit des Schadens.

Wir werden nur die Resultate von **Szenario B** weiterverfolgen, da Szenario A aus heutiger Sicht unrealistisch ist. In einem ersten Schritt schätzt Altwegg die Kosten zusätzlicher Lawinenabgänge infolge der Waldschäden. Dabei wendet er zwei Schätzmethoden an:

- Vermeidungs- bzw. Ersatzkosten: Kosten der Ersatzanlagen (Lawinenschutz) zur Vermeidung von zusätzlichen Lawinenabgängen infolge verminderter Schutzwirkung der geschädigten Wälder
- Schadenkosten der zusätzlichen Lawinenabgänge mittels Risikoanalyse

In einem zweiten Schritt beziffert Altwegg die Kosten der übrigen Gefahren (Steinschlag, Hochwasser etc.) pauschal auf zusätzlich mindestens 50% der Kosten für das Lawinenrisiko.

#### ■ **Basler & Partner (B&P, 1986)**

B&P geht von einem Waldschadensszenario aus, welches zwei Phasen von je 10 bis 20 Jahren aufweist. In der ersten Phase nimmt der Anteil der gesunden Wälder rasch ab. In Phase 2 verschlechtert sich der Zustand nur noch wenig. In den Schadensszenarien wird zwischen Berggebiet und Mittelland unterschieden. B&P ermittelt Vermeidungs- bzw. Ersatzkosten von Verbauungen gegen Lawinen, Wildbäche und Steinschläge sowie Schadenkosten aufgrund des noch verbleibenden Restrisikos und Kosten bzw. Erlösausfälle im Tourismus, in Industrie, Hochbau und Landwirtschaft. Bei letzteren handelt es sich jedoch teilweise nicht um Kosten im Sinne eines Ressourcenverbrauches, sondern nur um Verteilungseffekte.

#### ■ **Pfister, 1987**

Pfister unterstellt eine trendmässige Verschlechterung des Waldzustandes. Er geht von zwei Szenarien der Entwicklung der Schutzansprüche an den Wald im Berggebiet aus: Qualitative gleichbleibende und erhöhte Schutzansprüche. Mittels einer Umfrage bei Kreis- und Revierförstern im Berggebiet wurden Daten über forstliche Projekte, Problemflächen und die Folgen gestiegener Schutzansprüche erhoben. Daraus ergeben sich die erforderlichen zusätzlichen Aufwendungen infolge der (Berg-)Waldschäden und der erhöhten Schutzansprüche für die nächsten zehn Jahre.

## 2.4.2 Kosten der Waldschäden nach Schadensbereichen

### a) Der Wald als Ressource: Ertragsausfälle in der Forstwirtschaft

Der Wald wird bei der Beurteilung der Auswirkungen auf die Forstwirtschaft als erneuerbare Ressource und Anlagegut betrachtet. Neben den jährlich ausgewiesenen Flussgrössen (wie Erlöse der Forstwirtschaft) müssen auch die Bestandesveränderungen<sup>3)</sup> mit ihren Konsequenzen auf die künftigen Flussgrössen berücksichtigt werden.

Waldschäden führen zu Zwangsnutzungen. Übersteigen diese das Absorptionsvermögen der Nachfrage, sinken die Erlöse. Langerfristig kommt es dann zu einem Einbruch der Holznutzung in den verlichteten Wäldern (B&P, 1986). Die Zwangsnutzungen verursachen infolge dem zerstreut anfallenden, einzelstammweisen ‚Holzeinschlag zusätzlichen Aufwand (Pfister, 1986, S. 45; Burgbacher, 1988, S. 71; B&P, 1986, S. 24). Die erforderlichen neuen Erntekonzepte sind gefährlicher und teurer (Pfister, 1987, S. 44). Daneben ist die Zuwachsleistung kranker Bäume geringer. Bei abnehmender Stammzahl und sinkender Zuwachsleistung vermindert sich das Vermögen in Form des Holzvorrates. Zusätzliche Waldpflege und Sekundärschäden an geschwächten Bäumen (Wind, Schnee, Schädlinge, Pilze) verursachen weitere Kosten.

B&P schätzt die Erlösausfälle in der Forstwirtschaft infolge der immissionsbedingten Waldschäden auf 300-500 Mio Fr./a (1985). Dabei wird die Reduktion des Holzbestandes im Wald nicht berücksichtigt.

**In Anlehnung an B&P schätzen wir die Kosten der immissionsbedingten Waldschäden im Bereich der Forstwirtschaft auf 330 Mio Fr./a -560 Mio Fr./a im Jahr 1990.**

### b) Schutzfunktion des Waldes: Kosten zusätzlicher Naturgefahren

Die verminderte Schutzfunktion immissionsgeschädigter Walder führt zu einer Zunahme folgender Naturgefahren:

- zusätzliche Lawinenabgänge
- häufigere und stärkere Hochwasser
- Hangrutschungen, Erosion
- Zunahme der Steinschlaggefahren

Die bisherigen Untersuchungen messen dabei den zusätzlichen Lawinenabgängen das grösste Gewicht zu.

#### ■ Kosten zusätzlicher Lawinenabgänge

**Altwegg** stellt zwei Szenarien zur Waldschadenentwicklung auf der subalpinen und montanen Stufe auf. Wir schätzen aufgrund der heutigen Kenntnisse nur Szenario B als realistisch ein. Danach weisen auf diesen Stufen bis 2036 95% aller Bäume

---

3) Die jährliche Zuwachsleistung stellt einen Vermögenszugang dar, Abholzungen (Zwangsnutzungen) einen Vermögensabgang.

B&P schätzt die Kosten zusätzlicher Wildbachverbauungen, Hangverbauungen, Fluss- und Bachkorrekturen aufgrund der Faktoren Hangneigung, Bewaldung und Hydrologie (B&P, 1986, S. 21ff.).

#### ■ Zusammenfassung der Kosten zusätzlicher Naturgefahren

Die in den drei Studien ermittelten Schadens- und Ersatz- bzw. Vermeidungskosten werden anschliessend auf das Bezugsjahr 1990 umgerechnet (unter Berücksichtigung der Teuerung gemäss KPI). Liegen die Kostenangaben ursprünglich als Summe eines Kostenstromes über eine Periode von beispielsweise 30 Jahren vor, so gehen wir von einem konstanten Kostenstrom aus. Daneben werden die resultierenden Kosten in der Periode von 1990-2020 als Barwert 1990 eines konstanten Kostenstromes von 30 Jahren ermittelt (reale Diskontrate: 2 % p.s.).

| Kosten von Naturgefahren                       | Jahreskosten 1990<br>Mio Fr./a | Barwert 1990 der<br>Kosten 1990-2020<br>Mrd Fr. (30 Jahre) |
|--|--------------------------------|--|
| <b>Altwegg</b>                                 |                                |  |
| - Ersatzkosten, Lawinen, Stahlverbauungen      | <b>1'123</b>                   | 25   |
| - Ersatzkosten, Lawinen, temporäre Verbauungen | <b>508</b>                     | 11   |
| - Schadenkosten, nur Lawinen                   | <b>1'160</b>                   | 26   |
| - Ersatzkosten, alle Naturgefahren             | <b>1'685</b>                   | 38   |
| - Schadenkosten, alle Naturgefahren            | <b>1'770</b>                   | 4 0  |
| <b>B&amp;P</b>                                 |                                |  |
| - Ersatzkosten, alle Naturgefahren             | <b>887</b>                     | 15   |
| plus   | +                              | +  |
| Schadenkosten für das Restrisiko               | <b>522</b>                     | 12   |
| <b>Pfister</b>                                 |                                |  |
| - Vermeidungskosten                            | <b>408</b>                     | 9  |
| Alle Naturgefahren total, Kostenbereich        | <b>408-1'770</b>               | 9-40   |

Tabelle 2-1: Kosten zusätzlicher Naturgefahren infolge immissionsbedingter Waldschäden (nach Berechnungsansatz) im Jahr 1990 bzw. als Barwert 1990 des konstanten Kostenstromes über 30 Jahre (1990-2020)

Die Schadens- und Ersatzkosten liegen bei Altwegg nahe beieinander. Theoretisch mussten solange Ersatz- bzw. Vermeidungsmassnahmen ergriffen werden, als die Grenzkosten zur Vermeidung von Schäden kleiner sind als die Grenzkosten der resultierenden Schäden. B&P betrachtet die Schadens- und Ersatzkosten nicht alternative, sondern geht von einem Mix von verbleibenden Schäden und Vermeidungsmassnahmen aus. Die resultierenden Kosten liegen mit 1'190 Mio Fr./a im Bereich der Kostenschätzungen von Altwegg.

**c) Schadenkosten im Bereich der Berglandwirtschaft**

Gemäss B&P liegen 700-900 landwirtschaftliche Betriebe unterhalb von immissionsgeschädigten Wäldern mit ausgeprägter Schutzfunktion (B&P, 1986, S. 32f.). B&P rechnet mit Faktoreinkommensausfällen von 35-45 Mio Fr./a (1985) bzw. 39-50 Mio Fr. (1990) infolge der immissionsbedingten Waldschäden. Bei Altwegg sind diese Folgekosten bei den Kosten erhöhter Naturgefahren integriert.

**d) Einnahmehausfälle im Tourismus**

Die Landschaft - und die zugehörigen Wälder, als Teile des Landschaftsbildes - sind das Grundkapital für den Tourismus in den Bergen. Waldschäden vermindern die Erholungsqualität von Tourismusgebieten:

- Verarmung des Landschaftsbildes

- Negative Auswirkungen auf die Psyche der Touristen (beeinträchtigt Wald-erlebnis)

- Verstärkte Einwirkung der Witterung auf touristische Aktivitäten

- Vermehrte Lärmbelästigung durch fehlende Bewaldung und vermehrte Massnahmen zur Walderhaltung

- Erschwerung der Wasserversorgung im Winter durch geringere Speicherfähigkeit des Waldes

- Zunahme der Gefährdung von touristischen Anlagen durch Naturgefahren

B&P schätzt den Rückgang der Übernachtungen im Berggebiet auf 20-30%. Wir verwenden anschliessend den Wert von 20% (B&P, 1986, S. 29). Die Einnahmehausfälle im Berggebiet betragen dann etwa 280 Mio Fr. (1985) bzw. 310 Mio Fr. (1990).

**e) Weitere, nicht quantifizierte Effekte**

Neben den oben quantifizierten Schäden haben die immissionsbedingten Waldschäden weitere Wirkungen, die hier nicht quantifiziert werden:

- Aufwendungen für die Waldforschung und Beobachtung (s. INFRAS, Aug. 1992)

- Wertminderung der verbleibenden Bestände

- Bodenwertminderungen

- Gefährdung des bisherigen Systems von Waldbewirtschaftung und -pflege

- Regionalwirtschaftliche Auswirkungen, Abwanderung aus dem Berggebiet

- etc.

**2.4.3 Verminderung des Erholungswertes stadtnaher Wälder**

Neben seiner Funktion als Ressource für die Forstwirtschaft und der Schutzfunktion in den Bergen hat der Wald eine bedeutsame Funktion als Erholungsraum für Agglomerationen und Städte. Im Mittelland fällt die Schutzfunktion von Wäldern weitgehend

weg, dafür tritt die Erholungsfunktion in den Vordergrund, wobei dem Tourismus geringe Bedeutung zukommt.

Für die Region Lugano schätzte Nielsen die Zahlungsbereitschaft für den sogenannten Erlebniswert des Waldes (monetärer Nutzen der jährlichen Waldbesuche; Nielsen, 1991 und 1992). Neben dem Erlebniswert für die Erholungssuchenden ermittelte Nielsen auch den Existenzwert, den sämtliche BewohnerInnen der Region Lugano den stadtnahen Wäldern zuordnen (Nielsen, 1991, S. 35ff.). Der Existenznutzen besteht zusätzlich zum Erlebnissenutzen. Er gibt die Wertschätzung der Existenz des Waldes an - unabhängig davon, ob der Wald besucht wird. In der Region Lugano ermittelte Nielsen einen Erlebnisnutzen von jährlich durchschnittlich Fr. 3'000.- pro WaldbesucherIn. Dazu kommt ein Existenzwert von jährlich rund Fr. 700.- pro BewohnerIn. Für die gesamte Region Lugano ergibt dies einen Erholungsnutzen von mindestens 250 Mio Fr./a (Nielsen, 1992).

Für die Hochrechnung auf die Schweiz geht Nielsen von 8 Agglomerationen mit mindestens gleich grosser Dichte und Zentralitätscharakter wie Lugano aus. Das ergibt für die ganze Schweiz einen Nutzen stadtnaher Erholungswälder von jährlich mindestens 2 Milliarden Franken. Es stellt sich nun die Frage, inwieweit dieser Nutzen durch die immissionsbedingten Waldschäden vermindert wird. Dies hängt massgeblich vom resultierenden Waldbild und den direkten sowie indirekten Wirkungen der intensivierten Waldpflege oder Bewirtschaftung ab. Ewers schätzte die Reduktion der Waldbesuche infolge der trendmässigen Waldschadenentwicklung auf 11% der Waldbesuche (Ewers, 1986, S. 135). Ecoplan erwartet dagegen bei den in der Region Bern auftretenden Waldschäden (Anteil kranker Bäume 25% - 30%) keine Abnahme der Waldbesuche (mindestens bis ins Jahr 2000; Ecoplan B, 1992, S. 36). Wir gehen hier von einem immissionsbedingten Rückgang der Waldbesuche von 0% -10% aus. Die resultierenden Nutzeneinbussen betragen dann 0% bis 10% (Nutzeneinbussen der BesucherInnen die nicht mehr gehen + Nutzeneinbussen der BesucherInnen, die immer noch gehen): Immissionsbedingte Beeinträchtigung des Erholungsnutzens (Erlebnis- und Existenzwert) 0-200 Mio Fr. pro Jahr.

## **2.5 Folgerungen: Die Kosten der luftschadstoffbedingten Waldschäden in der Schweiz um 1990**

Von den Ursachenforschern in der Schweiz sind keine verbindlichen Aussagen zu den Ursachen der auftretenden Waldschäden zu erhalten. Die Schadenentwicklung in der Schweiz und im umliegenden Ausland deutet jedoch immer noch auf eine Zunahme der Waldschäden - verstärkt bei Laubbäumen - hin. Die Beteiligung der Luftverschmutzung als Auslöser oder mindestens als nitverursachender Faktor an dieser Entwicklung muss angenommen werden.

Die hier quantifizierten Schäden basieren auf Studien, welche in der zweiten Hälfte der achtziger Jahre erarbeitet wurden. Die dort unterstellten Schadensszenarien - mindestens diejenigen, die hier weiter verwendet werden - weichen nicht wesentlich von der in der Zwischenzeit abgelaufenen Entwicklung ab, wenn auch vermutet werden kann, dass die Schadenentwicklung etwas weniger negativ verlaufen könnte als in den Schadensszenarien angenommen wurde.

Die mit den unterschiedlichen Ansätzen gerechneten Kosten (Schadens- und/oder Vermeidungskosten) quantifizieren nur einen (fassbaren) Teil der gesamten Kosten bzw. Nutzeneinbusse infolge der immissionsbedingten Waldschäden (s. folgende Tabelle). Die gesamten Kosten dürften noch wesentlich höher liegen.

Die zusätzlichen Naturgefahren verursachen die grössten Kosten. Die Ersatzkosten von Pfister dürften dabei eine absolut unterste Grenze darstellen. Die Kosten der übrigen Naturgefahren (ausser Lawinen) wurden sehr pauschal geschätzt. Dasselbe gilt für die Reduktion des Erholungsnutzens infolge der Waldschäden. Angesichts der vielen nicht untersuchten bzw. quantifizierten Waldschadenkosten dürfte der Kostenbereich von 1,1 Mrd Fr./a bis 2,8 Mrd Fr./a (1990) eine untere Kostengrenze darstellen.

Für die Entstehung dieser Schäden sind primär die Schwefeldioxid-, die Ozon- und die Stickstoffoxidemissionen sowie die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft verantwortlich. Die Ozonemissionen entstehen über die Umwandlung von Kohlenwasserstoffen (VOC) und Stickstoffoxiden unter Mitwirkung der Sonnenstrahlung (nur in der warmen Jahreszeit). Seit einiger Zeit wird vermehrt auf den wesentlichen Anteil der Stickstoffemissionen aus der Landwirtschaft (Ammonium-Stickstoff) an den verursachten Waldschäden hingewiesen (z.B. BMFT, Mai 1993, S. 6; NZZ, Jan. 1993, S. 65). Im NZZ-Bericht werden diese Emissionen sogar als Hauptverursacher bezeichnet. Wir gehen deshalb davon aus, dass die Hälfte der luftschadstoffbedingten Waldschäden der Landwirtschaft angerechnet werden müssen. Der Beitrag der Feuerungsemissionen, der Wärme- und Stromversorgung an die verbleibende Hälfte der immissionsbedingten Waldschäden wird über ihren Anteil an den jährlichen Schwefeldioxid- und Stickstoffoxidemissionen sowie über ihren Anteil an den sommerlichen Kohlenwasserstoff- und Stickstoffoxidemissionen (für O<sub>3</sub>) ermittelt. Die toxizitätsorientierte Gewichtung der einzelnen Schadstoffe ist unseres Erachtens zurzeit nicht möglich, da die Kenntnisse über die Ursachen-wirkungszusammenhänge dafür nicht ausreichen. Es dürfte auch eine Rolle spielen, ob primär akute Belastungsspitzen oder die dauernde Belastung Schäden auslösen. Die andauernde Schadstoffbelastung der Wälder dürfte in Zukunft zusätzliche - hier nicht berücksichtigte - Belastungen verursachen: Zunahme der Nitratkonzentration im Grundwasser durch ausgewaschene Stickstoffdepositionen aus der Luft (NO<sub>x</sub> N H<sub>4</sub>).

|  | Jahreskosten<br>1990<br>Mio Fr./a | Barwert 1990 der<br>Kosten 1990-2020<br>Mrd Fr./30 Jahre |
|--|-----------------------------------|--|
| Forstwirtschaft  |                                   |  |
| a) B&P, Schadenkosten  | 330-560                           | 7-13   |
| Naturgefahren  |                                   |  |
| b) Altwegg, Ersatzkosten, alle Naturgefahren   | 1'690                             | 38   |
| c) Altwegg, Schadenkosten, alle Naturgefahren  | 1'770                             | 40   |
| d) B&P, Ersatzkosten plus  | 670                               | 15   |
| B&P, Schadenkosten für das Restrisiko  | 520   1'190.                      | 12   27  |
| e) Pfister, Ersatzkosten   | 410                               | 9  |
| Berglandwirtschaft   |                                   |  |
| f) B&P, Ausfälle Faktoreinkommen   | 40-50                             | 1  |
| Altwegg, bei Naturgefahren enthalten   | ---                               | --   |
| Tourismus  |                                   |  |
| g) B&P, Ausfälle Faktoreinkommen   | 310                               | 7  |
| Erholungsnutzen  |                                   |  |
| h) Nielsen, Reduktion Erholungs- und Existenz-<br>nutzen   | 0-200                             | 0-4  |
| Total Kosten der immissionsbedingten Wald-<br>schäden (a+e+f+g+h bzw. a+ b+g+h<br>davon Feuerungen und Verkehr | 1'090-2'840<br>550-1'420          | 24-64<br>12-32   |

Tabelle 2-2: Kosten immissionsbedingter Waldschäden in der Schweiz 1990. Zusammenstellung nach Schadensbereich und Schätzmethode. Jahreskosten 1990 sowie Barwert 1990 eines konstanten Kostenstromes über 30 Jahre (1990-2020)

Von den gesamten Kosten wird die Hälfte den (Ammonium-) Stickstoffemissionen der Landwirtschaft und die Hälfte den energiebedingten SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und NMVOC-Emissionen angerechnet.



## 3. Landwirtschaftliche Produktionsausfälle infolge der Luftverschmutzung

### 3.1 Einleitung

Bisher hatte die Schädigung von Pflanzen durch die Luftverschmutzung primär lokales Ausmass, war Resultat von Emissionen gewisser Industriebetriebe. Die in der jüngeren Vergangenheit stark angestiegene überregionale Belastung der Luft durch Luftschadstoffe führt zu Beeinträchtigungen der Pflanzenproduktion. Im Gegensatz zu der Situation bei den Waldschäden, wo über die Ursachen und Zusammenhänge sowie über die künftig zu erwartende Schadenentwicklung noch grosse Ungewissheiten bestehen, sind aufgrund jungerer Untersuchungen empirisch recht gut abgestützte Aussagen über den Einfluss der sommerlichen Ozonbelastung auf die Pflanzenproduktion möglich. Ein Grund für diesen Unterschied ist sicher darin zu sehen, dass bei Bäumen mit Lebenszyklen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten, bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen dagegen nur mit Jahren gerechnet werden muss. Die Reaktion auf veränderte Umweltsituationen ist bei den Kulturpflanzen daher viel schneller, was empirische Untersuchungen und die Ursachenforschung wesentlich vereinfacht. Trotzdem bestehen natürlich auch im Bereich der Kulturpflanzen noch beträchtliche Ungewissheiten, die zum Teil daher rühren, dass amerikanische Daten zu den Expositions-Wirkungszusammenhängen verwendet werden mussten. Die in der Schweiz durchgeführten Experimente deuten darauf hin, dass die Wirkungen der Ozonbelastung dadurch eher unterschätzt werden.

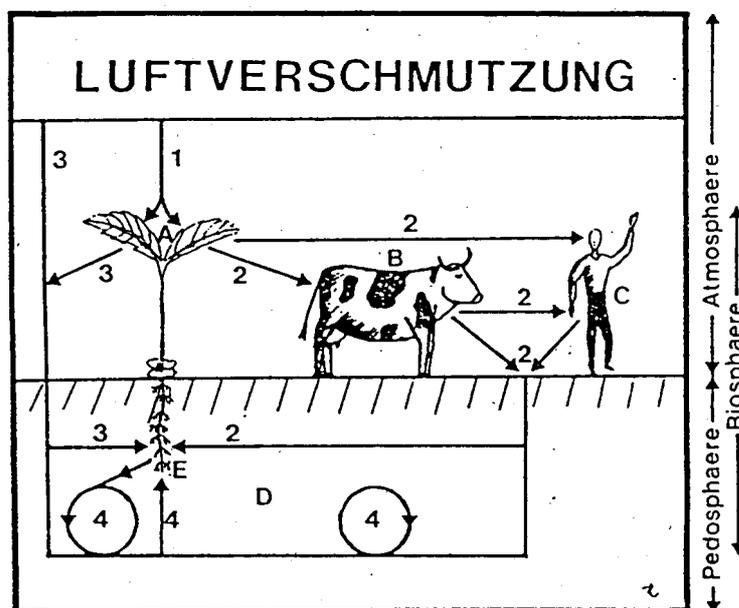
Die hier vorgenommenen Schätzungen von Ertragsverlusten und resultierenden monetären Kosten infolge der Ozonbelastung basieren auf den Arbeiten an der Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC) sowie auf der Dissertation von Näf (Fuhrer, 1988; Fuhrer et al, 1989; Stadelmann, 1988; Näf, 1991).

In Abschnitt 3.2 werden die Wirkungen der Luftschadstoffbelastung auf die Kulturpflanzen kurz dargestellt und auf Ozon als relevanten Schadstoff hingewiesen. Abschnitt 3.3 befasst sich näher mit den Ozonwirkungen und den davon beeinträchtigten Kulturen. Danach wird beschrieben, welche Regionen in der Schweiz untersucht werden. In Abschnitt 3.4 werden zuerst die Ertragsausfälle und dann mit Hilfe des Optimierungsmodells von Näf die resultierenden Kosten abgeschätzt. Dabei werden noch zusätzliche ozonempfindliche Kulturen mitberücksichtigt und der Einfluss der Subventionen auf die resultierenden Kosten abgeschätzt.

## 3.2 Die Wirkung der Luftschadstoffe auf landwirtschaftliche Kulturen

### 3.2.1 Wirkungswege der Luftverschmutzung auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion

Beim Einfluss der Luftverschmutzung auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion sind vier Wirkungswege (1-4) mit fünf Wirkungsorten (A-D) von Bedeutung, wie aus Figur 3-1 hervorgeht (Stadelmann, 1988, S. 43):



Figur 3-1: Einfluss der Luftverschmutzung auf die Pflanzenproduktion: Wirkungswege (1-4) und Wirkungsorte (A-D). 1-4 = Wirkungswege (Erklärung im Text). A = Spross (oberirdische Pflanzenorgane, Blätter), B = Tier, C = Mensch, D = Boden, E = unterirdische Pflanzenorgane (Wurzeln) (Stadelmann, 1988)

- Luftschadstoffe, -insbesondere gasförmige wie  $O_3$ , HF,  $SO_2$ , NO und  $NO_2$  können über die oberirdischen Pflanzenorgane (A) in die Pflanzen gelangen, sich in ihnen in umgewandelter Form anreichern oder den Stoffwechsel, den Ertrag und die Qualität der Kulturen beeinträchtigen. Die Wirkung kann akut oder chronisch sein. Akute Schäden, welche sich zum Beispiel als sichtbare Blattzerstörungen (Nekrosen) oder Blattverluste äussern, sind das Ergebnis der Einwirkung hoher Konzentrationen während kurzer Zeit. Wirken mässig hohe Konzentrationen von Schadgasen während längerer Zeit ein, so entstehen chronische Schädigungen, welche sich als Ertragsverluste äussern können, ohne dass an den Pflanzen von Auge sichtbare Symptome festzustellen wären.

- Luftschadstoffe können auf die Pflanzenoberflächen abgelagert und zum Teil in , Pflanzenorgane eingelagert werden. Diese Schadstoffe, welche die Pflanzen als Träger benutzen, können beim Konsum die Gesundheit von Tier (B) und Mensch (C) gefährden, sich im Körper anreichern oder ihn (grösstenteils) passieren und gelangen über die tierischen und menschlichen Ausscheidungen in Form von Hof- und Abfalldüngern in den Boden (D), wo sie über die Wurzeln oder andere unterirdische Organe (E) auf die Pflanzen einwirken können. Die Verunreinigung der Pflanzenoberflächen durch Schadstoffe aus der Luft bedeutet eine Qualitätsminderung der landwirtschaftlichen Erzeugnisse. Dieser Wirkungsweg wird vor allem von folgenden Schadstoffen beschriftet: Blei (Autobahndeposition), Cadmium, Quecksilber, Fluor, Chlor, organischen Schadstoffen wie polychlorierten Biphenylen, radioaktiven Nukliden wie Jod 131, Cäsium 134 und 137, Strontium 89 und 90 (nach dem Tschernobyl-Unfall). Betroffen von diesem Wirkungsweg ist vor allem die Landwirtschaft in unmittelbarer Umgebung von Emittenten wie Kehrlichtverbrennungsanlagen, Autobahnen/Autostrassen und speziellen Industriebetrieben.
- Luftschadstoffe wie Schwermetalle und organische Schadstoffe können direkt auf den Boden deponiert, von den oberirdischen Pflanzenorganen abgewaschen oder abgeblasen werden oder über die Ernterückstände (z.B. Rübenlaub, Kartoffelstauden) in den Boden gelangen und so über die Wurzeln auf die Pflanzen einwirken. In Extremfällen, zum Beispiel in der Umgebung von Verzinkereien, können so bei zweikeimblättrigen Kulturen (z. B. Rüben) auf sauren Böden Ertragsausfälle auftreten oder Pflanzen können überhöhte Schadstoffgehalte aufweisen.
- Luftschadstoffe, welche direkt oder indirekt aus der Luft in den Boden gelangen, können die biologischen, chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften derart verändern, dass sich diese veränderten Bodeneigenschaften auf die Wurzeln und somit die Pflanzenproduktion auswirken. Als Stichworte seien erwähnt: veränderte Nährstoffverfügbarkeit, pH-Veränderung des Bodens, Verminderung der Humusmenge und Humusqualität.
- Die Luftverschmutzung ist zeitlich verschieden stark. Schwefeldioxid-Konzentrationen sind im Winter höher als im Sommer, dafür sind die Ozonimmissionen im Sommer höher als im Winter und am Tag höher als in der Nacht. Im Hinblick auf die Beurteilung der Schadstoffexposition und des damit verbundenen Risikos für landwirtschaftliche Kulturpflanzen ist dies von besonderer Bedeutung, da viele landwirtschaftliche Kulturpflanzen während ihrer Entwicklungs- und Reifezeit hochsommerlichen Immissionen ausgesetzt sind (Fuhrer et al. 1989, S. 8). Gleichzeitig sind im täglichen Ablauf die Spaltenöffnungen der Blätter, durch welche schädliche wie nützliche Gase aufgenommen werden, zum Beispiel während der immissionspitzen von Ozon besonders gross.

### 3.2.2 Welche Luftschadstoffe sind für die Ertragseinbaussen relevant?

In einer Studie der FAC (Fuhrer et al., 1989) wird die Bedeutung verschiedener Schadstoffe für die Landwirtschaft abgeschätzt. Dabei werden für die in Frage kommenden Schadstoffe ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , HF, pH-Wert der Niederschläge) sogenannte Schwellenkonzentrationen in Abhängigkeit von der Einwirkungszeit ermittelt, ab welchen mit Schäden zu rechnen ist. Diese Schwellenkonzentrationen werden den typischen Immissionsdaten in ländlichen Regionen während der Vegetationsperiode gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass bei den ländlichen Immissionen in der Schweiz nur beim Ozon die Schwellenkonzentration überschritten wird (lokal treten auch bei Fluorwasserstoffen [HF] relevante Immissionen auf, welche jedoch nicht aus dem Energiebereich stammen, sondern aus der Aluminiumindustrie).

Die kritischen Schwellenwertbereiche der verschiedenen Schadstoffe werden in der folgenden Übersicht dargestellt:

|                  |                   | ppb      | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | pH       |
|------------------|-------------------|----------|--------------------------|----------|
| Schwefeldioxid   | ( $\text{SO}_2$ ) | 10-30    | 30-85                    |          |
| Stickstoffdioxid | ( $\text{NO}_2$ ) | 120-200  | 240-420                  |          |
| Fluorwasserstoff | (HF)              | 0,2 -1,2 | 0,3- 1,2                 |          |
| Ozon             | ( $\text{O}_3$ )  | 30-40    | 60-80                    |          |
| Niederschläge    | (pH-Wert)         |          |                          | 3,5- 3,0 |

Tabelle 3-1: Schwellenwertbereich für pflanzenschädigende Konzentrationen verschiedener gasförmiger Schadstoffe und kritischer Bereich für den pH-Wert von Niederschlägen (Fuhrer et al., 1989)

## 3.3 Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die landwirtschaftlichen Kulturen in der Schweiz

### 3.3.1 Einleitung

In der Untersuchung der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrilkulturchemie und Umwelthygiene (Fuhrer et al., 1989) wird versucht, aufgrund von Literaturangaben über die Wirkung von Luftschadstoffen auf Pflanzen und aufgrund von Daten zur schweizerischen Immissionssituation die möglichen Auswirkungen auf landwirtschaftliche Kulturpflanzen in der Schweiz theoretisch abzuschätzen. Dabei werden die Auswirkungen auf den Pflanzenertrag einerseits und auf die Pflanzenqualität andererseits unter-

sucht. Für diesen Bericht von Interesse sind vor allem die Aussagen, über die Ertragsausfälle.

In der Studie von Näf (1991) wird dem ökonomischen Aspekt mehr Beachtung geschenkt. Die gewonnenen Erkenntnisse der Arbeit von Fuhrer et al. (1989) werden als Grundlage benutzt und in ein ökonomisches Modell integriert. Anhand von unterschiedlichen hypothetischen Immissionsszenarien werden sowohl monetäre Effekte (monetarisierter Ertragsverluste) als auch Anpassungsreaktionen der landwirtschaftlichen Produzenten betrachtet.

Wie bereits im vorangehenden Abschnitt erwähnt, erweisen sich in der Schweiz die Ozon-Immissionen als besonders schädlich. Beide Berichte konzentrieren sich daher auf die Schadenwirkungen von Ozon.

Die ausgewählten Untersuchungsregionen, die Methode und die Resultate der Studien werden anschliessend zusammenfassend dargestellt.

### 3.3.2 Die Wirkungen von Ozon auf die Kulturpflanzen

Ozon wird einerseits natürlich, durch den UV-Anteil der Sonnenstrahlung produziert, deshalb steigt die Ozonkonzentration mit zunehmender Höhe. Andererseits entsteht Ozon als Folgeprodukt beim Abbau von Luftschadstoffen (v.a. Stickstoffoxid und Kohlenwasserstoffe). Die komplizierte Dynamik der Ozonproduktion sowie die Ozon-Verfrachtungen in der Atmosphäre haben zur Folge, dass die Ozonkonzentration im Sommer in den Städten starken Tag/Nacht-Schwankungen unterworfen ist: Tagsüber hohe Konzentration (Produktion durch Strahlung und Schadstoffe) - nachts tiefe Konzentration (schneller Abbau durch die katalytische Wirkung der übrigen Schadstoffe in der Stadtatmosphäre). In der ländlichen Atmosphäre ist die Konzentration dagegen relativ konstant und tendenziell hoch (Verfrachtung von verschmutzungsinduziertem Ozon plus natürliche Produktion, aber kein beschleunigter Abbau nachts). Die zu erwartende Schadenwirkung von Ozon ist daher in ländlichen Gebieten höher als in städtischen. Im Winter sind die Ozonkonzentrationen normalerweise gering.

Wie der Pflanzennährstoff Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) dringt Ozon tagsüber durch die Spaltöffnungen in die Blätter ein. Die Anzahl und die Öffnungsweite der Spaltöffnungen bestimmen, wieviel Ozon ins Blatt eindringen kann. Je nach Anzahl und Grösse der Spaltöffnungen sind somit einzelne Pflanzen mehr oder weniger ozonempfindlich.

Ozonkonzentrationen, wie sie im Sommer im Mittelland auftreten, reichen aus, um Schädigungen an Kulturpflanzen hervorzurufen. Um zu entscheiden, welche in der Schweiz angebauten Kulturen und Sorten besonders ozonempfindlich sind, müssen Ergebnisse ausländischer Untersuchungen herbeigezogen werden. In der folgenden Tabelle wird die relative Empfindlichkeit verschiedener landwirtschaftlicher Kulturpflanzen ausgewiesen.

| sehr empfindlich: |              | empfindlich: | weniger empfindlich: |
|-------------------|--------------|--------------|----------------------|
| Zwiebel           | Kartoffel    | Kohl         | Sellerie             |
| Hafer             | Spinat       | Rübsen       | Rübe                 |
| Buchweizen        | Rotklee      | Endivie      | Erdbeere             |
| Gerste            | Weissklee    | Gurke        | Kopfsalat            |
| Tomate            | Weizen       | Mohrrübe     | Senf                 |
| Luzerne           | Weinrebe     | Petersilie   |                      |
| Tabak             | Zuckermals   | Erbse        |                      |
| Bohne             | Knaulgras    | Ackerbohne   |                      |
| Radieschen        | Timothe Gras | Mais         |                      |
| Roggen            |              |              |                      |

Tabelle 3-2: Relative Empfindlichkeit von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen gegenüber Ozon (Fuhrer, 1988)

Nicht immer sind die Schäden durch die Ozoneinwirkungen, wie zum Beispiel Flecken an den Blättern, deutlich sichtbar. Die Auswirkungen von Ozonbelastungen bleiben in vielen Fällen verborgen. Zu den wichtigsten Ozonschädigungen gehören:

- Verminderung von Wachstum und Ertrag
  - Verkürzung der Lebensdauer
- Verlust der Widerstandskraft gegenüber anderen Belastungen wie Wassermangel, Pilzinfektionen, Kälte etc.

Zudem können Ozoneinwirkungen zu Veränderungen der Qualität des Erntegutes führen (Proteingehalt in Körnern und Samen steigt und sinkt in Blättern, Kohlenhydratkonzentrationen nehmen in den meisten Fällen ab, Mineralstoffgehalte können sowohl steigen als auch sinken; Fuhrer, 1989). Qualitative Änderungen scheinen aber im Vergleich zu quantitativen Änderungen eine weniger bedeutende Rolle zu spielen.

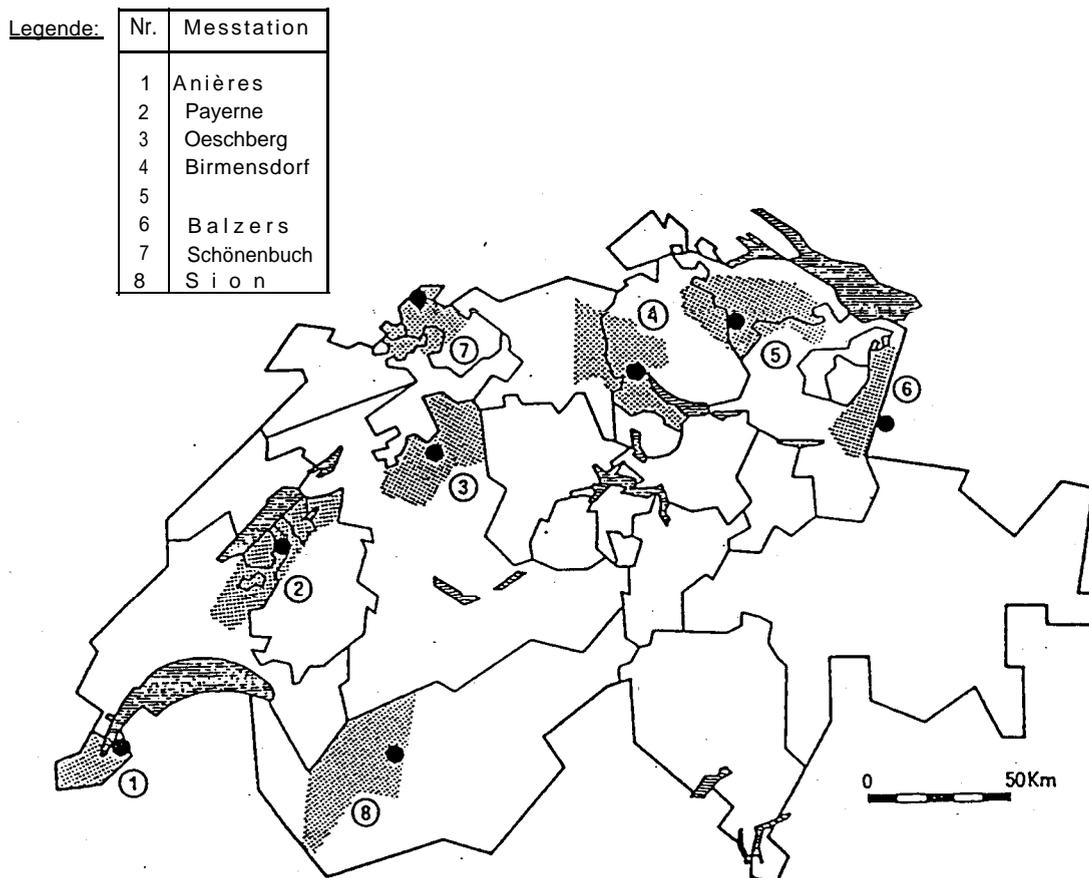
### 3.3.3 Die untersuchten Regionen in der Schweiz ihre Kulturen und ihre Immissionen

#### a) Untersuchungsregionen

In den Untersuchungen von Fuhrer et al. (1989) und Näf (1991) werden die Untersuchungsregionen aufgrund folgender Kriterien ausgewählt:

- Immissionsdaten verfügbar
- agronomische Daten verfügbar
- wichtiges Anbaugesbiet
- klimatische und topografische Homogenität innerhalb der Region

Acht über die wichtigsten pflanzenbaulich genutzten Produktionsgebiete der Schweiz verstreute Messstationen (Payerne VD, Tänikon TG, Sion VS, Birmensdorf ZH, Schönenbuch BL, Oeschberg BE, Anières GE, Balzers FL) bilden die Grundlage, um acht landwirtschaftliche Untersuchungsregionen mit etwa gleicher Luftqualität (Ozonbelastung) abzustecken.



Figur 3-2: Lage der acht Untersuchungsregionen. Die schwarzen Punkte bezeichnen die Lage der Messstationen (Fuhrer et al., 1989)

### b) Kulturen

Die untersuchten Kulturen wurden anhand der drei folgenden Kriterien ausgewählt

wichtige Kultur in der schweizerischen Landwirtschaft

- Ertragsverlustfunktion (Schadensfunktion) verfügbar
- Anbaudaten verfügbar

Dies führte zur Auswahl folgender Kulturen:

Kunstwiese

Weizen (Sommer-, Winterweizen)

Mais (Futtermais)

- Rüben (Zucker- und Futterrüben)
- Feldgemüse (Spinat, Zwiebeln etc.)
- Hülsenfrüchte (Ackerbohnen, Soyabohnen)
- Reben

Die folgende Tabelle enthält die Flächenanteile der ausgewählten Kulturen in den verschiedenen Untersuchungsregionen:

| Kultur                          | Flächenanteile [in %] |       |       |        |       |       |       |       |
|---------------------------------|-----------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
|                                 | (1)                   | (2)   | (3)   | Region |       | (6)   | (7)   | (8)   |
|                                 |                       |       |       | (4)    | (5)   |       |       |       |
| Kunstwiese                      | 6.0                   | 29.9  | 55.9  | 33.6   | 27.9  | 23.7  | 25.3  | 2.4   |
| Weizen                          | 54.3                  | 41.9  | 25.2  | 26.6   | 30.2  | 5.9   | 41.0  | 1.7   |
| Mais                            | 13.8                  | 15.5  | 13.8  | 31.1   | 26.1  | 51.6  | 26.9  | 2.0   |
| Rüben                           | 0.5                   | 9.9   | 3.9   | 2.9    | 10.5  | 4.9   | 1.2   | 0.2   |
| Feldgemüse                      | 4.7                   | 2.0   | 1.0   | 4.5    | 3.7   | 12.5  | 4.0   | 14.2  |
| Hülsenfrüchte                   | 2.4                   | 0.3   | 0.1   | 0.3    | 0.2   | 0.1   | 0.6   | 0.1   |
| Reben                           | 18.3                  | 0.5   | 0.0   | 1.0    | 1.4   | 1.3   | 1.0   | 79.4  |
| % LN                            | 63                    | 61    | 52    | 36     | 33    | 16    | 34    | 42    |
| landwirtsch.<br>Nutzfläche (ha) | 11902                 | 39111 | 37893 | 25878  | 43610 | 12936 | 13622 | 11616 |

Tabelle 3-3: Flächenanteile (in %) der berücksichtigten Kulturen, deren Anteil an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) der einzelnen Regionen (% LN) und die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche der Regionen [in ha] (Fuhrer et al., 1989)

Die gesamte Fläche der acht Regionen beträgt 196'568 ha oder 18% der schweizerischen landwirtschaftlichen Nutzfläche.

### c) Immissionswerte

Für die verschiedenen Regionen ergaben sich die folgenden Immissionswerte:

| Standort<br>Messtellen | Region | 1987                        |                             |     | 1988                        |                             |     | Durchschnitt |    |    |
|------------------------|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----|-----------------------------|-----------------------------|-----|--------------|----|----|
|                        |        | 7                           | 12                          | 24  | 7                           | 12                          | 24  | 7            | 12 | 24 |
|                        |        | [ppb]                       |                             |     | [ppb]                       |                             |     | [ppb]        |    |    |
| Anières                | 1      | 5 <sup>7<sup>1)</sup></sup> | 5 <sup>5<sup>2)</sup></sup> | 4 0 | 5 <sup>2<sup>1)</sup></sup> | 5 <sup>1<sup>2)</sup></sup> | 3 7 | 55           | 53 | 39 |
| Payerne                | 2      | 40                          | 38                          | 27  | 54                          | 53                          | 43  | 47           | 46 | 35 |
| Oeschberg              | 3      | 36                          | 35                          | 24  | 34                          | 36                          | 24  | 35           | 36 | 24 |
| Birmensdorf            | 4      | 34                          | 31                          | 23  | 43                          | 39                          | 29  | 39           | 35 | 26 |
| Tänikon                | 5      | 36                          | 35                          | 28  | 40                          | 38                          | 28  | 38           | 37 | 28 |
| Balzers                | 6      |                             |                             |     | 4 <sup>8<sup>1)</sup></sup> | 4 <sup>7<sup>2)</sup></sup> | 3 4 | 48           | 47 | 34 |
| Schönenbuch            | 7      | 38                          | 41                          | 36  | 43                          | 47                          | 41  | 41           | 44 | 39 |
| Sion                   | 8      | 37                          | 36                          | 26  | 38                          | 37                          | 27  | 38           | 37 | 27 |
| Mittel                 | CH     | 40                          | 39                          | 29  | 44                          | 43                          | 33  | 42           | 41 | 31 |

1) Berechnet aufgrund des 24h-Mittelwerts (f = 1.41 )

2) Berechnet aufgrund des 24h-Mittelwerts (f = 1.37)

Tabelle 3-4: Saisonale Mittelwerte (Mai-September) für die Ozonkonzentration (ppb) an den ausgewählten Messstandorten in den Jahren 1987/88. Mittelwertperioden 7h/Tag, 12h/Tag, 24h/Tag (Fuhrer et al. 1989)

An den NABEL-Messstellen Payerne, Tänikon und Basel nahm die Ozonbelastung in den folgenden Jahren 1989-1991 weiter zu (BUWAL, 1992).

## 3.4 Monetare Kosten der luftschadstoffbedingten Produktionsausfälle in der Landwirtschaft

### 3.4.1 Vorgehen, Methode

Ausgehend vom dreistufigen Verfahren der Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC) werden vorerst die ozonbedingten Ertragsverluste und die resultierenden Produktionsausfälle für ausgewählte Kulturen in acht Modellregionen ermittelt (Fuhrer et al., 1989). Die Produktionsausfälle werden pro Kultur und Region als Flächenverlust ausgewiesen. Diese Resultate dienen als Input für ein Optimierungsmodell (Näf 1991). In diesem werden die Anpassungsreaktionen der Produzenten auf die Ozonimmissionen berücksichtigt. Danach werden die resultierenden Ertragsausfälle bei zehn Kulturen monetar bewertet und als Reduktion der Deckungsbeiträge ausgewie-

sen. In einem nächsten Schritt werden die Resultate auf die Schweiz hochgerechnet. Wir ergänzen die von Näf berücksichtigten Kulturen um weitere drei (Reben, Hülsenfrüchte, Feldgemüse), zu denen Angaben über ozonbedingte Ertragsverluste verfügbar sind. In einem letzten Schritt wird abgeschätzt, wie gross die Ertragsausfälle sind, wenn statt schweizerischen Agrarpreisen Konkurrenzpreise verwendet werden, welche näher an den effektiven volkswirtschaftlichen Kosten des Ressourcenausfalls liegen.

### 3.4.2 Die Ertragsausfälle infolge der Ozonimmissionen

Mit Hilfe eines dreistufigen Verfahrens schätzt Fuhrer (1989) die Reduktion der Pflanzenerträge infolge der Ozonimmissionen für die acht Untersuchungsregionen ab:

1. Stufe      Ermittlung des schadstoffspezifischen Risikos, dass bei den in der Schweiz auftretenden Immissionen Ertragsausfälle auftreten. Ergebnis von Stufe 1 ist die Konzentration auf die Schadenwirkungen von Ozon
2. Stufe      Aufgrund der Expositions-Wirkungsbeziehungen und Angaben über die regionalen Ozonimmissionen wurden für die verschiedenen Kulturen in den acht Regionen relative Ertragsverluste (in %) ermittelt. Die Exposition-Wirkungsbeziehung basieren aus Daten aus dem amerikanischen "National Crop Loss Assessment Network" (NCLAN). Sie wurden mit Feldversuchen (Open Top Begasung) für die Schweiz bzw für die in der Schweiz eingesetzten Kulturen von der FAC plausibilisiert.
3. Stufe      Mit Hilfe der relativen Ertragsverluste und den Anbauflächen pro Kultur und der Regionen werden die Flächenverluste geschätzt, welche pro Kultur Regionen die infolge der Ozonemmissionen resultieren

|                                     | Relativer Ertragsverlust [in %]     |        |      |       |                 |                    |       |                           |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|------|-------|-----------------|--------------------|-------|---------------------------|
| Region                              | Relativer Ertragsverlust pro Kultur |        |      |       |                 |                    |       | pro Re-<br>gion<br>Mittel |
|                                     | Kunst-<br>wiese                     | Weizen | Mais | Rüben | Feld-<br>gemüse | Hülsen-<br>früchte | Reben |                           |
| 1                                   | 24.2                                | 5.5    | 2.1  | 16.8  | 1.3             | 7.7                | 19.4  | 11.0                      |
| 2                                   | 13.9                                | 2.9    | 1.1  | 10.1  | 0.6             | 5.2                | 14.6  | 6.9                       |
| 3                                   | 4.6                                 | 0.8    | 0.2  | 2.9   | 0.2             | 1.9                | 7.6   | 2.6                       |
| 4                                   | 4.0                                 | 1.5    | 0.4  | 4.9   | 0.2             | 3.0                | 6.9   | 3.0                       |
| 5                                   | 5.3                                 | 1.2    | 0.4  | 4.4   | 0.2             | 2.7                | 8.3   | 3.2                       |
| 6                                   | 15.2                                | 3.2    | 1.2  | 10.8  | 0.7             | 5.5                | 15.2  | 7.4                       |
| 7                                   | 11.6                                | 1.7    | 0.6  | 6.1   | 0.4             | 3.5                | 13.2  | 5.3                       |
| 8                                   | 5.3                                 | 1.2    | 0.4  | 4.4   | 0.2             | 2.7                | 8.3   | 3.2                       |
| Ø Verlust<br>pro Kultur<br>(Median) | 8.4                                 | 1.6    | 0.5  | 5.5   | 0.3             | 3.3                | 10.7  |                           |

Tabelle 3-5: Berechnete relative Ertragsverluste für die ausgewählten Kulturen und Regionen in Prozent der Erträge (Fuhrer et al., 1989)

|                                  | Flächenverluste in % der regionalen Anbaufläche |        |      |       |                 |                    |       |                 |
|----------------------------------|---|--------|------|-------|-----------------|--------------------|-------|-----------------|
| Region                           | Kunst-<br>wiese                                 | Weizen | Mais | Rüben | Feld-<br>gemüse | Hülsen-<br>früchte | Reben | Summe<br>Region |
| 1                                | 1.45  | 2.99   | 0.29 | 0.08  | 0.06            | 0.18               | 3.53  | 8.60            |
| 2                                | 4.16  | 1.22   | 0.17 | 1.00  | 0.01            | 0.02               | 0.07  | 6.65            |
| 3                                | 2.57  | 0.25   | 0.03 | 0.11  | 0.00            | 0.00               | 0.00  | 2.96            |
| 4                                | 1.34  | 0.40   | 0.12 | 0.14  | 0.01            | 0.01               | 0.07  | 2.09            |
| 5                                | 1.48  | 0.36   | 0.10 | 0.46  | 0.01            | 0.01               | 0.12  | 2.54            |
| 6                                | 3.60  | 0.19   | 0.61 | 0.53  | 0.09            | 0.01               | 0.20  | 5.23            |
| 7                                | 2.93  | 0.70   | 0.16 | 0.07  | 0.02            | 0.02               | 0.13  | 4.03            |
| 8                                | 0.13  | 0.02   | 0.01 | 0.01  | 0.03            | 0.00               | 6.59  | 6.79            |
| Ø CH <sup>1)</sup><br>pro Kultur | 2.21  | 0.77   | 0.19 | 0.30  | 0.03            | 0.03               | 1.34  | 4.86            |

1) arithmetisches Mittel

Tabelle 3-6: Berechnete Flächenverluste für die ausgewählten Kulturen und Regionen in Prozent der gesamten regionalen Anbaufläche (Fuhrer et al., 1989)

### 3.4.3 Monetäre Kosten der ozonbedingten Ertragsausfälle

#### a) Vorgehen, Methode der Kostenschätzung

- Näf verwendet die Arbeit von Fuhrer et al. (1989) als Grundlage für die Abschätzung der monetären Kosten der immissionsbedingten Ertragsausfälle (Näf 1991). Er berücksichtigt dabei die Anpassungsreaktionen der Produzenten auf Ozonimmissionen bei der Festlegung der Anbaustrukturen und beim Faktoreinsatz. Dazu wird ein lineares Optimierungsmodell und das Fruchtfolge-Optimierungsmodell "Opticrop" des Institutes für Agrarwirtschaft der ETHZ benutzt. Das lineare Programmierungsmodell maximiert eine Zielfunktion (Deckungsbeitrag = Erlös - variable Kosten) unter der Nebenbedingung der Ozonimmission für verschiedene Immissionsniveaus von Ozon. Die Differenz zwischen dem resultierenden Deckungsbeitrag beim natürlichen Ozonniveau und dem tatsächlichen Ozonniveau entspricht den monetären Kosten der Ozonbelastung.
  
- Aus den acht Untersuchungsregionen von Fuhrer werden sechs Regionen, die bezüglich der Produktionsbedingungen (Klima, Temperatur, Bodeneignung) eine gewisse Homogenität aufweisen, ausgewählt. Sie bilden eine Modellregion (149'000 ha). Für die Optimierung stehen 29 mögliche Fruchtfolgen zur Verfügung, womit sieben Szenarien berechnet werden, bei denen die Ozonbelastung von der natürlichen Belastung abweicht.
  
- Die Resultate der Modellregion werden anschliessend auf die Schweiz hochgerechnet. Dafür werden die gesamtschweizerischen Flächen von offenem Ackerland, Kunstwiesen und Rebland verwendet. Naturwiesen, Weiden, obstbauliche Intensivkulturen und andere Nutzungen (ca. 64% der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz) werden nicht berücksichtigt, da bei ihnen keine Ertragsverluste ausgewiesen werden.

| Nutzungsart                               | ha        | %     |
|---|-----------|-------|
| Offene Ackerfläche                        | 275'000   | 25,3  |
| Kunstwiesen                               | 106'400   | 9,8   |
| Naturwiesen, Weiden                       | 675'200   | 62,2  |
| Rebland                                   | 12'300    | 1,1   |
| Obstbauliche Intensivkulturen             | 7'700     | 0,7   |
| Andere Nutzung                            | 9'500     | 0,9   |
| Landw. Nutzfläche (ohne Sömmerungsweiden) | 1'086'100 | 100,0 |
| Gesamtareal der Schweiz                   | 4'013'000 |       |

Tabelle 3-7: Hauptnutzungsarten der Nutzfläche der Landwirtschafts- und Gartenbaubetriebe in der Schweiz (Fuhrer et al., 1989)

- Im Optimierungsmodell werden die Ertragsverluste bei Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Körnermais, Kartoffeln, Zuckerrüben, Kunstwiesen, Stroh, Lesekartoffeln und Rübenlaub berücksichtigt. Die von der FAC ebenfalls ausgewiesenen Ertragsverluste bei Rebland, Hülsenfrüchten und Feldgemüse (Fuhrer, 1989) werden hier noch zusätzlich bewertet (s. Tab. 3-5). Allerdings kann dabei das Optimierungsmodell nicht angewendet werden, sodass bei diesen drei Kulturen die Ertragsverluste aufgrund der nicht berücksichtigten Anpassungsreaktionen auf die Immissionen etwas überschätzt sein dürften.
- Die so berechneten Deckungsbeiträge enthalten einen beträchtlichen Anteil an Subventionen. Subventionen sind Transferleistungen und signalisieren keinen Ressourcenverzehr. Sie dienen vielmehr der Korrektur des Marktergebnisses, das sich in einer Konkurrenzsituation ergeben würde, in Richtung strukturpolitischer bzw. umweltpolitischer Ziele oder zur Abgeltung gemeinwirtschaftlicher Leistungen. Um die volkswirtschaftlichen Kosten des Ressourcenverbrauches infolge der Ozonimmissionen zu ermitteln, müssen die Ertragsausfälle mit Konkurrenzpreisen bewertet werden. Berechnungen der OECD zum Produzenten-Subventions-Äquivalent (PSE; 7. Landwirtschaftsbericht, 1992, S. 78 ff.) geben Hinweise auf den in den Landwirtschaftspreisen enthaltenen Subventionsanteil. Das Produzenten-Subventions-Äquivalent (PSE) berücksichtigt die Differenz zwischen dem Inlandpreis und dem Weltmarktpreis der landwirtschaftlichen Produkte und zählt alle Direktzahlungen und öffentlichen Ausgaben zugunsten der Landwirtschaft hinzu. Daraus resultiert die gesamte jährliche Unterstützung als PSE. 1987/88 wies die Schweiz ein mittleres PSE von 79 % auf, das heisst, die mit Weltmarktpreisen bewertete landwirtschaftliche Produktion der Schweiz wurde nur einen Erlös von 21% der effektiv bezahlten Preise und Transfers ergeben.

Es muss dazu jedoch bemerkt werden, dass auch das PSE Verzerrungen durch Exportsubventionen auf dem Weltmarkt enthält (es sollen damit tiefere Preise erzielt werden, um die Wettbewerbsfähigkeit zu erhöhen, im Gegensatz zu den u.a. verteilungspolitisch begründeten Subventionen in der Schweiz und in der EG, die zu höheren Preisen als in einer Konkurrenzsituation führen) und vielen anderen nationalen Agrarschutzmassnahmen zu wenig Rechnung trägt. Auch ökologische Aspekte bleiben unberücksichtigt. Unabhängig von Exportsubventionen sind die Weltmarktpreise dadurch verfälscht, dass durch niedrigere Umweltschutzaufgaben die Produktionskosten und damit die Preise in anderen Ländern tiefer liegen können. Weltmarktpreise sind daher ebenfalls nicht das Resultat eines Konkurrenzmarktes mit einheitlichen Rahmenbedingungen, sondern nur ein grober Indikator für Preise auf einem Konkurrenzmarkt. Daneben dienen die im PSE mitberücksichtigten Direktzahlungen mindestens teilweise der Abgeltung gemeinwirtschaftlicher Leistungen seitens der Landwirtschaft. Sie sind somit ein Entgelt für eine Leistung, welche die Landwirtschaft aufgrund eines politischen Auftrages erbringt, und die unter Konkurrenzbedingungen nicht bereitgestellt würde.

Sogenannte Weltmarktpreise können somit nicht unbesehen als Stellvertreter für Preise auf einem Konkurrenzmarkt verwendet werden. Sie dienen hier vielmehr der Festlegung einer oberen Grenze bei der Korrektur der schweizerischen Agrarprei-

se. Die untere Grenze für die Berichtigung der Agrarpreise ergibt sich aus dem Vergleich der EG- und der Schweizer Landwirtschaftspreise. Die EG-Preise für landwirtschaftliche Kulturpflanzen liegen im Mittel rund 55 % tiefer als in der Schweiz. Die EG-Preise sind darum eine untere Grenze für die Korrektur, weil auch sie Subventionen enthalten und damit tendenziell ebenfalls zu hoch sind (höher als die volkswirtschaftlichen Kosten). Die schweizerischen Preise für landwirtschaftliche Produkte müssten daher um 55-79% tiefer liegen, um im Bereich der volkswirtschaftlichen Kosten zu liegen.

- Die Berechnungen werden unter Berücksichtigung der Immissionsituation in den Jahren 1986-1988 vorgenommen. NÄF's Preise beziehen sich ursprünglich auf das Bezugsjahr 1985. Die resultierenden Kosten werden indexiert und auf das Preisniveau von 1990 umgerechnet.

## b) Ergebnisse

In der folgenden Tabelle werden die Ergebnisse der Kostenschätzungen ausgewiesen. Die Kosten der ozonbedingten Ertragsausfälle in der Schweiz zu Preisen von 1985 bzw. 1990 werden einmal mit Berücksichtigung der Subventionen bei der Bewertung der Ertragsausfälle ausgewiesen. Daneben wird ein Kostenbereich ausgewiesen, welcher sich bei der Verwendung von EG-Landwirtschaftspreisen bzw. von Weltmarktpreisen (untere Grenze) zur Bewertung der Ertragsausfälle ergibt.

| Hochrechnung  | Ertragsverluste Schweiz 1985 (in Mio Fr.) |                    | Ertragsverluste Schweiz 1990 (in Mio Fr.) |                    |
|---|---|--------------------|---|--------------------|
|   | inkl. Subventionen                        | exkl. Subventionen | inkl. Subventionen                        | exkl. Subventionen |
| Weizen, Gerste, Körnermais, Kartoffeln, Zuckerrüben, Kunstwiesen) | 208                                       | 44 ÷ 94            | 228                                       | 48 ÷ 103           |
| Reben   | 63  | 13 ÷ 28            | 75  | 16 ÷ 34            |
| Hülsenfrüchte   | 3   | 1 ÷ 1              | 3   | 1 ÷ 1              |
| Feldgemüse  | 1   | 0 ÷ 0              | 1   | 0 ÷ 1              |
| <b>T o t a l</b>  | <b>275</b>                                | <b>58 ÷ 123</b>    | <b>307</b>                                | <b>84 ÷ 139</b>    |

Tabelle 3-8: Monetär bewertete, landwirtschaftliche Ertragsverluste in der Schweiz bei einer Erhöhung des Ozonniveaus von der natürlichen Hintergrundkonzentration auf die Ozonkonzentration der Jahre 1987/88; Bewertung der Ertragsausfälle mit schweizerischen Preisen (inkl. Subventionen) und ohne Subventionen (Bewertung mit Weltmarktpreisen -> untere Grenze bzw. mit EG-Preisen -> obere Grenze)

Die ozonbedingten Ertragsausfälle in der Schweiz verursachen somit Kosten im Bereich von mindestens 300 Mio Fr./a, wenn die Ertragsausfälle mit den schweizerischen Landwirtschaftspreisen bewertet werden. Bei einer Bewertung zu Konkurrenzpreisen dürften diese Kosten im Bereich von mindestens 100 Mio Fr./a liegen.

### 3.5 Zusammenfassung und Folgerungen

Im Bereich der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion können luftschadstoffbedingte Ertragsminderungen empirisch nachgewiesen werden. Die Unsicherheiten scheinen hier deutlich geringer zu sein als bei den luftschadstoffbedingten Waldschäden. Es zeigte sich dabei, dass für die landwirtschaftlichen Kulturen die Ozonbelastung im Sommer den relevantesten Risikofaktor darstellt.

Die Angaben zu den ozonbedingten Ertragsverlusten basieren auf Daten aus den USA. Obwohl durch schweizerische Feldversuche plausibilisiert, ergibt sich daraus vorläufig noch ein Unsicherheitsmoment. Erste Begasungsversuche mit einheimischen Kulturen deuten darauf hin, dass die theoretischen Berechnungen mit USA-Daten die tatsächlichen Verluste eher unterschätzen (Fuhrer et al., 1986, S. 78). Die von der FAC ermittelten Ertrags- und Flächenverluste stammen von Untersuchungsregionen, welche zwischen 350 m u.M. und 700 m u.M. liegen. Die Ozonbelastungen und die pflanzenbaulichen Bedingungen auf den übrigen Höhenstufen unterscheiden sich von diesen Untersuchungsregionen. Dadurch ergeben sich bei der Hochrechnung auf die Schweiz weitere Unsicherheiten.

Die Kosten der Ertragsausfälle bei den zehn ursprünglich berücksichtigten Kulturen betragen je nach Ozonbelastung 228 Mio Fr./a (Preise 1990, Ozonbelastung von 1987/88) bis maximal 900 Mio Fr./a (Preise 1990, Ozonbelastung von 1987/88 plus 100%, zurzeit nicht realistisch). Werden auch die Ertragsverluste bei Reben, Hülsenfrüchten und Feldgemüsen berücksichtigt, so betragen die resultierenden Kosten bei heutigen Ozonimmissionen etwa 300 Mio Fr./a.

Aus landwirtschaftspolitischen Gründen sind die Preise der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen in der Schweiz administriert und signalisieren nicht mehr den wahren volkswirtschaftlichen Ressourcenverzehr. Werden die Resultate um den Subventionsanteil der landwirtschaftlichen Preise korrigiert, führt dies zu einer Verminderung der Ertragseinbussen um 55-79%, was eine verbesserte Annäherung an den tatsächlichen, volkswirtschaftlichen Ressourcenverzehr darstellt.

Die ozonbedingte Beeinträchtigung der landwirtschaftlichen Produktion stellt ein beachtliches Problem dar. Dabei sind die langfristigen Wirkungen der Luftverschmutzung auf die landwirtschaftliche Produktion noch nicht berücksichtigt. Luftschadstoffe gelangen direkt und indirekt aus der Luft in den Boden und verändern langfristig

unter Umständen dessen biologische, chemische und physikalische Eigenschaften (v.a. Versauerung). Die veränderten Bodeneigenschaften können sich dann auf die Wurzeln und auf die Pflanzenproduktion auswirken, was langfristig zu höheren als den beschriebenen Schäden führen könnte. Da viele Schweizer Böden relativ kalkhaltig sind, ist von dieser Seite vorläufig noch keine Beeinträchtigung der landwirtschaftlichen Produktion abzusehen.

Die Abschätzung der ozonbedingten Kosten bezieht aber nur einen Teil der potentiell beeinträchtigten Bereiche ein.<sup>5)</sup> Der ganze Bereich der Tierhaltung oder die Naturwiesen / Weiden wurden nicht untersucht. Allfällige Synergiewirkungen von anderen Luftschadstoffen werden bei den Kostenschätzungen nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend muss angenommen werden, dass die hier ausgewiesenen Kosten der ozonbedingten Produktionsausfälle eine untere Grenze der Kosten infolge der Luftschadstoffemissionen darstellen.

---

5) Das sind allerdings die ozonempfindlichsten Kulturen.

## 4. Kosten luftschadstoffbedingter Gesundheitsschäden in der Schweiz

### 4.1 Einleitung, Vorgehen

Zu den in der Schweiz vorherrschenden Immissionskonzentrationen liegt vorläufig noch wenig gesichertes Wissen über allfällige Gesundheitsrisiken vor. Festzustehen scheint, dass in sommerlichen (Ozon) und winterlichen Smogperioden Spitzenbelastungen auftreten, die von gesundheitlicher Relevanz sind und Risikogruppen (Kleinkinder, Ältere, gesundheitlich Geschädigte, Personen, die im Freien arbeiten müssen, SportlerInnen (Ozon) und Kinder) akut gefährden. Dank der zurzeit in der Schweiz laufenden epidemiologischen Untersuchungen kann in Zukunft mit besseren Kenntnissen über die effektiven Gesundheitsbeeinträchtigungen gerechnet werden.

In Ermangelung schweizerischer Grundlagendaten werden hier die Ergebnisse einer Studie von Heinz, Klaassen-Mielke für Belastungsgebiete in der BRD auf die schweizerischen Verhältnisse übertragen (Heinz et al., 1990). Obwohl nicht gleich, sind die Immissionskonzentrationen in den untersuchten BRD-Regionen im Bereich schweizerischer (Spitzen-)Werte. Die resultierenden Kosten für die Schweiz dürften aufgrund dieser Ausgangslage - im Vergleich zu den von Heinz für die BRD ermittelten Werten - eine leichte Überschätzung darstellen. Sie stellen aber immer noch nur einen Teil der gesamten immissionsbedingten Gesundheitskosten dar. Zuviele Kostenelemente werden durch den verwendeten Human-Kapital-Ansatz nicht berücksichtigt oder können infolge fehlender Informationen nicht quantifiziert werden (siehe Kap. 4.5).

### 4.2 Gesundheitlich relevante Luftschadstoffe und ihre Wirkungen

Die Luftschadstoffimmissionen infolge der Energienutzung sind an diversen Gesundheitsbeeinträchtigungen beteiligt:

- Atemwegserkrankungen
- Herz-/Kreislaufkrankungen
- Beeinträchtigung des Lungengewebes
- Allergien
- Karzinogene Wirkungen

Im Vordergrund stehen dabei die folgenden Schadstoffe:

- S O<sub>2</sub>** SO<sub>2</sub> reagiert direkt mit den Proteinen der Bronchialschleimhaut und führt zu deren Zerstörung. Bei diesem Vorgang kann es zu einer messbaren Obstruktion der Atemwege kommen. Der Kontakt von SO<sub>2</sub> mit den Schleimhäuten bewirkt eine Lähmung der feinen Flimmerhärchen, die dann den Bronchialschleim nicht mehr abtransportieren können, sodass dieser eine zähe Konsistenz annimmt und sich staut (Beier et al., 1988). Bei Spitzenbelastungen von SO<sub>2</sub> können Gesundheitsschäden festgestellt werden. Der Nachweis gesundheitlicher Wirkungen von Langzeitbelastungen bei tieferen Immissionskonzentrationen ist schwierig (Prognos, 1992, Bd. 2, S. 75).
- NO<sub>2</sub>:** NO<sub>2</sub> hat eine direkte toxische Wirkung auf das Bronchialsystem. Nach dem Einatmen höherer Konzentrationen beginnt zunächst eine akute Reaktion mit Verengung der kleinen Bronchien, nach einer Latenzzeit von Stunden bis Tagen kann es zum Lungenödem kommen (Beier et al., 1988).
- CO:** CO: verdrängt den Sauerstoff aus seiner Bindung mit dem roten Blutfarbstoff Hämoglobin und vermindert dadurch die Transportkapazität des Blutes für Sauerstoff. Dies kann zum Sauerstoffmangel führen, wobei Organe mit hohem Sauerstoffbedarf wie Herz, Leber, Gehirn und Nieren besonders empfindlich reagieren. Kurzzeitige Spitzenbelastungen sind daher gesundheitlich relevant.
- O<sub>3</sub>:** Wegen seiner geringen Wasserlöslichkeit wird Ozon in den oberen Luftwegen kaum absorbiert und dringt leicht bis in die tiefsten Lungenabschnitte vor. Ozon und andere photochemische Oxidantien sind aggressive Reizgase, die die Schleimhäute angreifen und die Atemfunktion beeinträchtigen können.
- VOC:** Unter diesem Sammelbegriff sind sehr unterschiedliche, einfache bis komplizierte Verbindungen vereinigt. VOC-Verbindungen mit einer komplizierteren Struktur stehen wegen ihren krebserregenden Eigenschaften im Mittelpunkt des Interesses.
- Staub und Russ:** Partikel mit geringem Durchmesser sind lungengängig. Von gesundheitlicher Bedeutung sind dabei die an den Stauboberflächen angelagerten Stoffe und Partikel (Schwermetalle, VOC).

Die meisten Luftschadstoffe führen nicht zu spezifischen Krankheiten, von denen sofort auf die Ursache geschlossen werden könnte. Je nach Schadstoff sind aber doch einzelne Organe starker betroffen: zum Beispiel die Atemwege durch die Reizgase, Herz und Gehirn durch Kohlenmonoxid, Nervensystem, Blut und Niere durch Blei, die Niere auch durch Cadmium. Selbstverständlich werden Krankheiten dieser Organe durch viele verschiedene Ursachen ausgelöst oder begünstigt. Dies gilt besonders auch für die Atemwege, wo neben Infektionen, Abwehrschwäche, Allergenen und beruflicher Schadstoffbelastung das Rauchen eine ganz zentrale Rolle spielt. Die Luftverschmutzung ist hier eine Ursache unter anderen (Züst et al., 1988).

Zurzeit ist in der Schweiz ein mehrjähriges Forschungsprogramm in Arbeit (SAPAL-DIA), mit welchem epidemiologische Zusammenhänge zwischen der Luftverschmut-

zung und verschiedenen Krankheitsbildern ergründet werden. Die wenigen quantitative Angaben, die bisher zur Verfügung stehen, sind in der folgenden Tabelle dokumentiert:

| <b>Auswirkungen von kurzzeitigen Belastungen bei Wintersmog</b><br>(Tagesmittelwerte der Schadstoffe in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |                     |                       |   |
|--|---------------------|-----------------------|---|
| <b>SO<sub>2</sub></b>  | <b>Schwebestaub</b> | <b>NO<sub>2</sub></b> | <b>Auswirkungen</b>   |
| 300/400  | über 150            |                       | Zunahme der Todesfälle, v.a. bei über 65-Jährigen und Kranken (Loewenstein et al., 1983)  |
| 300  | 150-250             |                       | Verschlechterung des Zustandes von Lungenkranken und gehäuft akute Atemwegserkrankungen bei Erwachsenen (Ericsson et al., 1983) |
| 280  |                     |                       | Anstieg der Notfallkonsultationen wegen Pseudokrapp (Fegeler et al.)  |
| 200-250  | 200-250             | 8-3                   | 2-3 Wochen anhaltende Verschlechterung der Lungenfunktion   |
| 200  | 150                 |                       | Zunahme der Anfallshäufigkeit bei Asthmatikern (Cohen,  |
| 200  | 100                 | 75                    | Verschlechterung der Lungenfunktion bei Erwachsenen (Van & Lende, 1975)   |

Tabelle 4-1: Zusammenfassung der luftverschmutzungsbedingten Gesundheitsschäden von SO<sub>2</sub>- und NO<sub>2</sub>-Immissionen aus verschiedenen Studien (Züst et al., 1988)

Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass auch in der Schweiz gemessene Ozonwerte (Spitzenkonzentrationen von über 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) die Gesundheit akut beeinträchtigen können, vor allem bei Kindern und bei Personen, welche im Freien schwer arbeiten, aber auch bei Sportlern, die in stadtnahen Gebieten trainieren (Züst et al., 1988).

Es fällt auf, dass die oben beschriebenen Auswirkungen der Luftschadstoffe auf die Gesundheit recht beschränkt und eher qualitative Natur sind, vor allem, wenn nicht sehr hohe Belastungen, sondern die in der Schweiz relevanten Belastungswerte betrachtet werden. Dieser Mangel an Informationen kann nur mit sorgfältig geplanten und systematisch durchgeführten Untersuchungen beseitigt werden. Man unterscheidet zwischen experimentellen und epidemiologischen Untersuchungen. Experimentelle Studien werden an freiwilligen Versuchspersonen in der Regel mit einem oder wenigen Schadstoffen durchgeführt. Vorteil einer solchen Studie ist, dass die Auswirkungen eines bestimmten Stoffes isoliert beobachtet und damit genauer bestimmt werden können. Andererseits ist die Übertragbarkeit auf die wirklichen Verhältnisse begrenzt. Dort tritt der untersuchte Schadstoff zusammen mit vielen anderen auf und ist ausserdem noch äusseren Einflüssen (z. B. meteorologischen) ausgesetzt. Aus experimentellen

Studien stammen vor allem Kenntnisse über die Auswirkungen einzelner Schadstoffe. In epidemiologischen Studien wird das Krankheitsgeschehen bestimmter Bevölkerungsgruppen in Abhängigkeit von den lufthygienischen Verhältnissen untersucht. Man vergleicht zum Beispieldie Häufigkeit von Erkrankungen oder Todesfällen in Wohngebieten mit unterschiedlicher Luftverschmutzung oder beobachtet die Häufigkeit von Erkrankungen im gleichen Wohngebiet über einen längeren Zeitabschnitt (Querschnitt- bzw. Längsschnittuntersuchungen). Ein Vorteil davon ist, dass dabei die wirkliche Belastung der Bevölkerung erfasst werden kann. Die Aussagekraft solcher Studien hängt aber sehr von der korrekten Auswahl des Kollektivs, von der Berücksichtigung anderer Einflüsse (wie Schadstoffe am Arbeitsplatz und in Wohnräumen, Tabakrauch, Viren, Bakterien, genetische Disposition) sowie von der sorgfältigen Auswertung ab.

| <b>Akute Auswirkungen von Ozon</b>       |   |  |
|--|---|--|
| 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$             | 13-30 Min.<br>schwere Arbeit                | Schleimheutraizungen von Augen, Nase, Rachen und Hals, Vershleoh-<br>terung der Leistungsfähigkeit bei Sportlern (Linder,1987) |
| 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$             | 13-30 Min.<br>schwere Arbeit                | Haufung der Symptome (Linder, 1967)  |
| 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$             | 2 Stunden Arbeit                            | Einschränkungen der Lungenfunktion bei Schulkindern (McDonnell 1985)   |
| 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$             | 1 Stunde Arbeit                             | Einschränkung der Lungenfunktion bei Erwachsenen (Avol et al., 1984)   |
| 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$             | hööhster Stundenmit-<br>telwert eines Teges | Augenreizungen bei jungen Frauen (Hammer et al., 1974)   |
| 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$             | 3 Stunden                                   | Beeinträchtigung der Dunkeladaptation (Lagerwerff, 1963)   |
| 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$<br>und mehr | höchster Stundenmit-<br>telwert eines Tages | Husten und Brustschmerzen bei alltäglicher Tätigkeit (Hammer, 1974)  |

Tabelle 4-2: Akute Auswirkungen von Ozon aus verschiedenen Studien (Züst et al., 1988)

Fazit: Welche Schadstoffe sind für die Bewertung von Gesundheitsschäden in der Schweiz relevant?

In den 60er und 70er Jahren war  $\text{SO}_2$ , zusammen mit anderen Schwefeloxiden fast ein Synonym für Luftverschmutzung. Aus diesem Grund wurden in dieser Zeit die meisten (ausländischen) Gesundheitsstudien im Zusammenhang mit diesem Schadstoff durchgeführt. Gleichzeitig wurden die grössten lufthygienischen Anstrengungen auf die Reduktion des Schwefelgehalts von Brennstoffen konzentriert. Die Sanierungsmassnahmen waren erfolgreich; in den 80er Jahren verlor der Schadstoff  $\text{SO}_2$  an Bedeutung und heutzutage bereiten die  $\text{SO}_2$ -Immissionen nur noch im Fall von Wintersmog Probleme. Die Stickoxidemissionen erreichten Mitte der 80er Jahre fast das Siebenfache der Emissionen von 1950, während die Kohlenwasserstoffe in der gleichen Zeit auf das

Vierfache anstiegen. NO<sub>2</sub> und VOC sind Vorläufersubstanzen von Ozon, sodass auch die O<sub>3</sub>-Immissionen stark zugenommen haben.

NO<sub>x</sub>, VOC und O<sub>3</sub> sind gegenwärtig die mengenmässig wichtigsten Schadstoffe in der Schweiz. Über die direkten Wirkungen der diversen VOC-Verbindungen und der Aerosole ist relativ wenig bekannt. Ihre Zusammensetzung und Struktur ist recht kompliziert. Zudem ist die Messung ihrer Emissions- und Immissionskonzentrationen aufwendig. Die Staub-/Russemissionen spielen in diesem Zusammenhang jedoch auch eine Rolle.

Abschliessend kann man also sagen, dass eine Bewertung der Gesundheitsschäden infolge Luftverschmutzung in der Schweiz heute vor allem von den Schadstoffen NO<sub>2</sub>, VOC, O<sub>3</sub> und Staub/Russ ausgehen sollte. Obwohl bis jetzt noch keine hinreichenden quantitativen Angaben über die Zusammenhänge zwischen Immissionen dieser Schadstoffe und bestimmten Krankheiten bekannt sind, haben einige qualitative Studien bewiesen, dass solche Zusammenhänge existieren. Da Schwefeldioxid und CO die LRV-Grenzwerte nur noch selten und an wenigen Orten überschreiten, dürften sie höchstens in Sonderfällen Gesundheitsschäden mitverursachen.

Die folgende Tabelle weist nach, dass der Anteil der NO<sub>x</sub>- und der VOC-Emissionen aus der Wärmeerzeugung an den Gesamtemissionen in der Schweiz relativ klein ist. Ausserdem werden sie hauptsächlich in den kalteren Jahreszeiten ausgestossen, sodass ihr Beitrag an die Ozonproduktion gering ist.

| Schadstoff       | Emissionen aus Wärmeerzeugung 1990 |                             |  |   | Emissionsprognosen für das Jahr 2000 |  |  |   |
|------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|---|--------------------------------------|--|--|---|
|                  | Haushalt<br>(t/a)                  | IGLD <sup>1)</sup><br>(t/a) | Totale Emissionen Schweiz<br>(t/a) <sup>2)</sup> | %-Anteil Feuerungen Haushalt + IGLD <sup>1)</sup> | Feuerungen Haushalt<br>(t/a)         | Wärmeerzeugung IGLD <sup>1)</sup><br>(t/a) | Totale Emissionen Schweiz<br>(t/a) <sup>2)</sup> | %-Anteil Feuerungen Haushalt + IGLD <sup>1)</sup> |
| CO               | 98'300                             | 19'700                      | 430'400  | = 27 %  | 100'300                              | 20'700                                     | 273'300  | = 44 %  |
| S O <sub>2</sub> | 14'600                             | 35'300                      | 62'600   | = 80 %  | 15'600                               | 31'500                                     | 80'500   | = 78 %  |
| N O <sub>x</sub> | 9'100                              | 31'800                      | 183'800  | = 22 %  | 10'100                               | 30'600                                     | 124'600  | = 33 %  |
| VOC              | 10'200                             | 6'700                       | 297'000  | = 6 %   | 13'000                               | 6'700                                      | 272'500  | = 7 %   |
| Staub/<br>Russ   | 4'300                              | 2'300                       | 20'500   | = 32 %  | 4'100                                | 1'400                                      | 19'300   | ==28%   |

1) Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft und Dienstleistungen (Industrie: Raumheizungen + Prozessfeuerungen, Mineralölindustrie, Glasindustrie, konventionell thermische Kraftwerke, Industrie der Steine und Erden) (Brennstoffverbrauch für Chemie = 2%) (nicht inbegriffen: Emissionen aus Abfallverbrennung, in Zusammenhang mit Fernwärme)

2) Verkehr + Haushalte + Industrie und Gewerbe

Tabelle 4-3: Die wichtigsten Emissionen aus dem Bereich der Wärmeerzeugung (hauptsächlich Haushalte und Industrie- und Gewerbef Feuerungen) in den Jahren 1990 und 2000 (Trendprognose). Zusammengestellt mit Hilfe von (BUWAL, 1989) und (BEW, 1985)

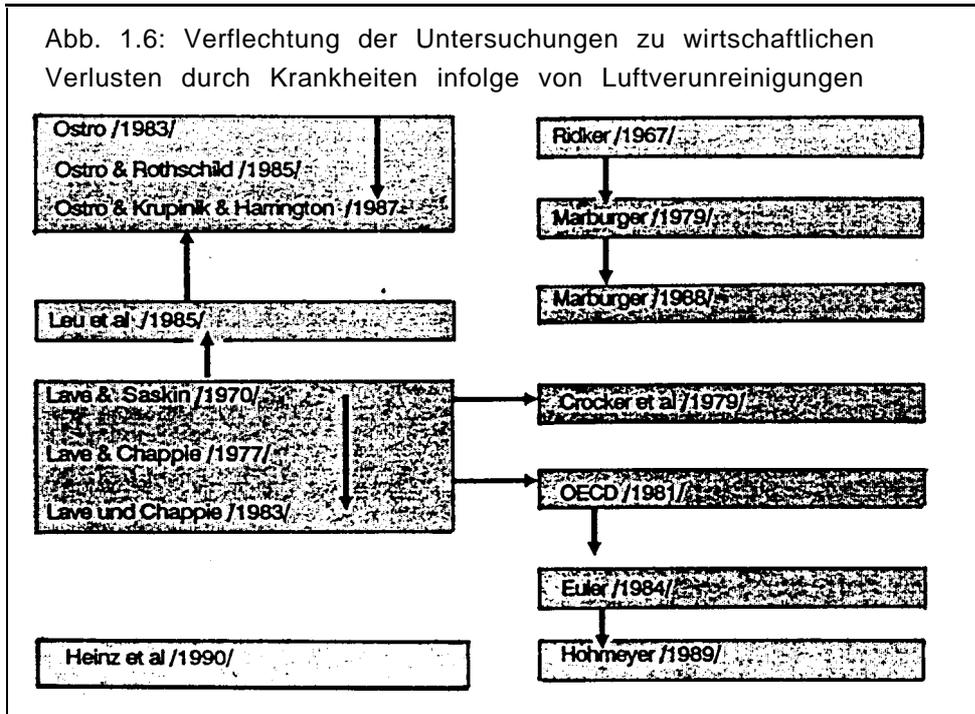
### 4.3 Ermittlung immissionsbedingter Gesundheitsschäden

Wie bereits erwähnt, ist der Kenntnisstand in bezug auf quantitative Aussagen zum Zusammenhang zwischen Schadstoffbelastung und Gesundheitsschäden sehr begrenzt. Auch im Ausland liegen nur vereinzelte epidemiologische Untersuchungen vor (BMU, 1987). In der BRD wurde aufgrund einer Auswertung von Krankenkassendaten von Bevölkerungsgruppen in unterschiedlich belasteten Gebieten versucht, einen Zusammenhang zwischen Luftschadstoffbelastung und Häufigkeit und Dauer von Atemwegs- und Herz-/Kreislaufkrankungen abzuleiten (Heinz, Klaassen-Mielke, 1990).

Eine Reihe von Untersuchungen zu immissionsbedingten Erkrankungen stammt aus den USA. In Anhang 1 befindet sich eine von Prognos erstellte Übersicht über die verschiedenen Arbeiten zu dieser Frage (Prognos, 1992, S. 78ff.). Die Übersicht weist aus, welche Annahmen über den Zusammenhang Luftverschmutzung/Gesundheitsschäden getroffen werden, inwieweit eine schadstoff- bzw. emittentenspezifische Zuordnung der Folgekosten erfolgt und wie die ökonomische Bewertung der Gesundheitsschäden vorgenommen wird. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass nur ganz wenige grundlegende Arbeiten existieren. Viele der folgenden Arbeiten basieren auf diesen, variieren einzelne Annahmen oder differenzieren einzelne Elemente. Prognos erstellt dazu das folgende Verflechtungsdiagramm (siehe Fig. 4-1).

In Ermangelung schweizerischer Arbeiten wird hier versucht, die Ergebnisse der Arbeiten von Heinz et al. aus der BRD auf die Schweiz zu übertragen (Heinz, Klaassen-Mielke, 1990 und Prognos, 1992, Bd. 2). Heinz et al. greifen auf Daten aus Statistiken der allgemeinen Ortskrankenkassen in der BRD zurück. Gegenstand der Datenauswertung sind die Arbeitsunfähigkeitsfälle einschliesslich der Erkrankungsfälle, die einen Krankenhausaufenthalt zur Folge haben für die Erkrankungen, die nicht zur Arbeitsunfähigkeit geführt haben und nicht stationär behandelt wurden, liegt noch kein geeignetes Datenmaterial vor). Allfällige Auswirkungen auf die Mortalität werden nicht untersucht.

Die untersuchten Daten wurden zwischen 1981 und 1985 erfasst. In Absprache mit einem medizinischen Sachverständigen wurden die untersuchungsrelevanten Diagnosen anhand des ICD-Schlüssels (International Code of Diseases) aus dem umfangreichen Spektrum der Krankheitsarten bestimmt.



Figur 4-1: Verflechtung der Untersuchungen zu wirtschaftlichen Verlusten durch Krankheiten infolge von Luftschadstoffimmissionen; Quelle: (Prognos, 1992, S. 79)

Als Arbeitsinstrument wird eine Datei erstellt, in der alle für die weiteren Auswertungen erforderlichen Daten eines Versicherten in einem Datensatz vorliegen. Dieser Datensatz enthält folgende Informationen:

(i) Persönliche Daten:

- Wohnort unter Einschluss des Arbeitsortes
- Alter
- Geschlecht
- Ausbildung
- Stellung im Beruf (Arbeiter/Angestellter)
- Jahresgehalt

(ii) Leistungsdaten:

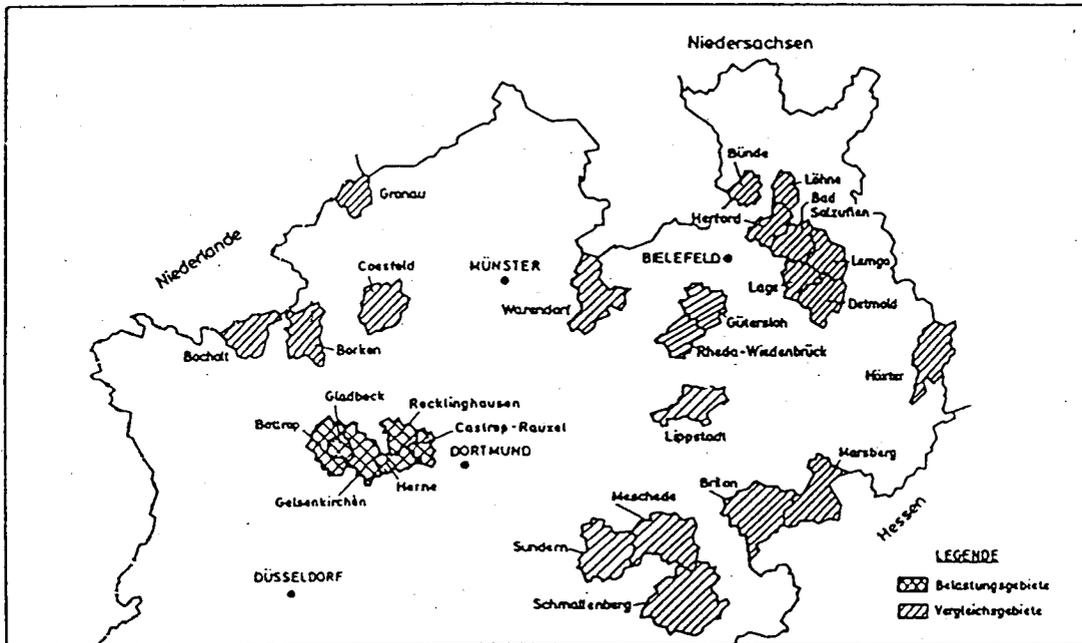
Häufigkeit und Dauer der Arbeitsunfähigkeit bzw. des Krankenhausaufenthaltes in den Diagnosegruppen Atemwegserkrankungen und Herz- und Kreislauferkrankungen

Um Verzerrungen der Ergebnisse zu vermeiden, werden mit sogenannten Filtern die folgenden Personengruppen eliminiert:

- Nicht ganzjährig versicherungspflichtige Beschäftigte
- Ausländer

- Personen, deren Arbeitsort ausserhalb der durch den Wohnort vorgegebenen Untersuchungsregionen liegt und
- Beruflich exponierte Personen

Nach der Anwendung der Filtervariablen verbleiben im Jahr 1984 für die Untersuchung 70'309 versicherungspflichtige Beschäftigte. Anschliessend werden ein Belastungsgebiet und drei Vergleichsgebiete definiert. In den Städten des Belastungsgebietes liegen die SO<sub>2</sub>-, NO<sub>2</sub>- und Schwebstaub-Immissionen im mittleren bis hohen Belastungsbereich: die SO<sub>2</sub>-Immissionen liegen zwischen 60 und 70 µg/m<sup>3</sup>, die NO<sub>2</sub>-Immissionen zwischen 40 und 60 µg/m<sup>3</sup> und der Schwebstaub zwischen 70 und 90 µg/m<sup>3</sup> (Messungen von 1985, telefonische Auskunft von Heinz). In den Vergleichsgebieten wurden Konzentrationen von 10 bis 60 µg/m<sup>3</sup> für SO<sub>2</sub>, 20 bis 40 µg/m<sup>3</sup> für NO<sub>2</sub> und 40 bis 80 µg/m<sup>3</sup> für Schwebstaub gemessen (1985).



Figur 4-2: Untersuchungsraum der Studie von (Heinz, Klaassen-Mielke, 1990)

Die Ermittlung immissionsbedingter Gesundheitsschäden erfolgt über die Bestimmung der Häufigkeit und der Dauer der Kranken- und Arbeitsunfähigkeitsfälle in den verschiedenen belasteten Gebieten für definierte Bevölkerungsgruppen (Einteilung nach Alter und Geschlecht). Beim Vergleich wird angenommen, dass die zusätzlichen Krankheitsfälle im hoch belasteten Gebiet durch die erhöhte Luftverschmutzung verursacht werden.

Schliesslich ergeben die aus der Schichtenanalyse (Analyse der Krankheiten nach Bevölkerungsgruppen und Belastungsindex) abgeleiteten Schätzwerte für die Erkrankungswahrscheinlichkeit und -dauer zusammen mit der Anzahl der im Belastungsge-

biet erfassten erkrankten Personen das Mengengerüst für die ökonomische Bewertung von Gesundheitsschäden.

In einer ergänzenden Studie wurde zusätzlich versucht, eine nach Schadstoffen differenzierte Datenauswertung durchzuführen (Heinz, in: Prognos, 1992, Band 2).

Mit Hilfe von Regressionsanalysen wurden Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten und die Dauer einer Arbeitsunfähigkeit in Abhängigkeit von der SO<sub>2</sub>-, NO<sub>2</sub>- und Staubkonzentration bestimmt. Bei der Ermittlung der Erkrankungswahrscheinlichkeit wurden die Immissionskonzentrationen am Wohnort und Einflussvariablen wie Alter, Geschlecht, Einkommen, berufliche Stellung und Ausbildung berücksichtigt. Bei der Abschätzung der Dauer von Arbeitsunfähigkeiten wurde nach Atemwegs- und Herz-/Kreislaufkrankungen unterschieden. Die Arbeit bezieht sich auf Erkrankungen. Mortalitätsanalysen stehen noch aus (aus Prognos, 1992, S. 83).

Es zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Wahrscheinlichkeit von Atemwegserkrankungen und Staub und zwischen der Wahrscheinlichkeit von Herz-/Kreislaufkrankungen bei NO<sub>2</sub> und Staub. Ein Einfluss auf die Erkrankungsdauer wurde bei den Atemwegserkrankungen für SO<sub>2</sub> und NO<sub>2</sub> festgestellt (Prognos, 1992, S. 83).

Bei der Übertragung der Resultate auf die Schweiz muss berücksichtigt werden, dass in den schweizerischen Belastungsgebieten die SO<sub>2</sub>- und die Schwebstaubimmissionen deutlich tiefer sind als in den untersuchten Belastungsgebieten der BRD (siehe Tab. 4-4). Die Ozonimmissionen dürften dagegen in der Schweiz mindestens gleich hoch sein.

|            |                   | S O <sub>2</sub><br>( μ g / m <sup>3</sup> ) | N O <sub>2</sub><br>( μ g / m <sup>3</sup> ) | Schwebstaub<br>( μ g / m <sup>3</sup> ) |
|------------|-------------------|--|--|---|
| BRD (1984) | Belastungsgebiete | 60 - 70                                      | 40 - 60                                      | 70 - 90                                 |
|            | Vergleichsgebiete | 10 - 60                                      | 20 - 40                                      | 40 - 80                                 |
| CH (1990)  | Belastungsgebiete | 10 - 30                                      | 30 - 70                                      | 40 - 70                                 |
|            | Vergleichsgebiete | 3 - 10                                       | 10 - 30                                      | 25 - 40                                 |

Tabelle 4-4: Immissionssituation in den für die Gesundheitskostenabschätzung betrachteten Gebieten der BRD im Vergleich zur schweizerischen Immissionssituation (INFRAS, 9. April 1992)

## 4.4 Kosten luftschadstoffbedingter Gesundheitsschäden in der Schweiz

### 4.4.1 Vorgehen, Methode

Ausgehend vom Mengengerüst von Heinz, Klaassen-Mielke für immissionsbedingte Gesundheitsschäden in BRD-Belastungsgebieten wird eine Übertragung auf die schweizerische Situation vorgenommen. Zu diesem Zweck werden zuerst die entsprechenden Belastungsgebiete in der Schweiz definiert und quantifiziert. Anschliessend werden die deutschen Krankheitskosten aufgrund von Kostensätzen im schweizerischen Gesundheitswesen in entsprechende Krankheitskosten in der Schweiz umgerechnet.

Generell werden die Kosten in der BRD unter Berücksichtigung der Teuerungsentwicklung in der BRD in Preisen 1990 ausgedrückt. Der mittlere Wechselkurs für die Umrechnung in Schweizer Franken betrug 1990 0,86SFr./1DM. Wird jedoch der Kaufkraftparitäts-Kurs verwendet, ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von 1,05/1,10 SFr./1DM (SBG, 1991).

Heinz et al. berücksichtigen in ihrer Untersuchung nur die immissionsbedingten Gesundheitskosten bei Erwerbstätigen. Diese Begrenzung ergibt sich aus dem verfügbaren statistischen Material und dem verwendeten Ansatz. Wir werden hier eine approximative Erweiterung des erfassten Personenkreises auch auf Nichterwerbstätige vornehmen.

### 4.4.2 Übertragung der immissionsbedingten Gesundheitskosten auf die Schweiz

#### a) Bestimmung der schweizerischen Belastungsgebiete

Als Kriterium zur Abgrenzung der Belastungsgebiete dient sinnvollerweise eine Immissionsbelastung, welche den Grenzwert überschreitet. Für jeden relevanten Schadstoff ergaben sich daher andere Belastungsgebiete. Die entsprechenden Immissionsdaten fehlen aber teilweise. Auch in der deutschen Studie werden die Belastungsgebiete nicht nach einzelnen Schadstoffen abgegrenzt.

Wir definieren zwei unterschiedlich abgegrenzte Belastungsgebiete, welche eine minimale und eine maximale Anzahl exponierter Einwohner umfassen. Die untere Grenze bildet die Anzahl der Einwohner in den Städten (Städteverband, 1990). Dabei werden die 51 Städte verwendet, die sich innerhalb der Agglomerationsräume des BFS (BFS, 1984) befinden. Kleinere, isolierte Städte auf dem Land werden nicht einbezogen.

#### 1) 51 Städte als Belastungsgebiet (untere Grenze, 1990)

|                |           |                             |
|----------------|-----------|-----------------------------|
| Einwohner:     | 2'038'000 |                             |
| Erwerbstätige: | 1'220'000 | Nichterwerbstätige: 818'000 |

## 2) Agglomerationen als Belastungsgebiete (obere Grenze, 1990)

|                |           |
|----------------|-----------|
| Einwohner:     | 3'765'500 |
| Erwerbstätige: | 2'241'000 |

Wir werden nur das Belastungsgebiet 1) weiterverwenden, da die Immissionen in BRD-Belastungsgebieten tendenziell eher höher sind als in schweizerischen und daher eine engere Definition der Belastungsgebiete in der Schweiz nahelegt.

## b) Übertragung der BRD-Gesundheitskosten auf die Schweiz

## ■ Immissionsbedingte Gesundheitskosten bei Erwerbstätigen in Belastungsgebieten

Die von Heinz ermittelten immissionsbedingten Gesundheitskosten werden unter Berücksichtigung der BRD-Teuerung von 1984-1990 im Bereich der Gesundheitspflege und eines Kaufkraftparitäts-Kurses von SFr. 1,05/1DM (1990) in Schweizer Kosten umgerechnet. Die Angaben erfolgen als Kosten pro versicherte erwerbstätige Person und Jahr in Belastungsgebieten:

| Kosten pro versicherte Person und Jahr | BRD 1984<br>DM/a | BRD 1990<br>DM/a | CH 1990<br>Fr./a |
|--|------------------|------------------|------------------|
| Atemwegserkrankungen                   | 67-201           | 74-225           | 78-236           |
| Herz- und Kreislauferkrankungen        | 31-270           | 34-301           | 36-316           |
| Total                                  | 98-471           | 108-526          | 114-552          |

Tabelle 4-5: Mittlere immissionsbedingte Gesundheitskosten pro erwerbstätige Person und Jahr in Belastungsgebieten. Angaben von Heinz für 1984 bzw, 1990 sowie Umrechnung in SFr. 1990 (s. Heinz et al., 1990)

Bei der Umrechnung der BRD-Kosten gemäss Tabelle 4-5 werden unterschiedliche Kostensätze im BRD- und CH-Gesundheitswesen nicht berücksichtigt. Im Bericht "Soziale Kosten von Verkehrsunfällen in der Schweiz" (Ecoplan, 1991) werden schweizerische Kostensätze im Gesundheitswesen ausgewiesen. Werden die ambulanten und die stationären Heilkosten bei Fällen mit Taggeld (d.h. länger als 3 Tage erkrankt) verwendet, ergeben sich durchschnittliche stationäre Kosten von Fr. 58,75 pro Tag und ambulante Kosten von durchschnittlich Fr. 15.- pro Tag (Basis: Ecoplan, 1991, S. 59, 63, 83). Umgerechnet auf Arbeitsunfähigkeitsstage ergeben sich die folgenden Kostensätze 1990 (Teuerung der Körper- und Gesundheitspflege 1988-1990: +6,24 %).

| Kostenkategorie (Durchschnitt pro Versicherungsfall) | Ausgaben pro Arbeitsunfähigkeitstag<br>[in SFr. 1990] |                      |
|--|---|----------------------|
|  | Umrechnung<br>aus BRD                                 | CH-Gesundheitskosten |
| Ambulante Behandlung (inkl. Verordnungen)            | 6.70  | 22.-                 |
| Stationäre Behandlung                                | 30.70   | 87.-                 |
| Krankengeld  | 18.60   |                      |
| Lohnfortzahlung                                      | 85.60   | 200.-                |
| Insgesamt  | 142.60  | 309.-                |

Tabelle 4-6: Vergleich der mittleren Ausgaben der Krankenkassen pro Arbeitsunfähigkeitstag bei einer Umrechnung der BRD-Kosten 1984 in SFr. 1990 und bei der Verwendung schweizerischer Kostensätze im Gesundheitswesen (Umrechnung mit Kaufkraftparitäts-Kurs 1,05SFr./1DM)

Die von Heinz verwendeten immissionsbedingten Gesundheitskosten müssen daher - nach ihrer Umrechnung in Schweizer Franken - noch deutlich erhöht werden (+117%), um dem schweizerischen Kostenniveau im Gesundheitsbereich Rechnung zu tragen.<sup>6)</sup>

#### ■ Gesundheitskosten bei Nichterwerbstätigen

Mit der Beschränkung auf die Gruppe der Erwerbstätigen wird nur ein Teil der luftschadstoffbedingten Krankheitskosten erfasst. Etwa 40% der Bevölkerung ist nicht erwerbstätig; darunter befinden sich Bevölkerungsgruppen, die recht empfindlich auf höhere Schadstoffbelastungen reagieren, wie Kinder und ältere Leute. Um diese Gruppen nicht vollständig zu vernachlässigen, rechnen wir anschliessend bei den Nichterwerbstätigen mit einem reduzierten Kostenansatz pro Krankheitstag. Rund 60% der durchschnittlichen Ausgaben der Krankenkassen pro Arbeitsunfähigkeitstag bei den Erwerbstätigen (s. Tab. 4-6) stammen aus der Lohnfortzahlung. Werden diese bei den Nichterwerbstätigen nicht berücksichtigt, ergeben sich im Jahr 1990 Gesundheitskosten von etwa 127 Fr. pro Krankheitstag.<sup>7)</sup> Wir nehmen an, dass die Gesundheit der Nichterwerbstätigen durch die Immissionen in Belastungsgebieten gleich beeinträchtigt wird wie diejenige von Erwerbstätigen. Bei Erkrankungen Nichterwerbstätiger treten zusätzlich Freizeitkosten (Nutzeneinbussen in der Freizeit) sowie Kosten infolge von Ausfällen nichterwerbswirtschaftlicher Arbeit auf (Hausarbeit, Gemeinschaftsarbeit, etc.). Diese werden aber auch bei den Erwerbstätigen Kranken nicht erfasst.

6) Es ist allerdings möglich, dass die Steigerung der BRD-Gesundheitskosten von 1984 bis 1990 einiges höher lag als die hier verwendete Zunahme des Indexes der Kosten für Gesundheits- und Körperpflege (+1 1,6 %).

7) Kosten für ambulante Behandlung, für stationäre Behandlung plus ca. 18 Fr./Person a für Krankengelder (Übernahme des BRD-Wertes, da die Krankengelder in der Schweiz nicht separat ausgewiesen werden).

#### ■ Immissionsbedingte Gesundheitsschäden in den schweizerischen Belastungsgebieten 1990

Die Ermittlung der immissionsbedingten Gesundheitskosten in den schweizerischen Belastungsgebieten basiert auf den Kostenschätzungen pro versicherte Person und Jahr in BRD-Belastungsgebieten von Heinz et al. (1990), s. Tab. 4-5. Zusätzlich werden hier noch die Nichterwerbstätigen mitberücksichtigt und die schweizerischen Kostensätze im Gesundheitswesen verwendet (s. Tab. 4-6).

Die immissionsbedingten Gesundheitskosten infolge der Luftverschmutzung in Schweizer Belastungsgebieten (51 Städte) liegen im folgenden Grössenbereich: **380 Mio Fr./a - 1'850 Mio Fr./a (1990)**. Der Anteil der Gesundheitskosten für Nichterwerbstätige beträgt: 81Mio Fr./a / 391Mio Fr./a (1990).

### 4.4.3 Zurechnung der Gesundheitskosten auf die einzelnen Schadstoffe

Um den Einfluss einzelner Schadstoffe auf die Gesundheit abzuschätzen, nahm Heinz noch eine zusätzliche, nach Schadstoffen differenzierte Datenauswertung vor (Heinz, in: Prognos, 1992, Bd. 2). Dabei berücksichtigt er die Immissionskonzentrationen von Schwebstaub, Stickstoffdioxid und Schwefeldioxid - Ozon figuriert leider nicht als Einflussvariable.

Wie schon erwähnt, ergibt sich ein Einfluss der NO<sub>2</sub>- und der Schwebstaubbelastung auf die Häufigkeit von Arbeitsunfähigkeitsfällen bei Herz-/Kreislaufkrankheiten. Die Häufigkeit von Atemwegserkrankungen wird dagegen nur von der Schwebstaubbelastung beeinflusst. Die Schwefeldioxid- und die Stickoxidbelastung beeinflussen die Dauer von Atemwegserkrankungen. Es kann kein Einfluss der Schadstoffbelastung auf die Dauer der Herz-/Kreislaufkrankheiten nachgewiesen werden. In der Schweiz muss ein signifikanter Einfluss der Ozonbelastung auf die Atemwegserkrankungen vermutet werden.

Aufgrund dieser Angaben kann keine genau differenzierte Zuweisung der Gesundheitskosten auf einzelne Schadstoffe vorgenommen werden. Wir gehen anschliessend von den folgenden Annahmen aus: Die Kosten werden den folgenden Emissionen zugerechnet:

- SO<sub>2</sub>-Jahresemissionen
- NO<sub>x</sub>-Jahresemissionen (inkl. Vorläufersubstanz für die Ozonbildung)
- Staub-/Russ-Jahresemissionen
- VOC-Sommeremissionen (Ozon-Vorläufersubstanz)

Der Anteil der Strom- und Wärmeversorgung an den immissionsschädigenden Gesundheitskosten ergibt sich aus dem Anteil der Feuerungsemissionen an den obigen Emissionen.

## 4.5 Zusammenfassende Bemerkungen

Bei der von Heinz übernommenen Monetarisierung der Gesundheitskosten handelt es sich um einen Human-Kapital-Ansatz. Die immissionsbedingten Gesundheitskosten werden teilweise aufgrund von Lohnfortzahlungs- und Krankengeldbeiträgen bei Arbeitsunfähigkeit ermittelt. Obwohl hier versucht wird, auch die Nichterwerbstätigen einzubeziehen, ist dieser Ansatz problematisch. Die derart monetarisierten Kosten vernachlässigen diverse Kostenelemente (s. auch Prognos, 1992, S. 85ff.):

- Krankheits- und Behandlungsfälle, die nicht zu Arbeitsunfähigkeit führen
- Arbeitsleistungen im nichtformellen Sektor der Wirtschaft (Hausarbeit, unbezahlte Arbeit für die Gemeinschaft)
- Nutzen der Freizeit
- Schmerzen, Trauer
- Psychosoziale Schäden
- Die Kostenschätzungen enthalten nur die Zunahme von Atemwegs- und Herz-/Kreislaufkrankungen. Andere Krankheiten (Allergien etc.) sowie eine allfällige Zunahme der Mortalität bleiben unberücksichtigt.

Die Übertragung der Ergebnisse der Studie von Heinz auf die Schweiz bleibt aufgrund der unterschiedlichen Immissionsverhältnisse problematisch und liefert daher nur eine grobe Schätzung der zu erwartenden Gesundheitskosten. Es ist zu erwarten, dass das zurzeit laufende Programm SAPALDIA in absehbarer Zeit neue Hinweise auf das Ausmass und die Ursachen des immissionsbedingten Krankheitsgeschehens liefern wird.

Erstrebenswert wäre die ergänzende Erfassung von Zahlungsbereitschaften, welche die individuellen Wertschätzungen von Verbesserungen der Luftschadstoffimmissionen in der Schweiz offenbaren würden.

## 5. Gebäudeschäden durch Immissionen der Strom- und Wärmeversorgung

### 5.1 Einleitung, Vorgehen, Abgrenzung

Hier sollen die Kosten der feuerungsbedingten Luftschadstoffbelastung an den Gebäudeaussenflächen quantifiziert werden. Wir betrachten dabei nur die Schäden an den Gebäudeaussenflächen des Normalgebäudebestandes infolge der Feuerungsemissionen. Die relativ hohen Schadenkosten an historischen Gebäuden und an Denkmälern werden aus empirischen und methodischen Gründen nicht in die Betrachtung einbezogen (fehlende Daten, sehr schwierige Quantifizierung der Schäden). Allfällige Schäden an anderen Infrastrukturanlagen (Tankanlagen, Übertragungsleitungen, etc.) sowie an Materialien im Gebäudeinnern werden ebenfalls vernachlässigt.<sup>8)</sup>

Verursacher der Gebäudeschadenkosten und der zusätzlichen Reinigungskosten bei den Gebäudehüllen sind folgende Emissionen bzw. Immissionen der Strom- und Wärmeversorgung (sog. feuerungsbedingte Emissionen und Immissionen):

- Schwefeldioxidemissionen (SO<sub>2</sub>)
- Stickstoffoxidemissionen (NO<sub>2</sub>)
- Staub- und Russemissionen
- Ozonimmissionen, das heisst die sommerlichen NO<sub>x</sub>- und VOC-Emissionen als Vorläufersubstanzen bei der Ozonbildung

Zu luftschadstoffbedingten Gebäudeschäden bestehen zwei Untersuchungen aus den Jahren 1986 und 1992 (INFRAS, 1986; INFRAS, Juli 1992). Die vorliegende Arbeit stützt sich auf diese Arbeiten ab und integriert insbesondere die in der neueren Studie (INFRAS, Juli 1992) vorgenommene Differenzierung zwischen verkehrsbelasteten und nicht verkehrsbelasteten Standorten (< 3000 Fahrzeuge pro Tag).

---

8) Zu den Kosten der Luftverschmutzung an SBB-Infrastrukturen besteht eine Untersuchung aus dem Jahr 1988 (INFRAS, 1988). Total der Kosten der Luftverschmutzung an SBB-Infrastrukturen in der Schweiz 1986: ca. 3,6 Mio Fr./a. ca. 4 Mio Fr./a 1991.

## 5.2 Schadenmechanismen und Kosten im Bereich der Gebäudeschäden

### 5.2.1 Die Luftschadstoffbelastung in der Schweiz

Für die Gebäudeschäden interessiert vor allem die Belastung durch SO<sub>2</sub>-, NO<sub>2</sub>-, Russ/Staub- und O<sub>3</sub>-Immissionen. Die Belastung ist im dicht besiedelten Gebiet grösser. Einzige Ausnahme ist die Ozonbelastung, welche typischerweise ausserhalb der Stadtzentren höher ist, obwohl die Zentren die höchsten Spitzenwerte aufweisen. Ursache dafür ist die Dynamik der Ozonbildung und die Verfrachtung der die Ozonbildung bestimmenden Primärschadstoffe:

|                      | NO <sub>2</sub><br>(µg/m <sup>3</sup> ) | SO <sub>2</sub><br>(µg/m <sup>3</sup> ) | Schwebestaub<br>(µg/m <sup>3</sup> ) | Ozon<br>(µg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------|---|---|--------------------------------------|------------------------------|
| Grenzwert (Jahr)     | 30                                      | 30                                      | 70                                   | --                           |
| Immissionskategorie: |   |   |                                      |                              |
| Ländliche Gebiete    | 10-40                                   | 5-20                                    | 15-40                                | 70-120                       |
| Agglomerationen      | 25-50                                   | 5-30                                    | 15-40                                | 70-120                       |
| Stadtzentren         | 40-60                                   | 10-35                                   | 20-70                                | 50- 80                       |

Tabelle 5-1: Durchschnittliche Immissionskonzentrationen in der Schweiz nach Immissionskategorie (gemäss BUWAL, Immissionswerte 1990, 1991)

In städtischen Gebieten sind bei NO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> Grenzwertüberschreitungen häufig. Die NO<sub>2</sub>-Konzentrationen liegen aber auch in den Agglomerationen und punktuell sogar in ländlichen Gebieten (verkehrsreiche Standorte) über dem Grenzwert.

Den Anteil der Feuerungen an den gesamten Schadstoffimmissionen bestimmen wir anhand einer detaillierten Analyse der verfügbaren Immissionsmessdaten<sup>9)</sup> kombiniert mit Immissionsmodellüberlegungen. Die Messorte werden dabei in drei Gruppen klassiert: Stadt (S), Agglomeration (A) und Land (L). Innerhalb jeder Gruppe werden die Messorte in "verkehrsexponiert" und "nicht verkehrsexponiert" (Lärmbelastung <60 dB(A)) geteilt.

Industriegebiete werden weggelassen. Für jede Untergruppe und für jeden Schadstoff wird ein Immissionsmittelwert berechnet. Die Berechnungen sind im Anhang 1 von (INFRAS, Juli 1992) im Detail dargestellt. Tabelle 5-2 fasst die Ergebnisse zusammen.

Der Verkehr hat an stark befahrenen Strassen ("verkehrsexponiert") einen wichtigen Einfluss auf die gesamte Immissionsbelastung: Die Immissionsanteile sind für die drei

9) Immissionsmessungen von kantonalen, kommunalen und NABEL-Stationen von 1990 (BUWAL, immissionswerte 1990); Jahresmitteherverte.

Schadstoffe an den verkehrsexponierten Lagen durchwegs höher als in den nicht verkehrsexponierten. Beim NO<sub>2</sub> ist die Differenz nur gering; erstens weil der Hauptteil der NO<sub>x</sub>-Emissionen aus dem Motorfahrzeugverkehr stammt (städtische Gegenden 60-70 %, ländliche 70-90%), und zweitens weil NO<sub>2</sub> ein Sekundärschadstoff ist. Das bedeutet, dass seine Entstehung eine gewisse Zeit beansprucht, und das hat wiederum zur Folge, dass die NO<sub>2</sub>-Immissionen Räumlich und zeitlich besser durchmischt sind als die Primärschadstoffe SO<sub>2</sub> und Staub. Letztere werden überwiegend von stationären Quellen ausgestossen (80-95%). Dass die verkehrsbedingten Immissionsanteile an verkehrsexponierten Lagen trotzdem höher sind als die Emissionsanteile, liegt am unterschiedlichen Emissionsniveau: im Strassenraum sind die verkehrsverursachten Emissionen stärker vertreten als die über den Dächern und aus Industriekaminen emittierten Emissionen.

| Feuerungsbedingte Immissionsanteile in % | Stadt  | Agglomeration | Land  |
|--|--------|---------------|-------|
| 1. verkehrsexponiert                     |        |               |       |
| SO <sub>2</sub>                          | 62-72  | 53-63         | 59-69 |
| NO <sub>2</sub>                          | 24-30  | 25-31         | 11-17 |
| Staubniederschlag                        | 35-45  | 37-47         | 39-49 |
| 2. nicht verkehrsexponiert               |        |               |       |
| SO <sub>2</sub>                          | 85-95  | 85-95         | 85-95 |
| NO <sub>2</sub>                          | 27-37  | 28-38         | 21-31 |
| Staubniederschlag                        | 8,0-90 | 85-95         | 90-98 |

Tabelle 5-2: Bereiche für durchschnittliche [schweizerische Mittelwerte) Immissionsanteile der Feuerungen an den gemessenen Immissionskonzentrationen (aus INFRAS, Juli 1992, S. 12)

## 5.2.2 Wie beeinflussen Luftschadstoffe die Gebäudehülle?

### a) Übersicht

Tabelle 5-3 stellt die wichtigsten Mechanismen übersichtsmässig zusammen. Dargestellt sind dabei auch die Räumlichen und ökonomischen Implikationen.

|                        | Exposition der Gebäude              |   |   |
|------------------------|-------------------------------------|---|---|
|                        | verkehrsexponiert                   | nicht verkehrsexponiert                                 |   |
| Depositionsart         | Trockendeposition                   | Trockenseposition                                       | Nassdeposition<br>Saurer Regen<br>Nebel |
| Schadstoffe            | Staub, Partikel                     | S O <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HCl O <sub>3</sub> | SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>       |
| Auswirkung             | Verschmutzung                       | Ätzung  | Spröd werden<br>Korrosion               |
| wichtigste Materialien | Farben, Anstriche, Beton            | Farben, Bleche  | Farben, Kunststoffe<br>Farben, Bleche   |
| Schaden                | Reinigungskosten, Renovationskosten | Renovationskosten                                       |   |
| räumliche Skala        | lokal<br>(Verkehrsachsen)           | mittel<br>(Agglomeration)                               | mittel- und grossräumig<br>(Region)     |
| Verursacher            | v.a. Verkehr und Feuerung           | Feuerungen, Industrie und Verkehr                       |   |

Tabelle 5-3: Luftverschmutzung und Gebäudeschäden: Übersicht über die wichtigsten Schadensmechanismen (INFRAS, Juli 1992, S. 14)

### b) Depositionsmechanismen

Luftschadstoffe beeinflussen die Gebäudehülle über zwei Depositionsmechanismen:

#### ■ Trockene Deposition:

Gasmoleküle werden durch Konvektion (Windströmungen) und Diffusion (physikalische "Verschmierung") bis zur Erdoberfläche verfrachtet, wo sie durch Sorptionsprozesse (physikalische Anlagerung oder chemische Reaktion) zurückgehalten werden können (Schadstoffe: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, O<sub>3</sub>).

Aerosole (Rauch- und Staubpartikel) sedimentieren aus der Atmosphäre langsam auf die Erdoberfläche.

#### n Nasse Deposition:

Gase und Aerosole werden durch Niederschläge auf die Erdoberfläche gebracht. Im Vordergrund steht der Regen ("saurer Regen"). Daneben spielen auch der Ne-

bet als Schadstoffsammler sowie Schnee, Tau und Eis eine Rolle. Die im Wasser aufgefangenen Schadstoffmoleküle der nassen Deposition können sich chemisch verändern. So wird beispielsweise der Hauptteil des eingefangenen Schwefeldioxids zu Sulfat ( $\text{SO}_4$ ) oxidiert. Die nasse Deposition ergibt einen Belastungssockel, der primär von der jährlichen Niederschlagsmenge abhängt.

Es kann nicht generell gesagt werden, welche Depositionsart als Ursache von Materialschäden dominiert. Die einzelnen Materialien reagieren unterschiedlich auf trocken bzw. nass deponierte Schadstoffe.

Die Luftschadstoffe bewirken nicht nur Materialschäden an der Gebäudehülle. Ein wichtiger weiterer Einfluss besteht in der Verschmutzung der Gebäudehülle durch die Ablagerung von Staub- und Russpartikeln. Die Verschmutzung kann als Vorstufe zu sich später einstellenden Materialschäden aufgefasst werden.

### c) Materialbezogene Schadensmechanismen

(Details siehe INFRAS, Juli 1992, S. 15-20)

Im Vordergrund stehen die folgenden Mechanismen:

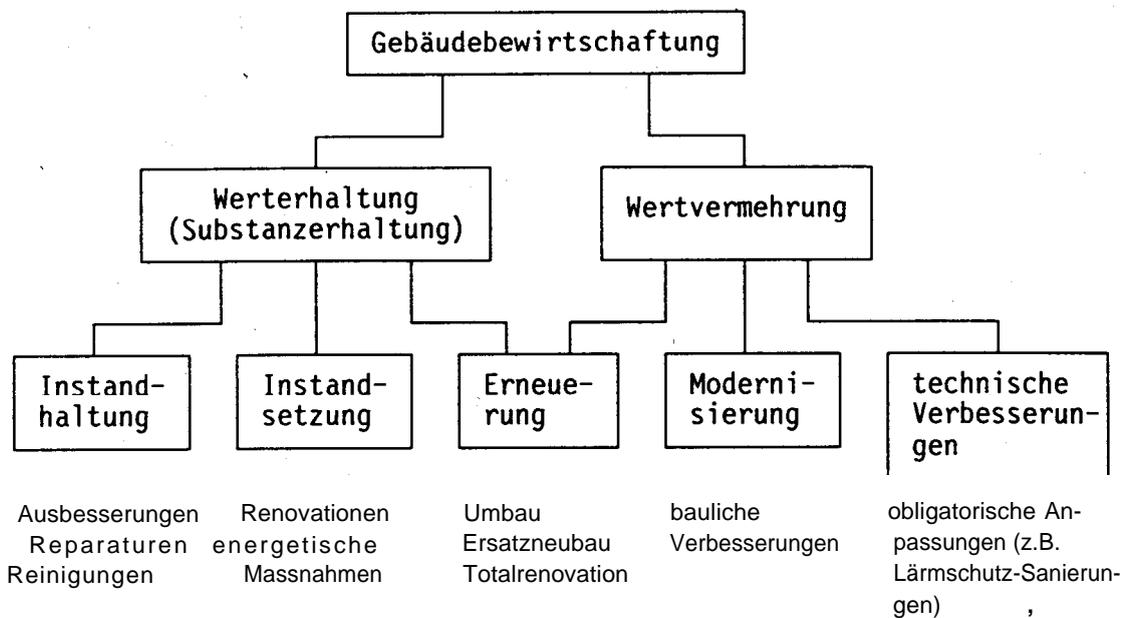
- Vorzeitige Alterung von Anstrichen infolge von  $\text{SO}_2$ -,  $\text{NO}_2$ - und  $\text{O}_3$ -Immissionen und infolge der Verschmutzung durch Russ und Staub.
- Schädigung von Natursteinen infolge von  $\text{SO}_2$ -Emissionen (lösender und treibender Angriff),
- Schädigung von Betonaussenflächen durch  $\text{SO}_2$  (ähnlich wie Schädigung der Natursteine). Bei gut konstruierten Stahlbetonkonstruktionen könnten dagegen bei den aktuellen  $\text{SO}_2$ -Immissionen keine Beeinträchtigungen nachgewiesen werden.
- Beschleunigte atmosphärische Korrosion von Metallen (Spenglerbleche, Dachrinnen, Fallrohre, Metallfassaden, Metallfensterrahmen) infolge saurer Luftschadstoffe: vor allem  $\text{SO}_2$ , daneben aber auch Stickoxide, Chlorwasserstoffe, organische Säuren etc.

## 5.2.3 Kosten von Immissionsschäden

### a) Begriffe der Gebäudebewirtschaftung

Bei der Klärung des Kostenbegriffs stützen wir uns im wesentlichen auf (Wüest + Gabathuler, 1989): Entsprechend können werterhaltende und wertvermehrnde Tätigkeiten der Gebäudebewirtschaftung unterschieden werden.

Bei der Bewirtschaftung der Gebäudehülle sind folgende Tätigkeiten relevant:



Figur 5-4: Tätigkeiten der Gebäudebewirtschaftung. Die Abgrenzung zwischen werterhaltenden und wertvermehrenden ist unscharf, insbesondere Erneuerungstätigkeiten können werterhaltenden und wertvermehrenden Charakter besitzen (Gliederung in Anlehnung an Wüest+Gabathuler, 1989)

Wir berücksichtigen hier die immissionsbedingten, zusätzlichen Kosten der Wert- bzw. Substanzerhaltung, welche in Gebieten mit starker Luftverschmutzung wegen der vorzeitigen Alterung (oder Verschmutzung) der Gebäudehülle entstehen. Das sind immissionsbedingte Aufwendungen für zusätzliche

- Ausbesserungen,
- Reparaturen,
- Renovationen und
- Reinigungen.

Der Immissionseinfluss manifestiert sich in erster Linie in einer Verkürzung der Zyklen für diese Tätigkeiten. Wir unterscheiden deshalb in der Folge einen Reinigungs- und einen **Renovationszyklus**. Der nächste Abschnitt zeigt ein Verhaltensmodell für die Wahl des Renovationszyklus.

## b) Luftbelastung und Gebäudebewirtschaftung

Vereinfachend betrachten wir hier nur die Bewirtschaftung der Gebäudehülle (s. INFRAS, Juli 1992). Die Wahl der optimalen Bewirtschaftungsstrategie der Gebäudehülle durch den Gebäudeeigentümer entspricht dabei einem Kostenminimierungsproblem. Die Kosten können durch optimal gewählte Renovationszyklen minimiert werden. Denn

sowohl Unterhalts- als auch Kapitalkosten für ein bestimmtes Gebäude hängen primär von der Länge des Renovationszyklus ab:

- Die **Unterhaltskosten**<sup>10)</sup> - darunter verstehen wir im wesentlichen Instandhaltungs- und Reparaturkosten - nehmen mit zunehmender Zyklusdauer zu, da als Folge der Alterung immer mehr Bauteile Mängel aufweisen und deshalb repariert werden müssen.
- Die **Kapitalkosten** (= Zinsen und Amortisation der Investitionen in die Gebäudehülle im Rahmen der Instandsetzungs- und Erneuerungstätigkeiten) nehmen mit zunehmender Zyklusdauer zuerst ab und in der Folge wieder zu, da zwei gegenläufige Effekte wirken: Der Umfang der für eine Substanzerhaltung notwendigen Renovationen ist umso grösser, je länger der Renovationszyklus gewählt wird. Beispielsweise kann die Gebäudehülle bei kurzen Zyklen im wesentlichen durch eine Erneuerung der Anstriche renoviert werden. Wird eine Renovation längere Zeit hinausgeschoben, so muss unter Umständen auch der Verputz erneuert werden oder sind Fenster, -laden, Dachrinnen, -abläufe etc. zu ersetzen. Die spezifischen Kapitalkosten (Kapitalkosten pro Bauteil) nehmen mit zunehmender Zyklusdauer ab, da der jährlich abzuschreibende Betrag (= Investition dividiert durch Lebensdauer) abnimmt. Das Kostenminimum wird dort erreicht, wo die mit zunehmender Zyklusdauer abnehmenden Kapitalkosten durch die Zunahme bei den Unterhaltskosten kompensiert werden.

Welche Verhaltensreaktionen löst nun die Belastung der Luft mit korrosiven bzw. verschmutzenden Schadstoffen aus? Primär verändert diese Luftverschmutzung die Rahmenbedingungen der Gebäudebewirtschaftung. Die Gebäudehülle altert schneller. Dadurch verkürzt sich der optimale Renovationszyklus, wodurch die jährlich aufzuwendenden Kosten für die Bewirtschaftung der Gebäudehülle steigen,

### c) Der verwendete Kostenbegriff

Die verkürzten Renovations- oder Reinigungszyklen infolge der Luftverschmutzung führen zu zusätzlichen Kosten. Wir berücksichtigen:

- Zusätzliche Renovationskosten aufgrund der verkürzten Lebensdauer einzelner Materialien der Gebäudehülle. Im Vordergrund stehen zusätzliche Anstriche bzw. vorzeitiger Ersatz von Blechen und Kunststoffen. Betroffen davon sind sowohl verkehrsexponierte wie auch nicht verkehrsexponierte Standorte. Entlang von Hauptachsen ist der Einfluss der Verschmutzung durch Partikel (vorzeitige neue Anstriche) wichtig.
- Zusätzliche Reinigungskosten (von Fenstern und Fassaden) aufgrund stärkerer Verschmutzung.

Im Zusammenhang mit der Abbruchbewirtschaftung können auch ästhetische Kosten auftreten, indem verschmutzte Fassaden zu einer Beeinträchtigung der Wohn- oder

10) genauer: laufender Unterhalt.

Lebensqualität führen können. Die Nicht-Renovation führt zu einer Abwertung eines Wohnquartiers bzw. bewirkt externe Kosten in der Nachbarschaft. Diese Kosten sind einerseits schwierig aufzuteilen auf die Verursacherkategorien Luft und Lärm, andererseits nur mit grossem methodischem Aufwand zu erfassen. Sie werden deshalb in der Folge nicht quantifiziert.

## 5.3 Die luftschadstoffexponierte Gebäudehülle der Schweiz

### 5.3.1 Fassadenfläche total

Die Schätzung der gesamten Fassadenflächen des schweizerischen Gebäudebestandes wurde durch Wuest + Gabathuler durchgeführt. Grundlage sind die Daten der kantonalen Gebäudeversicherungen sowie Vergleichswerte des BFS. Diese umfassen gemeindeweise den gesamten Gebäudebestand der Schweiz nach bautechnischen Merkmalen (Volumen, Bruttogeschossfläche, Energiebezugsfläche) und Versicherungswert. Die Daten werden aufgrund aktueller Erhebungen zur Bautätigkeit laufend nachgeführt.

Zur Ermittlung der Fassadenfläche und der verschiedenen Materialanteile wurden diese Daten mit Informationen über die Struktur des Gebäudebestandes verknüpft, welche aus einer durch Wuest + Gabathuler 1990 durchgeführten repräsentativen Erhebung stammen (siehe INFRAS, Nov. 1992, Anhang 3). Als Grundlage dienten dabei die Erhebungen, welche im Rahmen der Studie "Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung im Kanton Zürich" (I NFRAS, 1986) durchgeführt wurden.

Die wichtigsten Ergebnisse enthalten die Tabellen 5-5 und 5-6:

| Immissionskategorie | Fassadenfläche |     |
|---------------------|----------------|-----|
|                     | ha             | %   |
| Stadt               | 9'082          | 14  |
| Agglo               | 18'710         | 29  |
| Land                | 37'350         | 57  |
| Total               | 65'142         | 100 |

Tabelle 5-5: Fassadenfläche des schweizerischen Gebäudebestands 1990 nach Immissionskategorie; hinzu kommen noch ca. 111'000 km Dachrinnen und Fallrohre (Quelle: Gebäudedatenbank Wüest + Gabathuler)

| Material     | Fassadenfläche |     |
|--------------|----------------|-----|
|              | ha             | %   |
| Fassade      |                |     |
| - verputzt   | 21'716         | 33  |
| - verkleidet | 14'339         | 22  |
| - roh        | 10'312         | 16  |
| - übrige     | 4'333          | 7   |
| Fenster      | 11'938         | 18  |
| Bleche       | 2'505          | 4   |
| Total        | 65'142         | 100 |

Tabelle 5-6: Fassadenfläche des schweizerischen Gebäudebestands 1990 nach Materialanteilen

Der grösste Anteil der Fassadenfläche fällt auf industriell, gewerblich oder landwirtschaftlich genutzte Gebäude (gut 50% der Fassadenfläche). Die Fassadenfläche an Wohngebäuden macht ca. 25% aus.

### 5.3.2 Der verkehrsexponierte Anteil

Als Kriterium für die Abgrenzung zwischen verkehrsexponiert und nicht verkehrsexponiert wählen wir eine Lärmbelastung von 60 dB(A) (Lr-Tageswert). Entsprechend gilt grob gesagt der gesamte Gebäudebestand entlang von Hauptstrassen sowie derjenige entlang stark befahrener Nebenstrassen als verkehrsexponiert. Zur Bestimmung des verkehrsexponierten Anteils stehen vier Grundlagen zur Verfügung (INFRAS, Juli 1992, S. 60f.) :

- Lärmkataster Stadt Zürich (INFRAS, 1991): Er ermöglicht die Identifikation der Linklänge in der Stadt Zürich mit einer Lärmbelastung von über 60 dB(A). Für die Stadt Zürich resultiert ein Anteil exponierter Fassadenfläche in der Grössenordnung von 25%.
- Lärmkataster Neuchâtel: Gemäss diesem flächendeckenden Lärmkataster sind 40% des städtischen Gebäudebestandes Lärmbelastungen von über 60 dB(A) ausgesetzt.
- Iplak-Datenbank - Kanton Zürich (INFRAS, Nov. 1991): Die IPLAK-Datenbank erlaubt die Ausscheidung der Netzlänge der drei Strassentypen Autobahnen, Autostrassen, Hauptstrassen nach den drei Immissionskategorien Stadt, Agglo, Land sowie nach Innerorts- und Ausserortsanteile

Diese Werte sind als Untergrenze zu interpretieren, da stark befahrene Nebenstrassen nicht berücksichtigt werden.

- **Lärmkataster von 34 weiteren Gemeinden:** Infraconsult hat in der Parallelstudie "Soziale Kosten des Verkehrslärms in der Schweiz" (Infraconsult, 1991 ) die Lärm - kataster von 34 Gemeinden ausgewertet und die Anzahl Wohnungen nach Lärm - klassen bestimmt.

Aufgrund dieser Datenauswertungen schätzen wir den Anteil des verkehrsexponierten Gebäudebestandes wie folgt:

|         |     |     |
|---------|-----|-----|
| - Stadt |     | 30% |
| - Agglo | 15% |     |
| - Land  |     | 10% |

Es resultieren folgende Flächen:

| Immissionskategorie | Fassadenfläche Schweiz 1990 |    |                         |    |        |     |
|---------------------|-----------------------------|----|-------------------------|----|--------|-----|
|                     | verkehrsexponiert           |    | nicht verkehrsexponiert |    | Total  |     |
|                     | ha                          | %  | ha                      | %  | ha     | %   |
| Stadt               | 2'651                       | 4  | 6'431                   | 10 | 9'082  | 14  |
| Agglo               | 2'715                       | 4  | 15'995                  | 25 | 18'710 | 29  |
| Land                | 3'606                       | 6  | 33'744                  | 52 | 37'350 | 57  |
| Total               | 8'972                       | 14 | 56'170                  | 86 | 65'142 | 100 |

Tabelle 5- 7: Fassadenfläche des schweizerischen Gebäudebestands 1990 nach Immissionskategorie; Schätzung des verkehrsexponierten Anteils. Verkehrsexponiert = Lr (Tageswert  $\geq 60$  dB(A))

Anhang 4 von (INFRAS, Nov. 1992) enthält die Fassadenfläche des schweizerischen Gebäudebestandes. aufgeteilt nach Material für die Nutzungen Wohnen, Industrie/Gewerbe/Landwirtschaft, Dienstleistungen, öffentliche Gebäude und übrige Gebäude in den verschiedenen Immissionskategorien.

## 5.4 Kosten von Gebäudeschäden infolge von Feuerungs- immissionen

### 5.4.1 Einleitung

Die Luftverschmutzung führt zu zusätzlichen Renovationskosten infolge verkürzter Sanierungszyklen sowie zu zusätzlichen Reinigungskosten. Das Hauptgewicht der folgenden Ausführungen liegt bei der indirekten Erfassung der zusätzlichen Renovationskosten. Die empirische Basis bei den Reinigungskosten ist schlechter, so dass nur zusätzliche Reinigungskosten bei Geschäftsbauten in der Immissionskategorie Stadt ermittelt werden können. Die luftschadstoffbedingte Beschädigung von historischen Gebäuden und von Denkmälern wird hier nicht erfasst. Diese Objekte sind Unikate. Die Bewertung ihrer Beschädigung ist deshalb äusserst aufwendig und zudem methodisch problematisch.

Bei der indirekten Erfassung der feuerungsbedingten Zusatzkosten für Renovationen werden zuerst die gesamten Gebäudeschadenkosten infolge Luftverschmutzung geschätzt und der Feuerungsanteil nachträglich aufgrund der Anteile an den relevanten Schadstoffimmissionen bestimmt. Ausgangspunkt bildet die Schätzung der luftverschmutzungsbedingten Lebensdauerverkürzungen für die verschiedenen Materialien der Gebäudeaussenhülle. In einem zweiten Schritt werden die daraus resultierenden zusätzlichen Kapitalkosten geschätzt. Der Feuerungsanteil an den gesamten luftverschmutzungsbedingten Kosten wird im dritten Schritt gemäss den Immissionsanteilen bestimmt.

Der wichtigste semiempirische Input besteht bei diesem Ansatz in der Verarbeitung des in Wissenschaft und Praxis verfügbaren Wissens über den Einfluss der Luftverschmutzung auf die Lebensdauern der exponierten Materialien (Expertenbefragung, empirische Dosis-Wirkungs-Funktionen, etc.; siehe (INFRAS, Okt. 1986, S. 60-70); (BAM, Okt. 5 1990)) und die Reinigungsintervalle verschmutzter Gebäudeäussenflächen.

### 5.4.2 Zusätzliche Renovationskosten infolge von Feuerungs- immissionen

#### a) Methodik

Um die zusätzlichen Kapitalkosten für die Gebäudehülle zu ermitteln, müssen folgende Grössen bekannt sein:

- Menge der exponierten Bauteile nach Immissionskategorien (Stadt, Agglo, Land)
- Erstellungskosten dieser Bauteile
- Lebensdauerverkürzungen infolge Schadstoffimmissionen bei den einzelnen Bauteilen in den verschiedenen Immissionskategorien

Der methodisch heikelste Punkt ist die Ermittlung der schadstoffbedingten Lebensdauerverkürzungen. Denkbar ist hier von einer gross angelegten empirischen Erhebung bis zu einer Delphi-Methode eine ganze Palette von methodischen Ansätzen. Wir stützen uns in dieser Studie auf die nach wie vor aktuelle Methodik, welche von INFRAS entwickelt wurde (INFRAS, 1986). Es handelt sich dabei um einen praxisorientierten "methodenpluralistischen" Ansatz, welcher möglichst das ganze, in Wissenschaft und Praxis verfügbare Wissen verarbeitet. Der methodische Leitfaden lässt sich dabei mit dem Motto "besser ungefähr richtig als genau falsch" charakterisieren.

Die Lebensdauerverkürzung wird dabei für die drei Immissionskategorien Stadt, Agglo, Land geschätzt (siehe Tabelle 5-1 ). Dabei gehen wir von der vereinfachenden und vorsichtigen Annahme aus, dass die Lebensdauerverkürzungen in der Immissionskategorie Land vernachlässigbar sind.<sup>11)</sup> Das heisst, die Lebensdauern in der Immissionskategorie Land verwenden wir als Referenzlebensdauern. Die schadstoffbedingten Kapitalkosten entstehen aufgrund von Lebensdauerverkürzungen gegenüber den Referenzverhältnissen in der Immissionskategorie Land.

---

11) Dies dürfte in der Realität nicht der Fall sein, da es heutzutage keine eigentlichen Reinluftgebiete mehr gibt und gerade die Ozonkonzentration auf dem Land höher ist als in den Immissionskategorien "Stadt" und "Agglomeration". Dies betrifft v.a. Materialien wie Kunststoffe und Farben.

in (INFRAS, 1986) aufgearbeitet wurden, sowie in der Zwischenzeit erschienene Studien (v.a. Wüest + Gabathuler, 1989 und BAM, 1990). Für die hier im Vordergrund stehenden Materialien gehen wir gemäss diesen Grundlagen von folgenden Durchschnittswerten bzw. Ober- und Untergrenzen aus:

| Bauteile / Materialien  | Lebensdauer (Jahre) |            |             |
|-------------------------|---------------------|------------|-------------|
|                         | Durchschnitt        | Obergrenze | Untergrenze |
| Fassaden:               |                     |            |             |
| - verputzt mit Anstrich | 20                  | 40         | 10          |
| - verkleidet            | 40                  | 50         | 30          |
| - übrige                | 40                  | 60         | 30          |
| Fensterrahmen           | 35                  | 70         | 20          |
| Fensterladen            | 30                  | 40         | 20          |
| Spenglerbleche          | 20                  | 30         | 5           |
| Dachrinnen/Fallrohre    | 20                  | 30         | 5           |

Tabelle 5-9: Durchschnittswerte sowie Ober- und Untergrenzen der Lebensdauern für Gebäudeteile der Aussenhülle gemäss schweizerischer Literatur (vgl. dazu die beiden Tabellen aus (PLENAR, 1980 und Wüest + Gabathuler, 1989 in Anhang 2)

Diese Bandbreiten pro Material geben auch Indizien für den Einfluss der Luftbelastung. So ist anzunehmen, dass Gebäude in stark belasteten Gebieten eher Lebensdauern im Bereich der Untergrenze, in schwach belasteten Gebieten eher solche im Bereich der Obergrenze aufweisen.

Dass der Einfluss der Luftbelastung in dieser Weise wirkt, wird durch die in (INFRAS, Juni 1992, S. 15ff.) vorgenommene Schadstoffanalyse gestützt (vgl. auch BAM, 1990). Eine Vielzahl von Studien mit Dosis-Wirkungsfunktionen weist eine signifikante Verkürzung der Lebensdauer pro Bauteil infolge Belastung durch Luftschadstoffe nach.

Die wichtigsten empirischen Grundlagen für diese Fragestellung liefern zwei Studien, die sich auf die Situation in der BRD beziehen (BAM, 1990; Heinz, 1983). Insbesondere in der neueren Studie - im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin (BAM, 1990) - werden schadstoffbedingte Lebensdauerverkürzungen für verschiedene Materialien der Gebäudeaussenhülle in einer Fragebogenaktion bei Wohnungsunternehmen empirisch ermittelt. Dabei wird zwischen Belastungsgebieten ( $\text{SO}_2$ -Jahresmittelwert  $\geq 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , v.a. Städte im Ruhrgebiet) und "nicht belasteten Gebieten" unterschieden. Tabelle 5-8 zeigt die in diesem Zusammenhang interessierenden Schätzwerte:

| Bauteile/Materialien       | “Stadt” | “Agglo” | “Land” | Ø Lebensdauer “Land”<br>(Referenz) in Jahren |
|----------------------------|---------|---------|--------|--|
| ■ Fassaden:                |         |         |        |  |
| - verputzt                 | 50%     | 25%     | 0%     | 28   |
| - verkleidet               | 20 %    | 10%     | 0%     | 45   |
| - übrige                   | 20 %    | 10%     | 0%     | 50   |
| ■ Fenster:                 |         |         |        |  |
| - Fensterrahmen            | 30%     | 15 %    | 0%     | 41   |
| - Fensterläden             | 30%     | 15%     | 0%     | 30   |
| ■ Bleche                   | 60 %    | 40%     | 0%     | 33   |
| ■ Dachrinnen / Ablaufrohre | 60%     | 40%     | 0%     | 33   |

Tabelle 5-11: Schätzung der Lebensdauerverkürzungen durch Schadstoffeinfluss nach Immissionskategorien auf der Grundlage von (INFRAS, 1986; BAM, 1990)

Bei diesen bauteilspezifischen Lebensdauerverkürzungen handelt es sich um Durchschnittswerte. Es ist plausibel anzunehmen, dass diese in Abhängigkeit der Immissionskonzentrationen variieren. Für die Grösse der Varianz liegt keine empirische Evidenz vor. Sie dürfte jedoch direkt mit der Varianz der Immissionskonzentrationen der relevanten Schadstoffe verbunden sein. Wir haben die ‘Mittelwerte für die wichtigsten Schadstoffe in den drei Immissionskategorien in (INFRAS, Juli 1992, Anhang 1) ermittelt. Gemäss diesen Berechnungen gehen wir von folgenden Varianzen der Lebensdauerverkürzungen aus:

- Bei den Spenglerblechen, Dachrinnen und Fallrohren spielen die SO<sub>2</sub>-Immissionen die zentrale Rolle. Diese sind an verkehrsexponierten und nicht verkehrsexponierten Standorten in etwa gleich.
- Bei den übrigen Materialien ist der Einfluss der NO<sub>2</sub>- und SO<sub>2</sub>-Immissionen sowie der Staubbiederschlag in etwa gleich zu gewichten.- Der entsprechend aggregierte Schadstoffindikator variiert in Abhängigkeit der Verkehrsexponiertheit in der Gröszenordnung von  $\pm 25\%$  (gemäss den in (INFRAS, Juli 1992, Anhang 1) ermittelten Durchschnittswerten).

#### c) Zusätzliche Kapitalkosten infolge der Feuerungsimmisionen

Ausgehend von den Immissionskategorien von Kapitel 5.2.1, den Gebäudeaussenflächen und -materialien in diesen Immissionskategorien (Kap. 5.3) und den Lebensdauerverkürzungen in den Immissionskategorien Stadt und Agglo ergeben sich folgende zusätzliche Kapitalkosten: (Details zu den Berechnungen siehe INFRAS, Nov. 1992, Anhang 4).

| Immissions-<br>kategorie | Zusätzliche Kapitalkosten (in Mio Fr./a, Preisbasis 1991) |   |   |
|--------------------------|---|---|---|
|                          | infolge Luft-<br>verschmutzung                            | Anteil an verkehrsex-<br>ponierten Standorten | Anteil an nicht verkehrsex-<br>ponierten standorten |
| Stadt                    | 449   | 185   | 264   |
| Agglo                    | 336   | 67  | 269   |
| Land                     | 0   | 0   | 0   |
| <b>Total</b>             | <b>785</b>  | <b>252</b>                                    | <b>533</b>  |

Tabelle 5-12: Zusätzliche Kapitalkosten infolge Luftschadstoffimmissionen: Gesamtkosten der Luftverschmutzung in der Schweiz 1991 nach Immissionskategorie

Die Ermittlung des Feuerungsanteils zeigt Tabelle 5-11:

| Material                         | Zusätzliche Kapitalkosten Gebäudehülle in Mio Fr./a (Preisbasis 1991) |                                 |                  |                         |                                 |            |   |
|----------------------------------|---|---------------------------------|------------------|-------------------------|---------------------------------|------------|---|
|                                  | verkehrsexponiert   |                                 |                  | nicht verkehrsexponiert |                                 |            | Total Anteil<br>Feuarungen<br><br>Mio Fr. |
| Total<br>Mio Fr.                 | Anteil<br>Verkehr<br>%  | Anteil<br>Feuarungen<br>Mio Fr. | Total<br>Mio Fr. | Anteil<br>Verkehr<br>%  | Anteil<br>Feuarungen<br>Mio Fr. |            |   |
| Stadt                            |   |                                 |                  |                         |                                 |            |   |
| ŽFasaden/Fenster                 | 166   | 55%                             | 75               | 221                     | 31%                             | 152        | 227                                       |
| ŽBleche/Dachrinnen/<br>Fallrohre | 19  | 33%                             | 13               | 43                      | 10%                             | 39         | 52  |
| <b>Total Stadt</b>               | <b>185</b>  | <b>ca.53%</b>                   | <b>88</b>        | <b>264</b>              | <b>ca.30%</b>                   | <b>191</b> | <b>279</b>                                |
| Agglo                            |   |                                 |                  |                         |                                 |            |   |
| ŽFasaden/Fenster                 | 58  | 57%                             | 25               | 221                     | 29%                             | 156        | 181                                       |
| ŽBleche/Dachrinnen/<br>Fallrohre | 9   | 42%                             | 5                | 48                      | 10%                             | 43         | 88  |
| <b>Total Agglo</b>               | <b>67</b>   | <b>ca. 54%</b>                  | <b>30</b>        | <b>289</b>              | <b>ca.28%</b>                   | <b>199</b> | <b>228</b>                                |
| <b>Total Stadt + Agglo</b>       | <b>252</b>  | <b>ca.53%</b>                   | <b>118</b>       | <b>533</b>              | <b>ca.28%</b>                   | <b>390</b> | <b>508</b>                                |

Tabelle 5-13: Zusätzliche Kapitalkosten der Gebäudehüllen nach Immissionskategorie für die verkehrsexponierten/nicht verkehrsexponierten Gebäude, Schweiz 1991; und Ermittlung des feuerungsbedingten Anteils

Wir schätzen den Anteil der Feuerungen an den gesamten Kosten der Luftverschmutzung auf rund 510 Mio Fr. pro Jahr; ca. 120 Mio Fr. an verkehrsexponierten und 390 Mio Fr. an nicht verkehrsexponierten Standorten.

### 5.4.3 Zusätzliche Reinigungskosten infolge der Luftverschmutzung

#### a) Vorgehen, Methode

Die zusätzlichen Reinigungskosten von Gebäudeaussenflächen werden primär durch anthropogen verursachte Staub- und Russemissionen verursacht. Der grösste Teil dieser Emissionen stammt von stationären Quellen (80-95%, vgl. Tabelle 5-2). Nur an verkehrsexponierten Standorten erreicht der Verkehrsanteil 50-60%. Laut Tabelle 5-1 sind die Schwebestaubemissionen in ländlichen Gebieten und in den Agglomerationen etwa gleich gross (15-40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) und in den Stadtzentren knapp doppelt so gross (20-70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Unter den zusätzlichen Reinigungskosten verstehen wir die Aufwendungen für die regelmässige Reinigung von Fenstern, Türen, Storen, Laden, Metall- und Glasfassaden.

Die beiden zentralen Faktoren für die Ermittlung der zusätzlichen Reinigungskosten sind:

- Reinigungszyklen:

In einem ersten Schritt schätzen wir den Einfluss der Luftverschmutzung auf die Reinigungszyklen. Auch hier sind wir mit dem Problem konfrontiert, dass die Reinigungszyklen durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren gehören neben den Verschmutzungsfaktoren (z. B. Baukonstruktion, Materialien, Exposition, Bewitterung etc.) auch Verhaltensfaktoren (z. B. Nutzungszweck der Liegenschaft).

- Reinigungskosten

Wir unterscheiden Wohngebäude und Gebäude mit vorwiegend kommerzieller Nutzung:

Ž Im Bereich Wohngebäude entstehen Kosten durch die Ausgaben für Reinigungsmittel und Putzmaterial und durch den Arbeitsaufwand (in der Regel Zeitkosten ohne Entlohnung) für die Reinigung von Fenstern, Türen, Storen und Laden. Hier bestehen nicht nur Unsicherheiten bezüglich der mittleren Reinigungsintervalle und deren Beeinflussung durch Verkehrsimmissionen, sondern auch über die zu verwendenden Kostensätze, da die in diesem Bereich erbrachten Leistungen in der Regel nicht marktmässig bewertet werden.

Ž Industrie-, Gewerbe- und Dienstleistungs- und Verwaltungsbauten werden grösstenteils professionell gereinigt. Hier können die durchschnittlich von den Reinigungsinstituten verlangten Kostensätze eingesetzt werden.

Im Vergleich zu den Renovationskosten sind die empirischen Grundlagen bei den zusätzlichen 'Reinigungskosten schlecht. Wir stützen uns auf Ergebnisse der UBA-Studie (BAM, 1990) und eigenen punktuellen mündlichen Befragungen von Reinigungsinstituten und EigentümerInnen von Geschäftsgebäuden ab. Diese Informationen liefern in erster Linie Indizien für Grössenordnungen im Bereich von Geschäftsgebäuden mit professioneller Reinigung. Bei den Wohngebäuden sind demgegenüber kaum brauchbare Grundlagen vorhanden. Zudem stellt sich dort wie erwähnt das Problem der Bewertung der zusätzlichen Reinigungsaktivitäten.

Wir konzentrieren uns deshalb in der Folge auf die Bewertung der zusätzlichen Reinigungskosten bei den Geschäftsgebäuden und verzichten auf eine Abschätzung der Kosten bei Wohngebäuden.

#### **b) Feuerungsbedingte Reinigungskosten bei Gebäudehüllen - Ergebnisse**

Aufgrund der Immissionskonzentrationen von Tabelle 5-1 nehmen wir an, dass in den Immissionskategorien Land und Agglomeration keine zusätzlichen Reinigungen aufgrund der anthropogen verursachten Luftschadstoffbelastung nachweisbar sind. Eine Umfrage bei Fachfirmen ergab für Geschäftsgebäude in Stadtzentren (Immissionskategorie Stadt) zusätzlich 1-3 Fensterreinigungen pro Jahr (INFRAS, 1986, S. 97ff.; INFRAS, Juli 1992, S. 55). Unter Berücksichtigung der Russ- und Staubimmissionen schätzen wir den Anteil der durch die Feuerungsimmissionen zusätzlich verursachten Fensterreinigungen auf durchschnittlich + 2 pro Jahr. Bei einem Kostensatz von 6 Fr./m<sup>2</sup> (KVZG, 1991) resultieren bei Geschäftsbauten in der Immissionskategorie Stadt die folgenden zusätzlichen Reinigungskosten pro Jahr:

Fensterfläche Geschäftsbauten Stadt (gem. INFRAS, Nov. 1992, Anhang 3): 1060 ha

**Zusätzliche Reinigungskosten Geschäftsbauten "Stadt": 127 Mio Fr./a**

Zusätzliche Reinigungskosten von Metallfassaden, Fensterläden, Lamellen und Storen werden mangels brauchbarer empirischer Daten vernachlässigt.

Die resultierenden Reinigungskosten von etwa 130 Mio Fr./a sind eine untere Grenze für die Reinigungskosten. Auch in der Immissionskategorie Agglo sind zusätzliche Reinigungskosten zu erwarten. Die zusätzlichen Reinigungen bei Wohnbauten verursachen ebenfalls Kosten, und zudem ist zu erwarten, dass - wie schon angedeutet - bei Geschäfts- und Wohnbauten Kosten für die Reinigung von Storen und Fassadenflächen entstehen.

## 5.5 Zusammenfassung und Folgerungen

### 5.5.1 Sensitivitäts- und Fehlerrechnung

#### a) Vorgehen

Die berechneten Jahreskosten durch die feuerungsbedingte Luftverschmutzung basieren auf verschiedenen - zum Teil recht unsicheren - Annahmen. Entsprechend ist es notwendig, die sensitive Annahmen auszuleuchten. Dieser Frage wird in der Sensitivitätsanalyse nachgegangen. Zudem müssen Informationen über den Genauigkeitsgrad der Annahmen in den Rechnungen berücksichtigt werden, um daraus die Streuung der Resultate zu ermitteln. Wir führen zu diesem Zweck problembezogene Fehlerrechnungen durch.

#### b) Qualitative Überlegungen zur Zuverlässigkeit der Ergebnisse

Die ermittelten Ergebnisse sind aus unterschiedlich einzustufenden Grundlagen zusammengesetzt. Wir schätzen die Relevanz der Zahlenwerte folgendermassen ein:

- Die Ausscheidung der Immissionskategorie Stadt ist relativ konservativ-zurückhaltend. Es dürfte in vielen Städten Gebiete geben, die zur Immissionskategorie Stadt gehören, welche aber hier in der Immissionskategorie Agglo und in Einzelfällen gar in der Kategorie Land sind. In abgeschwächtem Mass gilt das auch für die Ausscheidung der Immissionskategorie Agglo.
- Die Angaben zu den Lebensdauerverkürzungen in den Immissionskategorien Stadt und Agglo gegenüber der Kategorie Land weisen beträchtliche Unsicherheiten auf.
- Die Wertgerüste für die Reinigungskosten sind vergleichsweise schwach gestützt und dürften deshalb relativ unsicher sein.
- Die Kostensätze für die einzelnen Renovationsarbeiten sind gut abgestützt. Kleinere Unsicherheiten können entstehen bei der Übertragung der Sätze auf Schweizer Durchschnittsverhältnisse.
- Das Mengengerüst (gesamte Fassadenfläche Schweiz nach räumlichen Kategorien und Materialien) basiert auf sehr guten Grundlagen. Die angegebenen Grössenordnungen dürften relativ genau sein und reagieren deshalb kaum sensitiv auf das Ergebnis.
- Die Aufteilung der Fassadenfläche nach Verkehrsexponiertheit basiert zwar ebenfalls auf mehreren, zum Teil gut fundierten Grundlagen. Problematisch aber ist die Abgrenzung mittels eines Lärmkriteriums ( $>/< 60$  dB(A)). Diese Grössenordnung stützt sich ab auf die empirischen Untersuchungen in Zürich/Biel und Neuchâtel und wurde ex ante vorgegeben.

### ■ Zusätzliche Renovationskosten

Aus den detaillierten Sensitivitätsanalysen in (INFRAS, 1992, Anhang 9) lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Das Ergebnis reagiert sehr sensitiv auf eine Veränderung des Verkürzungsfaktors der Lebensdauer. Unsicherheiten bei der unterstellten Referenzlebensdauer sind dagegen für das Ergebnis weniger relevant.

### ■ Zusätzliche Reinigungskosten

Zentrale Bedeutung hat die Annahme der zusätzlichen Fensterreinigungen infolge der Feuerungsimmisionen in der Stadt.

### c) Fehlerrechnung

Mit der Fehlerrechnung versuchen wir, Streubreiten für die einzelnen Ergebnisse auszuleuchten, um eine plausible Bandbreite für die Gesamtkosten zu erhalten (die mathematischen Details zur Fehlerrechnung befinden sich im Anhang 10 von INFRAS, Juli 1992).

### ■ Renovationskosten

Von den resultatbestimmenden Variablen sind vor allem die Schätzungen der Lebensdauerverkürzungen mit Unsicherheiten behaftet. In "Anlehnung an (INFRAS, 1986) gehen wir hier von einer Streubreite von  $\pm 30\%$  um den Erwartungswert aus. Für die Schätzungen der mittleren Lebensdauern der Materialien gehen wir von einer Streubreite in der gleichen Grössenordnung aus. Die bauteilspezifischen Investitionssummen können dagegen relativ genau geschätzt werden; wir unterstellen eine Streubreite von  $\pm 15\%$ . Für den Verkehrsanteil scheint eine Streubreite von  $\pm 25\%$  plausibel. Insgesamt resultiert gemäss Fehlerfortpflanzungsrechnung eine Streubreite von  $\pm 50\%$  (INFRAS, Juli 1992, S. A-32ff. und S. 75).

### ■ Reinigungskosten

Hier bestehen die grössten Unsicherheiten. Folgende Streubreiten scheinen plausibel:

- |                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| - Gebäudebestand                | $\pm 10\%$ |
| - $\Delta$ Reinigungshäufigkeit | $\pm 50\%$ |
| - Kostensatz                    | $\pm 10\%$ |

Für das Gesamtergebnis resultiert eine Streubreite von rund 52%.

## 6. Öffentliche Leistungen für die Strom- und Wärmeversorgung

### 6.1 Einleitung, Vorgehen

Hier geht es um die Identifizierung und Quantifizierung von öffentlichen Ausgaben und Sachleistungen zugunsten der Strom- und Wärmeversorgung, welche nicht von den entsprechenden Energiebezüglern (Verursachern) bezahlt werden. Eine der Forderungen vom 15. Weltenergiekongress in Madrid 1992 ist beispielsweise die Abschaffung aller offenen und verkappten Subventionen im Energiebereich (NZZ, 29.9.1992, S. 37).

Öffentliche Ausgaben, öffentliche Transferzahlungen und nicht erhobene Steuern im Bereich der Strom- und Wärmeversorgung deuten auf die Existenz von öffentlichen Gütern hin. Öffentliche Güter haben teilweise ähnliche Eigenschaften wie Externalitäten: Auch bei ihnen werden die entstehenden Kosten nicht unbedingt durch die Verursacher, sondern durch die Allgemeinheit getragen (s. Hediger, 11.1.1992). Bei öffentlichen Gütern ergibt sich der Entscheid über Art und Ausmass des Angebotes nicht als Resultat des Marktes. Der für sie erforderliche Ressourcenverbrauch ist jedoch nicht eine Externalität im Sinne von Pigou, welche durch kalkulatorische Energiepreiszuschläge internalisiert werden könnte. Der Ressourcenverbrauch ist vielmehr das Resultat eines Entscheidungsprozesses, welcher ausserhalb des Marktes zustandekommt. Hohmeyer versteht die öffentlichen Ausgaben und Leistungen zugunsten einzelner Energiesysteme als Externalität (Hohmeyer, 1986). Prognos (Prognos, April 1992, Bd 3, S. 69) verzichtet im Gegensatz zu Hohmeyer (Hohmeyer, 1989) auf den Einbezug der staatlichen Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen und aller anderen subventionsähnlichen öffentlichen Ausgaben. Prognos begründet dies damit, dass der gesamtwirtschaftliche Nutzen der Massnahmen der öffentlichen Hand bei F+E höher liegt als deren Kosten. Das Engagement der öffentlichen Hand ist darum erforderlich, weil diese F+E-Aufwendungen vom Markt nicht vorgenommen werden, sei es weil der Nutzen nicht privatiseirt werden kann (kein Ausschlussprinzip) und/oder sei es weil der Zeithorizont oder die Risikobereitschaft auf dem Markt geringer sind.

Hier wird unterschieden zwischen den staatlichen F+E-Ausgaben und den übrigen staatlichen Aufwendungen für den betrachteten Wärme- und Strombereich. Die staatlichen Ausgaben werden hier wohl identifiziert und nachgewiesen, aber aus den eben genannten Gründen nicht weiter in die Ermittlung der externen Kosten einbezogen.

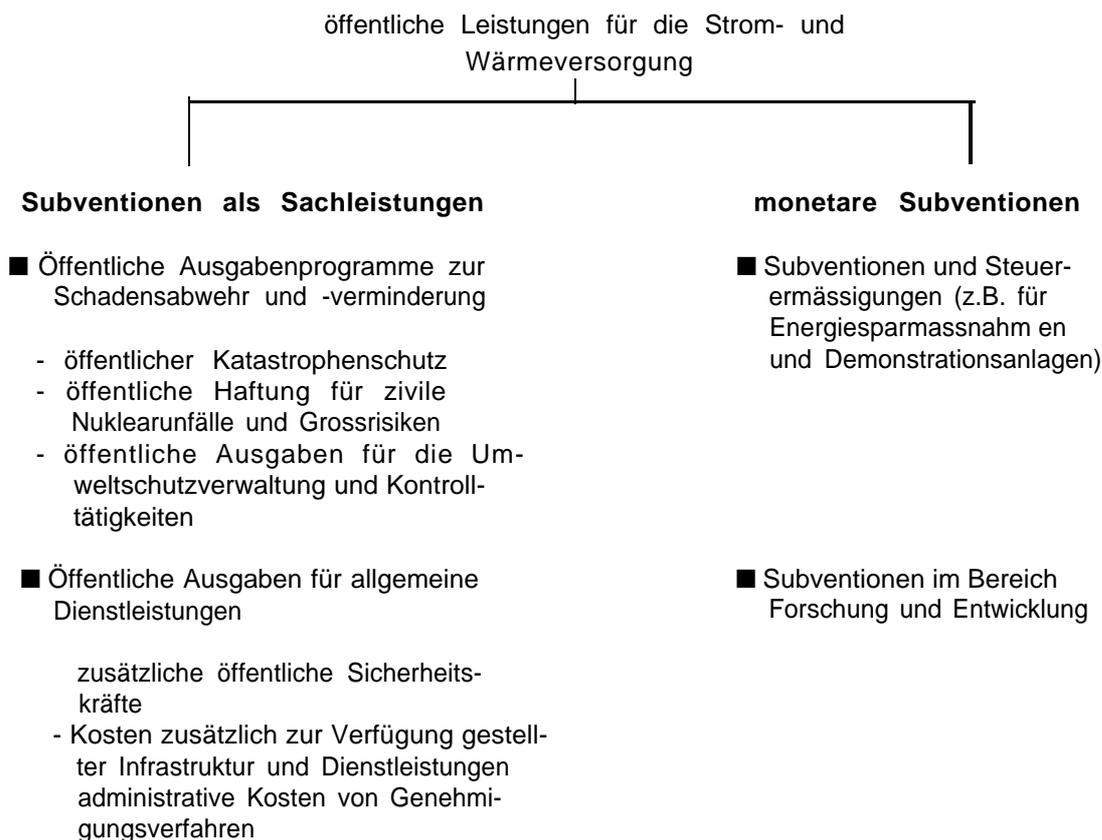
Beim Erfassen der öffentlichen Aufwendungen und Ausgaben entstehen vor allem Probleme durch die Verflechtungen verschiedener öffentlicher Aufgaben und der daraus resultierenden Ausgaben. Die Zurechenbarkeit der Aufwendungen wird dadurch erschwert. Ein weiteres Problem liegt darin, dass viele staatliche Einrichtungen nicht über eine detaillierte Kostenrechnung (Kostenstellen- und Kostenartenrechnung) verfü-

gen. Es wird dadurch sehr schwierig, die Kosten einzelner Aktivitäten zu ermitteln (Hohmeyer 1989, S. 131). Zudem muss darauf geachtet werden, dass innerhalb eines Projektes, das die externen Effekte der Wärme- und Stromversorgung quantifizieren soll, keine Doppelzahlungen stattfinden. Ausgabenprogramme im Bereich der Waldschäden gehören so zum Beispiel in den Bereich der Kosten der Waldschäden und sollen hier nicht mehr berücksichtigt werden.

Hier werden zunächst die verschiedenen öffentlichen Ausgabenbereiche beschrieben, die im Zusammenhang mit dem Strom- und Wärmebereich in Frage kommen. Sie werden in einem zweiten Schritt quantifiziert. Aus den dargestellten Gründen ist dies nicht immer möglich, darum bleibt es zum Teil bei einer qualitativen Bewertung oder einer grob-quantitativen Schätzung. Die Quantifizierung wird nach den verschiedenen Energieträgern bzw. -systemen vorgenommen.

## 6.2 Übersicht über die wichtigsten staatlichen Ausgabenbereiche bei der Strom- und Wärmeversorgung

In der folgenden Übersicht wird die Struktur der zu besprechenden Ausgabenbereiche dargestellt :<sup>12)</sup>



12) Die Gliederung bezieht sich auf Hohmeyer 1988, S. 132 ff., Inhalt: Hohmeyer, 1989 und VDEW, 1989.

### 6.2.1 Durch staatliche Stellen bereitgestellte Güter und Dienstleistungen (Subventionen als Sachleistungen)

Sogenannte "öffentliche Güter" werden durch die öffentliche Hand bereitgestellt, weil sie sonst überhaupt nicht oder nur unterhalb des gesellschaftlich optimalen Niveaus angeboten wurden. Für öffentliche Güter ist typisch, dass kaum jemand von ihrer Nutzung ausgeschlossen werden kann, und dass durch ihren Konsum auch keine Verknappung erfolgt (keine Konsumrivalität; die Erkenntnisse aus der öffentlichen Grundlagenforschung stehen beispielsweise allen zur Verfügung, die Nutzung durch Firma X beeinträchtigt die Nutzung durch die übrigen Firmen nicht). Aus diesen Gründen besteht kein Anreiz, diese Art Güter privat anzubieten. Informationsdienstleistungen wie zum Beispiel Immissionsmessnetze oder die meisten Elemente der Infrastruktur sind im wesentlichen öffentliche Güter (die Infrastrukturkosten können jedoch teilweise den Verursachern anelastet werden, die Infrastruktur ist somit, wie viele andere Güter auch kein reines öffentliches Gut).

#### a) Öffentlicher Katastrophenschutz

Der öffentliche Katastrophenschutz und die Vorsorge für Grossunfälle sind Beispiele für Massnahmen, welche der öffentlichen Hand durch den Produktionsprozess gewissermassen aufgezwungen werden.<sup>13)</sup> Der Staat trifft als Interessenvertreter der gesamten Bevölkerung Vorsorgemassnahmen für solche Gefahren. Die entsprechenden Einrichtungen dienen jedoch oft verschiedenen Zwecken und können daher nur schwer einzelnen Wirtschaftsaktivitäten bzw. Energieträgern zugeordnet werden.

Im Bereich der Grossrisiken bei Talsperren (Wasserkraftwerke) und bei Kernkraftwerken sollte es jedoch möglich sein, einzelne Kostengrössen zu schätzen, da spezifische Vorsorgevorkehrungen bezüglich dieser Gefahren getroffen werden. Vorsorgemassnahmen für zivile Reaktorunfälle beziehen sich auf die Erstellung, den Betrieb und den Unterhalt von Alarmsystemen, von Instrumenten zur Strahlungsmessung, auf die Überwachung der Sicherheitsplanung, des vorbeugenden Trainings von Personal oder der Erstellung und des Unterhaltes von Anlagen zur Dekontamination von Trinkwasser.

Wegen der Gefahr von Talsperrenbrüchen werden von der öffentlichen Hand Alarmsysteme unterhalten (z. B. in Zürich für den Sihlseeestaudamm) und Kontrollinstanzen gebildet. Bei der Ermittlung der dadurch entstehenden externen Kosten müssen allfällige Abgeltungen (Beiträge, Gebühren) berücksichtigt werden.

---

13) Es ist zwar denkbar, dass durch entsprechende Rahmenbedingungen die Privaten zur Vornahme dieser Massnahme gezwungen werden. Staatliche Bereitstellung ist jedoch manchmal effizienter und ermöglicht u.U. erst, dass die die Massnahme nach sich ziehende Leistung überhaupt angeboten wird. Selbst wenn die Rahmenbedingungen geschaffen werden, müssen sie aber kontrolliert werden.

**b) Öffentliche Haftung für zivile Nuklearunfälle**

In der Schweiz wurde 1983 eine unbegrenzte Haftung der Kernanlageninhaber gesetzlich eingeführt. Aufgrund der Kernenergiehaftpflicht-Verordnung (KHV, SR 732.44) vom 24. Oktober 1990 muss der Inhaber eine Versicherungsdeckung von 500 Mio Franken nachweisen. Der Bund versichert die Haftpflichtigen zusätzlich bis zu 1 Mrd Franken sowie für Nuklearschäden, die wegen dem Ablauf der dreissigjährigen Frist sonst nicht mehr geltend gemacht werden könnten und für Risiken, die der private Versicherer ausschliesst (Krieg, ausserordentliche Naturereignisse, Verjährung). Es ist vorstellbar, dass bei einem Kernkraftwerkunfall die Schadenshöhe 1 Mrd. Franken übersteigt.<sup>14)</sup> Wie erwähnt, ist der Schaden bis zu 1 Mrd Franken gedeckt, für den Rest haftet die Gesellschaft zwar unbeschränkt, faktisch aber nur mit ihrem Kapital. Die Haftung für diese zusätzlichen Risiken stellt zwar auch eine öffentliche Leistung dar. Sie wird jedoch in diesem Teilbericht nicht berücksichtigt. Falls die privatwirtschaftlich erforderliche Versicherungsprämie für die Haftpflichtversicherung von 1 Mrd Franken die aktuelle Prämie des Bundes übersteigt, ist die resultierende Differenz eine öffentliche Leistung. Die Prämien für die private Betriebshaftpflichtversicherung der fünf schweizerischen KKW betragen 1991 6,22 Mio Fr. Die Bundesversicherung belief sich 1991 auf 9,954 Mio Fr. bzw. 160 % der privaten Betriebshaftpflichtversicherung. Ohne die zugrundeliegenden versicherungsmathematischen Überlegungen zu kennen, wird hier angenommen, dass die Prämie für die Bundesversicherung in etwa angemessen ist.

**c) Öffentliche Ausgaben für die Umweltschutzverwaltung und die Kontrolltätigkeiten**

Hier geht es um die Aufwendungen der öffentlichen Hand für verschiedene Mess- und Kontrollsysteme zur Überwachung der Emissionen und Immissionen. Der Betrieb der Messnetze zur Erfassung der Luftverschmutzung und der Radioktivität (Immissionsmessnetze) wird grösstenteils vom Staat getragen. Die Überwachung der Emissionen der verschiedenen Kraftwerke wird von den Anlagebetreibern in der Regel selbst bezahlt.

Grundsätzlich geht es hier neben den Aufwendungen für Mess- und Kontrollsysteme seitens der öffentlichen Hand zusätzlich um alle Verwaltungsaufwendungen, die im Zusammenhang mit der Energieversorgung entstehen (z. B. Aufwendungen des BUWAL<sup>15)</sup>, des BWW<sup>16)</sup> und des BEW<sup>17)</sup>).

**d) Zusätzliche öffentliche Sicherheitskräfte**

Sicherheitskräfte bei Kraftwerken werden privat bezahlt, sie stellen daher keine öffentliche Leistung dar. Daneben ist jedoch bei Zwischenfällen eine zusätzliche Absicherung durch die öffentliche Hand notwendig. Alle Kosten für die Sicherheit von Grosskraftwerken, welche nicht vom Kraftwerkbetreiber getragen werden, sind öffentliche Lei-

14) Prognos schätzte die Schäden eines Super-Gaus für die BRD auf 10,7 Billionen DM (Prognos, 1992).

15) Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

16) Bundeamt für Wasserwirtschaft

17) Bundesamt für Energiewirtschaft

stungen, soweit diese Leistungen nicht durch die ohnehin erforderlichen Sicherheitskräfte (öffentliches Gut) erbracht werden. Eine zusätzliche Absicherung dürfte vor allem bei Zwischenfällen in kerntechnischen Anlagen von Bedeutung sein.

#### **e) Kosten zusätzlich zur Verfügung gestellter Infrastruktur**

Infrastrukturbeiträge oder Leistungen, die von den Verbrauchern nicht finanziert werden, stellen ebenfalls eine Subvention dar, welche die Nutzung der verschiedenen Energiebereiche beeinflusst. Denkbar sind Kostenbeteiligungen seitens der öffentlichen Hand für verschiedene Infrastrukturmassnahmen; der Verzicht auf Gebührenerhebungen, um Grossunternehmungen (z.B. Kraftwerke) zur Ansiedlung zu bewegen, Beiträge an das lokale Gasnetz oder Teilfinanzierungen industrieller Betriebe aus Steuergeldern (bzw. Erträge des Energiebereiches bei Gewinnablieferungen an die Staatskasse).

#### **f) Administrative Kosten von Genehmigungsverfahren**

Bau- und grosse Investitionsvorhaben führen in der Regel zu grossem administrativem Aufwand seitens der öffentlichen Hand. für die Mehrzahl der notwendigen Verwaltungsakte werden Gebühren erhoben. Diese Gebühren sollten kostendeckend sein. Nicht erhobene Gebühren oder nicht kostendeckende Gebühren sind versteckte Subventionen.

#### **g) Berücksichtigte Kostenelemente**

Von den erwähnten öffentlichen Aufwendungen für die Strom- und Wärmeversorgung werden nur die Nettokosten<sup>18)</sup>, die in der Staatsrechnung der Bundesverwaltung ausgewiesen werden und die geschätzten Kosten der Kantone für ihre energiepolitischen Programme berücksichtigt (s. Abschnitt 6.3). Allfällige öffentliche Leistungen in den Gemeinden bleiben vernachlässigt, und auch bei den Kantonen dürfte ein beträchtlicher Teil der interessierenden Leistungen ausserhalb der Kosten für die energiepolitischen Programme anfallen (Aufwendungen für Alarmnetze, Olwehr, etc.).

## **6.2.2 Monetäre öffentliche Subventionen**

### **a) Subventionen und Steuerermässigungen**

Als Subventionen sind jene Zuschüsse bezeichnet, die auf direkten monetaren Transfers basieren und welche keine Dienstleistungen oder Güter darstellen. Öffentliche Transferzahlungen für Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten werden ihrer grossen Bedeutung wegen in einem eigenen Kapitel erwähnt.

---

18) Nettokosten: Aufwand der Verwaltung abzüglich allfälliger Einnahmen (Gebühren, Beiträge).

Subventionen und Steuerermässigungen werden aufgrund einer umfangreichen Palette von Gründen gewährt. Transferzahlungen und Steuerermässigungen sind komplementäre wirtschaftspolitische Instrumente zu Steuern. Im Energiesektor der Schweiz werden sie vor allem bei Energiesparmassnahmen und Pilotanlagen gewährt, dazu kommen Beiträge für Demonstrationsanlagen. Es bleibt auch abzuklären, inwiefern Anstrengungen zur Sicherung der Öl- und Gasreserven berücksichtigt werden müssen.

Im folgenden Abschnitt können nur die von den Kantonen ausgewiesenen Beiträge und Subventionen berücksichtigt werden (gemäss den Informationen aus "Stand des energiepolitischen Programmes in den Kantonen", EVED, 1991). Über die Effekte der Steuerermässigungen für Energieeinsparungen, welche in den meisten Kantonen gewährt werden, bestehen keine Erhebungen. Die Bundesbeiträge werden unter die F+E-Beiträge subsumiert. Allfällige Beiträge von Gemeinden an die Erschliessung mit Gas (à fonds perdu) bleiben infolge fehlender Daten unberücksichtigt.

### **Öffentliche Subventionen für Forschung und Entwicklung**

Forschungs- und Entwicklungssubventionen sind die Hauptquelle öffentlicher Beiträge für verschiedene Energiebereiche. In der Schweiz werden diverse Energietechnologien durch öffentliche Forschung und Entwicklung unterstützt. Die Mittel werden vor allem unter den Forschungsstätten der ETH, des PSI<sup>19)</sup> und der Universitäten aufgeteilt. Die Zuordnung der öffentlichen F+E-Aufwendungen auf die Energieträger bzw. -prozesse ist teilweise problematisch: Müssen die Beiträge zur Förderung der Sonnenenergie nun der Sonnenenergie angelastet werden? Müssen sie nicht vielmehr den fossilen Energieträgern belastet werden, für welche die Sonnenenergie eine sogenannte Backstop-Technologie ist?

---

19) Paul Scherrer Institut

## 6.3 Bewertung der öffentlichen Leistungen

Die Aufteilung der öffentlichen Aufwendungen kann aus Datenerhebungsgründen nicht genau so vorgenommen werden, wie vorne vorgeschlagen (zudem können gewisse Bereiche wegen fehlenden Informationsgrundlagen überhaupt nicht berücksichtigt werden).

### 6.3.1 Öffentliche Ausgaben für die Umweltschutzverwaltung und Kontrolltätigkeiten

#### a) Ausgaben des Bundes

Als Grundlage der Schätzung der Aufwendungen im Verwaltungs- und Kontrollbereich des Bundes dient die Staatsrechnung 1990. Zur Ermittlung der gesuchten Grössen werden die Aufwendungen der verschiedenen Bundesämter und -stellen (BUWAL, BEW, BWV), die im Zusammenhang mit der Strom- und Wärmeversorgung stehen, herausgezogen und auf die verschiedenen Energiebereiche aufgeteilt.

Sofern einzelne Stellen oder Aufgaben nicht direkt den jeweiligen Energiebereichen zugeordnet werden können, erfolgt die Zuteilung der Aufwendungen entsprechend des jährlichen Verbrauchs (TJ) der einzelnen Energiebereiche<sup>20)</sup> (Windenergie wurde nicht berücksichtigt, da ihr Produktionsanteil vernachlässigbar ist). Die Aufwendungen für Energiesparen werden anteilig den Bereichen Erdölprodukte, Gas, Kohle, Elektrizität und Biomasse/Holz zugerechnet.

Die aufgeführten Resultate stellen einen Querschnitt des Jahres 1990 dar. Ausgaben für nicht dauerhafte Aktivitäten, wie zum Beispiel Aufwendungen für die Bravo-Kampagne, entstanden nur in diesem Jahr und verzerren daher das Bild ein wenig. Dafür sind gewisse einmalige Aufwendungen anderer Jahre nicht vermerkt. Für die nächsten Jahre dürfte infolge von Energie 2000 mit eher grösseren Aufwendungen gerechnet werden. Davon werden vor allem die Bereiche Energie- und Elektrizitätssparen, Biomasse, Sonnenenergie und Umweltwärme profitieren.

---

20) Endenergieverbrauch der verschiedenen Energiebereiche gemäss der Gesamtenergiestatistik 1990: Erdölprodukte (exkl. Anteil Verkehr) 248'600 TJ, Gas 70'480 TJ, Kohle 14'360 TJ, Biomasse (Holz) 12'120 TJ, Wasserkraft (geschätzt entsprechend des Produktionsanteiles) 97'249 TJ, Kernenergie (geschätzt entsprechend des Produktionsanteiles) 70'421 TJ, Sonnenenergie (Schätzung des BEW) 253 TJ, Umweltwärmenutzung (Schätzung des BEW) 2246 TJ.

| Energiebereich / Ausgabenbereich           | Ausgaben 1990<br>in 1000 Fr. |
|--|------------------------------|
| 1. Energiesparen (wird auf 2.-7. verteilt) | (1'906)                      |
| 2. Erdölprodukte (exkl. Verkehr)           | 5'320                        |
| 3. Gas                                     | 1'440                        |
| 4. Kohle                                   | 290                          |
| 5. Kernenergie                             | 3'520                        |
| 6. Wasserkraft                             | 2'680                        |
| 7. Biomasse / Holz                         | 240                          |
| 8. Sonnenenergie                           | 10                           |
| 9. Umweltwärmenutzung                      | 32                           |
| <b>Total Leistungen Bund</b>               | <b>13'532</b>                |

Tabelle 6-1: Öffentliche Leistungen des Bundes in verschiedenen Energiebereichen gemäss Staatsrechnung 1990 (exkl. Forschung und Entwicklung). Genauere Angaben siehe (INFRAS, Okt. 1992, S. 13f.)

#### b) Ausgaben der Kantone

Aufgrund der Angaben in der Erhebung des BEW zu den energiepolitischen Programmen in den Kantonen (EVED, 1991) ergeben sich für das Jahr 1991 die folgenden Aufwendungen:

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Anzahl Stellen: 91 Stellen zu Fr. 150'000/Stelle . | 13,7 Mio Fr./a        |
| Ausgaben für Pilotanlagen:                         | 2,6 Mio Fr./a         |
| Beiträge, Subventionen                             | 11,0 Mio Fr./a        |
| Information, Beratung, Energieplanung, Studien     | 7,2 Mio Fr./a         |
| <b>Total 1991</b>                                  | <b>34,5 Mio Fr./a</b> |

Der grösste Teil des allgemeinen Aufwandes sowie der Ausgaben für Information, Beratung etc. werden hier dem Bereich Energiesparen angelastet (70% von 20,9 Mio Fr.), der Rest den Bereichen Öl, Gas und Elektrizität (je 10%, Schätzungen INFRAS, da keine Angaben verfügbar). Die Ausgaben für Pilotanlagen, Beiträge und Subventionen werden auf die Bereiche Gas (20%), Biomasse/Holz (50%), Sonnenenergie (10 %) und Umweltwärmenutzung (20 %) verteilt (Schätzungen INFRAS, da keine Angaben verfügbar). Sie dürfen nicht auf den jährlichen Energieumsatz des jeweiligen Bereiches bezogen werden wie der allgemeine Aufwand und die Ausgaben für information, Beratung etc. Vielmehr sind sie als Investitionsbeiträge für die damit installierten Systeme zu verstehen und müssen auf die Energieproduktion dieser Systeme während ihrer Lebensdauer bezogen werden. Zunahme der Wärmeproduktion aus erneuerbaren Energien 1991 (VSE, 12/1992, Tab. 26): Die Energieproduktion der 1991 zusätzlich in-

stallierten WP über deren Lebensdauer beträgt 2'049 GWh und diejenige der Sonnenenergieanlagen 228 GWh (vgl. INFRAS, 1. Okt. 1992, S. 15).

Fast alle Kantone gewähren daneben noch Steuerermässigungen für Energiesparmassnahmen und Investitionen in erneuerbare Energien. Sie können hier jedoch nicht berücksichtigt werden, da die Angaben über das Ausmass der resultierenden Steuerzufälle und die Art der verbilligten Investitionen fehlen. Daneben werden hier diverse Leistungen in den kantonalen und kommunalen Verwaltungen infolge fehlender Daten nicht miterfasst (z. B. Kontrollaktivitäten in den Bauverwaltungen etc.).

### c) Ausgaben von Bund und Kantonen nach Energiebereich

Die Aufteilung der Ausgaben der Kantone auf die einzelnen Bereiche ist problematisch. Die Angaben zu den kantonalen energiepolitischen Aktivitäten (EVED, 1991) erfolgen pauschal und nicht nach Bereich differenziert

| Energiebereich<br>Aufwendungen | Öffentliche<br>Ausgaben       |                            | Verbrauch<br>1990<br>TJ/a] | Aufwendungen        |                     |
|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
|                                | 1991<br>Kantone<br>[1000 Fr.] | 1990<br>Bund<br>[1000 Fr.] |                            | 1990/91<br>[Rp/kWh] | [Fr./TJ]            |
| 1. Energiesparen               | (14'600)                      | (1'096)                    | --                         | --                  | --                  |
| 2. Erdölprodukte               | 9'170                         | 5'320                      | 248'600                    | 0,02                | 58                  |
| 3. Gas                         | 6'805                         | 1'440                      | 70'480                     | 0,04                | 117                 |
| 4. Kohle                       | 410                           | 290                        | 14'360                     | 0,02                | 49                  |
| 5. Elektrizität                | 6'870                         | 6'200                      | 167'670                    | 0,03                | 78                  |
| 5.1 Kernkraft                  |                               | 3'520                      | 70'421                     |                     |                     |
| 5.2 Wasserkraft                |                               | 2'680                      | 97'249                     |                     |                     |
| 6. Biomasse (Holz)             | 7'140                         | 240                        | 12'120                     | 0,22                | 609                 |
| 7. Sonnenenergie               | 1'360                         | 10                         | 253                        | 0,60 <sup>1)</sup>  | 1'669 <sup>1)</sup> |
| 8. UW-Wärme/Geothermie         | 2'700                         | 32                         | 2'246                      | 0,13 <sup>1)</sup>  | 370 <sup>1)</sup>   |

1) Die Ausgaben 1990/91 werden auf die Energieproduktion der 1991 neuerstellten Anlagen während ihrer Lebensdauer (20 Jahre bei der Sonnenenergie, 15 Jahre bei der Umweltwärmenutzung) bezogen.

Tabelle 6-2: Übersicht über die öffentlichen Leistungen des Bundes und der Kantone 1990/91 in verschiedenen Energiebereichen, total und pro Einheit verbrauchter Energie (exkl. Forschung und Entwicklung). Die Aufwendungen für Energiesparen werden aufgrund der Verbrauchsanteile auf die Positionen 2.-6. verteilt

Mit Ausnahme der Aufwendungen für Biomasse, Sonnenenergie und die Umweltwärmenutzung sind die spezifischen Ausgaben pro TJ bzw. pro kWh vernachlässigbar. Die Zuordnung der Aufwendungen der Kantone auf die Bereiche ist infolge fehlender De-

tailinformationen seitens der Kantone hypothetisch. Das spielt vor allem in den Bereichen Biomasse, Sonnenenergie- und Umweltwärmenutzung eine Rolle, weil dort die ermittelten spezifischen Aufwendungen nicht ganz vernachlässigbar sind.

### 6.3.2 Öffentliche Subventionen für Forschung und Entwicklung

Über die Ausgaben der öffentlichen Hand für Forschung und Entwicklung liegen relativ gute statistische Unterlagen vor. Die Daten werden dem Bericht des Bundesamtes für Energiewirtschaft über die Forschung und Entwicklung im Energiebereich (1989) entnommen. Die folgende Tabelle zeigt die Aufwendungen für verschiedene Forschungsgebiete. Davon abgezogen werden die Ausgaben des Nationalen Energieforschungsfonds<sup>21)</sup> und die Forschungsaufwendungen für die Energienutzung im Verkehr. Die Ausgaben für Forschung im Bereich der Systeme der Wärmenutzung (5,1 Mio Fr.) werden prozentual (entsprechend den Forschungsanteilen) auf die verschiedenen Energiebereiche aufgeteilt. Für die Umrechnung in Ausgaben pro TJ werden die Daten der schweizerischen Gesamtenergiestatistik beigezogen.

Bei der Ermittlung der spezifischen Forschungsausgaben in (Rp./kWh) besteht das Problem, dass Forschungsausgaben Investitionen für die Zukunft sind und eigentlich nicht auf den laufenden Verbrauch (bzw. auf die laufende Produktion) bezogen werden sollten. Hohmeyer hat eine Methode entwickelt (Hohmeyer, 1989), um bei neuen Technologies die in Zukunft erwarteten, kumulierten Forschungsausgaben der erwarteten künftigen Produktion anzulasten. Den bestehenden Technologien rechnet er die staatlichen Forschungsausgaben der Vergangenheit an. Letzteres ist nicht zulässig, da vergangene Kosten für die Volkswirtschaft nicht mehr bedeutsam sind (sog. sunk cost, ohne Relevanz für die heute anstehenden wirtschaftlichen Entscheide - wenn auch eventuell von historischem Interesse).

Bei den traditionellen Energieträgern Erdölprodukte, Gas, Kohle, Elektrizität und Biomasse/Holz werden die F+E-Ausgaben vereinfachend nicht als Investitionen für zu - sätzliche Anwendungen, sondern als laufende Beiträge für die jeweilige Jahresproduktion behandelt. Solange diese F+E-Budgets ungefähr gleich gross bleiben, ist diese Vereinfachung gerechtfertigt. Bei den Energieeinsparungen können aber keine spezifischen Kosten ermittelt werden, da die zugehörige Bezugsmenge fehlt.

Auch bei den neuen Technologien ist die Zuordnung der öffentlichen Forschungs- und Entwicklungsausgaben problematisch. Neben einem Szenario für die Entwicklung der staatlichen F+E-Ausgaben in Zukunft müssten auch die Technologieentwicklung und die künftigen Preise abgeschätzt werden. Die Zuordnung der F+E-Ausgaben ist oft nicht eindeutig: Beispielsweise kann die Förderung erneuerbarer Energien als Beitrag zur frühzeitigen Bereitstellung einer Backstop-Technologie im Bereich der fossilen Energieträger verstanden werden.

---

21) Dessen Aufwendungen werden durch eine Abgabe auf dem Benzin direkt von den Verursachern getragen und entsprechen somit keinen externen Effekten.

| Ausgabenbereiche                             | Forschungsaufwendungen 1989 <sup>2)</sup><br>[Mio Fr./a] | Endenergieverbrauch 1989<br>[TJ/a] | Ausgaben 1989<br>[Rp/kWh] [Fr./J] |       |
|--|--|------------------------------------|-----------------------------------|-------|
| 1. Energiesparen und übergreifende Forschung | (12,7) <sup>3)</sup>                                     | ..                                 | ..                                | ..    |
| 2. Erdölprodukte (exkl. Verkehr)             | 12,7   | 269'250                            | 0,02                              | 47    |
| 3. Gas                                       | 3,5  | 65'360                             | 0,02                              | 54    |
| 4. Kohle                                     | 1,3  | 14'000                             | 0,03                              | 93    |
| 5. Elektrizität                              | 65,1   | 163'810                            | 0,14                              | 397   |
| 5.1 Kernkraft                                | 53,2   | 68'716                             | 0,28                              | 774   |
| 5.2 Wasserkraft                              | 11,9   | 95'094                             | 0,04                              | 1 2 5 |
| 6. Biomasse (v.a. Holz)                      | 4,5  | 12'070                             | 0,13                              | 372   |
| 7. Sonnenenergie                             | 21,4   | 225                                | 1)                                | 1)    |
| 8. Windenergie                               | 0,8  | 0,9                                | 1)                                | 1)    |
| 9. Umweltwärme/Geothermie                    | 6,2  | 2'065                              | 1)                                | 1)    |
| 10. Kernfusion                               | 30,7   | 68'716                             | 1)                                | 1)    |
| Total  | 146  | 526'780                            | --                                | --    |

- 1) Die ausgewiesenen F+E-Ausgaben können nicht auf die jährliche Produktion bezogen werden, da sie Investitionscharakter haben. Korrekterweise müssten aus einem Szenario mit den künftigen F+E-Ausgaben, der Technologieentwicklung und der Zunahme der künftigen Produktion die resultierenden spezifischen Kosten pro Einheit über den betrachteten Zeitraum geschätzt werden (S. Hohmeyer, 1989)
- 2) Die Ausgaben für "Übergreifende Forschung" (11,1 Mio Fr.) und für "Systeme Wärmenutzung" (5,1 Mio Fr.) wurden anteilmässig auf die Positionen 1-9 verteilt (gemäss den Anteilen an den Forschungsaufwendungen von 1989).
- 3) Wurde gemäss Energieverbrauch 1989 auf die Positionen 2-6 verteilt.

Tabelle 6-3: Übersicht der Forschungsausgaben der öffentlichen Hand in verschiedenen Energiebereichen 1989. Die Aufwendungen für Energiesparen werden aufgrund der jeweiligen Verbrauchsanteile auf die Positionen 2-6 verteilt

## 6.4 Schlussbemerkungen - Folgerungen

Die Identifizierung staatlicher Geld- und Sachleistungen im Energiebereich, ihre Monetarisierung und verursachergerechte Zuordnung begegnet aber methodischen und datenmässigen Schwierigkeiten.

Hier werden nur die vom Bund ausgewiesenen Verwaltungsaufwendungen und die von den Kantonen im Rahmen ihrer energiepolitischen Programme angegebenen Aufwendungen (Personal und Beiträge) weiter verfolgt. Wie oben erwähnt können die Ausgaben im Bereich von F+E oft nicht eindeutig den Verursachern zugeordnet werden.

Die Aufteilung der kantonalen Ausgaben auf die diversen Bereiche müsste von uns vorgenommen werden, was zu beträchtlichen Unsicherheiten führt. Diverse Ausgaben bei den Kantonen und den Gemeinden sind dabei aber mangels Informationen noch nicht berücksichtigt; beispielsweise

- Vorsorge- und Sicherheitsmassnahmen zur Reduktion der Risiken bei Ölunfällen
- Erschliessungsbeiträge für das lokale Gasnetz aus den allgemeinen Mitteln
- Energierrelevante Kontrollaufgaben der Bau- und Gesundheitsverwaltungen
- etc.

## 7. Zuordnung der monetarisierten Kosten auf die Verursacher - Ermittlung von Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen

### 7.1 Vorgehen, Methodik

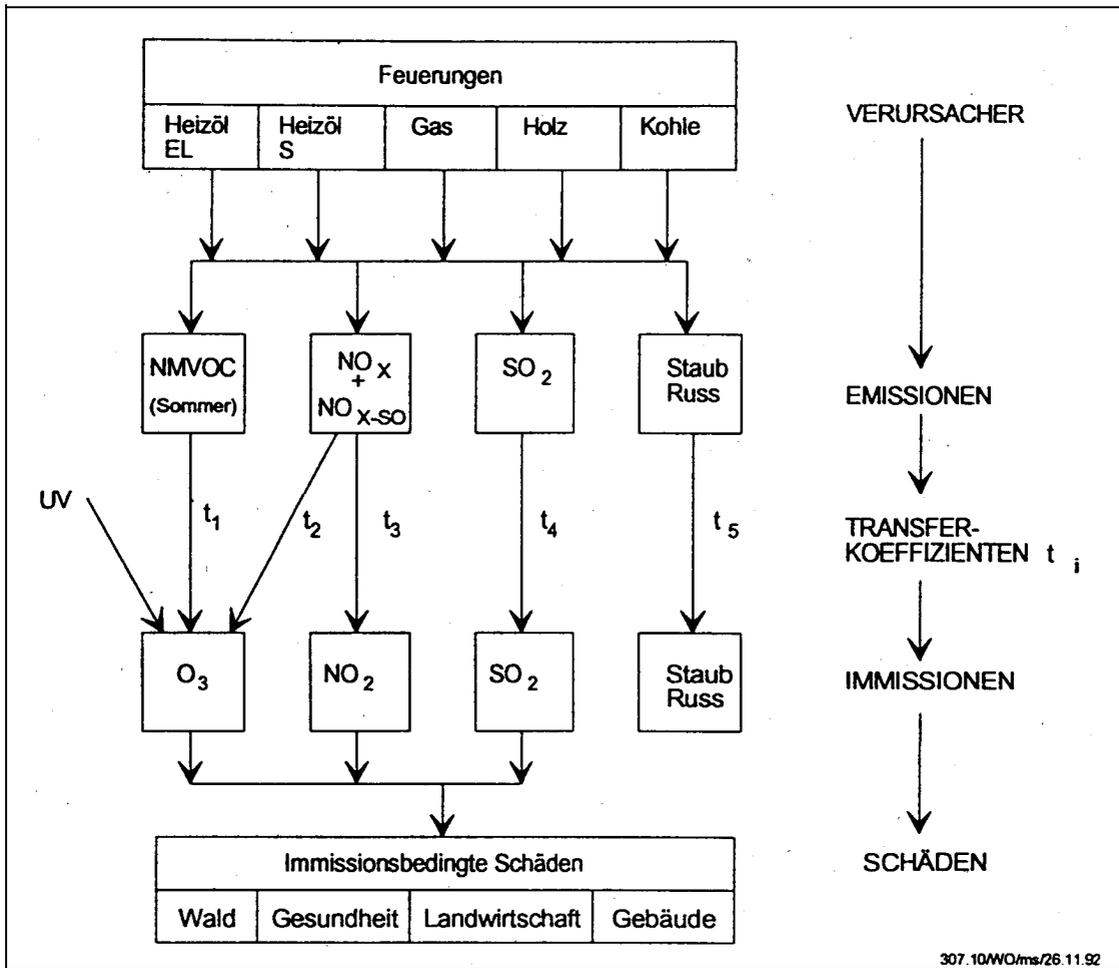
In den Kapiteln 2 bis 5 werden die externen Kosten der Luftschadstoffbelastung für vier Schadensbereiche bestimmt und monetarisiert (Schadenkosten). Bei der Zurechnung dieser Schäden auf die sie verursachenden Emissionen bzw. auf den Energieverbrauch stellen sich folgende Fragen:

- Grenzkostenbetrachtung: Die kalkulatorischen Energiepreiszuschläge (KEPZ) müssten theoretisch aufgrund einer Grenzkostenbetrachtung ermittelt werden.
- Relative Schädlichkeit: Die Schäden werden in der Regel durch mehrere gleichzeitig wirkende Schadstoffe verursacht. Es stellt sich die Frage, wie gross der relative Anteil der einzelnen verursachenden Schadstoffe an den ausgewiesenen Schadenkosten ist.
- Räumliche und zeitliche Differenzierung von KEPZ bzw. Emissionszuschlägen (EMZ).

#### 7.1.1 Grenzschaadenkosten als Grundlage für die Ableitung von Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen

Die Ableitung der EMZ/KEPZ aus den bisher ermittelten externen Gesamtkosten der Luftschadstoffbelastung müsste theoretisch aufgrund einer Grenzkostenbetrachtung erfolgen. Der optimale KEPZ entspricht dann den zusätzlichen externen Kosten, die bei optimaler Umweltqualität durch den Verbrauch einer zusätzlichen Energieeinheit verursacht werden. Nur wenn die externen Grenzschaadenkosten - unabhängig vom Ausmass der Luftverschmutzung - konstant sind, dürfen die KEPZ aufgrund einer Durchschnittskostenbetrachtung ermittelt werden (d.h.  $\emptyset$  KEPZ = Total der externen Schadenkosten: Energieverbrauch).

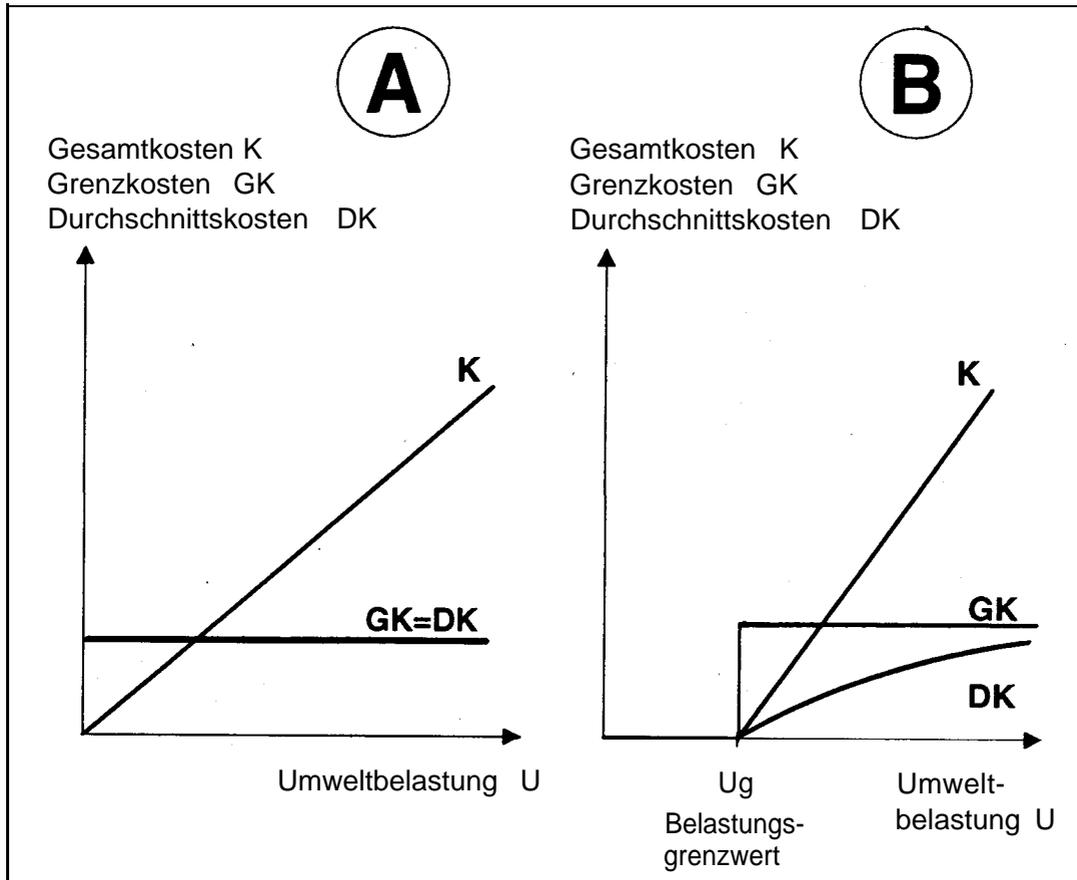
Die praktische Umsetzung der Grenzkostenbetrachtung erfordert starke Vereinfachungen (vgl. dazu die Ausführungen in Ecoplan B, 1992, S. 20ff.). Die Zusammenhänge Energieverbrauch  $\rightarrow$  Emissionen  $\rightarrow$  Immissionen (s. Fig. 7-1) und Immissionen  $\rightarrow$  Schäden müssten sonst Räumlich, zeitlich und nach Schadstoff differenziert spezifiziert werden, was aufgrund der vorhandenen Kenntnisse nicht möglich ist.



Figur 7-1: Wirkungskette der Luftschadstoffemissionen von Emittenten über die Immissionen auf die einzelnen Schadensbereiche, die hier untersucht werden

Wir gehen hier davon aus, dass bei geringen Immissionen (tiefer als die Immissionsgrenzwerte) in der Regel noch keine Schäden entstehen.<sup>22)</sup> Deshalb müssen bei den hier relevanten Luftschadstoffbelastungen die Grenzscha­den bzw. die externen Grenzkosten höher sein als die externen Durchschnittskosten.

22) Es ist denkbar, dass gewisse Luftschadstoffimmissionen auf tiefem Niveau einen Nutzen aufweisen (Düngewirkung von NO<sub>x</sub>-Immissionen), bavor die Schadenswirkung überwiegt.



Figur 7-2: Illustration der Grenzkosten- und Durchschnittskostenverläufe für zwei Schadensverläufe:

- (A): Die externen Schadenkosten  $K$  nehmen mit zunehmender Umweltbelastung linear zu  $\rightarrow$  Grenzkosten  $GK = dK/dU = \text{konstant} = \text{Durchschnittskosten } DK = K(U) : U$
- (B): Bis zur Umweltbelastung  $U$  treten keine Schäden auf, danach steigen die externen Schadenkosten  $K$  linear  $\rightarrow$  Grenzkosten  $GK = dK/dU = \text{konstant}$ ;  $GK > DK = K(U)/U$  falls die Umweltbelastung den Grenzwert  $U_g$  übersteigt!

Aus den bisher ermittelten externen Schadenkosten (Gesamtkosten) können mit Hilfe der Emissionen bzw. des Energieverbrauchs nur durchschnittliche EMZ bzw. KEPZ ermittelt werden. Diese ergeben eine untere Grenze für die gesuchten (grenzkostenorientierten) EMZ bzw. KEPZ.

Grenzkostenorientierte EMZ/KEPZ werden vereinfachend wie folgt abgeleitet (vgl. Eco-plan B, 1992, S. 22ff.):

- Wir nehmen an, dass die ermittelten Schäden nur durch Schadstoffbelastungen verursacht werden, welche die bestehenden Grenzwerte bzw. Emissionsziele überschreiten.
- Davon ausgehend werden die Schadenkosten den Emissionsmengen zugerechnet, welche Ziel- bzw. Grenzwertüberschreitungen erzeugen  $\rightarrow$  Emissionszuschläge in Franken pro kg Emission. Diese EMZ sind grösser als der durchschnittliche EMZ (= Schadenkosten: Gesamtemission). Die so ermittelten (grenzkostenorientierten)

EMZ werden anschliessend der Berechnung der KEPZ pro Energiesystem zugrundegelegt.

Für SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> und Schwebestaub bestehen Immissionsgrenzwerte, für die NMVOC dagegen ist nur ein Emissionsziel aus dem Luftreinhaltekonzept des Bundes verfügbar (Bundesrat, 1986)

|  | Immissions-Grenzwert<br>[ μ g/m <sup>3</sup> ] | Immissionen 1990 [ μ g/m <sup>3</sup> ] |       |       | Emissionen<br>1990<br>[1000 t/a] | Emissions-<br>ziel <sup>1)</sup><br>[1000 t/a] |
|--|--|---|-------|-------|----------------------------------|--|
|  |  | Stadt                                   | Agglo | Land  |                                  |  |
| SO <sub>2</sub>                                | Jahr 30<br>Tag 100                             | 10-35                                   | 5-30  | 5-20  | 62,6                             | 54,4   |
| NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> <sup>2)</sup> | Jahr 30<br>Tag 80                              | 40-60                                   | 25-50 | 10-40 | 183,8                            | 67,2   |
| NMVOC  | Jahr --  | --                                      | --    | --    | 297,0                            | 146,9  |
| Schwebestaub                                   | Jahr 70<br>Tag 150                             | 20-70                                   | 15-40 | 15-40 | 20,5                             | 41,6 <sup>3)</sup>                             |

1) Gemäss Luftreinhaltekonzept: bei NMVOC und NO<sub>x</sub> Stand der Emissionen von 1960, bei SO<sub>2</sub> und Staub/Russ Stand 1950

2) Emissionen: NO<sub>2</sub>, Immissionen: NO<sub>2</sub>

3) Kein Ziel des Luftreinhaltekonzeptes

Tabelle 7-1: Immissionsgrenzwerte, Immissionen und Emissionen 1990 sowie Emissionszielwerte (bei NO<sub>x</sub> und NMVOC 1960; bei SO<sub>2</sub> und Staub/Russ 1950) für die relevanten Schadstoffe

Vereinfachend nehmen wir an, dass bei Einhaltung der Emissionsziele des Luftreinhaltekonzeptes die Immissionsgrenzwerte in der Regel eingehalten werden. Die verbleibenden Immissionen sollen keine Schäden verursachen. Die Schäden werden somit durch die folgenden (zielwertüberschreitenden) Emissionsmengen verursacht (gem. BUWAL, Nr. 76, Dez. 1987):

| Schadstoff      | Schädigende Emissionen 1990 |             |
|-----------------|-----------------------------|-------------|
| SO <sub>2</sub> | 1990                        | 8'200 t/a   |
| NO <sub>x</sub> | 1990                        | 116'600 t/a |
| NMVOC           | 1990                        | 150'100 t/a |
| Total           | 1990                        | 274'900 t/a |

Aufgrund der Emissions- und der Immissionswerte um 1990 werden die Staubemissionen in der Schweiz nicht weiter als schadens- und kostenrelevant erachtet (obwohl in Zentren noch vereinzelt Staubimmissionen im Bereich des Jahresgrenzwertes auftreten).

### 7.1.2 Relative Schädlichkeit der Luftschadstoffe

Die Schäden werden jeweils durch das Zusammenwirken mehrerer Schadstoffe verursacht. Dabei stellt sich die Frage, wie der Einfluss der einzelnen Schadstoffimmissionen zu gewichten ist: Aufgrund der Grenzkostenüberlegungen ergibt sich eine erste relative Gewichtung nach Massgabe der zielwertüberschreitenden Emissionsmenge (welche hier als schadenverursachend betrachtet wird). Dabei wird jedes Kilogramm Schadstoff oberhalb des jeweiligen Zielwertes als gleich schädlich behandelt. In einer vergleichenden Gegenüberstellung von Beurteilungswerten im internationalen Massstab werden die unten aufgeführten Toxizitätsfaktoren angegeben. Diese Toxizitäts- oder Schädlichkeitsfaktoren erlauben zusätzlich eine grobe Gewichtung der einzelnen Schadstoffe aufgrund ihrer relativen Schädlichkeit.

|                 | Toxizitätsfaktor, bezogen auf CO |         |                       |
|-----------------|----------------------------------|---------|-----------------------|
|                 | Mensch                           | Gebäude | Vegetation            |
| CO Referenzwert | 1                                | 1       | 1                     |
| SO <sub>2</sub> | 100                              | 100     | 125                   |
| NO <sub>x</sub> | 125                              | 125     | 125                   |
| NMVOC           | 100                              | 100     | 100-200 <sup>1)</sup> |
| Staub           | 100                              | 100     | 100                   |

1) Abhängig von der Art der NMVOC; Annahme: 140.

Tabelle 7-2: Toxizitäts- bzw. Schädlichkeitsfaktoren von Luftschadstoffen bezogen auf Kohlenmonoxid (Grupp, 1986, S. 361) nach Schadensbereich

### 7.1.3 Räumliche und zeitliche Differenzierung der Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschläge

Luftschadstoffemissionen sind nicht überall und immer gleich schädigend. Die Schadenswirkung hängt von der Lage der Emissionsquelle (Auspuffhöhe oder Kaminhöhe -> unterschiedliche Verdünnung) und den lokal vorherrschenden Immissionsverhältnissen ab und damit vom Ort und Zeitpunkt der Emissionen. NMVOC-Emissionen im Sommer sind beispielsweise mitverantwortlich für die Ozonbildung und die daraus resultierenden Schäden. Im Winter dagegen besteht kein Ozonproblem, und daher entfällt eine entsprechende Schadenswirkung.

Da weder die verursachten Schäden noch die monetarisierten Kosten saisonal erfasst werden, lassen sich auch die EMZ bzw. KEPZ nicht saisonal differenzieren. Davon ausgenommen sind die NO<sub>x</sub>- und NMVOC-Emissionen im Sommer, welchen als Ozonbildner die Schäden der sommerlichen Ozonimmissionen angerechnet werden.

Bei den Waldschäden und den landwirtschaftlichen Produktionsausfällen kann davon ausgegangen werden, dass der Emissionsort keine grösse Rolle spielt. Bei den Gebäude- und bei den Gesundheitsschäden sind jedoch primär die lokalen Emissionen in den Belastungsgebieten "Stadt" und "Agglomeration" für die Schäden verantwortlich. Emissionen auf dem Land verursachen kaum Schäden. Die Gesundheits- und die Gebäudeschäden mussten demnach den zielwertüberschreitenden Emissionen in den Belastungsgebieten Stadt und Agglomeration angelastet werden. Das erfordert eine Differenzierung der EMZ und der KEPZ nach Stadt/Agglo und Land. Unter Berücksichtigung der bestehenden Ungewissheiten, wird das folgende vereinfachte Vorgehen gewählt:

- Die KEPZ und EMZ werden grundsätzlich nicht lokal differenziert.
- In einer Variante werden die KEPZ für Energiesysteme auf dem Land ohne Gesundheits- und Gebäudeschadenanteile ermittelt.

## 7.2 Emissionszuschläge (EMZ)

Die, externen Kosten in den Schadensbereichen Wald, Gesundheit, Landwirtschaft und Gebäuden werden auf die sie verursachenden Emissionen umgelegt. Daraus ergeben sich für die Schadstoffe SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und NMVOC sogenannte Emissionszuschläge in Franken pro Tonne bzw. Kilogramm Schadstoff.

Staub/Russ-Emissionen werden infolge des tiefen Emissions- und immissionsniveaus in der Schweiz als nicht mehr schadenverursachend betrachtet. Bei Ozon stellt sich die Frage, welche Emissionen für die auftretenden Ozonimmissionen verantwortlich sind. Die Dynamik der Ozonbildung ist äusserst komplex, gerade hier müsste eigentlich zwischen Stadt und Land unterschieden werden. Klar ist, dass für die zusätzliche Ozonbildung sowohl NO<sub>x</sub>- und VOC-Emissionen verantwortlich sind. Wie stark die beiden Schadstoffe jedoch beteiligt sind, hängt von diversen Faktoren ab. Die VOC-Emissionen stellen ein Gemisch verschiedenster Kohlenwasserstoffverbindungen mit ganz unterschiedlichem Ozonbildungspotential dar. Die Methanemissionen haben dabei das tiefste Ozonbildungspotential (3,5 Moleküle O<sub>3</sub> pro Molekül CH<sub>4</sub>, wenn genügend NO<sub>x</sub> vorhanden ist gegenüber 10-14 Molekülen O<sub>3</sub> pro Molekül Butan oder Pentan; BUWAL, Nr. 101, 1989, S. 15).

Wir gehen hier stark vereinfachend davon aus, dass die sommerlichen Emissionen von Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub> und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen (NMVOC) für die Schäden verursachenden zusätzlichen Ozonimmissionen verantwortlich sind.

| Schadensbereich            | Externe Kosten 1990 [Mio Fr/a] | Schadenverursachende Emissionen [in t] 1990 |                  |               |                        | Total   |
|----------------------------|--------------------------------|---|------------------|---------------|------------------------|---------|
|                            |                                | S O <sub>2</sub>                            | N O <sub>x</sub> | NM VOC Sommer | NO <sub>x</sub> Sommer |         |
| Wald                       | 550 - 1'420                    | 8'200                                       | 116'600          | 62'200        | 47'100                 | 234'100 |
| Gesundheit                 | 380 - 1'850                    | 8'200                                       | 116'100          | 62'200        | 47'100                 | 234'100 |
| Landwirtschaft             | 65 - 140                       | --  | --               | 62'200        | 47'100                 | 109'300 |
| Gebäude <sup>1)</sup>      | 450 - 830                      | 5'100                                       | 24'400           | 10'000        | 9'700                  | 49'200  |
| <b>Toxizitätsgewichtet</b> |                                |   |                  |               |                        |         |
| Wald                       | 550 - 1'420                    | 7'950                                       | 112'950          | 67'550        | 45'650                 | 234'100 |
| Gesundheit                 | 380 - 1'850                    | 6'980                                       | 124'060          | 52'940        | 50'110                 | 234'100 |
| Landwirtschaft             | 65 - 140                       | --  | --               | 65'210        | 44'090                 | 109'300 |
| Gebäude <sup>1)</sup>      | 450 - 830                      | 4'350                                       | 26'000           | 8'520         | 10'330                 | 49'200  |

1) nur Feuerungsemissionen

Tabelle 7-3: Emissionen, die pro Schadensbereich die externen Kosten verursachen. Grenzkostenbetrachtung: Die Kosten werden nur auf diejenigen Emissionen umgelegt, welche über den Emissionszielen des Luftreinhaltekonzeptes liegen. Toxizitätsgewichtete Variante: Die Emissionsmengen werden nach ihrer relativen Schädlichkeit gewichtet (Berechnungsgrundlagen: Tab. 7-2; Anhang 2; Luftreinhaltekonzept 1986)

Aus den Angaben von Tabelle 7-3 können nun für die Zurechnungsvarianten mit und ohne Toxizitätsgewichtung die spezifischen Emissionszuschläge pro Schadstoff bestimmt werden.

|                   | 1 ) | Verursachende Emissionen 1990 [Fr./t] |                      |                             |                         |
|-------------------|-----|---------------------------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------|
|                   |     | S O <sub>2</sub> 1990                 | NO <sub>x</sub> 1990 | NM VOC-Sommer <sup>2)</sup> | NO <sub>x</sub> -Sommer |
| Wald              | 1   | 2'350- 6'070                          | 2'350- 6'070         | 2'350- 6'070                | 2'350- 6'070            |
|                   | 2   | 2'280- 5'890                          | 2'280- 5'880         | 2'550- 6'580                | 2'280- 5'880            |
| Gesundheit        | 1   | 1'620- 7'900                          | 1'620- 7'900         | 1'620- 7'900                | 1'620- 7'900            |
|                   | 2   | 1'360- 6'720                          | 1'720- 8'410         | 1'720- 8'400                | 1'720- 8'400            |
| Landwirtschaft    | 1   | -----                                 | -----                | 595- 1'280                  | 585- 1'280              |
|                   | 2   | -----                                 | -----                | 625- 1'340                  | 557- 1'200              |
| Gebäude           | 1   | 9'150- 16'840                         | 9'150- 16'870        | 9'150- 16'870               | 9'150- 16'870           |
|                   | 2   | 7'800- 14'360                         | 9'750- 17'980        | 7'800- 14'370               | 9'740- 17'970           |
| Emissionszuschlag | 1   | 13'120- 30'800                        | 13'120- 30'800       | 13'720- 32'080              | 13'720- 32'080          |
|                   | 2   | 11'500-26'900                         | 13'800- 32'270       | 12'400- 30'700              | 14'300- 33'450          |

1) 1: Variante ohne Toxizitätsfaktoren; 2: Variante mit Toxizitätsfaktoren gem. (Grupp, 1986)

2) Diese Zuschläge gelten nur für die im Sommer emittierten Schadstoffmengen der Ozonbildner NM-VOC bzw. NO<sub>x</sub>

Tabelle 7-4: Ermittlung der Emissionszuschläge (Fr./t) für die SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>-Emissionen (Jahresemissionen) sowie für NMVOC- und NO<sub>x</sub>-Emissionen im Sommer aus den Schadenkosten pro Schadensbereich.  
 Variante 1: gleichmässige Verteilung der Schadenkosten auf die schädigenden Emissionsmengen oberhalb der Emissionszielwerte  
 Variante 2: toxizitätsgewichtete Verteilung der Schadenkosten auf die Emissionen

Die Toxizitätsgewichtung führt nur bei SO<sub>2</sub>-Emissionen zu Veränderungen, die 10% übersteigen (ca. -12%). Diese Reduktion des Gewichtes der SO<sub>2</sub>-Emissionen ist unseres Erachtens in der heutigen Situation (weiter abnehmender Anteil der SO<sub>2</sub>-Emissionen, Unterschreitung des Emissionszieles in naher Zukunft) berechtigt. Wir werden daher nur noch mit den toxizitätsgewichteten Emissionsmengen weiterrechnen.

### 7.3 Kalkulatorische Energiepreiszuschläge (KEPZ)

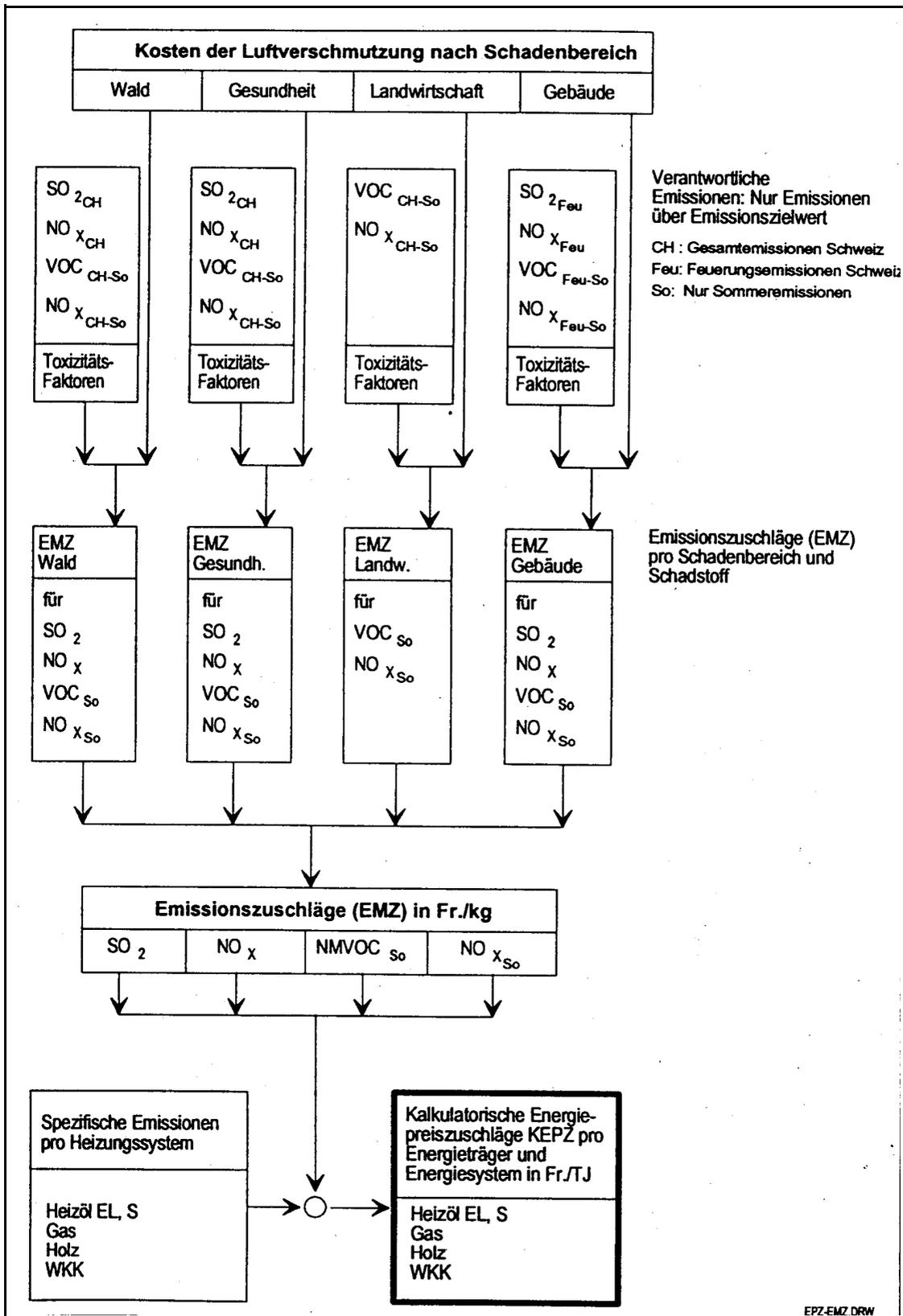
Die kalkulatorischen Energiepreiszuschläge ergeben sich aus der Kombination von Emissionszuschlägen [Fr./kg] mit den spezifischen Emissionen pro Endenergieeinheit [kg/TJ] eines bestimmten Heizsystems. Wir ermitteln kalkulatorische Energiepreiszuschläge für die Systeme, zu denen in Tabelle 7-5 Emissionszuschläge angegeben werden.

Die hier verwendeten Emissionsfaktoren gelten für bestehende Systeme (Stand 1987) oder für moderne Systeme (Stand 1992-94), die geringere spezifische Emissionen aufweisen als der heutige Durchschnitt. Wir unterscheiden zudem zwei Emissionsfaktoren:

- Emissionsfaktoren CH: Berücksichtigen nur die Feuerungsemissionen in der Schweiz. Vorgelagerte Prozessstufen werden ausgeklammert.
- Emissionsfaktoren CH+: Neben den Feuerungsemissionen in der Schweiz werden auch die Emissionen bei den vorgelagerten Prozessstufen in der Schweiz und im Ausland berücksichtigt (Förderung, Umwandlung/Raffination, Transport, Lagerung, Verteilung). Bei Emissionen im Ausland werden dieselben Emissionszuschläge wie bei Emissionen in der Schweiz verwendet.

Figur 7-3 illustriert die Vorgehensweise bei der Ermittlung der kalkulatorischen Energiepreiszuschläge (KEPZ) aus den externen Kosten, den schadenverursachenden Emissionen, den daraus sich ergebenden Emissionszuschlägen und den spezifischen Emissionen pro Heizungssystem.

Aus den Tabellen 7-4 und 7-5 ergeben sich die folgenden kalkulatorischen Energiepreiszuschläge für das Jahr 1990. Darin sind die monetären Kosten der Bereiche Wald-, Gesundheits-, Landwirtschafts- und Gebäudeschäden enthalten. Die Zuschläge, die sich direkt aus den staatlichen Ausgaben und Leistungen ergeben, werden in Tabelle 7-5 separat ausgewiesen.



Figur 7-3: Ermittlungsb von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen (KEPZ) für verschiedene Heizsysteme

| Feuerungssystem [kg/TJ]<br>(Datenquelle)             | Emissionen CH in kg/TJ |                 |       |                 |                 | SO <sub>2</sub> | NO <sub>x</sub> | NMVOC | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> |
|--|------------------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|
|  | SO <sub>2</sub>        | NO <sub>x</sub> | NMVOC | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> |                 |                 |       |                 |                 |
| <b>Erdgas</b>  |                        |                 |       |                 |                 |                 |                 |       |                 |                 |
| Gebläse, Anlage 87,SVGW/ETH, <1MW                    | 0,5                    | 30              | 1     | 1               | 55'000          | 6,8             | 44              | 62    | 244             | 58'800          |
| Atmosphärisch 87, SVGW/ETH, <1 MW                    | 0,5                    | 60              | 5     | 5               | 55'000          | 6,8             | 74              | 66    | 248             | 58'800          |
| Gebläse, Neuanlage 90, ETH, <0,1MW                   | 0,5                    | 30              | 5     | 5               | 55'000          | 6,8             | 44              | 66    | 248             | 58'800          |
| Atmosphärisch,90, ETH, <0,1 MW                       | 0,5                    | 50              | 5     | 5               | 55'000          | 6,8             | 64              | 66    | 248             | 58'800          |
| Low NO <sub>x</sub> , Neuanlage 90, ETH, <0,1 MW     | 0,5                    | 15              | 2     | 2               | 55'000          | 6,8             | 29              | 63    | 245             | 58'800          |
| Industrie-Neuanlage 90, ETH, >0,1 MW                 | 0,5                    | 40              | 5     | 5               | 55'000          | 6,4             | 54              | 62    | 109             | 58'800          |
| Industrie-Low NO <sub>x</sub> 90, ETH, >0,1 MW       | 0,5                    | 20              | 2     | 2               | 55'000          | 6,4             | 34              | 59    | 106             | 58'800          |
| Gas-Dampfturbinen-Kraftwerk, Gemis 2.0               | 0,3                    | 56              | 2,8   | 1,4             | 55'000          | 6,2             | 70              | 60    | 106             | 58'800          |
| <b>Erdöl</b>   |                        |                 |       |                 |                 |                 |                 |       |                 |                 |
| Bestehende Anlage 87, ETH, 0,01-0,1 MW               | 67,5                   | 50              | 6     | 1,5             | 74'000          | 102             | 115             | 44    | 16              | 82'400          |
| Low NO <sub>x</sub> , Neuanlage 90, ETH, 0,01-0,1 MW | 67,5                   | 25              | 3,2   | 0,8             | 74'000          | 102             | 90              | 41    | 15              | 82'400          |
| Brennwertkessel 90, ETH, 0,01-0,1 MW                 | 67,5                   | 25              | 3,2   | 0,8             | 74'000          | 102             | 90              | 41    | 15              | 82'400          |
| Industrie HEL-CH 90, ETH, 1 MW                       | 67,5                   | 60              | 3,4   | 1,6             | 74'000          | 99              | 90              | 39    | 16              | 82'800          |
| Industrie HS 90, ETH, 1) 1 MM                        | 450                    | 160             | 5     | 5               | 79'000          | 486             | 193             | 43    | 22              | 87'500          |
| +S-Dampfturbinerien-Kraftwerk, Gemis 2.02            | 88                     | 86              | 7,2   | 0,1             | 79'000          | 124             | 119             | 46    | 17              | 87'500          |
| <b>Holz</b>  |                        |                 |       |                 |                 |                 |                 |       |                 |                 |
| Holzschnitzel feucht 90, GEMIS, 0,01 MW              | 50                     | 100             | 150   | 150             |                 | 62              | 207             | 182   | 156             | 9'150           |
| <b>WKK</b>   |                        |                 |       |                 |                 |                 |                 |       |                 |                 |
| Gas-WKK 90, 0,1-0,5 MW                               | 0,6                    | 25              | 0,5   |                 | 55'000          | 7               | 39              | 62    | 243             | 58'800          |
| <b>AKW-Schweiz</b>                                   |                        |                 |       |                 |                 |                 |                 |       |                 |                 |
| vorgelagerte Prozesstufen gem. GEMIS 2.0             | -                      | -               | -     | -               | -               | 13              | 2 5             | 7     | 8,4             | 5'820           |

1) ohne Rauchgasentschwefelung  
2) mit Rauchgasentschwefelung

307FEUER.XLS, 1.12.

Tabelle 7-5: Emissionsfaktoren [kg/TJ Input] für verschiedene Systeme mit und ohne vorgelagerte Prozesstufen 1990  
(Quellen: ETHZ, GEMIS 2.0, INFRAS Aug.1991 / 1+2)

Kalkulatorische Energiepreiszuschläge, welche auch die Emissionen der vorgelagerten Prozessstufen bei den jeweiligen Energieträgern berücksichtigen. Diese Zuschläge dienen primär der Illustration der Bedeutung der vorgelagerten Prozessstufen. Methodisch ist es zwar nicht korrekt, die in der Regel im Ausland anfallenden Emissionen bei den vorgelagerten Prozessstufen mit Emissionszuschlägen in die Berechnung der kalkulatorischen Energiepreiszuschläge einzubeziehen, welche die in der Schweiz entstehenden externen Kosten enthalten. Die spezifischen staatlichen Ausgaben für die einzelnen Energieträger bzw. -systeme werden separat ausgewiesen.

| Feuerungssystem<br>(+Datenquelle)  | Aktuelle Endenergie-<br>preise 1992<br>Fr. / GJ |     | Energiepreiszuschläge 1992 |             |                               |             | Staatliche<br>Aufwendungen<br>1990/91 (Fr./GJ) |
|------------------------------------|---|-----|----------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|--|
|                                    |   |     | C H<br>Fr. / GJ            |             | CH+ mit Vorstufen<br>Fr. / GJ |             |  |
| <b>Erdgas</b>                      | Rp./kWh   |     | Rp./kWh                    |             | Rp./kWh                       |             |  |
| Gebläse, Anlage 87, <1 MW          | 13,9  | 5,0 | 0,51-1,19                  | 0,18-0,43   | 0,97-2,29                     | 0,35-0,83   | 0,17   |
| Atmosphärisch 87,<1 MW             | 13,9  | 5,0 | 1,02-2,38                  | 0,37-0,86   | 1,48-3,49                     | 0,53-1,25   | 0,17   |
| Gebläse, Neuanlage 90, <0,1 MW     | 13,9  | 5,0 | 0,52-1,21                  | 0,18-0,44   | 0,98-2,32                     | 0,35-0,83   | 0,17   |
| Atmosphärisch,90, <0,1 MW          | 13,9  | 5,0 | 0,85-1,99                  | 0,30-0,72   | 1,31-3,10                     | 0,47-1,11   | 0,17   |
| Low NOx, Neuanlage 90,< 0,1 MW     | 13,9  | 5,0 | 0,26-0,61                  | 0,09-0,22   | 0,72-1,72                     | 0,26-0,62   | 0,17   |
| Industrie-Neuanlage 90, >0,1 MW    | 13,9  | 5,0 | 0,68-1,60                  | 0,24-0,58   | 1,12-2,65                     | 0,40-0,95   | 0,17   |
| Industrie-Low NOx 90, >0,1 MW      | 13,9  | 5,0 | 0,34-0,80                  | 0,12-0,29   | 0,78-1,85                     | 0,28-0,67   | 0,17   |
| <b>Erdöl</b>                       | Fr./100 kg                                      |     | Fr./100 kg                 |             | Fr./100 kg                    |             |  |
| Bestehende Anlage 87, 0,01-0,1 MW  | 9,6   | 40  | 1,62 - 3,80                | 6,77-15,84  | 3,20-7,51                     | 13,36-31,31 | 0,11   |
| Low NOx, Neuanlage 90, 0,01-0,1 MW | 9,6   | 40  | 1,20-2,80                  | 5,00-11,71  | 2,78-6,52                     | 11,60-27,18 | 0,11   |
| Brennwertkessel 90, 0,01-0,1 MW    | 9,6   | 40  | 1,20 - 2,80                | 5,00-11,71  | 2,78-6,52                     | 11,60-27,18 | 0,11   |
| Industrie HEL-CH 90, 1 MW          | 9,6   | 40  | 1,78 - 4,18                | 7,43-17,39  | 2,74-6,42                     | 11,41-26,74 | 0,11   |
| Industrie HS 90, 1 MW              | 4,8   | 20  | 7,85-18,37                 | 32,72-76,54 | 8,91-20,86                    | 37,13-86,91 | 0,11   |
| <b>Holz</b>                        | Fr./Sm <sup>3</sup>                             |     | Fr./Sm <sup>3</sup>        |             | Fr./Sm <sup>3</sup>           |             |  |
| Holzsplitz feucht 90, 0,01 MW      | 11,1  | 35  | 2,61-6,16                  | 8,24-19,43  | 4,62-10,86                    | 14,56-34,24 | 0,98   |
| <b>WKK</b>                         | Rp./kWh   |     | Rp./kWh                    |             | Rp./kWh                       |             |  |
| Gas-WKK 90, 0,1-0,5 MW             | 13,9  | 5,0 | 0,42-0,99                  | 0,15-0,36   | 0,89-2,10                     | 0,32-0,76   | 0,17   |

307PREIS.XLS, 20.12

Tabelle 8-2: Aktuelle Energiepreise 1992 und kalkulatorische Energiepreiszuschläge 1990 aufgrund der externen Kosten in den Bereichen Wald-, Gesundheits-, Landwirtschafts- und Gebäudeschäden sowie die staatlichen Ausgaben 1990/91 für die verschiedenen Energieträger/-systeme

## 8.2 Problembereiche und Unsicherheiten

### 8.2.1 Quantifizierung der Schäden, Monetarisierung der Kosten

#### a) Waldschäden

Die grössten Unsicherheiten bestehen bei der Abschätzung der künftigen Waldschadenentwicklung und bei der Zuordnung von Schäden auf die Verursacher bzw. die verursachenden Schadstoffe. Die aktuelle Schadenentwicklung gibt keinen Anlass zur Entwarnung. Ob jedoch die hier verwendeten Schadenszenarien von Basler & Partner bzw. von Altwegg realistisch sind, wird erst die Zukunft weisen. Wir schätzen sie als etwas zu pessimistisch ein.

Bei der Monetarisierung der Kosten werden hier nur die "wirklichen" technologischen externen Kosten berücksichtigt. Makroökonomische Effekte, wie sie die Studie von Basler & Partner ausweist, ordnen wir den sogenannten pekuniären externen Effekten zu. Diese führen nur zu Umverteilungswirkungen und sind nicht mit einem Ressourcenverbrauch verbunden.

Wir übernehmen die Hypothese, dass die sogenannt neuartigen Waldschäden durch die Luftschadstoffbelastung ausgelöst oder mindestens mitverursacht werden. Die Schäden werden deshalb zu 50% den energiebedingten schweizerischen SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- bzw. Nichtmethan-VOC-Emissionen sowie zu 50% den Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft angelastet. Der Stand der Ursachenforschung erlaubt es aber zurzeit noch nicht, diese Annahme überzeugend zu untermauern oder gar Aussagen über die relative Bedeutung einzelner Schadstoffe zu machen.

Wir gehen davon aus, dass die immissionsbedingten Waldschäden den Erholungsnutzen stadtnaher Wälder mindern. Während die Arbeiten von Nielsen gute Grössenordnungen für den Erholungsnutzen angeben, ist die Annahme der Minderung dieses Nutzens durch Waldschäden schlechter abgestützt -> Bereich von 0-200 Mio Fr./a. Trotz dieser Unsicherheiten sind wir der Ansicht, dass der hier ausgewiesene energiebedingte Kostenbereich von 0,55 -1,4 Mrd Fr./a in der Grössenordnung richtig ist.

#### b) Landwirtschaftliche Produktionsausfälle

Der Stand der epidemiologischen Forschung erlaubt es, recht gut abgesicherte Aussagen über den Verursacher (Ozonbelastung) und über das Ausmass der Produktionsausfälle zu machen. Wünschbar wären noch schweizerische Expositions-Wirkungsfunktionen zur Überprüfung der hier verwendeten amerikanischen Angaben.

Eine der Schwierigkeiten liegt darin, die für die Ozonbelastung auf dem Land massgeblichen Verursacher zu definieren. Relativ stark vereinfachend werden hier die sommerlichen Stickstoffoxid- und Nichtmethan-Kohlenwasserstoff-Emissionen in der Schweiz als eigentliche Verursacher bezeichnet. Es ist dabei noch ungewiss, wieweit auch die Methanemissionen beigezogen werden müssten. Auch ist das Ozonbildungspotential je nach Kohlenwasserstoff verschieden. Für die Zuordnung der Kosten auf die

Stickoxid- bzw. Kohlenwasserstoff-Emissionen müsste vom Ozonbildungsbeitrag der einzelnen Emissionen ausgegangen werden. Dieser hängt aber von den vorherrschenden Schadstoffkonzentrationen, vom Vorhandensein anderer Schadstoffe etc. ab. Erste Ergebnisse von POLLUMET deuten darauf hin, dass bei den heutigen Immissionen auf dem Land die Stickstoffoxide den begrenzenden Faktor für die Ozonbildung darstellen. Das muss jedoch nicht bedeuten, dass nur sie alleine als die Verursacher behandelt werden sollen. Uns scheint daher eine Gleichbehandlung von NMVOC- und NO<sub>x</sub>-Emissionen vertretbar.

Ein grosses Problem stellt die Bewertung der landwirtschaftlichen Produktionsausfälle dar, da aufgrund der vielfältigen Interventionen auf praktisch allen Märkten für landwirtschaftliche Güter keine Konkurrenzpreise verfügbar sind, sondern nur administrierte Preise. Der von uns ausgewiesene Bereich dürfte eine untere ("Weltmarktpreise") und eine obere ("EG-Preise") Grenze angeben.

Die hier berücksichtigten Schäden entsprechen aber nur einem Teil der gesamthaften Auswirkungen der Luftschadstoffbelastung. Die Tierhaltung oder die Naturwiesen/Weiden sowie allfällige Langfristwirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit bleiben unberücksichtigt. Im Vergleich zu den übrigen hier untersuchten Schäden haben die landwirtschaftlichen Produktionsausfälle eine eher untergeordnete Bedeutung.

### **c) Gesundheitsschäden**

Im Bereich der Ursachenforschung und Epidemiologie ist die Situation bei den Gesundheitsschäden in der Schweiz vorläufig noch nicht wesentlich besser als bei den Waldschäden. Das dürfte sich nach Abschluss der epidemiologischen Untersuchungen im Programm SAPALDIA ändern.

Nachdem hier noch keine Arbeiten zu Gesundheitsschäden infolge der Luftverschmutzung bei schweizerischen Immissionsverhältnissen verarbeitet werden konnten, wird eine Studie für die BRD (Heinz/Klaassen-Mielke) als Grundlage für die Schätzung von schweizerischen Gesundheitskosten verwendet. Im Vergleich zu den sonst verwendeten Arbeiten aus den USA liegen die im BRD-Untersuchungsgebiet vorherrschenden Immissionen deutlich näher bei den schweizerischen Werten.

Schon die deutsche Arbeit weist eine Reihe von Lücken und Unsicherheitsbereichen auf. So werden nur die Erwerbstätigen erfasst und davon nur diejenigen Behandlungsfälle, welche zu Arbeitsunfähigkeit führten. Der verwendete Humankapitalansatz, mit welchem die Ressourcenausfallkosten erfasst werden, berücksichtigt aber auch bei den Erwerbstätigen nur einen Teil der Gesamtkosten. Die BRD-Resultate dürften daher eine deutliche Unterschätzung der Gesundheitskosten darstellen. In unseren Berechnungen für die Schweiz versuchten wir eine Lücke zu füllen (Einbezug der Nichterwerbstätigen unter Annahme gleicher Krankheitsrisiken infolge der Luftschadstoffimmissionen). Da jedoch die Immissionsverhältnisse in den von uns definierten Belastungsgebieten von denjenigen in der BRD abweichen, dürften unsere Resultate die immissionsbedingten Gesundheitskosten weniger deutlich unterschätzen als die Arbeit von Heinz/Klaassen-Mielke die BRD-Gesundheitskosten.

Generell muss aber darauf hingewiesen werden, dass die gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen längst noch nicht abschliessend beschrieben werden können. So ist es gut möglich, dass noch bei weiteren Krankheiten (wie bspw. Allergien) Luftschadstoffe beteiligt sind. Die Übertragung der BRD-Kostensätze auf schweizerische Verhältnisse ist problematisch. Ein Grund liegt darin, dass im Gesundheitswesen, infolge der komplizierten Finanzierungsstrukturen, die (volkswirtschaftlichen) Kosten schwer extrahierbar sind.

#### **d) Gebäudeschäden**

Die hier ausgewiesenen Gebäudeschäden umfassen die immissionsbedingten Schäden an den Aussenflächen des Normalgebäudebestandes. Daneben sind bei historischen Gebäuden und Denkmälern sowie bei anderen Infrastrukturanlagen Schäden bedeutenden Ausmasses zu erwarten. Die Immissionen verursachen unter Umständen auch im Gebäudeinnern Schäden, die hier nicht berücksichtigt werden können.

Die wichtigsten Ungewissheiten beim hier ausgewiesenen Resultat, bestehen bei den Angaben über die immissionsbedingte Verkürzung der Lebensdauer der Materialien der Gebäudehülle sowie bei der Veränderung der Reinigungszyklen bei Geschäftsbauten infolge der Luftverschmutzung. Die Zuteilung des schweizerischen Gebäudebestandes zu den drei Immissionskategorien entspricht nicht immer den effektiven Immissionsverhältnissen. Der Anteil der Gebäude, die der Immissionskategorie Stadt zugeteilt werden, ist jedoch relativ vorsichtig abgeschätzt. Zudem werden die Gebäudeschäden infolge der gewählten Methode systematisch unterschätzt: Die Abschätzung der Schäden und der Kosten beruht auf einem Vergleich der Renovations- und der Reinigungskosten in mittel und stark belasteten Gebieten (Immissionskategorie Stadt und Agglomeration) mit denjenigen in schwach belasteten Gebieten (Land). Dadurch wird unterstellt, dass die Immissionsbelastungen auf dem Land keine Gebäudeschäden verursachen. Stimmt diese Annahme jedoch nicht, so fehlt bei der hier vorgenommenen Schätzung der Gebäudekosten in allen drei Immissionskategorien ein Kostensockel. Die Angaben über die exponierten Flächen und über den materialmässigen Aufbau der Gebäudehülle sind relativ zuverlässig.

Die effektiven Gebäudeschäden infolge der Luftverschmutzung dürften daher einiges höher sein als hier ausgewiesen.

Die Kosten werden den Schwefeldioxid-, und den Stickstoffoxid- Jahresemissionen sowie den sommerlichen Stickstoffoxid- und Nichtmethan-Kohlenwasserstoffemissionen nach Massgabe ihres Emissionsanteils an der Summe der Feuerungsemissionen dieser Schadstoffe zugerechnet. Im Gegensatz zum Vorgehen bei den anderen Schadenbereichen, werden hier nicht die Schäden infolge der gesamten schweizerischen Luftschadstoffemissionen ermittelt, sondern direkt diejenigen der Feuerungsemissionen.

Die Fehlerrechnung mit recht grossen Fehlertoleranzen bei den kritischen Annahmen zeigt, dass die Grössenordnung der zu erwartenden Kosten im Rahmen der hier angestrebten Genauigkeit gut nachgewiesen werden kann.

**e) Öffentliche Leistungen und Ausgaben**

Die öffentlichen Leistungen für einzelne Energieträger werden zwar oft als Externalität bezeichnet, weil diese Leistungen von den Steuerzahlern und nicht von den Verursachern bzw. Konsumenten bezahlt werden. Obwohl die letzte Aussage stimmt, sollten diese öffentlichen Leistungen nicht als Externalität zugunsten des Energiesystems bezeichnet werden, sondern als öffentliche Güter. Sie stellen keine volkswirtschaftliche Ressourcenverschwendung dar, welche sich nicht in den Preisen widerspiegelt. Vielmehr ergeben sie einen Verbrauch, welcher nicht über den Markt gesteuert wird, sondern über aussermarktliche, politische Entscheide. Diese Ausgaben nehmen somit eine Zwischenstellung ein. Es geht hier nicht darum, mittels einer "Pigou"- Internalisierung über kalkulatorische Energiepreiszuschläge die Allokation dieser Leistungen zu verbessern (immer vorausgesetzt, dass die Prozesse, die die Art und das Ausmass des Angebotes der öffentlichen Güter bestimmen, effizient sind). Die öffentlichen Leistungen und Ausgaben werden hier zwar soweit wie möglich quantifiziert und den einzelnen Energieträgern zugeordnet. Sie werden jedoch separat ausgewiesen und nicht zu den Kalkulatorische Energiepreiszuschlägen der vier hier untersuchten , Schadenbereiche addiert. Es zeigt sich, dass die öffentlichen Leistungen, die hier erfasst werden konnten, im Vergleich mit den Kalkulatorische Energiepreiszuschlägen für die vier Schadenbereiche ohnehin vernachlässigbar sind.



## **Anhang 1: Internalisierung und Quantifizierung von externen Kosten**

In der folgenden Zusammenstellung befindet sich ein Überblick über die wichtigsten Studien zur Identifizierung und Quantifizierung von externen Kosten. Die Übersicht ist dem Schlussbericht von PROGNOSE zum Projekt "Identifizierung und Internalisierung externer Kosten der Energieversorgung" (Prognos, Juni 1992, S. 80-82) entnommen.

| Autor<br>Jahr<br>Land               | INTERNALISIERUNG UND QUANTIFIZIERUNG  | MONETARISIERUNG<br>ANSATZ UND<br>BEWERTUNG  |
|-------------------------------------|---|---|
| Ridker<br>1967<br>USA               | 18-20 % der Todesfälle durch Lungenerkrankungen auf Luftschadstoffe zurück dieser Prozentsatz wird in Relation zu den Gesamtkosten von Lungenerkrankungen gesetzt.  | Die Folgekosten betragen 360 - 400 Mio \$ p.a. (Preisstand 1958)<br><br>Humankapitalansatz (s. Glossar S. 36)<br>- entgangene Einkommen bei vorzeitigem Tod<br>- Kosten durch Arbeitsunfähigkeit<br>- Behandlungskosten<br><br>keine Berücksichtigung von beruflicher Schadstoffexposition  |
| Lave & Seskin<br>1970 u.1977<br>USA | Basierend auf einer Literaturswertung und einer Regressionsanalyse werden für Krankheiten Elastizitätskoeffizient ermittelt. 1977 finden auch soziodemographische und andere Einflussfaktoren Berücksichtigung<br>Bei der Monetarisierung wird die Kostenschätzung von /Cooper et al./ zugrundegelegt | Bei einer Reduktion von 88% SO <sub>2</sub> und 58% bei Schwebstaub werden 16,1 Mrd \$ p.a. eingespart (Preisstand 1973)<br><br>Humankapitalansatz<br><br>Raucherverhalten, berufliche Exposition gehen in der Studie von 1970 nicht ein<br><br>genauere berufliche Tätigkeit, Rauchen und Ernährungsgewohnheiten gehen in das Regressionsmodell nicht ein.   |
| Lave & Chappie<br>1983<br>USA       | Erweitert den Ansatz von /Lave, Saskin 1977/:<br>- disaggregiert Daten bis auf Stadtebene<br>- Berücksichtigung von Raucherverhalten, Alkoholkonsum und Ärztedichte<br><br>Ergebnis ist ein signifikanter Zusammenhang zwischen Mortalitätsrate und der SO <sub>2</sub> -Belastung                    | Humankapitalansatz  |
| Crocker et al.<br>1979.<br>USA      | Regressionsanalyse; es ergibt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen Erkrankung durch SO <sub>2</sub> bei Kleinkindern und für Pneumonie aufgrund Schwebstaubbelastung.<br>Berücksichtigung weiterer Faktoren Raucherverhalten, Ernährungsweise Ausbildungsstand und Freizeitverhalten          | Reduzierung der Luftschadstoffe um 60% bei Stadtbevölkerung von 150 Mio bringt ökonomischen Nutzen 5,1 - 15 Mrd \$ p.a.<br><br>Humankapital:<br>- Kosten/Todesfall zwischen 400.000 -1 Mio \$<br>beruhend auf entgangenen Einkommen   |
| OECD<br>1981<br>11 Länder           | Basiert auf Elastizitätswert von /Lave & Saskin, 1977/.   | z.B. in der BRD Reduzierung von SO <sub>4</sub> um 1,21 Mio t ergibt Einsparungen zwischen 234 Mio \$ und 5,8 Mrd \$ (Basis 85)<br><br>Humankapitalansatz (definition siehe S. 84)<br><br>vgl.Lave & Saskin, 1977.  |
| Leu et al.<br>1985<br>Schweiz       | Basiert auf /Lave, Seskin, 1977/ (Regressionskoeffizient) und /Ostro 1983/ (Elastizitäten).   | zwischen 0,48 Mio und 1,75 Mio energiebedingt verlorene Arbeitstage ergeben volkswirtschaftliche Verluste von mind. 100 Mio SFr p.a.<br><br>Humankapitalansatz<br><br>Die Zuordnung auf einzelne Energieträger ergibt für Treibstoffe 27,2 Mio SFr. auf Heizöl 66,9 Mio SFr. und auf Kohle 5,4 Mio SFr. p.a.<br><br>- Schätzung energiebedingter Krankheitsfolgekosten durch Luft-<br>- Einbeziehung nicht-berufstätiger Frauen mit Kindern unter 15 Jahren |
| Hohmeyer<br>1989<br>BRD             | Basiert auf /Euker, 1984/, dieser basiert /OECD/  | zwischen 450 Mio DM p.a. und 11,2 Mrd DM p.a.<br><br>vgl. OECD-Studie   |
| Marburger<br>1979 u.1984            | Basierend auf Annahmen, dass 20% der Atemwegserkrankungen auf Luftschadstoffe zurückgehen, wird auf der Basis von Krankenkassen- und Versicherungsdaten etc. der emissionsbedingten Anteil von Arbeitsunfähigkeit- und Todesfällen bestimmt Über Behandlungskosten/Tag wird monetarisiert.            | je t Emission ca. 3,70 DM, der gesamte innerörtliche Verkehr ca. 247 Mio DM/a<br><br>Humankapitalansatz<br><br>- Beitrag der Luftverschmutzung bei der Entstehung von Atemwegserkrankungen ist umstritten.  |
| Ostro<br>1983,1985<br>USA           | Basiert auf Interviews von ca. 120'000 Personen. Dabei wird jede Person mit ihren soziodemographischen Daten, den Erkrankungen und den Arbeitsunfähigkeitstage erfasst<br>Aus den verlorenen Arbeitstagen und verschiedenen Luftverschmutzungsgruppen werden Signifikanz und Elastizitäten ermittelt. | Humankapital (siehe Glossar S. 36)<br><br>Genauere Untersuchungsgrundlagen als z.B. Lave & Saskin   |
| Cropper<br>1981<br>USA              | Entwicklung eines Bewertungsmodells in dem die Betroffenen zwischen Einkommensausfällen durch Krankheit und Vorsorgemaßnahmen (z.B. Erholung) abwägen und entsprechende Zahlung leisten   | Bei 1 Mio Betroffener wäre der ökonomische Nutzen einer 10% Reduzierung des SO <sub>2</sub> Gehalts 3,6 Mio \$.<br><br>Zahlungsbereitschaft im weiteren Sinne (siehe Glossar S. 35)<br><br>Der Vorteil dieser Methode ist die Berücksichtigung der Reaktion der Betroffenen auf Luftverschmutzung   |

|                                       |                         |                   |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------|
| ■ NOx Sommer (1990)                   |                         |                   |
| NOx-Emissionen                        | Sommer 1990:            | 85'800 t/a        |
|                                       | Sommer 1960: (Zielwert) | <u>38'700 t/a</u> |
| Schadenverursachende NOx-Emissionen   | Sommer 1990             | 47'100 t/a        |
| ■ NMVOC Sommer(1990)                  |                         |                   |
| NMVOC-Emissionen                      | Sommer 1990:            | 124'900 t/a       |
|                                       | Sommer 1960: (Zielwert) | <u>62'700 t/a</u> |
| Schadenverursachende NMVOC-Emissionen | Sommer 1990             | 62'200 t/a        |

Die Kosten der Gebäudeschäden werden bereits bezüglich der Feuerungsemissionen ausgewiesen. Die Feuerungsemissionen 1990 werden wie folgt ermittelt (nach BUWAL, Nr. 76, 1987):

| in 1000t  | SO <sub>2</sub> |      | NOx  |      | NOx-Sommer |      | NMVOC-Sommer |      |
|-----------|-----------------|------|------|------|------------|------|--------------|------|
|           | 1990            | 1950 | 1990 | 1960 | 1990       | 1960 | 1990         | 1960 |
| Haushalte | 14,6            | 25,2 | 9,0  | 5,2  | 1,8        | 1,0  | 2,0          | 1,2  |
| Industrie | 43,4            | 27,7 | 49,9 | 29,3 | 21,6       | 12,7 | 15,9         | 6,7  |
| Total     | 58,0            | 52,9 | 58,9 | 34,5 | 23,4       | 13,7 | 17,9         | 7,9  |

Tabelle A2-1: Ermittlung der Feuerungsemissionen im Jahr 1990 bzw. in den Jahren 1950/1960 aus (BUWAL, Nr. 76 1987),

## Literaturverzeichnis

- Ailor W. A., "Atmospheric Corrosion", John Wiley & Sons, New York 1982
- Altwegg D., "Die Folgekosten von Waldschäden", Dissertation HSG St. Gallen, Bamberg 1988
- Avol E. L., Linn W. S., Venet T. G., Shamoo D. A., Hackney J. D., "Comparative respiratory effects of ozone and ambient oxidant pollution exposure during heavy exercise", J. Air Pollut. Control Assoc. 1984, 34:804-809
- BAM, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, "Volkswirtschaftliche Verluste durch umweltverschmutzungsbedingte Materialschäden in der BRD", im Auftrag des UBA, Berlin, Oktober 1990
- Baudirektion des Kantons Zürich, "Luftprogramm für den Kanton Zürich, Massnahmenplan Lufthygiene", Zürich, April 1990
- BBW, Bundesamt für Energiewirtschaft und Schweizerisches Nationalkomitee der Weltenergiekonferenz, "Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1984", Juni 1985
- Beier, Wagner, Katzschner, "Atemwegserkrankungen und Luftbelastung", Arbeitsbericht des Fachbereichs Stadtplanung und Landschaftsplanung, Heft 83, Gesamthochschule Kassel, 1988
- BEW, Bundesamt für Energiewirtschaft, "Schweizerische Gesamtenergiestatistik", Bern 1990
- BEW, Bundesamt für Energiewirtschaft, "Liste der Projekte; Forschung, Entwicklung und Demonstration im Bereich der Energie in der Schweiz", Bern 1989
- BFK, Bundesamt für Konjunkturfragen, "Sanierungshandbuch Planung und Projektierung", Anhang A-12, 2. Aufl., Bern, Mai 1980
- BFS, Bundesamt für Statistik, "Abgrenzung der Agglomerationsräume in der Schweiz 1980", 1984
- BFS, Bundesamt für Statistik, "Statistisches Jahrbuch der Schweiz 1991", Verlag NZZ, 1990
- BFS, Bundesamt für Statistik, "Erhebungen über die Bautätigkeit in der Schweiz", diverse Jahrgänge, "Wohnbautätigkeit in der Schweiz", diverse Jahrgänge

- BMFT, Bundesminister für Forschung und Technologies, "Bilanz aus 10 Jahren Waldschadensforschung", Forschungsergebnisse 12/93, Bonn, 2.2.1993
- BMFT, "Wälder werden durch Verkehr und Landwirtschaft belastet", BMFT-Journal Nr. 2, Mai 1993
- BMU, Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), "Auswirkungen der Luftverunreinigungen auf die menschliche Gesundheit", Bonn 1987
- Botschaft zur Staatsrechnung der Schweizerischen Eidgenossenschaft für das Jahr 1990, Bern 1991
- B&P, Basler & Partner, "Die wirtschaftlichen Folgen des Waldsterbens in der Schweiz", im Auftrag der Schweiz. Gesellschaft für Umweltschutz, Zürich 1986
- BSV, Bundesamt für Sozialversicherung, Sektion Statistik, "Statistik über die Krankenversicherung, vom Bunde anerkannte Versicherungsträger 1989", April 1991
- Bundesrat Schweiz, "Luftreinhaltkonzept", Bericht 86.047, 10. Sept. 1986
- Burgbacher H. (Hrsg.), "Modellhafte Untersuchungen über wirtschaftliche Auswirkungen der neuartigen Waldschäden auf den Bauernwald im Schwarzwald", Heft 137 der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg i.Br. 1988
- BUWAL, "Vom Menschen verursachte Schadstoff-Emissionen in der Schweiz 1950-2010", Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 76 plus Nachtrag September 1988
- BUWAL, "Ozon in der Schweiz", Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 101, Bern, Februar 1989
- BUWAL, "Energie aus Heizöl oder Holz? Eine vergleichende Umweltbilanz", Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 131, Bern, Oktober 1990
- BUWAL, "Immissionsmesswerte 1990", Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 123, Bern 1990
- BUWAL, "Luftverschmutzung und Gesundheit", Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 134, Bern 1990
- BUWAL (Hrsg.), "Umweltbericht 1990. Zur Lage der Umwelt in der Schweiz", Bern 1991
- BUWAL, "Luftbelastung 1991", Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 179, Bern, Juni 1992
- Christ U., Volz R., "Ursachenforschung zu den Waldschäden", Hrsg. Bundesamt für Forstwesen und Landschaftsschutz, Bern 1988

- Cohen A.A., Bromberg S., Buechley R.W. et al., "Asthma and air pollution from a coal-fuelled power plant", *Am. J. Public Health* 1972, 62: 1181-1188
- Dassen W., Brunekreef B., Hoek G. et al., "Decline in children's pulmonary function during an air pollution episode", *J. Air Pollt. Control Assoc.* 1986, 36/11: 1223-1227
- Ecoplan, "Soziale Kosten von Verkehrsunfällen in der Schweiz", im Auftrag des Dienstes für Gesamtverkehrsfragen des EVED, GVF-Auftrag Nr. 186, Bern, April 1991
- Ecoplan B, "Externe Kosten im Agglomerationsverkehr", Vorabzug, Bericht 15B des NFP 'Stadt und Verkehr', Zürich, April 1992
- Ericsson G., Camner P., "Health effects of sulfur oxides and particulate matter in ambient air", *Stand. J. Work, Environ., Health* 1983, 9/suppl 3: 1-52
- EVED, Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, "Aktionsprogramm Energie 2000", Bern 1991
- EVED, Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, "Stand des energiepolitischen Programmes in den Kantonen", Stand Januar 1991, Bern, März 1991
- Ewers H. J., "Zur Monetarisierung der Waldschäden in der BRD", in: "Kosten der Umweltverschmutzung", Tagungsband zum Symposium, UBA-Berichte 7/86, Berlin 1986
- Fegeler U., Moyzes R., Wedler E., Eberhard K., "Immissions- und Wettereinflüsse auf Atemwegserkrankungen
- Frey R. L., Gysin C. H., Leu R.E., Schmassmann N., "Energie, Umweltschäden und Umweltschutz in der Schweiz", Verlag Rüegger, 1991 (2. Aufl.)
- Fuhrer J., "Die Wirkungen von Ozon auf landwirtschaftliche Kulturen", in: "Landwirtschaft und Umwelt", UFA-Revue Nr. 7-8, S. 39-41, 1988
- Fuhrer J., Lehnherr B., Stadelmann F.X., "Luftverschmutzung und landwirtschaftliche Kulturpflanzen in der Schweiz", Schriftenreihe der FAC Liebefeld Nr. 3, 1989
- GEMIS, "Gesamt-Emissionsmodell integrierter Systeme", Version 2.0, Öko-Institut Darmstadt, GH Kassel Forschungsgruppe; im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten, Darmstadt/Kassel, Okt. 1992
- Grupp H., "Die sozialen Kosten des Verkehrs", Teil 1, in: 'Verkehr und Technik', Heft 9, 1986
- Hammer D.I., Hasselblad V., Portnoy B., Wehrle P. F., "Los Angeles student nurse study", *Arch. Environ. Health* 1974, 28:255-260

- Hediger W., "Öffentliche Ausgaben als externe Kosten der Strom- und Wärmeversorgung", Kommentar, PSI, Würenlingen, 11. November 1992
- Heinz I., "Volkswirtschaftliche Kosten durch Luftverunreinigungen", INFU-Werkstatt-hefte, Heft 4, Dortmund 1983
- Heinz I., Klaassen-Mielke R., "Krankheitskosten durch Luftverschmutzung", Physica-Verlag, Heidelberg 1990
- Hohmeyer O., "Soziale Kosten des Energieverbrauchs", 2. Aufl., Springer Verlag, 1989
- Infraconsult/Dienst GVF, "Soziale Kosten des Verkehrslärms", Schlussberichtsentwurf, Bern 1991
- INFRAS, "Monetare Kosten der Luftverschmutzung an Gebäuden im Kanton Zürich", im Auftrag des ATAL Kt. Zürich, Zürich, Oktober 1986
- INFRAS, "Monetare Kosten der Luftverschmutzung an SBB-Infrastrukturen", im Auftrag des NFP 14, Zürich, 20. Januar 1988
- INFRAS/EWI AG, "Externalitäten im Energiebereich", Vorstudie, Zürich, 6. Dezember 1990
- INFRAS/Amt für Technische Anlagen und Lufthygiene des Kantons Zürich, "Aktualisierung N02-Emmissionsmodell Kanton Zürich", Schlussbericht, November 1991
- INFRAS/Gesundheitsinspektorat der Stadt Zürich, "Verkehrserhebungen III für den Strassenlärmkataster", Zürich 1991
- INFRAS, "Prozesskette Erdöl", Arbeitspapier, Zürich, August 1991/1
- INFRAS, "Prozesskette Erdgas", Arbeitspapier, Zürich, August 1991/2
- INFRAS, "Externalitäten der Strom- und Wärmeversorgung", Offerte, Zürich, 20. Februar 1992
- INFRAS, "Gebäudeschäden durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung", im Auftrag des Dienstes für Gesamtverkehrsfragen, noch unveröffentlicht, Zürich, Juli 1992
- INFRAS, "Landwirtschaftliche Produktionsausfälle infolge der Luftverschmutzung", Arbeitsbericht, Zürich, April 1992
- INFRAS, "Kosten luftschadstoffbedingter Gesundheitsschäden in der Schweiz", Arbeitsbericht, 9. April 1992
- INFRAS, "Kosten neuartiger Waldschäden in der Schweiz", Arbeitsbericht, Zürich, Oktober 1992

- INFRAS, "Öffentliche Ausgaben als externe Kosten der Strom- und Wärmeversorgung", Arbeitsbericht, Zürich, 1. Oktober 1992
- KVZG, Kant. Verband Zürcher Gebäudereinigungsunternehmer, "Gebäudereinigung; Richtlinien", Ausgabe 1991
- Lagerwerff J.M., "Prolonged ozone inhalation and its effects on visual parameters", *Aerospace Medicine* 1963, 34/6: 479-487
- Landwirtschaftsbericht (Siebter), Bern, 1992
- Lätt N., "Zum Zusammenhang zwischen Kronenschäden und Windfallholzanteil", *Schweiz. Zeitschrift für das Forstwesen*, 142(1991)2; 109-131
- Lave L. B., Seskin E. P., "Air pollution and human health", Baltimore/London: Johns Hopkins University Press, 1977
- Leu R. E., Gysin C.H., Frey R.L., Schmassmann N., externe Kosten der Energie am Beispiel von Mortalität und Morbidität", *Schweiz. Zeitschr. für Volkswirtschaft und Statistik*, 129. Jg. (1984), S. 388-407
- Linder J., "Ozon und körperliche Leistungsfähigkeit", Diss. Inst. f. Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETH Zürich 1987
- Loewenstein J. C., Bourdel M. C., Bertin M., "Influence de la pollution atmosphérique (SO<sub>2</sub>-poussières) et des conditions météorologiques sur la mortalité à Paris entre 1969 et 1976", *Rev Epidém et Santé publique* 1983; 31:143-161
- Marburger E.A., "Zur ökonomischen Bewertung gesundheitlicher Schäden durch Luftverschmutzung", UBA, Berichte 7/86, 'Kosten der Umweltverschmutzung', Erich Schmidt Verlag, Berlin
- McDonnell W.F., Chapman R.S., Leigh M.W., Strope G.L., Collier A.M., "Respiratory responses of vigorously exercising children to 0,12 ppm ozone exposure", *Am. Rev. Respir. Dis.* 1985, 132:875-879
- Näf W., "Ökonomische Konsequenzen der Luftverschmutzung für die schweizerische Landwirtschaft", Dissertation der wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg, 1991
- Nägeli W., "Handbuch des Liegenschaftenschätzers", 2. Aufl., Schulthess Verlag, Zürich
- Neininger B., "Pressemitteilung des Forschungsprogramms POLLUMET", EMPA, Dübendorf, August 1992
- Nielsen C., "Der Erholungswert stadtnaher Wälder im Kanton Tessin", BUWAL-Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 146, Bern 1991  
"Der Wert stadtnaher Wälder als Erholungsraum - Eine ökonomische Analyse am Beispiel von Lugano", Dissertation Universität Zürich, 1992
- NZZ; Neue Zürcher Zeitung, "Die 'neuartigen' Waldschäden in Mitteleuropa", nach einem Referat von H. Mohr an der 117. Versammlung Deutscher Naturforscher, NZZ Nr. 21, 27.1.1993, S.65

- Öko-Institut, "Emissionsmatrix für klimarelevante Schadstoffe in der BRD", Darmstadt, August 1989
- Pfister F., "Walderhaltung und Schutzaufgaben im Berggebiet", Bericht Nr. 294 der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen EAFV/WSL, Birmensdorf 1987
- PLENAR, "Auslöser und Nebenwirkungen beim Energiesparen im Bauwesen", Schlussbericht, Zürich 1980
- PROGNOS, "Identifizierung und Internalisierung externer Kosten der Energieversorgung", im Auftrag des BMW, Basel/Bonn, April 1992
- Bd. 1, "Kosten der Bodenbelastung, Waldschäden und Gefährdung der Artenvielfalt / Bau- und Materialschäden durch Luftverschmutzung"
- Bd. 2, "Externe Effekte im Strassenverkehr / Gesundheitsschäden durch Abbau und Verarbeitung fossiler Brennstoffe / Abschätzung der Schäden durch einen sogenannten 'Super-Gau'"
- Bd. 3, "Externe Effekte regenerativer Energiesysteme / Externe Effekte bei einem umfassenden System einer Photovoltaikwirtschaft / Bemerkungen zu externen Effekten durch Energiegewinnung aus Wasserkraft"
- Bd. 4, "Abschätzung der Schäden durch" CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>-Akkumulation / Adäquate Berücksichtigung der Erschöpfbarkeit nicht erneuerbarer Ressourcen"
- Endbericht, Basel, Juni 1992
- SBG, Schweizerische Bankgesellschaft, "Preise und Löhne rund um die Welt", Ausgabe 1991
- Schläpfer R., Hämmerli F., "Das 'Waldsterben' in der Schweiz aus heutiger Sicht", Doku Nr. 42 der Studiengruppe Energieperspektiven, Baden 1989
- Schönstein R., Schörner G., "Volkswirtschaftliche Bedeutung von Waldschädigungen durch luftverunreinigende Schadstoffe", Forschungsinstitut für Energie- und Umweltplanung, im Auftrag des Bundesministeriums für Gesundheit und Umweltschutz, Wien 1985
- Stadelmann F. X., "Luftverschmutzung: Ein Problem für die Landwirtschaft?", in: Landwirtschaft und Umwelt", UFA-Revue Nr. 6, S. 41-44, 1988
- Städteverband, "Statistik der Schweizer Städte 1990", Stat. Jahrbuch des Schweiz. Städteverbandes, 52. Ausgabe, 1990
- Statistisches Bundesamt, "Statistisches Jahrbuch 1991 für die Bundesrepublik Deutschland", Verlag W. Kohlhammer
- UBA (Hrsg.), "Verkehrsbedingte Umweltbelastungen - Analysen, Prognosen, Ziele, Minderungen", Texte 26/91, Berlin 1991

