

Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich

Synthesebericht der gleichnamigen Studie über die
Berechnung der Externalitäten der Strom- und
Wärmeversorgung in Gebäuden in der Schweiz

Bundesamt für Konjunkturfragen



Bundesamt für Energiewirtschaft



Amt für Bundesbauten





Impressum

Herausgeber:

Bundesamt für Energiewirtschaft
Amt für Bundesbauten
Bundesamt für Konjunkturfragen

Auftragnehmer:

Arbeitsgemeinschaft INFRAS/PROGNOS:
Dr. E. Ledergerber, INFRAS AG, Zürich, Gesamtleitung
K. P. Masuhr, PROGNOS AG, Basel

AutorInnen:

INFRAS AG Walter Ott, Projektleiter
 Reto Dettli
 Barbara Jäggin
 David Häne
 Elmar Ledergerber
 Anita Sigg
 Saskia Willemse

PROGNOS AG Klaus P. Masuhr, Projektleiter
 Reinhard Schüssler
 Wolfgang Tautschnig
 Inge Weidig

ProjektbegleiterIn:

Bundesamt für Energiewirtschaft: L. Frey
Amt für Bundesbauten: M. Kraus
PACER-Programmleitung: I. Wuillemin, BfK

Gestaltung:

Education Design, Sepp Steibli, Bern

Copyright ©
Bundesamt für Konjunkturfragen
3003 Bern, August 1994

Auszugsweiser Nachdruck mit Quellenangabe erlaubt.
Zu beziehen bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale EDMZ
Bestell-Nr. 724.270 d

ISBN 3-905232-46-4
Form. 724.270 d 8.94 2000 U19625



Vorwort der auftraggebenden Ämter

Unter Externalitäten versteht man positive oder negative Auswirkungen, die bei der Produktion oder dem Konsum eines Gutes entstehen, jedoch nicht dem Verursacher zugute kommen resp. durch diesen getragen werden müssen. Gerade im Bereich der Energie- und Umweltpolitik spielen solche Externalitäten, und darunter insbesondere die externen Kosten des Energieverbrauches, eine wichtige Rolle. Beispielhaft können hier die Auswirkungen der feuerungsbedingten Luftverschmutzung auf die menschliche Gesundheit oder die Beeinträchtigung von Gewässern durch die Wasserkraftnutzung genannt werden.

In fast allen Bereichen der Bereitstellung und Nutzung von Energie entstehen solche externe Kosten. Je höher diese externen Kosten sind, desto mehr gibt der Preis der Energie ein falsches Signal: Er ist zu tief, zuviel Energie wird konsumiert. Diese Art der Internalisierung der externen Kosten, also das «Zuschlagen» der externen Kosten auf die herkömmlichen Preise, kann dazu führen, dass der Preis der Energie näher bei den wahren Kosten liegt und die Energie volkswirtschaftlich effizient und nicht zu Lasten der Umwelt eingesetzt wird.

Was im Grundsatz kaum umstritten ist, lässt im konkreten Fall jedoch verschiedene praktische Fragen offen. Wie hoch sind diese externen Kosten? Und wie können sie erfasst werden? An diesem Punkt knüpft die vorliegende Studie an. Sie gibt einen Überblick über die Bereiche, in denen wesentliche externe Kosten bei der Bereitstellung und Nutzung von Energie entstehen, und versucht, diese zu identifizieren und zu quantifizieren, zu monetarisieren und schliesslich auf die Energiepreise resp. auf die verbrauchte kWh Energie umzurechnen.

Im Rahmen der Herleitung dieser sogenannten kalkulatorischen Energiepreiszuschläge zeigt die vorliegende Studie auch die bestehenden Grenzen und Lücken auf. Den Auftraggebern war von Anfang an bewusst, dass das Vorhaben mit entsprechenden Problemen zu kämpfen haben würde. Nicht überall genügen die verfügbaren Daten, und nicht immer sind die naturwissenschaftlichen Zusammenhänge (bspw. Ursache-Wirkungsbeziehungen) vollends geklärt. Auch auf methodischer Ebene existieren ungelöste Probleme. Je nach Methode resultieren unterschiedliche Ergebnisse, je nach Art der externen Kosten und Datenlage ist die eine oder andere Methode zur Bewertung geeignet.

Dieser Unterschied zeigt sich insbesondere im Vergleich zwischen dem fossilen Energie- und dem Strombereich. Neben der unterschiedlichen Qualität der verfügbaren Daten spielt hier v.a. die unterschiedliche Problemlage eine Rolle: Handelt es sich im fossilen Bereich hauptsächlich um Schäden im «Normalbetrieb», die regelmässig und/oder relativ häufig auftreten, so stehen im Strombereich die Grossrisiken mit sehr kleinen Eintretenswahrscheinlichkeiten im Vordergrund. Dies wiederum wirkt sich auf die Vergleichbarkeit und Anwendung der Zuschläge aus: Die Zuschläge im Strombereich weisen weitgehend den Charakter eines «Risikozuschlages» auf, sind wegen der völlig anderen Berechnungsmethode nur bedingt mit den Zuschlägen aus dem fossilen Bereich vergleichbar, und müssen auch in der Anwendung anders betrachtet werden.

Die genannten Unsicherheiten kommen darin zum Ausdruck, dass die berechneten «kalkulatorischen Energiepreiszuschläge» in Bandbreiten an-



gegeben werden. Die Bandbreiten reflektieren noch vorhandene Mängel, aber auch unterschiedliche gesellschaftliche Wertschätzungen, welche nicht von Dritten festgelegt werden können. Nicht zu vergessen ist, dass im Rahmen dieser Untersuchung nicht alle Aspekte behandelt werden konnten. In diesem Sinne sind die errechneten Energiepreiszuschläge auch eher als Untergrenze zu verstehen.

Trotz diesen Problemen liefert die Studie wertvolle Erkenntnisse: Sie gibt einen Überblick über die Bereiche, in welchen externe Kosten entstehen; sie zeigt die Grössenordnung der externen Kosten, und sie verweist auf bestehende Wissenslücken. Mit ihrer Veröffentlichung sollen diese Erkenntnisse nach aussen getragen werden. Die Arbeit ist als Diskussionsbeitrag zur Problematik der externen Kosten zu verstehen, der sich damit der Kritik öffnet aber auch dazu dienen soll, dass offene Fragen vertieft diskutiert und vorhandene Lücken allmählich geschlossen werden. Die errechneten Energiepreiszuschläge können auch ganz konkret für Wirtschaftlichkeitsüberlegungen eingesetzt werden, zur Berücksichtigung der externen Kosten zwecks Berechnung der Rentabilität von Energiesparmassnahmen oder von erneuerbaren Energien. In diesem Fall stellen die Energiepreiszuschläge ein Entscheidungshilfsmittel dar, das in den unterschiedlichsten Bereichen zur Anwendung kommen kann und insbesondere dem umweltorientierten Investor eine grössere Kostentransparenz eröffnet. Die Anwendung der kalkulatorischen Energiepreiszuschläge ist selbstverständlich freiwillig, doch wird empfohlen, sie zumindest für Sensitivitätsüberlegungen bei Variantenvergleichen zu berücksichtigen.

Die vorliegende Arbeit wurde von einer Expertengruppe mit Vertretern der Energiewirtschaft, der Umweltschutzverbände, der Industrie, der Verwaltung und der Forschung begleitet. Die Mitglieder dieser Begleitgruppe haben den Verlauf der Untersuchung kritisch mitverfolgt und mit zahlreichen Anregungen zur Verbesserung der Arbeit beigetragen. Die Auftraggeber danken an dieser Stelle den Mitgliedern der Begleitgruppe für ihr grosses Engagement. Selbstverständlich liegt die Verantwortung für den Inhalt der Untersuchung ausschliesslich bei den Auftragnehmern.

Bundesamt für Energiewirtschaft
Amt für Bundesbauten
Bundesamt für Konjunkturfragen



Vorwort der Begleitgruppe

Die vorliegende Studie wurde durch eine Gruppe von Fachleuten begleitet. Ihre Aufgabe bestand darin, die Auftragnehmer zu beraten und gewissermassen als erstes Publikum auf die Entwürfe der Studie zu reagieren, die verwendeten Daten, Methoden und Argumentationen zu hinterfragen, um damit mitzuhelfen, die Qualität der Studie zu erhöhen und ihre Verständlichkeit zu verbessern. Für den Inhalt der Studie sind aber ausschliesslich die Autoren verantwortlich.

Die Begleitgruppenmitglieder haben mit Interesse und Engagement an den Diskussionen der verschiedenen Phasen des Projektes teilgenommen. Es handelt sich um einen vielschichtigen Forschungsgegenstand, den die Studiennehmer kompetent bearbeitet haben. Allen Teilnehmern war es ein Anliegen, Mittel und Wege aufzuzeigen, Umweltbelastungen effizient zu vermindern.

Die Begleitgruppe misst dem umweltverträglichen Verhalten der Menschen eine zentrale Bedeutung bei. Dazu braucht es nicht nur Einsicht, sondern auch wirtschaftliche Anreize. Die Mitglieder der Begleitgruppe haben auch erkannt, dass der Umsatz an technischer Energie für einen wesentlichen Anteil der lokalen und globalen Umweltbelastungen verantwortlich ist.

Dies heisst aber nicht, dass die Mitglieder der Begleitgruppe den verschiedenen Umweltproblemen den gleichen Stellenwert im Vergleich mit den übrigen Problemen der Menschheit zuweisen. Das Ausmass der Bedrohung durch Umweltprobleme und als Folge davon die Dringlichkeit von tiefgreifenden Veränderungen im Umweltverhalten werden verschieden eingeschätzt, was notwendigerweise zu unterschiedlichen Beurteilungen der Resultate dieser Studie führt. Die Monetarisierung der Umweltbelastungen bedeutet ja letztlich nichts anderes als ein quantitativer Vergleich der Umweltgüter mit andern monetarisierbaren Gütern.

Externe Kosten können nicht losgelöst von subjektiven Einschätzungen bestimmt werden. Im Land der Gehörlosen ist Lärm keine Umweltbeeinträchtigung und hat keine externen Kosten. Bei der Bestimmung externer Kosten versucht man, die Zahlungsbereitschaft der Bevölkerung für Umweltgüter zu ermitteln. Wie bei der Bestimmung von Preisen auf funktionsfähigen Märkten, handelt es sich dabei um ein möglichst objektives Verfahren zur Bestimmung von durchaus subjektiven Präferenzen.

Der Bericht als Ganzes ist belastbar; er ist sorgfältig und umsichtig formuliert. Es waren aber nicht in allen Fällen Daten und Methoden verfügbar, welche über alle Zweifel erhaben sind. Insbesondere gegenüber der Behandlung potentieller Kernkraftwerkunfälle und des Treibhauseffektes können Vorbehalte angebracht werden. Daraus folgt, dass die quantitativen Resultate der Studie nicht gleich belastbar sind, wie die Studie als Ganzes. Diese Einschätzung teilt die Begleitgruppe mit den Auftraggebern und auch mit den Verfassern. Die möglichst sorgfältige Identifikation der Umweltbelastungen stellt den ersten Schritt der Problemanalyse dar; hier treten schon erhebliche Unsicherheiten auf. Die Unsicherheiten vergrössern sich, wenn die Umweltbelastungen quantifiziert und in einem dritten Schritt in Geldeinheiten ausgedrückt werden müssen. Dies unter anderem deshalb, weil die quantitative Wertschätzung der Umwelt seitens der Bevölkerung nur lückenhaft bekannt ist.



0 Vorwort der Begleitgruppe

Alle Begleitgruppenmitglieder erachten aber den Versuch der Monetarisierung externer Kosten als sinnvoll. Die Geister scheiden sich bei der Frage, welche praktische Relevanz den erarbeiteten Ergebnissen zukommt.

Für Versuche, die Monetarisierung und damit die Bewertung der externen Kosten wo möglich in verschiedener Weise in die Praxis umzusetzen, wird geltend gemacht, dass

- die Internalisierung externer Kosten als Voraussetzung für das optimale Funktionieren einer Marktwirtschaft ökonomisch unbestritten sei,
- der Verzicht auf eine Monetarisierung der externen Kosten in der praktischen Auswirkung einer Bewertung mit Null Franken gleichkomme,
- die ausgewiesenen Zuschläge häufig an der Untergrenze der vermuteten Bandbreite der externen Kosten lägen («Spitze des Eisbergs»),
- die Monetarisierung externer Kosten nicht mit einem Vorschlag zur Anwendung in einer bestimmten Form verwechselt werden dürfe,
- praktische Anwendungsversuche mithelfen würden, Präferenzen in der Bevölkerung festzustellen, womit die Bestimmung zuverlässigerer Werte für die externen Kosten erleichtert würde und dass
- aufgrund des sich abzeichnenden politischen Konsenses, im Umweltschutz vermehrt marktwirtschaftliche Instrumente einzusetzen, der Versuch der Monetarisierung externer Kosten unbedingt gemacht und in Zukunft vertieft werden müsse.

Gegen solche Versuche der praktischen Umsetzung wird hingegen vorgebracht,

- dass die Identifikation der Umweltbelastungen noch zu lückenhaft sei, um darauf eine seriöse Monetarisierung aufbauen zu können. Ein krasses Beispiel der ungenügenden präzisen Identifikation liege im Fall des Treibhauseffektes vor.
- Zudem gäbe es zwar eine Reihe von Umweltbelastungen, deren Monetarisierung relativ unproblematisch sei (z.B. Korrosionsschäden oder Einbussen an Landwirtschaftserträgen durch Luftverschmutzung), dass aber die Monetarisierung vieler Umweltbelastungen
 - nicht objektiv zu leisten sei (wieviel Wert hat ein Menschenleben?),
 - auf unüberprüfbaren Einschätzungen beruhe (wie gross ist der negative Wert der blossen Gefahr eines Kernkraftwerkunfalls?) und
 - die Bewertung von Umweltzerstörung und Gefahren durch die Bevölkerung nicht bekannt sei.

Umsetzungsversuche des theoretischen Konzepts der externen Kosten könnten deshalb falsche Signale aussenden.

Was die Verwendung der kalkulatorischen Energiepreiszuschläge (KEPZ) betrifft, ist sich die Begleitgruppe einig, dass die ermittelten Werte nicht direkt als Grundlage für eine Umweltsteuer zu verwenden sind: Insbesondere bei den ausgewiesenen «Schadenkosten des Treibhauseffektes» (grosse Bandbreite der Schätzungen) und bei der Berücksichtigung des Risikos von Kernschmelzunfällen (äusserst seltenes Ereignis mit riesigem Schadenpotential) ist grosse Vorsicht geboten.



Die Verwendung der kalkulatorischen Energiepreiszuschläge in erweiterten Wirtschaftlichkeitsrechnungen ist dann weitgehend unbedenklich, wenn es sich um die wirtschaftliche Beurteilung von Energiesparmassnahmen handelt. Für den Vergleich verschiedener Energieträger sollten jedoch die vorher gemachten Einschränkungen berücksichtigt werden.

Auf jeden Fall können KEPZ im Rahmen von Sensitivitätsanalysen verwendet werden.

Die Begleitgruppe ist sich abschliessend einig, dass es sich beim Thema der Studie um ein wichtiges, aber auch schwieriges Forschungsgebiet handelt und dass die Studie einen wertvollen Beitrag, auf praxisnaher Stufe, zur Identifikation, Quantifizierung und Monetarisierung externer Kosten leistet.

Die Begleitgruppe setzte sich aus folgenden Personen zusammen:

- einem Vertreter der Privatwirtschaft:
 - Herrn F. W. Bosshard, Unotec AG, Hurden,
- zwei Personen mit speziellen Kenntnissen bezüglich bestimmter Energieträger:
 - Herrn Dr. H. Baumberger, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Baden
und
 - Herrn Dr. A. Kilchmann, Schweiz. Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich.
- einem Fachmann aus den Reihen der Umweltorganisationen:
 - Herrn Th. Flüeler, Umweltberater, Hausen bei Brugg,
- einer Wissenschaftlerin und einem Wissenschaftler:
 - Frau Prof. H. Schelbert, Universität Zürich und
 - Herrn Prof. D. Spreng, ETH Zürich (Vorsitz),
- drei Delegierten der Auftraggeber:
 - Herrn Dr. W. Baumgartner, IBFG, Zürich, als Delegierter des Bundesamtes für Energiewirtschaft (Protokoll und Organisation),
 - Herrn M. Kraus, Amt für Bundesbauten, Bern
und
 - Frau I. Wuillemin, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern.



Begriffe, Abkürzungen

AFB	Amt für Bundesbauten
Backstop-Technologie	Ersatztechnologie, welche bei zur Neige gehenden fossilen Ressourcen diese sukzessive ersetzen kann
BAU	B usiness A s U sual (unbeeinflusste Entwicklung)
BEW	Bundesamt für Energiewirtschaft
BFK	Bundesamt für Konjunkturfragen
Bilgenöl	Ölverluste in den Kielraum (Bilge) des Schiffes, wo das Öl sich mit dem Bilgenwasser vermischt
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
CH ₄	Methangas
CO, CO ₂	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	G lobal W arming P otential; Treibhauspotential eines Treibhausgases
H ⁺	Positiv geladenes Werkstoff-Ion (Proton)
HEL, HM/S	Heizöl extraleicht; Heizöl mittel/schwer
ICRP	I nternational C ommission on R adiological P rotection
IPCC	I nternational P anel on C limate C hange
K	Gesamtkosten [Fr.; Fr./a]
KEPZ	Kalkulatorische Energiepreiszuschläge
KW	Kraftwerk
LNG	L iquefied N atural G as, verflüssigtes Erdgas
LPG	L iquefied P etroleum G as; verflüssigtes Propan/Butan
lt	Liter
Mg	Magnesium
Nm ³	Normal-Kubikmeter Gas
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
NM VOC/NMHC	Flüchtige Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe
NO _x , NO ₂ , N ₂ O	Stickstoffoxide; Stickstoffdioxid; Lachgas
PACER	P rogramme d' A ction pour les E nergies R enouvelables, Aktionsprogramm für erneuerbare Energien des BFK
Personen-Sv	Personen-Sievert: Mass für die biologisch wirksame Kollektivdosis radioaktiver Strahlung



ppb	P arts p er B illion: (1 : 10 ⁹)
ppm	P arts p er M illion: (1 : 10 ⁶)
ppt	P arts p er T rillion: (1 : 10 ¹²)
Quellterm	Bei einem KKW-Grossunfall freigesetzte Menge radio- aktiven Materials
Sm ³	(Holz)-Schnitzelkubikmeter
SO ₂	Schwefeldioxid
TOE	Tonnen Erdöläquivalent
Trsp	Transport
UCPTE	U nion pour la c oordination de la p roduction et du t ransport de l' é lectricité (B, BRD, F, GR, JU, LU, NL, Oe, P, CH, SP)
ø	durchschnittlich
η	Wirkungsgrad



Inhaltsverzeichnis

Vorwort der auftraggebenden Ämter	3
Vorwort der Begleitgruppe	5
Begriffe, Abkürzungen	8
1 Ausgangslage, Auftrag, Vorgehen	15
1.1 Ausgangslage und Auftrag	15
1.2 Projektorganisation	17
2 Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge in der Strom- und Wärmeversorgung	19
2.1 Was sind externe Kosten?	19
2.2 Warum kalkulatorische Energiepreiszuschläge?	25
3 Bereichsweise Ermittlung der externen Kosten der Strom- und Wärmeversorgung	29
3.1 Die verschiedenen Dimensionen der externen Effekte	29
3.2 Methodische Probleme bei der Erfassung von Externalitäten	35
3.2.1 Grenzkosten versus Durchschnittskosten	35
3.2.2 Konzepte zur Bewertung externer Kosten	35
3.2.3 Externe Kosten versus externe Nutzen?	40
3.3 Kosten immissionsbedingter Waldschäden	43
3.3.1 Waldschäden in der Schweiz	43
3.3.2 Kosten der Waldschäden in der Schweiz	44
3.3.3 Fazit	47
3.4 Kosten luftschadstoffbedingter Produktionsausfälle in der Landwirtschaft	49
3.4.1 Produktionsausfälle durch Luftschadstoffe	49
3.4.2 Monetäre Kosten der ozonbedingten Ertragsausfälle in der Landwirtschaft	50
3.4.3 Zusammenfassende Bemerkungen	51



3.5	Kosten luftschadstoffbedingter Gesundheitsschäden in der Schweiz	53
3.5.1	Luftschadstoffbedingte Gesundheitsschäden in der Schweiz	53
3.5.2	Kosten immissionsbedingter Gesundheitsschäden	53
3.5.3	Zusammenfassende Bemerkungen	56
3.6	Luftschadstoffbedingte Gebäudeschäden	57
3.6.1	Immissionen und Schadensmechanismen im Gebäudebereich	57
3.6.2	Kosten der immissionsbedingten Gebäudeschäden in der Schweiz	58
3.6.3	Zusammenfassende Bemerkungen	61
3.7	Externe Kosten von Transport, Lagerung und Raffination von Öl und Gas	63
3.7.1	Erfasste Aktivitäten und Umweltbelastungen	63
3.7.2	Externalitäten bei Transport, Lagerung und Raffination von Erdöl	63
3.7.3	Externalitäten bei Transport und Lagerung von Erdgas	65
3.7.4	Zusammenfassende Bemerkungen	67
3.8	Externe Kosten der Nutzung der fossilen Rohstoffe: Treibhauseffekt und intertemporale Verteilungsgerechtigkeit	69
3.8.1	Globale Externalitäten bei der Nutzung fossiler Rohstoffe	69
3.8.2	Die Treibhausgasemissionen als Externalität	70
3.8.3	Intertemporale Verteilungsgerechtigkeit bei der Nutzung fossiler Rohstoffe im Strom- und Wärmebereich	81
3.9	Externe Kosten der Kernenergienutzung	83
3.9.1	Die externen Kosten des Normalbetriebs	83
3.9.2	Externe Kosten von Kernschmelzunfällen	86
3.10	Externe Kosten der Wasserkraftnutzung	97
3.10.1	Die externen Kosten des Normalbetriebs	97
3.10.2	Die externen Kosten von Stör- bzw. Grossunfällen	102
3.10.3	Zusammenfassende Bewertung	104
3.11	Externe Kosten der Übertragung und Verteilung von Elektrizität	105
3.12	Öffentliche Leistungen und Externalitäten	107
3.12.1	Übersicht über die wichtigsten staatlichen Ausgabenbereiche bei der Strom- und Wärmeversorgung	107
3.12.2	Bewertung der öffentlichen Leistungen im Strom- und Wärmebereich	107
3.13	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse	111
3.14	Zusammenfassende Ergebnisübersicht	115



4	Die Ermittlung von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen und von Risikozuschlägen	119
4.1	Zuordnung der externen Kosten der Luftverschmutzung auf die verursachenden Emissionen der Wärmeversorgung	121
4.1.1	Grenzschadenskosten als Grundlage für die Ableitung von Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen	123
4.1.2	Relative Schädlichkeit der Luftschadstoffe	124
4.1.3	Räumliche und zeitliche Differenzierung der Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschläge	124
4.1.4	Emissionszuschläge (EMZ)	125
4.2	Ausgewählte Energiesysteme – Emissionsfaktoren	127
4.3	Kalkulatorische Energiepreiszuschläge und Risikozuschläge	129
4.3.1	Kalkulatorische Energiepreiszuschläge	129
4.3.2	Risikozuschläge zur Berücksichtigung der Unfallrisiken in der Elektrizitätsversorgung	135
4.3.3	Zusammenfassende Schlussbemerkungen	136
4.4	Anwendung der kalkulatorischen Energiepreiszuschläge	139
4.4.1	Ausgewählte Dämmmaterialien, Fenster und alternative Produktionsanlagen	139
4.4.2	Erfassung des Energieverbrauchs und der Emissionen	139
4.4.3	Emissionen und Energieverbrauch	141
4.4.4	Externe Kosten	142
4.4.5	Auswirkungen der externen Kosten auf die Wirtschaftlichkeit von Energiesparmassnahmen	144
Literaturverzeichnis		147
Tabellen- und Figurenverzeichnis		153
Publikationen und Videos des Impulsprogrammes PACER		159



1 Ausgangslage, Auftrag, Vorgehen

1.1 Ausgangslage und Auftrag

Nach den Ölpreisschocks 1973 und 1979 sind die fossilen Energieträger (ausser Kohle) und die Elektrizität **real** laufend **billiger** geworden und liegen teilweise auf einem noch nie erreichten tiefen Preisniveau. Auf der anderen Seite hat der Endenergieverbrauch in der Schweiz in den letzten 20 Jahren stärker zugenommen als das Bruttoinlandprodukt – ganz im Gegensatz zur Entwicklung in den meisten übrigen hochentwickelten Staaten. Dieses ernüchternde Ergebnis beunruhigt nicht mehr nur wegen den langfristigen Perspektiven der Versorgung mit fossilen Energieträgern. In den vergangenen Jahren rückten auch die mit dem Energieverbrauch verbundenen Umweltbelastungen und Klimarisiken ins Zentrum des energiepolitischen Interesses.

Die traditionelle Energie- und Umweltpolitik mittels Geboten und Verboten stösst zusehends an ihre Grenzen und weist zunehmende Vollzugsdefizite auf. Deshalb wird vermehrt der Einsatz marktwirtschaftlicher Instrumente in der Energie- und Umweltpolitik postuliert. Kombiniert mit neuen Rahmenbedingungen könnten diese einen Beitrag zur Integration von Wirtschafts- und Umweltpolitik im Sinne eines qualitativen, nachhaltigen Wachstums leisten. Zur Zeit werden in der Schweiz und in der EG diverse Modelle für CO₂- und/oder Energielenkungsabgaben geprüft. Mit diesen Abgaben wird eine Reduktion des Energieverbrauchs bzw. der damit verbundenen Emissionen anvisiert.

1990 lancierte das Bundesamt für Konjunkturfragen das Aktionsprogramm **Bau und Energie** mit den Impulsprogrammen BAU (Erhaltung und Erneuerung), RAVEL (Rationelle Verwendung von Elektrizität) und PACER (Erneuerbare Energien) zur Förderung des qualitativen, nachhaltigen Wachstums. Im Umfeld der Impulsprogramme PACER und RAVEL wurde die Frage aufgeworfen, wieweit eine **erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung**, in welcher auch Kosten der Umweltbelastung mitberücksichtigt werden, die Konkurrenzfähigkeit von alternativen Energien und von Energiesparen verbessern würde. Die Grundlage für eine erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung sollen sogenannte **kalkulatorische Energiepreiszuschläge (KEPZ)** liefern. **KEPZ widerspiegeln die monetarisierbaren externen Kosten, die beim Verbrauch von Energie in einem Energiesystem verursacht werden.** Die Erweiterung der Wirtschaftlichkeitsrechnung zielt darauf ab, dass möglichst dem gesamten Ressourcenverbrauch im Wirtschaftlichkeitskalkül Rechnung getragen wird, also auch dem Verbrauch von Umweltressourcen, der Belastung der Gesellschaft mit Risiken, etc. Diese Belastungen und Ressourcenverbräuche werden als externe Effekte bezeichnet, weil sie nicht in die individuellen Entscheidungen der Energiekonsumenten einfließen – also extern sind. Mit kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen sollen die Kosten dieser externen Effekte soweit möglich internalisiert werden, womit sie zu einem Faktor des individuellen Wirtschaftlichkeitskalküls werden.

Während die Abgabenmodelle eher darauf beruhen, mit einem bestimmten Abgabesatz ein im voraus definiertes Umweltziel anzuvisieren (Preis-Standard-Ansatz), geht die erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung vom Ziel aus, über KEPZ die externen Kosten zu integrieren und so zu einem effizienteren Einsatz der Umweltressourcen und zu geringeren Umweltbelastungen zu kommen.



1 Ausgangslage, Auftrag, Vorgehen

In einer Vorstudie (INFRAS, EWI, 1990¹) wurde abgeklärt, ob aufgrund der vorliegenden Kenntnisse hinreichend abgestützte KEPZ für die Energiesysteme im Strom- und Wärmebereich abgeschätzt werden können. Dabei zeigte sich, dass in der Praxis die theoretisch optimalen KEPZ (wo Grenzschadenskosten = Grenzvermeidungskosten) nicht bestimmt werden können. Aufgrund der verfügbaren Grundlagen können aber quantitative Hinweise auf die Grössenordnung von KEPZ erarbeitet werden, welche gegenüber heute zu einem deutlich verbesserten Einsatz der Energie- und Umweltressourcen führen.

Darauf wurde die Arbeitsgemeinschaft INFRAS/PROGNOS vom BEW, BFK und vom AFB beauftragt, die externen Effekte der Strom- und Wärmeversorgung in den folgenden Bereichen zu quantifizieren und zu monetarisieren:

- Schäden der Luftschadstoffbelastung: Waldschäden, Gesundheitsschäden, Produktionsausfälle in der Landwirtschaft, Gebäudeschäden.
- Öffentliche Leistungen für die Strom- und Wärmeversorgung.
- Schäden der Boden- und Gewässerverschmutzung sowie von Unfallrisiken bei Transport, Raffination und Lagerung von Öl und Gas.
- Schäden von CO₂-bedingten Klimaveränderungen (Treibhauseffekt).
- Intertemporale Effekte infolge des Konsums nichterneuerbarer Ressourcen zu Lasten künftiger Generationen.
- Externe Effekte der Kernenergienutzung.
- Externe Effekte der Wasserkraftnutzung.
- Externe Effekte von Stromübertragung und Verteilung.

Aus den resultierenden externen Kosten sollen sogenannte **kalkulatorische Energiepreiszuschläge (KEPZ)** pro Energieträger bzw. pro Energiesystem im Strom- und Wärmebereich abgeleitet werden.

Diese kalkulatorischen Energiepreiszuschläge könnten für die folgenden Zwecke verwendet werden:

- Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung von öffentlichen und privaten Bauträgern: Die KEPZ dienen dabei einer teilweisen Internalisierung externer Effekte im Sinne von sogenannten Schattenpreisen (Energiepreise, die auch externe Kosten enthalten).
- Informationen zur Höhe der externen Kosten bzw. der Umweltkosten: Für die Beurteilung von Kosten und Nutzen von Umweltmassnahmen, für Internalisierungsstrategien, für die Beurteilung von Abgabenmodellen etc.



1.2 Projektorganisation

Die folgende Tabelle illustriert die Arbeitsaufteilung und die Arbeitsschritte:

INFRAS	PROGNOS
Teilbericht 1 (TB1): Externe Kosten der Luftverschmutzung – Waldschäden – Gesundheitsschäden – Landwirtschaftliche Produktionsausfälle – Gebäudeschäden Öffentliche Leistungen als Externalität	TB2: Externe Kosten der Kernenergienutzung – Normalbetrieb – Störfälle
TB3: Externe Kosten der fossilen Ressourcennutzung – Verschmutzungen/Unfälle bei Transport, Raffination und Lagerung von Öl und Gas – Kosten des Treibhauseffektes – Intertemporale Verteilungsgerechtigkeit als Externalität	TB4, 5: Externe Kosten der Wasserkraftnutzung (TB4) – Speicherkraftwerke – Laufkraftwerke Übertragung und Verteilung (TB5)
TB6: Anwendung von kalkulatorischen Energiepreisschlägen auf – Dämmaterialien – Fenster – Solarzellen, Sonnenkollektoren Auswirkungen von kalkulatorischen Energiepreisschlägen auf Investitionsentscheide	
SB: Synthesebericht	

Tabelle 1.1
Arbeitsaufteilung und Teilberichte (TB).
Teilberichte 1–6 sind Materialienbände zum Schlussbericht (SB)

Zu den Zwischenresultaten und Projektteilberichten wurden von verschiedenen Seiten Stellungnahmen und Anregungen abgegeben:

- Projektbegleitgruppe mit Vertretern und Vertreterinnen der Ämter, der Energiewirtschaft, der Wissenschaft, der Wirtschaft und der Umwelt.
- Projektleitung des Impulsprogramms PACER.
- Das Paul-Scherrer-Institut (Labor für Umwelt- und Systemanalysen) zu den Externalitäten der Wärmeversorgung.
- Die Hauptabteilung Sicherheit von Kernenergieanlagen und das Gutachten von A. F. Fritzsche und das Paul-Scherrer-Institut zur Kernenergie.
- Diverse Fachleute aus der Verwaltung, von Hochschulen, von RAVEL, Beratungsfirmen etc.

Diese Feedbacks lieferten wertvolle Informationen und Anregungen. Sie wurden soweit wie möglich in den Schlussberichten berücksichtigt. **Die Verantwortung für die ausgewiesenen Resultate liegt jedoch alleine bei der Arbeitsgemeinschaft INFRAS/ PROGNOS.**



2 Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge in der Strom- und Wärmeversorgung

2.1 Was sind externe Kosten?

Die Externalitäten der Strom- und Wärmeversorgung sind ein äusserst komplexes und vielschichtiges Problem. Generell ist jede Aktivität im Bereich der **Energieerzeugung, Energiebereitstellung und -nutzung mit einem Verbrauch an materiellen und immateriellen Gütern verbunden**. In der gesellschaftlichen Organisation des Austausches von Aktivitäten wird dieser Güterverbrauch – im Idealfall – klar identifiziert, bewertet und sodann dem individuellen und gesellschaftlichen Nutzen der Leistungserbringung durch das Energieversorgungssystem gegenübergestellt. Die entscheidenden Bewertungskriterien sind hier Preise und Kosten.

Seit längerem ist nun bekannt, dass dieser Bewertungsprozess im Energiesektor nicht funktioniert. Unser Energiesystem verursacht in fast allen Lebensbereichen Kosten, die in keiner betriebswirtschaftlichen Rechnung auftauchen: Durch den Energieverbrauch in allen Bereichen der Volkswirtschaft, in den Haushalten, in den Industrie- und Dienstleistungsbranchen und im Verkehr wird unsere Luft mit Schadstoffen belastet, es treten Gesundheitsschäden auf. Fauna und Flora werden zunehmend gefährdet. Die Risiken der Kernenergienutzung führen zu heftigen politischen und gesellschaftlichen Konfrontationen. Der energiebedingte Ausstoss von Gasen wie Kohlendioxid, Stickoxide, Methan usw. bedroht unser Weltklima. Die hierdurch entstehenden Kosten müssen aber **nicht vom Verursacher, letztlich also dem Energiekonsumenten getragen werden**: Sie werden der Allgemeinheit aufgebürdet und sind damit erfolgreich aus der betriebswirtschaftlichen Rechnung der Lieferanten und Konsumenten «externalisiert».

Dieser Sachverhalt erscheint auf den ersten Blick einfach und lapidar. Dahinter verbergen sich jedoch zahlreiche Komplikationen. Vor allem sind die Externalitäten der Energieversorgung kein eindimensionales Gebilde. Sie sind vielmehr das Ergebnis eines kaum entwirrbaren Netzwerks von verursachenden Faktoren, Schadenswirkungen, synergetischen Effekten, Akkumulationsprozessen und räumlich diffusen Verteilungen, die eine genaue Bestimmung ausserordentlich schwer machen. Schon wenige **Fallbeispiele** können diese Komplikationen verdeutlichen:

In der Öffentlichkeit spielt die Diskussion um die Ursachen der Waldschäden eine grosse Rolle. Obwohl ein endgültiger Nachweis noch nicht geführt werden konnte, gilt inzwischen als gesichert, dass ein Zusammenhang zwischen der Emission von Schwefeldioxid und Stickoxiden (im Zusammenwirken mit Ozon, Schwermetallanreicherungen sowie anderen Stressoren) und der Schädigung der Wälder besteht: Diese emissionsbedingten Schäden, die im wesentlichen auf den Energieverbrauch zurückzuführen sind, konnten recht früh als externe Kosten der Energienutzung identifiziert werden.

Die **Schädigung der Wälder** beeinträchtigt direkt die Wohlfahrt einer grossen Zahl von Menschen:

- Konkret verlieren z.B. Waldbesitzer einen Teil ihrer Erwerbs- und Wohlstandsgrundlagen (unmittelbarer «ökonomischer» Schaden).
- Die Schutzfunktion des Waldes kann verloren gehen.



2 Externe Kosten der Strom- und Wärmeversorgung

- Etwas weniger konkret: Es wird die Möglichkeit, im Wald Erholung zu suchen, zu wandern, Bäume und Waldtiere zu «erleben», beeinträchtigt.
- Schliesslich kann sich die Landschafts- und Vegetationsstruktur der Region durch die geschädigten Waldstriche verändern, mit Auswirkungen nicht nur auf den Erlebniswert, sondern auch auf die ökologische und klimatische Qualität der betroffenen Gebiete.

Typisch für dieses Beispiel ist, dass zumindestens einige unmittelbare Schäden deutlich beobachtbar sind und dass sich einigermaßen klare Ursachen-Wirkungsbeziehungen zu den energiebedingten Schadstoffemissionen feststellen lassen. Aber bereits an diesem Beispiel wird deutlich, dass neben dem eher materiellen «Kernschaden» eine ganze Reihe von **immateriellen Beeinträchtigungen** auftreten, die schwer in Geldeinheiten zu bewerten sind. Zudem ist bereits in diesem relativ einfachen Beispiel erkennbar, dass Schädigungen nicht allein auf eine Ursache bzw. einen Schadstoff zurückzuführen sind, sondern dass Schädigungen erst in einer **synergetischen Wechselwirkung diverser Einflussfaktoren auftreten**, die eine eindeutige kausale Zuordnung der Schäden nicht erlauben.

Anders gelagert ist der Fall in einem zweiten Beispiel, den externen Effekten der **Kernenergienutzung**. Sieht man einmal von den radioaktiven Emissionen des «Normalbetriebs» ab, so geht die kontroverse politische Diskussion weniger von bereits existierenden Beeinträchtigungen der materiellen Lebensqualität aus. Sie konzentriert sich vielmehr auf die Problematik des **Risikos** von verheerenden Katastrophen durch grosse Reaktorunfälle oder Sabotageakte, die letzten Endes von der Gesellschaft getragen werden müssten (Externalität). Im Vordergrund steht das «Restrisiko» als multiplikative Verknüpfung eines unermesslichen Schadens zum Beispiel durch einen grossen Kernschmelzunfall mit einer als sehr klein geschätzten Eintrittswahrscheinlichkeit.

Die Bewertung

- des Risikos einer seltenen, aber in ihren Auswirkungen nicht überschaubaren Atomkatastrophe oder
- der materiellen Folgen einer solchen Katastrophe

lässt sich nicht mehr so eindeutig vornehmen wie im Beispiel 1. Sie verlangt gesellschaftliche Klärungsprozesse ungleich differenzierterer Art, die eng mit der Frage zusammenhängen, welches (unfreiwillige) Risiko eine Gesellschaft oder Teile der Gesellschaft überhaupt in Kauf zu nehmen bereit ist, bzw. was sie zu zahlen bereit wäre, dieses Risiko zu mindern.

Das dritte Beispiel für die externen Effekte der Energieversorgung ist die drohende **Klimakatastrophe**. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe (in Kraftwerken, Haushalten, Industrieanlagen oder Automobilen) führt zur Emission ungiftigen Kohlendioxids. Die zunehmende Anreicherung von Kohlendioxid in der Atmosphäre behindert zusammen mit anderen Spurengasen den Austritt von Wärmestrahlung aus der Erdatmosphäre und wirft damit grosse Teile dieser Wärmestrahlung wieder auf die Erde zurück. Klimamodelle zeigen hier eine rasche Erwärmung der terrestrischen Durchschnittstemperaturen mit bislang unabsehbaren Folgen für Ökosysteme und Menschen. Empirisch lässt sich in den letzten 150 Jahren ein zunehmender Anstieg der Erdtemperaturen feststellen.

Nach den Modellrechnungen kann schon eine globale Erwärmung um wenige Grade innerhalb der nächsten 50–70 Jahren zu katastrophalen Folgen führen. Der Meeresspiegel steigt, die Konsequenzen wären Über-



schwemmungen und Völkerwanderungen unabsehbaren Ausmasses. Gleichzeitig könnten subtropische Gebiete versteppen, die weltweiten Armutszonen dramatisch zunehmen und die Ausprägung von Kalt- und Warmfronten in der Atmosphäre mit anormalen Sturm- und Unwetteraktivitäten verstärkt werden.

Vergleicht man diese Art der externen Effekte mit den vorher diskutierten Beispielen, so zeigen sich auch hier grundsätzliche Unterschiede. Im Gegensatz zum Problem der Kernenergie geht es bei Fragen der Klimakatastrophe nicht in erster Linie um einen gesellschaftlichen Diskussionsprozess der Bewertung externer Effekte. Sieht man von Sondervoten (etwa den möglichen positiven Effekten auf die landwirtschaftliche Nutzung Sibiriens) ab, so besteht ein breiter Konsens darüber, dass die Folgen der Klimakatastrophe ein gigantisches Schadenspotential beinhalten und deshalb im Sinne des Vorsorgeprinzips soweit wie möglich zu **vermeiden** sind.

Ein entscheidendes Problem ist die Verzögerung zwischen Ursache (z.B. CO₂-Emission und Erderwärmung) und den Wirkungen. Zudem ist noch wenig gesichert, in welchen Regionen der Erde sich die Schadenswirkungen entfalten werden. Zeiträume von vielen Jahrzehnten vergehen zwischen den verursachenden Emissionen und dem Auftreten der Folgewirkungen. Mögliche Gegenmassnahmen zeigen auch erst über lange Fristen Wirkungen. Es ist also ein sofortiger und drastischer Handlungsbedarf gegeben, ohne dass die entsprechenden Entscheidungsgrundlagen gesichert erscheinen, und ohne dass ein fühlbarer Problemdruck in der Form von aktuell spürbaren Klimaveränderungen und Schäden besteht. Hinzu kommt die Komplikation, dass das Klimaproblem nur im internationalen Kontext gelöst werden kann und sich daher sofort ernste Fragen der Verteilungsgerechtigkeit zwischen den Regionen unserer Erde stellen. Das deprimierende Feilschen auf der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro zeigt die Dimensionen des Problems.

In Übereinstimmung mit den anderen Beispielen werden auch hier Phänomene der Synergien und Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichsten Elementen materieller und immaterieller Wertsysteme sichtbar. Hinzu kommt die Unsicherheit bei der räumlichen Trennung von Verursachern (v.a. die Industrieländer) und Geschädigten.

Nimmt man allein diese drei Beispiele, so wird deutlich, dass die Auseinandersetzung mit den externen Effekten der Energieversorgung Fragen ganz unterschiedlicher Art aufwirft. Die Vielschichtigkeit der Probleme lässt sich mit den drei Stichworten

- Identifizierung externer Effekte
- Quantifizierung dieser Effekte
- Monetarisierung und Umsetzung in Kostenkategorien

umreissen.

Die Vergangenheit hat gezeigt, dass viele externe Effekte über lange Zeit gar nicht wahrgenommen worden sind. Geht man von einer Struktur unterschiedlicher externer Effekte in der Energieversorgung aus, die sich vor allem in der Art und Weise ihrer Entstehung unterscheiden, so zeigt sich, dass bereits die **Wahrnehmung der Existenz externer Effekte, ihre Identifizierung**, ein oftmals schwer lösbarer erster Schritt ist. Denn es ist davon auszugehen,

- dass aufgrund des sehr komplexen Zusammenwirkens von verschiedensten Einflussfaktoren die Menge der tatsächlichen externen Effekte der Energieversorgung wesentlich grösser ist als diejenige der zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannten;



2 Externe Kosten der Strom- und Wärmeversorgung

- dass sich diese Menge im Laufe der Zeit durch das Auftreten anderer (an sich unschädlicher und mit dem Energiesystem nicht zusammenhängender) Faktoren ständig verändern kann und
- dass aufgrund der Existenz kritischer Schwellenwerte und systemimmanenter Selbststeuerungsbedingungen (im ökologischen wie im sozialen System) Veränderungen in den Wirkungslinien auftreten, die die Einschätzung als potentielle externe Effekte ebenso verändern können wie ihre Beurteilung (z.B. als schädlich oder nicht).

Der Hinweis auf Synergieeffekte und Kumulationsvorgänge verdeutlicht bereits die Schwierigkeiten, die bei der notwendigen **Analyse der Ursachen-Wirkungsketten** auftreten können. Die **Quantifizierung der externen Effekte**, das heisst hier die technisch-physikalische Beschreibung der relevanten Vorgänge, ist in vielen Fällen noch nicht gelungen oder sie ist zumindest Gegenstand heftiger wissenschaftlicher Auseinandersetzungen und wird es infolge der eben dargestellten Komplexität und Vielschichtigkeit auch in Zukunft mindestens teilweise bleiben.

Die Schwierigkeiten lassen sich schon an dem oben aufgeführten relativ einfachen Beispiel der Kontaminierung durch Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen verdeutlichen: Im Prinzip liegen hier zum Beispiel in bezug auf die auftretenden Waldschäden relativ klare Hinweise über die Verursacher-Wirkungsbeziehungen vor. In welchem Ausmass aber die auftretenden Schäden auf diese Emissionen allein zurückzuführen sind, ist keineswegs sicher, weil die Schadenwirkungen in engem Zusammenhang mit ökologischen, biologischen und klimatischen Interdependenzen stehen, die eine klare Zurechnung problematisch machen.

Neben den Waldschäden treten zusätzliche Wirkungen auf (z.B. Landschaftsverbrauch, Veränderungen des ökologischen Gleichgewichts, Verlust von Erholungswerten u.ä.), die selbst von den Betroffenen u.U. erst nach Überschreiten gewisser Schwellenwerte registriert, den Schadstoff-Emissionen aber kaum zugerechnet werden und allein daher schwer beschreib- oder quantifizierbar sind.

Hinzu kommen Zeitverzögerungen und Differenzen zwischen den Orten der Schadstoff-Emission und -Immission, die die Beobachtung und Analyse der Ursachen-Wirkungszusammenhänge oft ausserordentlich schwierig, wenn nicht zum Teil unmöglich machen.

Die Liste der unklaren Ursachen-Wirkungsketten ist lang. An dieser Stelle nur noch drei Beispiele:

- Der Einfluss von Luftschadstoffen auf die Morbidität und Mortalität (Lungenerkrankungen, Herz-Kreislaufschäden, Allergien etc.).
- Die Dosis-Wirkungsbeziehung¹⁾ zwischen radioaktiver Strahlung und Krebsentstehung.
- Die Akkumulation von Schwermetallen im Boden und ihre Auswirkungen auf Grundwasser, Fauna und Flora.

¹⁾
Dosis-Wirkungsfunktionen beschreiben die Veränderung des Schadensausmasses an Objekten, die einer jeweils unterschiedlichen Schadstoffintensität ausgesetzt sind.



Die **Monetarisierung der externen Effekte** ist die kritischste Phase im Umgang mit solchen Effekten. Hier findet die **Transformation der Effekte in Kostenkategorien** statt.

Allein schon die drei oben geschilderten Beispiele lassen erkennen, dass diese Monetarisierung in vielen Fällen auf fast unüberwindliche Schwierigkeiten stösst:

- Wie soll der Erholungswert des Waldes monetarisiert werden?
- Wieviel kostet ein Menschenleben?
- Was ist den Menschen die Artenvielfalt in Flora und Fauna wert?
- Welchen Preis hat eine aussterbende Lurchart?
- Was kostet der Verlust an gesellschaftlichem Konsens?

Diese Liste lässt sich so beliebig verlängern, dass die Frage berechtigt erscheint, warum man überhaupt das Wagnis eingehen muss, die Identifizierung externer Effekte mit einer Monetarisierung zu verknüpfen.



2.2 Warum kalkulatorische Energiepreiszuschläge?

Die Antwort kann an dieser Stelle knapp und einfach ausfallen:

Eine Monetarisierung externer Effekte ist notwendig und sinnvoll, weil nur sie den Einsatz von **ökonomischen Internalisierungsstrategien** ermöglicht. Solche ökonomische Strategien sind zwar nicht das einzige Instrument der Internalisierung. In einer Gesellschaft, die Märkten, Wettbewerb, Preisen und Kostengrößen eine bedeutsame Lenkungsfunktion zuspricht, sind sie aber unabdingbarer Bestandteil des anvisierten Lenkungsprozesses. Eine ökonomische Internalisierung ohne Monetarisierung verliert jede Treffsicherheit.

Externe Effekte bewirken aus ökonomischer Sicht generell eine Beeinträchtigung, wenn nicht sogar die Zerstörung der Funktionsfähigkeit privatwirtschaftlich organisierter **Märkte**. Die ökonomische Theorie geht davon aus, dass Märkte über den **Preismechanismus** die auf ihnen gehandelten Güter optimal allozieren. Unter der Bedingung freien Wettbewerbs (eine Bedingung, die natürlich aus vielerlei Gründen unabhängig von der Frage der Externalitäten oft nicht erfüllt ist) führt der Preismechanismus zu einem optimalen Ausgleich von Angebot und Nachfrage. Optimalität heisst hier, dass auf der Nachfrageseite – bei gegebenem Preis – ein Maximum an Nutzenstiftung erzielt wird. Auf der Angebotsseite sichert der Markt die volkswirtschaftlich kostenminimale Produktion der betreffenden Güter.

Voraussetzung hierfür ist, dass in dem in Frage stehenden System von Preisen tatsächlich **alle Kosten** enthalten sind. Ist dies nicht der Fall, geben die Preise eine falsche Auskunft über die tatsächlichen, volkswirtschaftlich notwendigen Kosten, die zur Produktion eines Gutes anfallen und verfälschen damit auch die Kaufentscheidungen der Konsumenten.

Die externen Kosten der Energieversorgung verursachen ein solches Defizit an wahren Marktinformationen: Der Preis für Erdöl, Erdgas, Strom etc. blendet die externen Kosten, die letztlich von der Allgemeinheit oder völlig Unbeteiligten getragen werden müssen, aus. Der Konsument verbraucht aus der Sicht einer volkswirtschaftlich optimalen Allokation der knappen Ressourcen an Kapital, Arbeit, Energie und Umwelt mehr Energie als er beim Einbezug der externen Kosten verbraucht hätte. Er entscheidet sich für ein vermeintlich preiswertes Energiesystem oder einen günstig angebotenen Energieträger, obwohl unter Umständen ein anderes System oder ein anderer Energieträger beim Einbezug der jeweils entstehenden externen Kosten volkswirtschaftlich kostengünstiger wäre.

Der Versuch des vorliegenden Projektes besteht darin, die externen Kosten der Energieversorgung in Form von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen zu monetarisieren und damit letztlich der Versuch, die Verteilung der knappen Umweltgüter in einen «Marktmechanismus» einzufügen. Die theoretische Begründung für die Bestimmung von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen ist letztlich der Versuch einer Art **Marktsimulation**. Das Wiedererreichen der Optimalität der Güterverteilung durch eine geeignete **Internalisierung** der kalkulatorischen Energiepreiszuschläge ist Hauptziel des ehrgeizigen Unterfangens, die Externalitäten der Energieversorgung in Rappen und Franken zu erfassen.

Gelingt dieses Unterfangen, – und es wird gezeigt werden, dass dies ein ausserordentlich schwieriger Prozess ist – so kann eine Internalisierung mit Hilfe des «Informationssystems kalkulatorische Energiepreiszuschläge» ganz verschiedene Formen annehmen.



2 Externe Kosten der Strom- und Wärmeversorgung

In erster Linie sind kalkulatorische Energiepreiszuschläge eine entscheidende **Informationshilfe für Investoren** (seien es private Energiekonsumenten, Ingenieure oder staatliche Instanzen), die in einer Entscheidungssituation stehen. Soll die Entscheidung unter Kostengesichtspunkten optimal ausfallen, so sind Entscheidungen ohne Einbezug der externen Kosten irrational. Sie begünstigen tendenziell solche Energiesysteme, deren (ausgeblendete) externe Kosten besonders hoch sind. Und sie benachteiligen solche Systeme, die keine oder nur geringe externe Kosten verursachen. Dies wird besonders bei der Bewertung regenerativer Energiesysteme deutlich. Bei blosser Betrachtung der betriebswirtschaftlich ausgewiesenen Kosten schneiden diese Systeme gegenüber den konventionellen Energieträgern Kohle, Erdöl, Erdgas, Kernenergie häufig schlecht ab. Bei Einbeziehung der kalkulatorischen Energiepreiszuschläge für diese fossilen und nuklearen Systeme kann das Bild aber völlig anders aussehen. Aus volkswirtschaftlicher Sicht können die regenerativen Energien dann trotz des vermeintlich hohen Marktpreises günstiger sein.

Das gleiche gilt für die wirtschaftliche Bewertung von **Energiesparmassnahmen und Massnahmen zum effizienten Energieeinsatz**. Viele Einsparpotentiale erscheinen als «nicht wirtschaftlich», weil die Marktpreise für Energie aus volkswirtschaftlicher Sicht zu niedrig sind. Zur Beseitigung dieser Missstände kann das in letzter Zeit verstärkt geforderte Least-Cost-Planning (LCP) eingesetzt werden. Mit LCP wird versucht, vor allem im Vergleich von angebotsorientierten Massnahmen (z.B. dem Bau eines neuen Kraftwerks) und nachfrageorientierten Massnahmen (z.B. Investitionen in Energiesparmassnahmen) das volkswirtschaftliche Optimum zu finden. LCP ist zwar keine Strategie, die notwendigerweise eine Internalisierung der Energiepreiszuschläge erfordert. Sie erweitert aber den Blick in Richtung auf die externen Effekte der verschiedenen Technologien und kann so dazu beitragen, dass beim Wirtschaftlichkeitsvergleich konkurrierender Technologien diese Effekte über Preiszuschläge internalisiert werden.

In der ökonomischen Literatur wird seit Jahrzehnten eine zweite mögliche Funktion von Energiepreiszuschlägen diskutiert: Das Heranziehen der Energiepreiszuschläge als Basis für die monetäre Kalibrierung von **Energiesteuern** oder **Energieabgaben**. Die Grundidee ist hier, die oben angesprochene «Marktsimulation» durch staatliches Handeln anzustossen. Der Energieverbraucher wird als Emittent von Schadstoffen mit einer Abgabe belegt, die gerade den externen Kosten der Energienutzung entspricht. Durch die Abgabe werden die Emittenten veranlasst, Massnahmen zur Emissionsvermeidung zu ergreifen. Aus Kostenüberlegungen werden sie diese Massnahmen gerade soweit treiben, bis die Kosten für zusätzliche Vermeidungsmassnahmen höher ausfallen würden als die zusätzlich eingesparten Abgabebeträge.

Ohne hier auf die theoretischen Komplikationen dieser Strategie eingehen zu können, soll nicht unerwähnt bleiben, dass Lösungsansätze dieser Art in der wirtschaftstheoretischen Literatur umstritten sind. Aber auch aus praktischer Sicht gibt es durchaus Komplikationen: Wie noch zu zeigen sein wird, sind die einzelnen Energieträger oder Energienutzungstechnologien mit den verschiedensten externen Kosten verbunden. Eine Abgabe müsste konsequenterweise nach zahlreichen Anwendungsarten differenziert werden, um den errechneten Energiepreiszuschlägen entsprechen zu können. Durch technischen Wandel werden sich die Zuschläge zudem laufend ändern, so dass eine ständige Anpassung der Abgaben vorgenommen werden müsste. Ein in der Praxis kaum realisierbares Vorhaben.

Dennoch liefert die Berechnung von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen wichtige Informationen für die möglichen Bandbreiten bei der Dimen-



sionierung einer eher allgemein ansetzenden Abgabe. Sie vermittelt eine Vorstellung über die quantitative Relevanz der externen Kosten und gibt der Politik wichtige Informationen, in welche Richtung und in welcher Grössenordnung Abgabainstrumente eingesetzt werden könnten.

Diese zuletzt genannte Informationsfunktion spielt auch für die **öffentliche Diskussion** über das heute vorherrschende Energiesystem eine Rolle. Allgemeine oder nur qualitativ begründete Aussagen darüber, dass unser Energiesystem mit zahllosen Beschädigungen von Mensch, Natur und Umwelt verbunden ist, bleiben in einer in vielen Bereichen materiell eingestellten Gesellschaft auf merkwürdige Weise konturenlos. In einer Gesellschaftsordnung, die Preisen und Einkommen einen hohen Stellenwert einräumt, sind Informationen über «harte» Kostengrössen ein wichtiges Informations- und Bewertungsinstrument. Auch wenn man die konsequente Monetarisierung zum Beispiel des menschlichen Lebens oder der unberührten Fauna und Flora als «ökonomistisch» zurückweisen würde, geht dieser Informationswert von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen nicht verloren.

Daneben liefern die Informationen aus der Berechnung von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen wichtige Grundlagen für die Analyse von Kosten und Nutzen der Energie- und Umweltpolitik sowie einzelner zur Diskussion stehender Massnahmen.



3 Bereichsweise Ermittlung der externen Kosten der Strom- und Wärmeversorgung

3.1 Die verschiedenen Dimensionen der externen Effekte

In den folgenden Abschnitten wird versucht, anhand von 10 Bereichen das ganze Spektrum der externen Effekte abzugreifen. Dabei werden

- die Wahrnehmung und Identifizierung
- die Quantifizierung und
- die Monetarisierung von externen Effekten

als ein stufenartiger Prozess der immer grösser werdenden Bewertungsunsicherheit dargestellt. Hier wird sich zeigen, dass in der Tat die Monetarisierung der entscheidende Engpass bei jeder Beschreibung externer Effekte ist.

Die nachfolgende Tabelle 3.1 gibt zunächst einen Überblick über die insgesamt relevanten technisch-physikalischen Primärwirkungen, die von energiespezifischen Aktivitäten ausgehen. Sie teilt dabei den Energiesektor in 5 Aktivitätsebenen auf:

- **Primärenergiebereitstellung**, im wesentlichen also die Förderung von Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran;
- **Energieumwandlung** mit einem besonderen Schwergewicht auf den verschiedenen Systemen der Stromerzeugung;
- **Transport und Verteilung** der Energie, insbesondere also der Transport von Öl in Tankern und in Pipelines und die Verteilung von Gas in Gasnetzen, aber auch die Stromverteilung über Freileitungsnetze;
- **Energienutzung** mit der ganzen Palette des Energieverbrauchs im Haushalts-, Unternehmens- und Transportsektor;
- **Entsorgung** von Rest- und Abfallstoffen, im wesentlichen Asche, Reststoffe aus der Rauchgasreinigung, radioaktives Material, aber auch Komponenten der Energiesysteme selbst (hier insbesondere Komponenten von Kernkraftwerken und bestimmte Elemente von photovoltaischen Systemen und Solarkollektoren).



3 Dimensionen externer Effekte

Aktivität	Technisch/physikalische Primärwirkung
Primärenergiebereitstellung/ Energieförderung	• Ressourcenerschöpfung • Flächenverbrauch • Emissionen von Schadstoffen und Lärm • Rest- und Abfallstoffe (siehe Entsorgung)
Energieumwandlung • Verbrennung fossiler Energieträger • Kernspaltung • Regenerative Systeme	• Flächenverbrauch • Emission von Luftschadstoffen • Radioaktive Strahlung im Normalbetrieb • Radioaktive Emissionen bei einem Kernschmelzunfall • Rest- und Abfallstoffe (siehe Entsorgung) • Lärm
Transport und Verteilung	• Flächenverbrauch • Schadstoffemissionen – Normalemissionen – Grossunfälle
Energienutzung • Haushalte und Unternehmen	• Emission von Luftschadstoffen • Rest- und Abfallstoffe (siehe Entsorgung) • Bei regenerativen Energien: Flächenbelegung • Lärm
Entsorgung von Rest- und Abfallstoffen	• Flächenverbrauch • Schadstoffemissionen • Radioaktive Emissionen

Tabelle 3.1
Technisch-physikalische Primär-
wirkungen des Energieversorgungs-
systems



Den Aktivitätsebenen lassen sich insgesamt 5 Kategorien technisch-physikalischer Primärwirkungen zuordnen:

- Ressourcenerschöpfung
- Flächenverbrauch
- Emission von Schadstoffen (Luftschadstoffe, Bodenschadstoffe, Gewässerschadstoffe, radioaktive Strahlung)
- Lärm, Erschütterungen
- Rest- und Abfallstoffe.

In Tabelle 3.2 werden die bei diesen Primärwirkungen insgesamt identifizierbaren externen Effekte aufgelistet und bezüglich ihrer Relevanz qualitativ bewertet. Gesamthaft lassen sich hier 8 grosse «Felder» von Effekten belegen, wobei als **Strukturierungskriterium die jeweils von externen Effekten betroffenen Objekte** dienen können:

- Materialschäden
- Gesundheitsschäden
 - Morbidität
 - Mortalität
- Psychische Beeinträchtigungen
- Schäden an Nutztieren und -pflanzen
- Gefährdung der Artenvielfalt
- Boden- und Wassergefährdung
- Störung von Landschaftsbildern und Naturräumen
- Verletzung der intertemporalen Verteilungsgerechtigkeit.

Es ist unmittelbar erkennbar, dass diese durchaus plausible Strukturierung natürlich nicht trennscharf sein kann. So kann sich z.B. die Gefährdung der Artenvielfalt in einer psychischen Beeinträchtigung von Menschen auswirken, wodurch wiederum Gesundheitsschäden entstehen können. Ebenso führen Boden- und Wasserbeeinträchtigungen zu Schäden bei Nutztieren und Pflanzen in Flora und Fauna und letztlich wiederum beim Menschen.



3 Dimensionen externer Effekte

Technisch/physikalische Primärwirkung	Identifizierbare externe Effekte	Relevanz
Flächenverbrauch	* Störung des Landschaftsbildes	mittel
	* Gefährdung der Artenvielfalt	gering
	* Grundwassergefährdung (quantitativ, qualitativ) (der Flächenverbrauch selbst ist meist internalisiert)	mittel
	* Restwasser (quantitative und qualitative Beeinträchtigung von Gewässern)	mittel
Emission von Schadstoffen	* Materialschäden	hoch
	* Gesundheitsschäden	hoch
	* Psychische Beeinträchtigung	mittel
	* Schäden an Nutztieren und -pflanzen	mittel
	* Gefährdung der Artenvielfalt	hoch
	* Boden- und Grundwassergefährdung (Klimaveränderung)	hoch hoch
	* Folgen der Klimaveränderung	hoch
Radioaktive Strahlung * Normalbetrieb	* Gesundheitsschäden	gering
	* Todesfälle	hoch
* Kernschmelzunfall und grossflächige Verseuchung	* Schädigung von Flora und Fauna	hoch
	* Materialschäden	hoch
	* Evakuierungskosten	hoch
Unfälle, Grossrisiken * Tankerunfälle * Staudammbruch	* Gewässer- und Küstenschäden	mittel
	* Todesfälle, Materialschäden	hoch
Lärm	* Gesundheitsschäden	gering
	* Psychische Beeinträchtigung	mittel
Ressourcenerschöpfung	* Verletzung der intertemporalen Verteilungsgerechtigkeit	hoch

Tabelle 3.2
Identifizierbare externe Effekte der
Strom- und Wärmeversorgung



In einer **anthropozentrischen Sichtweise** (der Mensch steht hierbei im Mittelpunkt allen Geschehens) liessen sich so **alle** externen Effekte bis zu ihrer «Letztwirkung» bei Menschen verdichten, und dies geschieht auch zeitweilig. Für eine einigermaßen ordentliche Strukturierung der verschiedenen möglichen externen Effekte taugt aber eine solche Vorgehensweise offensichtlich nicht.

Der vorliegende Bericht geht deshalb bei der Gliederung der darzustellenden Effekte einen anderen Weg: Aus Tabelle 3.2 ist zunächst **die überaus dominierende Relevanz der Emissionen und zwar vor allem der gasförmigen Emissionen** erkennbar. Es macht deswegen Sinn, zunächst die externen Effekte dieser Emissionen in den Vordergrund zu stellen und nach «Schadensobjekten» zu ordnen. Dies geschieht in den Abschnitten 3.3 bis 3.7, wobei erkennbar werden wird, dass die möglichen Schadensvolumina (aber auch die Schwierigkeiten bei der Identifizierung, Quantifizierung und Monetarisierung) extrem unterschiedlich ausfallen können.

Bei der Behandlung der Schäden in Flora und Fauna und der Gesundheitsschäden durch Luftemissionen führt die Darstellung in eine Mischung aus materiellen Schäden und der Beeinträchtigung vieler immaterieller Werte. Hier treten bereits erhebliche Unsicherheiten in der Quantifizierung und Monetarisierung auf. Zugleich besteht die Vermutung eines wesentlich höheren Schadenspotentials als z.B. im Bereich der Materialschäden.

Auch in Abschnitt 3.8 tritt das Unsicherheitsmoment bei der Darstellung der möglichen Folgen einer Klimakatastrophe in den Vordergrund. Hier kommt, zusätzlich zu den Problemen der Quantifizierung und/oder Monetarisierung, die Frage nach dem **Umgang mit (möglichen) extrem grossen Schäden** ins Spiel. Die erst sehr langfristig auftretenden Folgen von (heute in Gang gesetzten) Klimaveränderungen verweisen zudem auf die Gefahr einer Verletzung der intertemporalen Verteilungsgerechtigkeit.

Die Abschnitte 3.9 bis 3.11 befassen sich mit den externen Kosten der Elektrizitätserzeugung und -verteilung und stellen damit – anders als die vorhergehenden Abschnitte – auf eine bestimmte Technologie und nicht auf die jeweiligen Schadensobjekte ab. Von besonderem Interesse (und von besonderer Brisanz) ist dabei die Analyse der Kernenergienutzung.

Hier weist insbesondere das Risiko eines sehr schweren **Kernschmelzunfalls** in Atomkraftwerken sowohl im Schadenspotential als auch in der Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Unfalls eine völlig andere Dimension auf als die Effekte der vorangegangenen Abschnitte. Hier steht nicht das (u.U. unermesslich hohe) Schadensausmass, sondern die Interpretation des **Begriffs «Risiko» selbst** im Vordergrund der Bewertungsproblematik.

Abschnitt 3.12 geht in einem Exkurs auf die öffentlichen Leistungen als Externalität ein. In Abschnitt 3.13 werden die Ergebnisse zusammenfassend bewertet.



3.2 Methodische Probleme bei der Erfassung von Externalitäten

3.2.1 Grenzkosten versus Durchschnittskosten

Voraussetzung für eine Internalisierung externer Effekte im Rahmen ökonomischer Instrumente und für die Berechnung von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen ist eine Monetarisierung der durch externe Effekte verursachten **Schäden** und/oder der Kosten ihrer **Vermeidung**. Auf das vermeintlich gegensätzliche Begriffspaar Schadenskosten – Vermeidungskosten wurde bereits in den Eingangsabschnitten hingewiesen. Vermeintlich ist der Gegensatz deswegen, weil die ökonomische Theorie der externen Kosten zur Bestimmung des Wohlfahrtsoptimums Informationen über beide Kostenarten voraussetzt und – zumindest theoretisch – die Aufstellung von Kostenfunktionen, das heisst den Verlauf der Kosten bei unterschiedlichen Niveaus der verursachenden Faktoren (z.B. der Emissionen), fordert. Ziel einer optimalen Internalisierung ist dann, einen Zustand herbeizuführen, in dem der sogenannte Grenzscha den der Betroffenen (der zusätzliche Schaden bei Zunahme der verursachenden Grösse um eine Einheit) und die Grenzkosten der Vermeidung gleich sind. Zur Berechnung eines optimalen Zustands müssten also die Grenzscha denskosten und Grenzvermeidungskosten in Abhängigkeit von der «Menge der externen Effekte» (z.B. des Verbrauchs eines knappen Umweltgutes oder des Schadstoffausstosses) berechnet werden.

Ungeachtet der bestechenden Rationalität dieser Theorie besteht für die Praxis kein Zweifel, dass vor allem die Aufstellung von Schadensfunktionen in fast allen Bereichen an profunden quantitativen Informationsdefiziten scheitert. Es wird noch zu zeigen sein, dass in den meisten Schadensfeldern nur das Kostenniveau im Status quo bestimmt werden kann, dass also praktisch nur ein Punkt der Schadenskurve hinreichend bekannt ist. Angesichts der Datenmängel ist es daher bereits ein ehrgeiziges Ziel, Durchschnittskosten (und nicht Grenzkosten) zu ermitteln.

Trotz dieser zumindest aus theoretischer Sicht unbefriedigenden Sachlage besitzen aber auch solche Durchschnittsberechnungen einen hohen Informationswert. Mit ihnen können durch den Vergleich der Grössenordnung von Gesamtschadenskosten und Gesamtvermeidungskosten schon die grössten Effizienzverluste beseitigt werden. In der Praxis muss oft ohnehin nur die Frage entschieden werden: «Lohnt es sich, auf den Einsatz einer konkreten Technologie hinzuarbeiten oder nicht?». Unter diesem Gesichtspunkt ist auch eine **gewisse Grosszügigkeit bezüglich der Genauigkeit** der durch die Monetarisierung ermittelten Werte zulässig.

Diese wohlverstandene Grosszügigkeit sollte nicht als Unverantwortlichkeit missverstanden werden. Kein Befürworter der Monetarisierung wird die in einer Fragesituation ermittelten Werte auf den Punkt absolut setzen wollen. Zunächst aber ist wichtig, dass überhaupt den durch externe Effekte entstandenen Schäden Rechnung getragen wird und diese in die Entscheidungen privater Marktteilnehmer integriert werden. Hier ist darauf zu verweisen, dass ein Verzicht auf die Monetarisierung letztlich eine viel grössere Fehlerquelle darstellt, weil unbestreitbar vorhandene externe Kosten mit dem Wert Null in alle relevanten Kalkulationen eingehen würden.

3.2.2 Konzepte zur Bewertung externer Kosten

Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Berechnungen für die einzelnen Schadensbereiche soll bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen



3 Methodische Probleme

werden, dass es ein für alle Bereiche einheitliches Schadensbemessungskonzept nicht gibt und nicht geben wird. Die Figur 3.1 legt für die weiteren Ausführungen folgende Gliederung nahe:

- Schadenskostenermittlung
 - unmittelbare Erfassung
 - Ermittlung von Präferenzen (Zahlungsbereitschaften, indirekt)
- Vermeidungskostenermittlung.

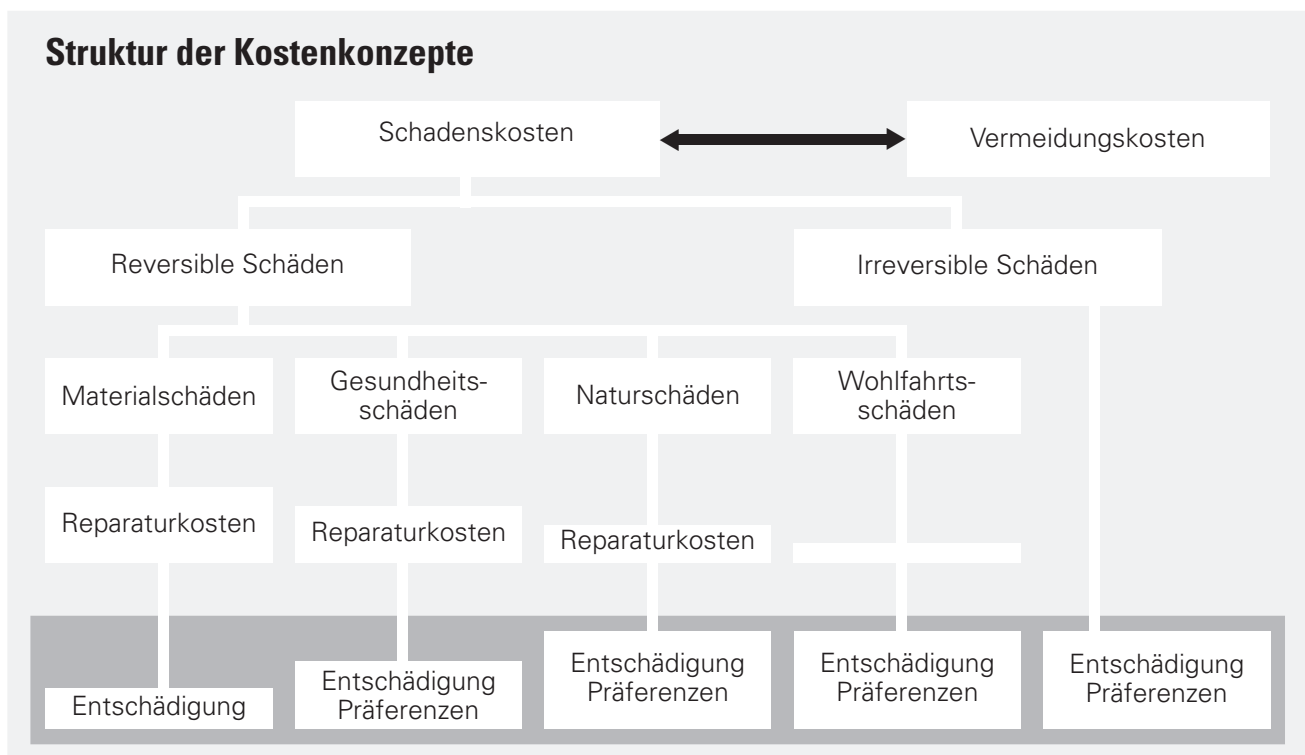
a) Schadenskosten

Die **unmittelbare Erfassung** von Schäden ist im Grundsatz einfach. Es handelt sich hier zum Beispiel um Schäden an Bauwerken und Pflanzen oder um Gesundheitsschäden, die reversibel²⁾ sind und durch eine «Reparaturleistung» beseitigt werden können: Der Schaden besteht in den Kosten der Reparatur, die in einfachen Fällen auch eine Entschädigung zum Beispiel von messbaren Einkommensverlusten in der Land- und Forstwirtschaft mit einschliesst.

Leider wird von dieser einfachen unmittelbaren Schadensmessung nur ein kleiner Teil der Externalitäten abgedeckt. Es liegt in der Natur der Externalitäten, die ja gerade dadurch entstehen, dass sie nicht über Märkte abgewickelt werden können, dass der grösste Teil dieser Phänomene einer **einfachen** Bewertung «nicht zugänglich» ist, weil sie keinen Marktpreis haben. Zu dieser Gruppe von Externalitäten gehören alle Schäden nicht-materieller Art und irreversible Schäden, zum Beispiel der Verlust an Menschenleben, das Verschwinden von Arten in Flora und Fauna, der Erholungs- und Erlebniswert unbeeinträchtigter Landschaften. Auch die Interpretation und Bewertung des **Risikos** grosser Kernkraftunfälle (nicht die monetäre Bewertung des möglichen Schadens selbst) ist in dieser Sphäre anzusiedeln. Dies sind Kategorien von Schäden, die empirisch am schwierigsten zu bestimmen sind, die aber zugleich den wohl grössten Teil der relevanten Externa-

²⁾ Reversibel bedeutet hier die Möglichkeit einer prinzipiellen Wiederherstellung: Der abgestorbene Baum wird ersetzt (Funktionsreversibilität), das Absterben selbst ist natürlich irreversibel.

Figur 3.1
Externe Kosten: Struktur der Erfassungskonzepte





litäten ausmachen. Hier können Verfahren zur Anwendung kommen, die aus den Präferenzen der Betroffenen monetäre Grössen für die interessierenden Schäden ableiten. Der ökonomisch messbare Schaden bestimmt sich dabei aus der Wertschätzung, welche die durch externe Effekte betroffenen Güter erfahren.

Bei der Präferenzmessung können zwei Ansätze unterschieden werden:

- Indirekte Verfahren, die aktuelles, beobachtbares Marktverhalten (auf Vergleichsmärkten) analysieren und daraus Rückschlüsse auf die mit diesem Verhalten offenbarte Wertschätzung ziehen.
- Direkte Verfahren, die die Wertschätzung bzw. Zahlungsbereitschaft über Befragungen erfassen. Diese Verfahren werden auch als «Contingent-Valuation-Methoden» bezeichnet.

■ Indirekte Verfahren

Die bekannteste Methode ist hier die Marktdatendivergenzmethode (auch: Hedonistische Preisanalyse). Mit ihr wird versucht, die Wertschätzung (Präferenz) für nicht marktmässig gehandelte Güter aus existierendem Marktverhalten in bezug auf andere Güter abzuleiten.

Der mit diesen Ansätzen am häufigsten untersuchte Markt ist der Häuser- und Grundstücksmarkt. Die Methode ist vor allem in den USA verwendet worden. Von besonderem Interesse ist im vorliegenden Fall die unterschiedliche Ausstattung mit oder der direkte Zugang zu öffentlichen Gütern, wie zum Beispiel Ruhe, frische Luft, Nähe zu Erholungsanlagen und so weiter. Mit ökonometrischen Verfahren kann hier untersucht werden, ob und in welchen Quantitäten die unterschiedliche Ausstattung mit diesen Gütern Einfluss auf den Kaufpreis (oder das Mietniveau) hat.

Die methodische Adäquanz der Marktdatendivergenzmethode kann nur im Einzelfall bewertet werden. Es gibt vor allem zwei Anforderungen, die in der Praxis nicht immer erfüllt sind. Die eine betrifft die implizite Annahme, dass die Marktteilnehmer alle über das gleiche Einkommen verfügen. Dies ist natürlich in jedem Fall eine irrealen Annahme. Die zweite ist die Forderung, dass auch alle anderen Faktoren, die den Kaufpreis beeinflussen können, in allen untersuchten Fällen gleich sind. Ein konzeptioneller Ausweg besteht hier darin, diese «Störfaktoren» durch ökonometrische Verfahren zu eliminieren. Dadurch wird allerdings der Untersuchungsaufwand deutlich in die Höhe getrieben.

Auch andere Beispiele der Marktdatendivergenzmethode zeigen konzeptionelle Schwierigkeiten: In Abschnitt 3.9, der sich mit den externen Effekten eines Kernschmelzunfalls befasst, wird als Methode zur monetären Bewertung des **Risikos** die Messung der Lohnzuschläge bei gefahrengeneigten Berufen (Bergmann, Tunnelbauer o.ä.) erwähnt werden. Hier stellt sich stets das Problem der Freiwilligkeit des Risikos (externe Effekte sind ein faktisches Ereignis, das in aller Regel unfreiwillig hingenommen werden muss) und die Frage der Übertragbarkeit von Tatbeständen aus einer spezifischen Arbeitswelt in die Sphäre der Allgemeinheit.

■ Direkte Verfahren

Ein grundsätzlich anderer Ansatz ist der Versuch, durch Befragungen oder kontrollierte Experimente Präferenzen monetär zu ordnen. Verfahren dieser Art werden auch Zahlungsbereitschaftsansätze genannt. Teilweise hat sich die englische Terminologie: «Willingness to pay» oder «Willingness to sell» durchgesetzt³⁾. Die Feldbefragung ist hier die wichtigste Methode.

³⁾ Um hier einem Missverständnis vorzubeugen: Zahlungsbereitschaft heisst nicht, dass der Befragte (der von externen Effekten Betroffene) tatsächlich entsprechende Beträge zahlen muss (z.B. dafür, dass ein bestimmter externer Effekt nicht eintritt). Es geht vielmehr um die Dimensionierung von Wertschätzungen.



3 Methodische Probleme

Gegen die direkten Verfahren der Präferenz- bzw. Schadensermittlung werden vor allem zwei Einwände erhoben:

- Die Befragten neigten zu einer Überschätzung der Präferenz, da sie ihre Einkommensrestriktion nicht beachteten.
- Es käme zu «strategischem Verhalten» (Trittbrettfahrer).

Theoretisch müssten rationale Individuen in der Lage sein, ihre Präferenzen für öffentliche Güter zu erfassen und bei Befragung in Geldeinheiten auszu-drücken. Dass dies nicht immer der Fall ist, wird im konkreten Fall schnell klar, wenn Teilnehmer an Befragungen zum Beispiel die Begrenztheit des zur Verfügung stehenden Einkommens aus den Augen verlieren und im ersten Moment, wenn ihnen ein bestimmtes öffentliches Gut vor Augen geführt wird, viel zu hohe Zahlen nennen. Dieses Problem kann aber durch geeignete Formulierung der Fragestellung (Plausibilitätstests), durch Betonung der Budgetrestriktion und durch Lieferung von Hintergrundinformationen eingegrenzt werden.

Ein weiterer Nachteil der direkten Methoden kann ihre Anfälligkeit für strategisches Verhalten – das sogenannte «Trittbrettfahrerproblem» – sein. Eine Art strategischen Verhaltens könnte zum Beispiel darin bestehen, die Präferenzen zu hoch anzugeben, nämlich dann, wenn die Meinung vorherrscht, dass das öffentliche Gut von dritter Seite in voller Höhe der angegebenen Präferenzen finanziert werden wird. Dies ist immer dann der Fall, wenn die befragte Gruppe meint, der Staat finanziere das öffentliche Gut, dieses Gut käme nur ihrer Untergruppe zugute, während die Kosten über Steuern auf die Gesamtbevölkerung abgewälzt würden.

In der Praxis scheint strategisches Verhalten eine geringere Rolle zu spielen, als in der theoretischen Literatur angenommenen. Strategisches Verhalten kann durch Paralleluntersuchungen neutralisiert werden, die (bei Homogenität der Befragtengruppe) nach denselben öffentlichen Gütern fragen, aber unterschiedliche Zahlungsmodi vorschlagen. Auf diese Art und Weise könnten trotz strategischen Verhaltens zumindest Bandbreiten der wahren Zahlungsbereitschaft erstellt werden.

Der grosse Vorteil der Befragungsverfahren ist (neben ihrer konzeptionellen Einfachheit), dass mit ihnen auch jene Teile der Präferenzen erfasst werden können, die sich auf immaterielle Werte beziehen. Mögliche Fragen wären zum Beispiel:

- Wieviel wären Sie bereit zu zahlen, wenn das **Risiko**, an einer emissionsbedingten Atemwegserkrankung zu sterben, gesenkt würde? Nicht gefragt wird, und dies sei deutlich hervorgehoben: Wieviel ist Ihnen Ihr Leben wert?
- Wieviel würden sie für die Erhaltung des Erholungswertes eines nahe gelegenen Waldes bezahlen?

Erfasst werden können auch Existenz- und Vermächtniswerte, wie zum Beispiel eine seltene Tierart, ein Naturschutzgebiet oder eine bestimmte Aussicht. Hier beruht die Wertschätzung nicht auf dem Verbrauch privater Güter, noch muss das öffentliche Gut selbst in Anspruch genommen werden (etwa durch «Genuss» der Aussicht), damit ein positiver Existenzwert besteht. Es handelt sich um ein «interesseloses Wohlgefallen», das zwar mit der materiellen Nutzenoptimierungshypothese der Marktwirtschaft – so weit sie ausschliesslich monetär ausgerichtet ist – nur schwer zu vereinbaren ist. Dennoch stellt es einen nicht unbeträchtlichen Teil der Wertschätzung öffentlicher Güter dar, eines Teils, dessen Erfassung nur mit Befragungsmethoden möglich ist.



b) Vermeidungskosten

Die erheblichen Probleme bei der Bestimmung der Schadenskosten haben dazu geführt, dass häufig empfohlen wird, auf diese Prozedur ganz zu verzichten, und direkt die Kosten der Vermeidung eines externen Effekts als die Schadenskosten eben dieses Effekts zu definieren.

Ein solcher Ansatz wirft **erhebliche konzeptionelle Probleme** auf. Empirisch – und dies ist ja auch der Hintergrund der Empfehlung – ergeben sich dagegen kaum Komplikationen: Vermeidungskosten entstehen, wenn ein Verursacher durch Einschränkung seiner Aktivitäten oder durch den Einsatz von Vermeidungstechnologien (d.h. Kapital in Form von Filtern, Reinigungsmethoden etc.) das Niveau der von ihm ausgehenden externen Effekte senkt. Im einzelnen mag die Zuordnung spezifischer Vermeidungstechnologien zu spezifischen, quantitativen Reduktionen externer Effekte nicht immer eindeutig sein. Letztlich kann aber stets eine befriedigend genaue Kostenbestimmung geleistet werden, weil die in Frage kommenden Technologien (oder die inkriminierte Aktivität) einen Marktpreis haben.

Die oben genannte Empfehlung läuft nun darauf hinaus, diese Vermeidungskosten just als die «eigentlichen» Kosten des externen Effekts zu «definieren». In dieser zugespitzten Formulierung wird deutlich, dass ein reiner Vermeidungskostenansatz überhaupt nicht danach fragt, in welchem Ausmass eigentlich Schadenskosten durch die Massnahme vermieden würden. Es findet also kein Abgleich von Schadens- und Vermeidungskosten (im Sinne einer Gesamtoptimierung) statt, so dass massive Fehlallokationen nicht ausgeschlossen werden können.

So sind die Vermeidungskosten zwar ein wichtiger Parameter für die Ausgestaltung der Internalisierungsstrategien. Ohne den (vergleichenden) Blick auf die Dimension der Schadenskosten hängen aber diese Strategien in bezug auf ihre Optimalität in der Luft.

Selbstverständlich gibt es Ausnahmen. Die zwei wichtigsten seien hier genannt:

Die Kritik am «reinen» Vermeidungskostenansatz stellt auf den fehlenden Vergleich zwischen Schadens- und Vermeidungskosten ab. Dieser Vergleich ist aber oft auch ohne explizite monetäre Quantifizierung der Schäden einfach. Nämlich dann, wenn es eine berechnete Vermutung gibt, dass die **«Schäden auf jeden Fall höher»** sind als die Vermeidungskosten.

Dies ist zum Beispiel im Zusammenhang mit der Klimadiskussion wahrscheinlich: Nach heutigem Erkenntnisstand gibt es kaum mehr Zweifel, dass sich fortgesetzte CO₂-Emissionen im heutigen Ausmass in den nächsten 50 bis 100 Jahren verheerend auf das globale Klima auswirken würden. Ohne hier in apokalyptische Prophezeiungen abgleiten zu müssen, dürften die resultierenden Schäden extrem hoch sein. In einem solchen Fall ist der «reine Vermeidungskostenansatz» absolut kompatibel mit den oben geschilderten monetären Optimierungsüberlegungen. Die Treibhausproblematik schafft ein künftiges Grossrisiko mit relativ hoher Eintrittswahrscheinlichkeit, jedoch mit noch bedeutenden Unsicherheiten über Verlauf, globale Verteilung und Ausmass der zu erwartenden Konsequenzen → Vermeidung dieses Risikos im Sinne des Vorsorgeprinzips → Vermeidungskosten.

Ein zweiter Kritikpunkt am «reinen» Vermeidungskostenansatz betrifft einen Bereich, der eigentlich nicht der monetären Sphäre angehört. Es ist dies die Vorstellung von einer Gesellschaft, die der Bewahrung einer unversehrten Natur und der Forderung nach naturgerechter Lebensweise der Menschen einen absoluten oder zumindest einen sehr hohen Stellenwert einräumt. Die ökonomische Theorie der Internalisierung masst sich hier nicht an zu bewerten, ob dies sinnvoll ist oder nicht. Sie verweist vielmehr – in ihrem



3 Methodische Probleme

Theoriesystem widerspruchsfrei – auf die entsprechende Gestalt der Präferenzstrukturen dieser Gesellschaft, und konstatiert ziemlich lapidar die zur Realisierung einer solchen Gesellschaft anfallenden Kosten als das relevante Entscheidungskriterium.

3.2.3 Externe Kosten versus externe Nutzen?

Die Strom- und Wärmeproduzenten und -konsumenten werden stets 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.

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 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 (politischen) Diskussion ausräumen hilft und dabei der Stellenwert allfälliger externer Nutzen sehr relativiert wird.

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 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. Typischerweise werden die Anbieter durch den geschickten Einsatz der Produktionsfaktoren (Arbeit, Know-how, Kapital, Ressourcen) versuchen, günstigere und/oder bessere Produkte anzubieten und damit Nutzen an unbeteiligte Konsumenten übertragen. 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, 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. Diese Übertragung erfolgt **nicht über Marktprozesse** (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 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 untenliegenden 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 erhielte.

Es ist aber auch 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 Überlegungen nicht relevant und können vernachlässigt werden.** Die meisten in der (politischen) Diskussion aufgeführten externen Nutzen beruhen auf einem Missverständnis, indem Markteffekte (pekuniäre, 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).



3.3 Kosten immissionsbedingter Waldschäden

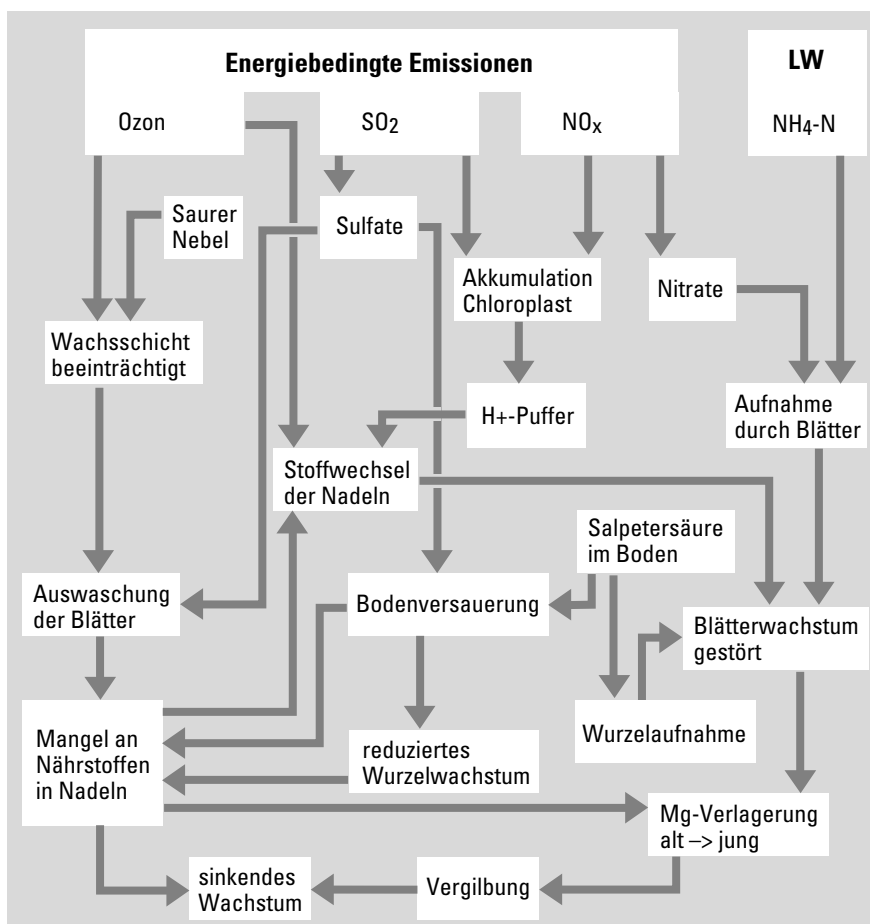
3.3.1 Waldschäden in der Schweiz (INFRAS, TB1, Oktober 1993)

■ Schadensentwicklung

Die Identifizierung und Quantifizierung von Waldschäden – die sogenannte Waldschadensentwicklung – wird seit 1984 systematisch vorgenommen (Programm Sanasilva, Sanasilva 1986–1991). Die Beurteilung der Schadensentwicklung ist vorerst noch nicht eindeutig möglich, da die Messperiode zu kurz ist. Trotz einer vorübergehenden Abnahme der Schäden im Jahr 1988 kann keineswegs von einer generellen Verbesserung der Situation ausgegangen werden. Neben den Nadelbäumen werden zudem vermehrt Laubbäume geschädigt.

■ Mögliche Ursachen

Nach den gehäuft auftretenden Waldschäden anfangs der achtziger Jahre wurde von **«neuartigen Waldschäden»** gesprochen. Trotz intensiver Waldschadensforschung ist es bisher noch nicht gelungen, die auftretenden Schäden auf einzelne Ursache-Wirkungsmechanismen zurückzuführen. Das zurzeit vorherrschende Erklärungsmodell geht davon aus, dass die Waldschäden von einem **Ursachenkomplex aus abiotischen und biotischen Faktoren mit wesentlicher Beteiligung der Luftschadstoffe** ausgelöst werden. Neben den direkten Schadenswirkungen der Luftschadstoffe (SO_2 , NO_x , O_3) auf die oberirdischen Baumteile und den indirekten Wirkungen über die Bodenbelastung, beeinflussen Witterung, Klima und nicht standort-adäquate Bestandespflege die Schadensentstehung. Die verschiedenen Effekte wirken dabei teilweise als Stressoren, prädisponierende Faktoren und/oder Schadensauslöser.



Figur 3.2
Auswirkungen der wichtigsten
Luftschadstoffe auf ober- und unter-
irdische Pflanzenteile
LW: Landwirtschaft



3 Waldschäden

Die jüngsten Untersuchungen weisen verstärkt auf den Einfluss der indirekten Wirkungen hin, vor allem auf die Folgewirkungen der Überdüngung durch Stickstoffimmissionen. Dabei spielen die Stickstoffemissionen der Landwirtschaft – der sogenannte Ammonium-Stickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) infolge von Ammoniakemissionen – eine besondere Rolle. Die Überversorgung mit Stickstoff führt zu einer Überdüngung, wonach das bisherige Wasserangebot der Bäume nicht mehr ausreicht. Zudem wachsen die Wurzeln dem Stickstoff nach, das heisst nach oben, was die Empfindlichkeit der Bäume für Trockenstress und Windwurf erhöht. Die Versauerung des Bodens vermindert die Fähigkeit der Bäume, Nährstoffe aufzunehmen und führt gleichzeitig zu einer verstärkten Auswaschung der Nährstoffe.

Die künftige Entwicklung der Waldschäden ist noch schwer abschätzbar. Aufgrund der jüngsten Trends besteht kein Anlass zur Entwarnung. Die Waldschäden können nur durch komplexe Wirkungsmechanismen erklärt werden. Die Luftschadstoffemissionen aus Energieversorgung, Verkehr (Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Ozon) und Landwirtschaft (Ammoniak) sind als Stressoren, prädisponierende Faktoren oder Auslöser an der andauernden Schädigung der Wälder wesentlich mitbeteiligt.

3.3.2 Kosten der Waldschäden in der Schweiz

■ Funktionen des Waldes

Der Wald hat vielfältige Funktionen, die durch die Waldschäden beeinträchtigt werden können:

- Der Wald dient als Ressource. Die Waldbewirtschaftung und Holznutzung hat grosse regionalwirtschaftliche Bedeutung.
- Im Berggebiet schützt der Wald Siedlungen, Verkehrswege und Tourismusinfrastrukturen vor Naturgefahren (Lawinen, Steinschlägen, Erdbeben und Hochwasser).
- Agglomerationsnahe Wälder und Bergwälder spielen eine wichtige Rolle für die Erholung und den Tourismus.
- Der Wald hat neben diversen anderen Funktionen auch eine Existenzfunktion – einen Wert an sich – als Lebensraum für Pflanzen, Tiere und Menschen, als Landschaftselement, etc.

■ Methodik der Kostenschätzung

Die Kosten der luftschadstoffbedingten Waldschäden werden in zwei Schritten ermittelt:

- Zuerst wird die künftige Entwicklung der physischen Waldschäden abgeschätzt, das heisst, es wird ein sogenanntes Schadenszenario formuliert.
- Dann werden die monetären Kosten dieser Schäden bzw. allfälliger Nutzeneinbussen abgeleitet.

Drei Studien nahmen im Zeitraum von 1986–1988 Abschätzungen zu den Kosten der Waldschäden vor (Altwegg, 1988; B+P, 1986; Pfister, 1987). Alle drei Arbeiten basieren auf Schadenszenarien, welche langfristig von einer trendmässigen Zunahme der Waldschäden ausgehen. Aus heutiger Sicht dürften die Schadenszenarien eher etwas pessimistisch sein. Aufgrund der



jüngsten Waldschadensentwicklung können sie aber nicht als unrealistisch bezeichnet werden:

– **Die Folgekosten von Waldschäden** (Altwegg, 1988):

Die Untersuchung beschränkt sich auf die Folgekosten von Waldschäden durch die Beeinträchtigung der **Schutzfunktion von Gebirgswäldern**. Im Vordergrund steht die Gefährdung durch Lawinen, die sehr detailliert untersucht wird. Die Kosten der zusätzlichen Lawinengefährdung werden mit zwei Monetarisierungsansätzen ermittelt:

- Ersatzkosten von zusätzlich erforderlichen Lawinenverbauungen
- Schadenskosten von zusätzlichen Lawinenabgängen mittels Risikoanalyse.

Daneben werden pauschal die Schadenskosten der übrigen Gefahren (Steinschlag, Hochwasser, Erdbeben) geschätzt.

– **Die wirtschaftlichen Folgen des Waldsterbens in der Schweiz**

(B+P, 1986):

Die Waldschadensszenarien (2 Phasen von je 10 bis 20 Jahren) unterscheiden zwischen Berggebiet und Mittelland. Im Berggebiet werden die Vermeidungs- bzw. Ersatzkosten von zusätzlich erforderlichen Verbauungen gegen Lawinen, Wildbäche und Steinschläge sowie die Schadenskosten der nach den Verbauungen noch verbleibenden Risiken geschätzt. Zusätzlich werden die Erlösausfälle in Berglandwirtschaft und Tourismus eruiert.

– **Waldhaltung und Schutzaufgaben im Berggebiet** (Pfister, 1987):

Mit einem Vermeidungskostenansatz werden die Zusatzkosten für forstliche Projekte geschätzt, welche die Schutzfunktion der immissionsgeschädigten Wälder im Berggebiet gewährleisten sollen. Dabei wird unterstellt, dass die Schutzbedürfnisse in Zukunft zunehmen. Diese Kosten-schätzung dürfte eine untere Grenze der immissionsbedingten Kosten verminderter Schutzfunktion von Bergwäldern ergeben.

- Bei den Wäldern im Mittelland stehen die Ressourcenfunktion für die Forstwirtschaft und die Erholungsfunktion für Städte und Agglomerationen im Vordergrund. In der Region Lugano wurde die Wertschätzung der Bevölkerung für den **Erlebnissenutzen** (nur für Waldbesucher/innen) und den **Existenznutzen** (für die ganze Bevölkerung) der stadtnahen Wälder erfasst (Nielsen, 1991 und 1992). Pro **Waldbesucher/in** ergibt sich ein **Erlebnissenutzen** von **Fr. 3000.–** pro Jahr. Dazu kommt ein **Existenzwert** von **Fr. 700.– pro Bewohner/in und Jahr**. Auf die Schweiz hochgerechnet beträgt der Nutzen stadtnaher Erholungswälder rund **2 Milliarden Franken** pro Jahr. Es stellt sich nun die Frage, wie weit 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. In der Schweiz wird zurzeit nicht mit grossflächigem Absterben von Waldflächen gerechnet, der Existenzwert der Wälder wird daher nicht massiv beeinträchtigt. Ewers schätzte die Reduktion der Waldbesuche infolge der trendmässigen Waldschadensentwicklung in der BRD 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 (Erlebnis- und Existenzwert) betragen dann 0–10% (Nutzeneinbussen der Besucher/innen die nicht mehr gehen und Nutzen-



3 Waldschäden

einbussen der Besucher/innen, die immer noch gehen): Immissionsbedingte Beeinträchtigung des Erholungsnutzens (Erlebnis- und Existenzwert) 0–200 Mio. Fr. pro Jahr.

■ Monetarisierter Kosten der Waldschäden

In der folgenden Tabelle werden die in den verschiedenen Arbeiten geschätzten Kosten der Waldschäden synoptisch zusammengefasst.

	Jahreskosten 1990 Mio. Fr./a	Barwert 1990 der Kosten 1990–2020 Mrd. Fr./30 Jahre
Forstwirtschaft		
a) B+P, Schadenskosten	330–560	7–13
Naturgefahren		
b) Altwegg, Ersatzkosten, alle Naturgefahren	1'690	38
c) Altwegg, Schadenskosten, alle Naturgefahren	1'770	40
d) B+P, Ersatzkosten plus	670	15
B+P, Schadenskosten (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 Existenznutzen	0–200	0–4
Total Kosten der immissionsbedingten Waldschäden (a + e + f + g + h bzw. a + c + g + f + h)	1'090–2'890	24–64
davon Feuerungen und Verkehr	550–1'445	12–32

Tabelle 3.3
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)

Die Kosten der zusätzlichen Naturgefahren infolge der Waldschäden im Berggebiet haben die grösste Bedeutung. Die Kosten infolge der Reduktion des Erlebnis- und Existenznutzens von Agglomerationswäldern sind relativ pauschale Schätzungen. Neben den Waldschäden dürften die andauernden Schadstoffimmissionen zusätzliche – hier nicht berücksichtigte – Belastungen verursachen: Beispielsweise zunehmende Nitratkonzentrationen im Grundwasser durch ausgewaschene Stickstoffdepositionen aus der Luft (NO_x , NH_4).

■ Zurechnung der Kosten – Emissionszuschläge

Für die Entstehung dieser Schäden sind primär die Schwefeldioxid-, die Ozon- und die Stickstoffoxidimmissionen sowie die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft verantwortlich. Die Ozonimmissionen 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 Stickstoffemissio-



nen aus der Landwirtschaft (Ammonium-Stickstoff) an den verursachten Waldschäden hingewiesen (z.B. BMFT, Mai 1993, S. 6; NZZ, Jan. 1993, S. 65). 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 Ozon) ermittelt.

3.3.3 Fazit

Der Verlauf der künftigen Waldschadensentwicklung ist ungewiss, und die Ursachen der auftretenden Waldschäden sind noch nicht abgesichert. Die Waldschäden treten jedoch weiterhin auf und haben teilweise noch eine zunehmende Tendenz. Die Luftschadstoffe werden als zumindest mitbeteiligte Verursacher der Waldschäden betrachtet.

Die monetarisierten Kosten der Waldschäden hängen entscheidend vom Waldschadenszenario ab, das der Kostenschätzung zugrundegelegt wird. Die Waldschadenszenarien, von denen die hier verwendeten Arbeiten ausgehen, dürften eher zu pessimistisch sein.

Die hier ausgewiesenen Kosten der immissionsbedingten Waldschäden sind daher relativ schlecht abgesichert. Die Aufteilung der geschätzten Kosten auf die Landwirtschaft und auf den Energieverbrauch erfolgt pauschal und muss durch weitere Ursachenforschung überprüft werden. Wir erachten die resultierenden Kosten von 550–1420 Mio. Fr. für die energiebedingten Waldschadenskosten als zurückhaltende Schätzung, mindestens solange die Wirkung der energiebedingten Immissionen als zusätzliche Stressoren oder Auslöser der Waldschäden nicht ausgeschlossen werden kann.

Diverse Schaden- und Kostenelemente sind nicht in den hier vorgenommenen Kostenschätzungen enthalten:

- Auswirkung der Luftschadstoffdepositionen auf das Grundwasser
- Aufwendungen für die Waldforschung
- Wertminderungen bei den verbleibenden Waldbeständen und bei den Böden infolge der Schadstoffimmissionen
- Regionalwirtschaftliche Effekte wie Abwanderung etc.



3.4 Kosten luftschadstoffbedingter Produktionsausfälle in der Landwirtschaft

3.4.1 Produktionsausfälle durch Luftschadstoffe

■ Der Einfluss von Luftschadstoffen auf landwirtschaftliche Kulturen

Im Gegensatz zur Situation bei den Waldschäden, wo über die Ursachen, die Wirkungszusammenhänge und die künftig zu erwartende Schadensentwicklung noch grosse Ungewissheiten herrschen, sind aufgrund jüngerer Untersuchungen empirisch gut abgestützte Aussagen über die Wirkungen der sommerlichen Ozonbelastung auf die Pflanzenproduktion möglich.

Die empirischen Grundlagen zur Abschätzung der Schadenswirkungen von Luftschadstoffen auf Kulturpflanzen stammen aus den USA. Dort wurden im Rahmen des «National Crop Loss Assessment Network» für verschiedene Pflanzen und Schadstoffe Expositions-Wirkungszusammenhänge ermittelt. In der Zwischenzeit wurden in der Schweiz diverse Forschungsarbeiten zu den Auswirkungen der hier vorherrschenden Luftschadstoffimmissionen auf schweizerischen Kulturen vorgenommen (Fuhrer, 1988; Fuhrer et al., 1989). Diese Untersuchungen bestätigen die ausländischen Resultate weitgehend und deuten darauf hin, dass die ozonbedingten Schäden in der Schweiz zum Teil noch höher sind.

■ Ursachen von Pflanzenschäden

Aufgrund der schweizerischen Immissionssituation kommen die im Sommer auftretenden Ozonimmissionen als Verursacher von Pflanzenschäden (Ertrags- und Qualitätsminderungen) in Frage. Die Immissionen von SO₂, NO₂ und der pH-Wert der Niederschläge erreichen die kritischen Schwellenwerte für Kulturpflanzen nicht. Die komplizierte Dynamik von Ozonbildung und -abbau führt dazu, dass relativ hohe ländliche Ozonkonzentrationen erreicht werden, die über den Tag weit weniger schwanken als in den Städten. Die pflanzenspezifische Schädigung hängt von der relativen Empfindlichkeit der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen ab.

■ Auswirkungen der Ozonimmissionen in der Schweiz auf landwirtschaftliche Kulturen

In acht landwirtschaftlichen Untersuchungsregionen mit etwa gleicher Luftqualität⁴⁾ wurden sieben verschiedene Kulturen untersucht (Fuhrer, 1989; Näf, 1991). Die Untersuchungsregionen liegen zwischen 350 bis 700 m ü.M. Die Ozonbelastung und die pflanzenbaulichen Bedingungen auf den übrigen Höhenstufen unterscheiden sich von diesen Untersuchungsregionen, was bei der Hochrechnung auf die Schweiz Unsicherheiten verursacht.

⁴⁾

Anières, Payerne, Oeschberg, Birmensdorf, Tänikon, Balzers, Schönenbuch, Sion: 18% der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz.



3 Landwirtschaftliche Produktionsausfälle

Pro Region ergeben sich bei den untersuchten sieben Kulturen die in der folgenden Tabelle ausgewiesenen Ertragsverluste:

	Relativer Ertragsverlust [in %]							
Region	Relativer Ertragsverlust pro Kultur							pro Region Mittel
	Kunst-wiese	Weizen	Mais	Rüben	Feld-gemüse	Hülsen-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 pro Kultur (Median)	8.4	1.6	0.5	5.5	0.3	3.3	10.7	

Tabelle 3.4
Berechnete relative Ertragsverluste für die ausgewählten Kulturen und Regionen in Prozent der Erträge (Fuhrer et al., 1989)

3.4.2 Monetäre Kosten der ozonbedingten Ertragsausfälle in der Landwirtschaft

■ Methodik der Kostenschätzung (INFRAS, TB1, Okt. 1993)

Die Abschätzung der monetären Kosten der von Fuhrer et al. aufgezeigten Ertragsminderungen basiert auf einem linearen Optimierungsmodell (Näf, 1991) und dem Fruchtfolge-Optimierungsmodell «Opticrop» des Instituts für Agrarwirtschaft der ETHZ. Das lineare Optimierungsmodell maximiert den Deckungsbeitrag (Erlös minus variable Kosten) unter der Nebenbedingung der vorherrschenden Ozonimmissionen. Die Differenz zwischen dem Deckungsbeitrag beim natürlichen Ozonniveau und demjenigen beim tatsächlichen Ozonniveau ergibt die monetären Kosten der Ozonbelastung. Für die Optimierung stehen 29 mögliche Fruchtfolgen zur Verfügung. Die Ergebnisse aus den Modellregionen werden über die entsprechenden Flächen auf die Schweiz hochgerechnet.

Das Optimierungsmodell berücksichtigt die Ertragsverluste von Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Körnermais, Kartoffeln, Kunstwiesen, Zuckerrüben, Stroh, Lesekartoffeln und Rübenlaub. Aufgrund von Untersuchungen der FAC werden zusätzlich die Ertragsverluste bei Rebland, Hülsenfrüchten und Feldgemüse einbezogen; gesamthaft haben diese Kulturen einen Anteil von ca. 36% an der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz.

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. Das von der OECD



berechnete Produzenten-Subventions-Äquivalent (PSE; 7. Landwirtschaftsbericht, 1992, S. 78 ff.) 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 würde nur einen Erlös von 21% der effektiv bezahlten Preise und Transfers ergeben. Auch das PSE enthält Verzerrungen durch Exportsubventionen auf dem Weltmarkt und trägt vielen anderen nationalen Agrarschutzmassnahmen zuwenig Rechnung. Weltmarktpreise sind daher ebenfalls nicht das Resultat eines Konkurrenzmarktes mit einheitlichen Rahmenbedingungen, sondern nur ein grober Indikator für Preise auf einem Konkurrenzmarkt. Sie dienen hier vielmehr der Festlegung einer **unteren Grenze** bei der Korrektur der schweizerischen Agrarpreise. Die **obere 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.

■ Monetariserte Kosten der Ertragsausfälle

Der Wert der Ertragsausfälle in der schweizerischen Landwirtschaft wird einmal zu Preisen von 1990 (inkl. Subventionen) und einmal ohne Subventionen ausgewiesen. Aus volkswirtschaftlicher Sicht muss die Bewertung der Ertragsausfälle ohne Subventionen erfolgen.

Hochrechnung	Ertragsverluste Schweiz 1990 (in Mio. Fr.)	
	inkl. Subventionen	exkl. Subventionen
Weizen, Gerste, Körnermais, Kartoffeln, Zuckerrüben, Kunstwiesen	228	48 – 103
Reben	75	16 – 34
Hülsenfrüchte	3	1 – 1
Feldgemüse	1	0 – 1
Total	307	64 – 139

Tabelle 3.5
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)

3.4.3 Zusammenfassende Bemerkungen

Im Bereich der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion können luftschadstoffbedingte Ertragsminderungen empirisch nachgewiesen werden. Die Unsicherheiten sind hier deutlich geringer als bei den luftschadstoffbedingten Waldschäden. Es zeigte sich dabei, dass für die landwirtschaftlichen Kulturen die **Ozonbelastung im Sommer** den relevantesten Risikofaktor darstellt. Begasungsversuche mit einheimischen Kulturen deuten darauf hin, dass die theoretischen Berechnungen mit Hilfe der USA-Daten die tatsächlichen Verluste in der Schweiz eher unterschätzen (Fuhrer et al., 1986, S. 78).



3 Landwirtschaftliche Produktionsausfälle

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 Annäherung an den tatsächlichen, volkswirtschaftlichen Ressourcenverzehr darstellt.

Hier werden 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 nur einen Teil der potentiell beeinträchtigten Bereiche ein. Der ganze Bereich der **Tierhaltung** oder die **Naturwiesen/Weiden** werden nicht untersucht. Allfällige **Synergiewirkungen** von anderen Luftschadstoffen werden bei den Kostenschätzungen nicht berücksichtigt. Die ausgewiesenen Kosten der ozonbedingten Produktionsausfälle stellen eine **untere Grenze** der Kosten infolge der Luftschadstoffemissionen dar.



3.5 Kosten luftschadstoffbedingter Gesundheitsschäden in der Schweiz

3.5.1 Luftschadstoffbedingte Gesundheitsschäden in der Schweiz

Zu den in der Schweiz vorherrschenden Immissionskonzentrationen liegt vorläufig noch wenig gesichertes Wissen über allfällige Gesundheitsrisiken vor. Festzustehen scheint, dass in sommerlichen und winterlichen Smogperioden Spitzenbelastungen auftreten, die von gesundheitlicher Relevanz sind und Risikogruppen (Kleinkinder, Ältere, gesundheitlich Geschädigte, Personen, die im Freien arbeiten müssen, Sportler/innen [Ozon] und Kinder) akut gefährden. Dank der zur Zeit in der Schweiz laufenden epidemiologischen Untersuchungen kann in Zukunft mit besseren Kenntnissen über die effektiven Gesundheitsbeeinträchtigungen gerechnet werden: Programm SAPALDIA⁵⁾, Untersuchungen an Schulkindern im Tessin (bezüglich Ozon), etc. Im Vordergrund steht der Einfluss der Luftschadstoffe – vor allem von Ozon und Stickstoffoxiden – auf die Atemwege, die Lungenfunktion und auf Allergien.

Die meisten Luftschadstoffe führen aber nicht zu spezifischen Krankheiten, von denen sofort auf die Ursache geschlossen werden könnte. Die in Frage kommenden Krankheiten werden durch viele verschiedene Ursachen ausgelöst oder begünstigt. Die Luftverschmutzung ist dabei in der Regel eine Ursache unter anderen, was die Identifikation und Zuordnung von Gesundheitsschäden erschwert.

■ Die gesundheitlich relevanten Schadstoffe in der Schweiz

In den 60er und 70er Jahren war SO₂, 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 meisten lufthygienischen Anstrengungen auf die Reduktion des Schwefelgehalts von Brennstoffen konzentriert. In den 80er Jahren verlor der Schadstoff SO₂ an Bedeutung und heutzutage bereiten die SO₂-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. NO₂ und VOC sind Vorläufersubstanzen von Ozon. Aufgrund der Immissionsverhältnisse in der Schweiz stehen bei der Bewertung der Gesundheitsschäden Ozon, die Stickstoffoxide und die VOC im Vordergrund. Die Bedeutung der Staub-/Russ- und der SO₂-Immissionen hat in der Schweiz abgenommen und ist kleiner als im benachbarten Ausland.

3.5.2 Kosten immissionsbedingter Gesundheitsschäden

Der Kenntnisstand in bezug auf quantitative Aussagen zum Zusammenhang zwischen Schadstoffbelastung und Gesundheitsschäden ist 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 ein Zusammenhang zwischen Luftschadstoffbelastung und Häufigkeit und Dauer von Atemwegs- und Herz-/Kreislaufkrankungen abgeleitet (Heinz, Klaassen-Mielke, 1990). Eine Reihe von Untersuchungen zu immissionsbedingten Krankheiten stammt aus den USA (s. Prognos, 1992, S. 78ff.). Nur einige wenige dieser Arbeiten sind jedoch grundlegender Art. Die übrigen basieren auf ihnen, variieren einzelne Annahmen oder differenzieren einzelne Elemente.

⁵⁾

Swiss Study on **Air Pollution and Lung Diseases in Adults**, 1990–1992.



3 Gesundheitsschäden

■ Methodik der Kostenschätzung (INFRAS, TB1, Okt. 1993)

In Ermangelung schweizerischer Arbeiten werden die Ergebnisse der Arbeit von Heinz et al. aus der BRD auf die Schweiz 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 (1981–1985). Gegenstand der Datenauswertung sind die **Arbeitsunfähigkeitsfälle einschliesslich der Erkrankungsfälle von Erwerbstätigen, die einen Krankenhausaufenthalt** zur Folge haben (für die Erkrankungen, die nicht zur Arbeitsunfähigkeit geführt haben und nicht stationär behandelt wurden, liegt kein geeignetes Datenmaterial vor). Allfällige Auswirkungen auf die **Mortalität** werden nicht untersucht. Ausgewertet werden die Erkrankungen, welche den Diagnosegruppen **Atemwegserkrankungen** sowie **Herz- und Kreislauferkrankungen** zugeordnet werden können. Die immissionsbedingten Gesundheitsschäden ergeben sich aus einem **Vergleich der Häufigkeit und der Dauer** der Kranken- und Arbeitsunfähigkeitsfälle in **unterschiedlich belasteten Gebieten** für definierte Bevölkerungsgruppen (nach Alter und Geschlecht) und für die zwei Krankheitsgruppen⁶⁾. In einer ergänzenden Studie wurde zusätzlich eine nach Schadstoffen differenzierte Datenauswertung durchgeführt (Heinz, in: Prognos, 1992, Bd. 2).

⁶⁾ Um Verzerrungen zu vermeiden, werden beruflich exponierte Personen, nicht ganzjährig versicherte Beschäftigte, AusländerInnen und ausserhalb der Untersuchungsregion Arbeitende aussortiert.

Ausgehend vom Mengengerüst von Heinz et al. für immissionsbedingte Gesundheitsschäden in BRD-Belastungsgebieten wird eine Übertragung auf die schweizerische Situation vorgenommen. Zu diesem Zweck werden für die Schweiz Belastungsgebiete definiert und quantifiziert. Als Kriterium zur Abgrenzung der Belastungsgebiete dient sinnvollerweise eine Immissionsbelastung, welche den Grenzwert überschreitet. Für jeden relevanten Schadstoff ergäben sich daher andere Belastungsgebiete. Die entsprechenden Immissionsdaten sind nur teilweise verfügbar. Auch in der deutschen Studie werden die Belastungsgebiete nicht nach einzelnen Schadstoffen abgegrenzt. Zum immissionsbelasteten Gebiet in der Schweiz werden die 51 Städte gezählt, die sich innerhalb der Agglomerationen des BFS befinden (BFS, 1984). Kleinere isolierte Städte auf dem Land werden nicht einbezogen:

Belastungsgebiet: 51 Städte mit (1990)	2'038'000 EinwohnerInnen
	1'220'000 Erwerbstätigen
	818'000 Nichterwerbstätigen

Bei der Umrechnung der immissionsbedingten Gesundheitskosten von 1984 in der BRD zu schweizerischen Gesundheitskosten 1990 werden die BRD-Teuerung von 1984–1990, ein Kaufkraftsparitätskurs von Fr. 1,05/1 DM (1990) und schweizerische Kostensätze im Gesundheitswesen (gem. Eco-plan, 1991) verwendet.

Mit der Beschränkung der Kostenschätzung auf die Gruppe der **Erwerbstätigen** wird nur ein Teil der luftschadstoffbedingten Krankheitskosten erfasst. Etwa 40% der Bevölkerung sind 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, wird bei den Nichterwerbstätigen mit einem reduzierten Kostenansatz pro Krankheitstag gerechnet. Rund 60% der durchschnittlichen Ausgaben der Krankenkassen pro Arbeitsunfähigkeitstag bei den Erwerbstätigen stammen aus der Lohnfortzahlung. Diese wird bei den Nichterwerbstätigen nicht berücksichtigt.



Wir nehmen an, dass die Gesundheit der Nichterwerbstätigen durch die Immissionen in Belastungsgebieten gleich beeinträchtigt wird wie diejenige von Erwerbstätigen. Bei Erkrankungen Erwerbstätiger und 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.

■ Monetäre Kosten immissionsbedingter Gesundheitsschäden in der Schweiz (INFRAS, TB1, Okt. 1993)

Die Umrechnung der Ergebnisse aus der BRD ergibt folgende Gesundheitskosten (1990):

Immissionsbedingte Gesundheitskosten pro Person	CH 1990
Atemwegserkrankungen	91 – 276 Fr./a
Herz- und Kreislauferkrankungen	42 – 370 Fr./a
Total pro erwerbstätige Person in Belastungsgebieten	133 – 646 Fr./a
Total pro nichterwerbstätige Person in Belastungsgebieten	54 – 220 Fr./a

Tabelle 3.6
Immissionsbedingte Gesundheitskosten in Belastungsgebieten für Erwerbs- und Nichterwerbstätige im Jahr 1990 (Fr. pro Person und Jahr). Basis: BRD-Gesundheitskosten in Belastungsgebieten nach Heinz et al., 1990

Auf die Schweiz hochgerechnet ergeben sich die folgenden immissionsbedingten Gesundheitskosten (INFRAS, TB1, Okt. 1993):

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 bei Nichterwerbstätigen beträgt: 81 Mio Fr./a ÷ 391 Mio Fr./a (1990).

Um den Einfluss einzelner Schadstoffe auf die Gesundheit abzuschätzen, wurde eine zusätzliche, nach Schadstoffen differenzierte Datenauswertung vorgenommen (Heinz, in: Prognos, 1992, Bd. 2). Dabei werden die Immissionskonzentrationen von Schwebestaub, Stickstoffdioxid und Schwefeldioxid berücksichtigt – Ozon figuriert leider nicht als Einflussvariable. Es ergibt sich ein Einfluss der NO₂- und der Schwebestaubbelastung auf die **Häufigkeit** von Arbeitsunfähigkeitsfällen bei Herz-/Kreislaufkrankheiten. Die Häufigkeit von Atemwegserkrankungen wird dagegen nur von der Schwebestaubbelastung 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 zusätzlich ein signifikanter Einfluss der Ozonbelastung auf die Atemwegserkrankungen vermutet werden.



3 Gesundheitsschäden

Aufgrund dieser Angaben kann keine genau differenzierte Zuweisung der Gesundheitskosten auf einzelne Schadstoffe vorgenommen werden. Wir gehen davon aus, dass die Kosten den folgenden Emissionen zugerechnet werden:

- SO₂-Jahresemissionen
- NO_x-Jahresemissionen
- VOC-Sommeremissionen (Ozon-Vorläufersubstanz)
- NO_x-Sommeremissionen (Ozon-Vorläufersubstanz)

3.5.3 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. 85 ff.):

- 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-/ Kreislauferkrankungen. 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 zur Zeit laufende Programm SAPALDIA in absehbarer Zeit neue Hinweise auf das Ausmass und die Ursachen des immissionsbedingten Krankheitsgeschehens in der Schweiz liefern wird.



3.6 Luftschadstoffbedingte Gebäudeschäden

Die Luftschadstoffimmissionen beeinflussen sämtliche exponierten Materialoberflächen. In dieser Arbeit werden nur die Schäden an den **Gebäude-aussenfassaden des Normalgebäudebestandes** untersucht. Die relativ hohen Schadenskosten 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**⁷⁾. Die folgenden Überlegungen basieren auf zwei Untersuchungen aus den Jahren 1986 und 1992 (INFRAS, 1986; INFRAS, Juli 1992).

3.6.1 Immissionen und Schadensmechanismen im Gebäudebereich

■ Schadensmechanismen

Die Luftschadstoffe wirken über zwei Depositionsmechanismen auf die Gebäudeoberflächen ein:

- **Trockene**, gasförmige **Deposition** durch Konvektion (Wind) und Diffusion auf Gebäudehülle, wo sie durch chemische Reaktionen oder physikalische Anlagerung zurückgehalten werden.
- **Nasse Deposition** von Gasen und Aerosolen in Niederschlägen, Nebel, Schnee, Tau und Eis. Die nasse Deposition ergibt einen Belastungssockel, der primär von der jährlichen Niederschlagsmenge abhängt.

Daneben werden die Gebäudehüllen durch **Staub- und Russablagerungen verschmutzt**. Die folgenden Schadensmechanismen spielen bei den immissionsbedingten Gebäudeschäden eine wichtige Rolle:

- Vorzeitige Alterung von Anstrichen infolge von SO₂-, NO₂- und O₃-Immissionen und infolge der Verschmutzung durch Russ und Staub.
- Schädigung von Natursteinen infolge von SO₂-Emissionen (lösender und treibender Angriff).
- Beschleunigte atmosphärische Korrosion von Metallen (Spenglerbleche, Dach- und Fassadenverkleidungen, Dachrinnen, Fallrohre, zementgebundene und Metallfassaden, Metallfensterrahmen) infolge saurer Luftschadstoffe: vor allem SO₂, daneben aber auch Stickoxide, Chlorwasserstoffe, organische Säuren etc.
- Schädigung von Betonaussenflächen durch SO₂ (ähnlich wie Schädigung der Natursteine). Bei gut konstruierten Stahlbetonkonstruktionen konnten dagegen bei den aktuellen SO₂-Immissionen keine Beeinträchtigungen nachgewiesen werden.

■ Die Luftschadstoffbelastung der Gebäude in der Schweiz

Gebäudeschäden werden primär durch SO₂-, NO_x-, O₃- und Russ-/Staubimmissionen verursacht (s. oben).

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. In städtischen Gebieten

⁷⁾

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: ≈ 3,6 Mio Fr./a ≈ **4 Mio. Fr./a 1990.**



3 Gebäudeschäden

sind bei NO₂ und SO₂ Grenzwertüberschreitungen häufig. Die NO₂-Konzentrationen liegen aber auch in den Agglomerationen und punktuell sogar in ländlichen Gebieten (verkehrsreiche Standorte) über dem Grenzwert.

8) Immissionsmessungen von kantonalen, kommunalen und NABEL-Stationen von 1990 (BUWAL, Immissionswerte 1990); Jahresmittelwerte.

Der Anteil der Feuerungen an den gesamten Schadstoffimmissionen wird anhand einer detaillierten Analyse der verfügbaren Immissionsmessdaten⁸⁾ kombiniert mit Immissionsmodellüberlegungen bestimmt. Die Messorte werden dabei in drei Gruppen klassiert: **Stadt, Agglomeration** und **Land**. Innerhalb jeder Gruppe werden die Messorte in **«verkehrsexponiert»** und **«nicht verkehrsexponiert»** (Lärmbelastung <60 dB[A]) aufgeteilt.

Der Verkehr hat an stark befahrenen Strassen («verkehrsexponiert») einen wichtigen Einfluss auf die gesamte Immissionsbelastung: Die Immissionsanteile sind für die drei Schadstoffe an den verkehrsexponierten Lagen durchwegs höher als an nicht verkehrsexponierten.

Feuerungsbedingte Immissionsanteile in %	Stadt	Agglomeration	Land
1. verkehrsexponiert			
SO ₂	62–72	53–63	59–69
NO ₂	24–30	25–31	11–17
Staubniederschlag	35–45	37–47	39–49
2. nicht verkehrsexponiert			
SO ₂	85–95	85–95	85–95
NO ₂	27–37	28–38	21–31
Staubniederschlag	80–90	85–95	90–98

Tabelle 3.7
Bereiche für durchschnittliche (schweizerische Mittelwerte) Immissionsanteile der Feuerungen an den gemessenen Immissionskonzentrationen (aus INFRAS, Juli 1992, S. 12)

3.6.2 Kosten der immissionsbedingten Gebäudeschäden in der Schweiz

Die Kosten der durch die Feuerungsimmissionen verursachten Gebäudeschäden setzen sich wie folgt zusammen:

- Zusätzliche Kosten der Wert- bzw. Substanzerhaltung von Bauten in belasteten Gebieten, welche durch **vorzeitige Alterung oder Verschmutzung** der Gebäudehülle entstehen (zusätzliche/vorzeitige Ausbesserungen, Reparaturen, Renovationen, Ersatz und Reinigungen).
- Die immissionsbedingten Kosten manifestieren sich primär über **verkürzte Reinigungs- und Renovationszyklen**. Dadurch steigen die jährlichen **Reinigungs- und Kapitalkosten** der Gebäudehüllen in belasteten Gebieten.

Die Fassadenflächen des schweizerischen Gebäudebestandes (65'100 ha) werden nach Belastungs- bzw. Immissionskategorie (Stadt, Agglomeration, Land), Verkehrsexposition und Materialart differenziert (Basis: Wüest + Gabathuler, 1990; INFRAS, 1986 und Juli 1992, Anhang 4). Der Fassadenflächenanteil von Wohngebäuden beträgt rund 25%. Etwa 33% der Fassadenflächen sind verputzt, 22% verkleidet, 18% Fenster, 16% roh.

■ Zusätzliche Renovationskosten infolge der Luftverschmutzung

Die immissionsbedingte Verkürzung der Lebensdauer der Materialien der Gebäudehülle verursacht zusätzliche Kapitalkosten. Der Einfluss der Luftverschmutzung in den verschiedenen belasteten Gebieten **Stadt, Agglo, Land**⁹⁾

9) Immissionskategorien: **Stadt:** stark belastete städtische Gebiete; **Agglo:** mittel belastete Gebiete in städtischen Agglomerationen (ohne Kernstadt); **Land:** schwach belastete ländliche Gebiete.



ergibt sich aus Expertenbefragungen, empirischen Dosis-Wirkungs-Funktionen etc. (s. INFRAS, 1986, S. 60–70; BAM, Okt. 1990). Dabei wird die vereinfachende und vorsichtige Annahme getroffen, dass die Lebensdauerverkürzungen in der Immissionskategorie **Land** vernachlässigbar sind, das heisst, dass die Lebensdauern in der Immissionskategorie **Land** als Referenzlebensdauern verwendet werden.

Bauteile/Materialien	«Stadt»	«Agglo»	«Land»	Ø Lebensdauer «Land» (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 3.8
Schätzung der Lebensdauerverkürzungen durch Schadstoffeinfluss nach Immissionskategorien auf der Grundlage von (INFRAS, 1986; BAM, 1990)

Ausgehend von den drei Immissionskategorien, den Gebäudeausserflächen und -materialien in diesen Immissionskategorien und den Lebensdauerverkürzungen in den Immissionskategorien Stadt und Agglo ergeben sich die folgenden zusätzlichen Kapitalkosten der feuerungsbedingten Luftverschmutzung:

Total 510 Mio. Fr./a,
davon 120 Mio. Fr./a an verkehrsexponierten Standorten.



3 Gebäudeschäden

Material	Zusätzliche Kapitalkosten Gebäudehülle in Mio Fr./a (Preisbasis 1991)						
	verkehrsexponiert			nicht verkehrsexponiert			Total Anteil
	Total Mio Fr./a	Anteil Verkehr %	Anteil Feuerungen Mio Fr./a	Total Mio Fr.	Anteil Verkehr %	Anteil Feuerungen Mio Fr./a	Feuerungen Mio Fr./a
Stadt							
• Fassaden/Fenster	166	55%	75	221	31%	152	227
• Bleche/Dachrinnen/Fallrohre	19	33%	13	43	10%	39	52
Total Stadt	185	≈ 53%	88	264	≈ 30%	191	279
Agglo							
• Fassaden/Fenster	58	57%	25	221	29%	156	181
• Bleche/Dachrinnen/Fallrohre	9	42%	5	48	10%	43	68
Total Agglo	67	≈ 54%	30	269	≈ 26%	199	229
Total Stadt + Agglo	252	≈ 53%	118	533	≈ 28%	390	508

Tabelle 3.9
Zusätzliche Kapitalkosten bei Gebäudehüllen nach Immissionskategorie für die verkehrsexponierten/nicht verkehrsexponierten Gebäude, Schweiz 1991; und Ermittlung des feuerungsbedingten Anteils

■ Zusätzliche Reinigungskosten infolge der Luftverschmutzung

Die **zusätzlichen** Reinigungskosten von Gebäudeausenflächen werden primär durch anthropogen emittierte Staub- und Russemissionen verursacht. Der grösste Teil dieser Emissionen stammt von stationären Quellen (80–95%). Nur an verkehrsexponierten Standorten erreicht der Verkehrsan- teil 50–60%. Unter den Reinigungskosten verstehen wir die Aufwendungen für die regelmässige Reinigung von Fenstern, Türen, Storen, Läden, Metall- und Glasfassaden.

Die Luftverschmutzung führt zu verkürzten Reinigungszyklen und/oder ästhetischen Beeinträchtigungen. Die Kostenschätzung berücksichtigt nur die verkürzten Reinigungszyklen bei professionell gereinigten Industrie-, Gewerbe-, Dienstleistungs- und Verwaltungsbauten. **Allfällige Reinigungskosten bei Wohnbauten werden vernachlässigt.**

Auf Grund der aktuellen Immissionsverhältnisse sind in den Immissionska- tegorien **Agglo** und **Land** keine Verkürzungen von Reinigungszyklen infolge anthropogen verursachten Luftschadstoffimmissionen nachweisbar.

Die **feuerungsbedingten Reinigungskosten** bei **Geschäftsbauten** (Fenster) in der Immissionskategorie **Stadt** betragen:
127 Mio. Fr. pro Jahr (Schweiz, 1990).

Zusätzliche Reinigungskosten von Metallfassaden, Fensterläden, Lamellen und Storen werden mangels brauchbarer empirischer Daten vernachlässigt. Die Kostenschätzung dürfte deshalb eine untere Grenze darstellen, da auch in der Immissionskategorie **Agglo** sowie bei Wohnbauten zusätzliche Reinigungskosten zu erwarten sind.



3.6.3 Zusammenfassende Bemerkungen

Die berechneten Jahreskosten durch die feuerungsbedingte Luftverschmutzung basieren auf verschiedenen – zum Teil recht unsicheren – Annahmen:

- 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 Lebensdauer**verkürzungen** 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 bei der Übertragung der Sätze auf Schweizer Durchschnittsverhältnisse entstehen.
- 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 ($>/< 60 \text{ dB[A]}$). Diese Grössenordnung stützt sich ab auf die empirischen Untersuchungen in Zürich/Biel und Neuchâtel.

Aufgrund einer Fehlerrechnung ergeben sich die folgenden Resultate mit Bandbreiten:

	Erwartungswerte	Streubreite
Zusätzliche Renovationskosten:	Mio. Fr./a	
– Stadt	280	$\pm 50\%$
– Agglo	230	$\pm 50\%$
Zusätzliche Reinigungskosten Stadt	130	$\pm 52\%$
Total feuerungsbedingte Gebäudeschadenskosten	640	$\pm 30\%$

Tabelle 3.10
Gebäudeschadenskosten infolge von Feuerungsimmissionen, Ermittlung der Streubreite für das Gesamtergebnis mit der Methode der Fehlerfortpflanzungsrechnung (vgl. die Berechnungen in INFRAS, Juli 1992, Anhang 10)

Die gesamten Gebäudeschadenskosten durch die feuerungsbedingte Luftverschmutzung werden auf rund **640 Mio. Fr.** pro Jahr geschätzt. Das Ergebnis liegt mit grosser Wahrscheinlichkeit innerhalb einer Bandbreite von $\pm 30\%$; plausible Unter- und Obergrenzen dürften entsprechend bei **450 bzw. 830 Mio. Fr.** pro Jahr liegen.



3.7 Externe Kosten von Transport, Lagerung und Raffination von Öl und Gas

Nach der Erfassung der externen Kosten der energiebedingten Luftschadstoffbelastung werden anschliessend die **Unfallrisiken** der Strom- und Wärmeversorgung mit Öl und Gas sowie die wichtigsten Auswirkungen auf **Gewässer und Boden** identifiziert, quantifiziert und monetarisiert.

3.7.1 Erfasste Aktivitäten und Umweltbelastungen

Es zeigt sich, dass sich im Bereich der Öl- und Gasversorgung keine grundsätzliche Unterscheidung zwischen Grossrisiken – Grossereignissen mit sehr kleiner Eintretenswahrscheinlichkeit – und Effekten im Normalbetrieb aufdrängt. Aufgrund von relevanzorientierten Prozessanalysen (INFRAS, 1990) werden die folgenden Aktivitäten und Umweltbelastungen erfasst:

■ Transport, Raffination und Lagerung von Erdöl bzw. Erdölprodukten:

- Tankerunfälle, Offshore-Förderung, Transport auf Meeren: Belastung der Meere
- Transport und Lagerung von Erdöl-(produkten) in der Schweiz (Boden- und Gewässerbelastung)
- Erdölraffination (Gewässerbelastung).

■ Transport, Lagerung und Verteilung von Gas (Erdgas):

- Rohrleitungen (Hochdruck, Niederdruck): Unfallfolgen
- Röhrenspeicher, Kugelspeicher: Unfallfolgen
- Druckreduzier- und Messstationen: Unfallfolgen

■ Systemgrenzen/Bezugsgrössen:

Grundsätzlich gilt die Systemgrenze Schweiz und als Bezugsgrösse die schweizerischen Umsätze von Öl bzw. Gas. Bei den global wirksamen Verschmutzungen der Weltmeere (Tankerschiffahrt, Tankerunfälle etc.) gilt als Bezugsmenge der Weltölverbrauch (Systemgrenze Erde).

3.7.2 Externalitäten bei Transport, Lagerung und Raffination von Erdöl

Der Weltölverbrauch betrug 1990 3'118 Mio. t (Anteil der Schweiz 0,41 % bzw. 12,7 Mio. t, Westeuropa 591 Mio. t).

■ Meerestransport, Offshore-Förderung

Die Belastung der Weltmeere durch Erdölprodukte hat diverse Quellen und liegt im Bereich von 1,7– 8,5 Mio. t/a (Clark, 1992). Der Anteil der Erdölwirtschaft an dieser Verschmutzung beträgt rund 580'000–600'000 t/a¹⁰⁾ oder rund **0,02%** des jährlichen Welt-Erdölabsatzes.

Die Auswirkungen der Verschmutzung sind vom Verschmutzungsort abhängig. Verschmutzungen auf offener See und in wärmeren Gegenden werden relativ rasch durch Verdunstung und Bakterien abgebaut – mit Ausnahme von Klumpen aus Ölteppichen, welche auf den Meeresboden absinken, dort

¹⁰⁾

Verschmutztes Ballastwasser
160'000 t/a;
Tankerunfälle ø 120'000 t/a;
Raffinerien, Offshore-Förderung
150'000 t/a, etc.



3 Transport, Lagerung und Raffination von Öl und Gas

toxisch wirken und beim Abbau viel Sauerstoff zehren. Verschmutzungen von Küsten verursachen dagegen viel grössere ökologische Schäden, vor allem in Kaltgebieten und arktischen Zonen. Dort kann die Erholung des Ökosystems bis zu 100 Jahre dauern (in gemässigten Breitengraden in der Regel 3–8 Jahre).

Die Meeresverunreinigungen durch Öleinträge verursachen diverse Kosten, welche teils interner und teils externer Art sind. Intern sind die Kosten dann, wenn sie durch die Verschmutzer bzw. ihre Versicherungen getragen werden (Schadenersatz, Reinigungskosten, Abgeltungen für Verdienstaussfälle etc.). Extern sind alle übrigen Kosten. Ein Teil davon ist grundsätzlich quantifizierbar (zusätzliche Reinigungskosten bis zur Wiederherstellung einer befriedigenden Umweltqualität, nicht gedeckte Verdienst- und Ertragsausfälle). Ein Teil der externen Kosten ist jedoch kaum quantifizierbar: beispielsweise Reduktion der lokalen Artenvielfalt (ev. temporär), Wert von nicht wirtschaftlich genutzten Tieren und Pflanzen etc..

Die wenigen ausgewiesenen Kosten geben auch Hinweise auf die zu erwartenden externen Kosten. Unfälle in Kaltgebieten und in der Nähe ökologisch sensibler Küstenbereiche ergeben hohe externe Umweltkosten. Werden diese jedoch auf den gesamten Weltabsatz von Erdöl bezogen, dürften sie maximal im Bereich von 1,0–5 Fr./t, das heisst 3–15 Mrd. Fr./a liegen. Das entspricht etwa 0,2–1,2% des mittleren Erdöl-Endverbrauchspreises (ca. 300 Fr./t) in der Schweiz. Diese Grössenordnung ist im Lichte der übrigen Schäden und der dabei bestehenden Ungewissheiten von untergeordneter Bedeutung.

■ Transport und Lagerung von Erdölprodukten in der Schweiz

Die folgende Übersicht dokumentiert die Unfälle mit Erdölprodukten in der Schweiz in den Jahren 1989–1991, bei denen mehr als 100 l freigesetzt wurden:

		Verschmutztes Medium								
		Erdreich			Oberflächengewässer			Grundwasser		
		Lager	Trsp.	Total	Lager	Trsp.	Total	Lager ¹⁾	Trsp.	
ausgeflossen 89–91	[l]	47'335	23'690	71'025	20'715	2'330	23'045	81'800	—	
pro Jahr	[l/a]	15'778	7'897	23'675	6'905	777	7'682	27'267	—	
zurückgehalten 89–91	[l]	43'860	22'865	66'725	9'275	1'928	11'203	56'640	—	
pro Jahr	[l/a]	14'620	7'622	22'242	3'092	643	3'735	18'880	—	
Anzahl Ereignisse pro Jahr		78	6,3	84	10	1,7	12	1,3		
pro Ereignis:										
ø ausgeflossen	[l]	202	1'247	282	668	466	640	20'450	—	
ø zurückgehalten	[l]	187	1'203	265	299	386	310	14'160	—	
ø Belastung in	[l]	15	244	17	369	80	330	6'290	—	

Tabelle 3.11
Verschmutzung von Erdreich, Oberflächen- und Grundwasser durch Ölunfälle bei Transport und Lagerung in der Schweiz in den Jahren 1989–1991 (Quelle: BUWAL, Abt. Immissionsschutz)

¹⁾
Ein Grossereignis: 75'000 l ausgeflossen, 50'000 l zurückgehalten



Seit dem Bestehen der 5 Pipelines¹¹⁾ in der Schweiz wurden bis 1990 315 Mio. t Erdölprodukte ohne Unfall transportiert (Erdölvereinigung, 1991, S. 17).

Von den 1991 aufgetretenen 14 Schäden bei Ölpipelines in Europa verursachten fünf Schäden leichte Bodenverschmutzungen (<1000 m²) und 7 Schäden schwere Bodenverschmutzungen, jedoch ohne Dauerschäden. 2 Benzin/Diesel-Schäden beeinträchtigten Wasserläufe weitflächig, aber nicht dauerhaft.

Die Ereignisse mit Ölschäden in der Schweiz sowie bei Pipelines in Europa sind belastungsmässig dokumentiert. Zu den ökologischen Folgewirkungen und allfälligen Kosten fehlen die entsprechend detaillierten Angaben. Die verfügbaren generellen Hinweise deuten darauf hin, dass die Ölunfälle lokal bedeutende Umweltschäden verursachen, wenn Gewässer oder Grundwasser beeinträchtigt werden, dass jedoch die Schädigungen vorübergehend sind. Bodenverschmutzungen werden in der Regel behoben (biologisch und/oder durch Ausbaggerung). Bezüglich der externen Kosten sind nur diejenigen Schäden und Kosten relevant, die nicht repariert werden bzw. nicht von den Verursachern übernommen werden müssen. Die Grössenordnung der aufgetretenen Leckmengen und der dadurch verursachten externen Kosten ist im Vergleich mit den übrigen Externalitäten der Strom- und Wärmeversorgung sowie verglichen mit dem Wert der umgesetzten Erdölprodukte gering. Wegen ihrer geringen Bedeutung für die externen Kosten und den Schwierigkeiten bei ihrer Quantifizierung werden sie anschliessend vernachlässigt.

■ Raffinerien

Raffinerien produzieren grosse Mengen von Raffinerieabwasser (ca. 3,5 t pro t Öl, Tendenz sinkend), welche mit Ölrückständen verschmutzt sein können (ca. 6,7 t pro Mio. t prozessiertes Erdöl, 1990). Ein beträchtlicher Teil der Gewässerbelastungen der Raffinerien wird zurzeit durch End-of-the-pipe-Massnahmen (Abwasserreinigung, Verbrennung der organischen Abfälle etc.) internalisiert. Die Restbelastungen sind relativ klein und haben eine sinkende Tendenz. Zu den Auswirkungen der Restemissionen auf Gewässer- und Bodenqualität konnten keine Angaben verfügbar gemacht werden. Ihre Bedeutung und die allfälligen externen Kosten werden im Vergleich mit den übrigen externen Kosten der Strom- und Wärmeversorgung als gering eingeschätzt und werden daher nicht weiterverfolgt.

3.7.3 Externalitäten bei Transport und Lagerung von Erdgas

Die Untersuchung der externen Effekte beim Transport und der Lagerung von Gas beschränkt sich hier auf den Erdgasumsatz primär in der Schweiz. Der Stadtgasverbrauch (1991 noch 67 GWh/a bei einem Erdgasverbrauch von 23'500 GWh/a) und der Flüssiggasverbrauch werden vernachlässigt.

Der Erdgasverbrauch in Westeuropa betrug 1990 rund 263 Mrd. Nm³, in der EG 250 Mrd. Nm³, und in der Schweiz 1,845 Mrd. Nm³ oder 20'808 GWh/a (Eurogas). Das Hauptaugenmerk liegt auf den Störfallrisiken bei Hochdruckleitungen, -speichern und Druckreduzier- und Messstationen. Eine internationale Auswertung von 443 Gasunfällen aus den Jahren 1932–1987 ergibt folgende Resultate:

- Die meisten Unfälle geschehen beim Transport und bei Leitungsversagen. Bei Hochdruck-Gasanlagen sind technisches Versagen an der Anlage (Korrosion, Versagen Schweisssnaht) und Unfälle bei Bau- oder Reparaturarbeiten Hauptunfallursache (SKS, 1991, S. 37 f.).

¹¹⁾

Oléoduc du Jura, du Rhône SA, Oleodotto del Reno, Sappro, Centraleurop. Pipeline (CEL, nur Transit).

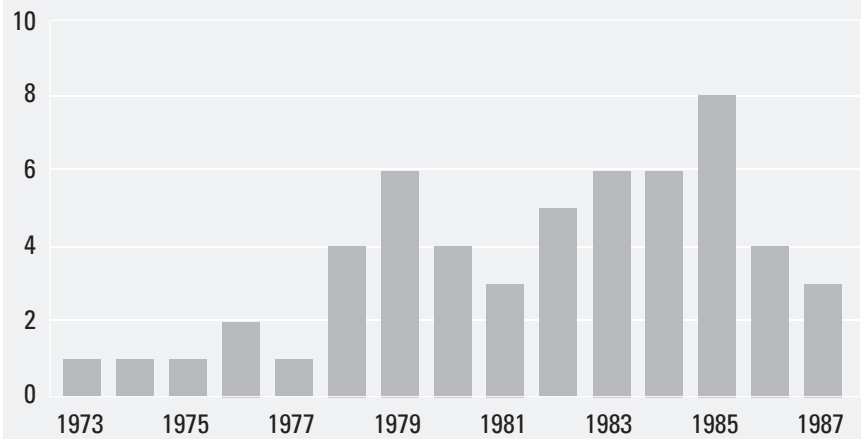


3 Transport, Lagerung und Raffination von Öl und Gas

■ Ereignisse in der Schweiz

Die schweizerischen Ereignisse werden, soweit überhaupt erfasst, von Bützer ausgewertet (Bützer, 1988, S. 119 f.). Daneben bestehen Angaben des Technischen Inspektorats des Schweizerischen Gasfaches (TISG, 1991) zu Todesfällen mit Leitungsgas: 1981– 1991 1 bis 5 Todesfälle pro Jahr, im Durchschnitt der 11 Jahre 3,2 Todesfälle pro Jahr. Diese Ereignisse umfassen alle Todesfälle im Zusammenhang mit der Erzeugung, der Speicherung, dem Transport, der Verteilung und der Nutzung von leitungsgelagertem Gas in der Schweiz (ohne Selbstmorde mit Leitungsgas). Entgegen der hier sonst verwendeten Abgrenzung werden oben somit auch Todesfälle bei der Gasnutzung miteingerechnet.

Flüssiggas-/Erdgasunfälle Schweiz Auswertung von 9 Kantonen



Figur 3.3
Unfälle mit Flüssiggas und Erdgas in
der Schweiz (9 Kantone)
(Bützer, 1988, S. 119)

■ Externe Kosten

Externe Effekte treten bei den angegebenen Unfallrisiken nur dann auf, wenn Kosten ausserhalb des Strom- und Wärmebereiches entstehen. Solange als nur Gasnutzer/innen oder Betreiber/innen der Gasinfrastruktur betroffen sind, müssen allfällige Unfallkosten als interne Kosten verbucht werden. Von den hier untersuchten Unfallrisiken dürften primär bei den folgenden externe Kosten erwartet werden:

- Freisetzen bei Röhren- oder Kugel-Hochdruckspeichern mit je nach Umgebung beträchtlichem Gefährdungspotential.
- Leck bei Gashochdruckleitungen im Siedlungsgebiet. Die Eintretenswahrscheinlichkeit dürfte eher tiefer als im Ausland liegen: Die Leitungen werden bei der Erstellung streng kontrolliert, alle Schweissnähte geröntgt. Im Betrieb werden sie zweimal monatlich abgesperrt. Bauliche Veränderungen in der Umgebung sind meldepflichtig. Die Leitungen werden periodisch von innen abgesucht.
- Transport von Propan, Butan, LNG (v.a. Strassentransport).

Grundsätzlich können auch bei Explosionen im Bereich der Niederdruck-Gasverteilung externe Kosten auftreten: Sachschäden und Verletzungen bei «Unbeteiligten» (Gäste, Nachbarn ohne Gas, Passanten etc.).

In der Schweiz ist bisher kein Gas-Grossereignis aufgetreten. Die Quantifizierung der Risiken bei Speichern und allenfalls bei Hochdruckleitungen



würde eine fallweise Betrachtung unter Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse erfordern (Exposition). Dazu fehlen detaillierte Grundlagen weitgehend. In Zürich befindet sich der grösste Gasröhrenspeicher Europas. Er ist der einzige Röhrenspeicher in der Schweiz, der sich im Siedlungsbereich (Industriezone, Sportplätze) befindet. Gemäss Auskunft der Betreiberin (GVO) liegt das Todesfallrisiko bei einem Unfall im Bereich von 10^{-5} Tote/a. Die Höhe der zu erwartenden externen Kosten ist jedoch bezogen auf den Gasabsatz gering und wird anschliessend vernachlässigt.

3.7.4 Zusammenfassende Bemerkungen

Für den hier verfolgten Zweck interessieren grundsätzlich nur die schweizerischen Belastungen und die global wirkenden Meeresbelastungen. Es zeigt sich, dass ein Teil der resultierenden Boden- und Gewässerbelastungen von den Verursachern behoben oder entschädigt werden muss und daher intern ist. Die verbleibenden externen Kosten von globaler Meeresverschmutzung, Boden- und Gewässerbelastung in der Schweiz und Unfallrisiken in der Schweiz betragen grob abgeschätzt:

Erdölprodukte 0,1–0,5 Fr./100 kg = 2–12 Rp./GJ = **0,01–0,04 Rp./kWh**

Gas

vernachlässigbar



3.8 Externe Kosten der Nutzung der fossilen Rohstoffe: Treibhauseffekt und intertemporale Verteilungsgerechtigkeit

3.8.1 Globale Externalitäten bei der Nutzung fossiler Rohstoffe

Bisher standen die lokalen und nationalen Externalitäten, die bei der Nutzung fossiler Energieträger für die Strom- und Wärmeversorgung entstehen, im Mittelpunkt: Externe Kosten der Schadstoffemissionen und der Unfallrisiken. Hier geht es nun um Externalitäten bei der Nutzung fossiler Ressourcen, welche eine zeitliche und eine international/ globale Dimension aufweisen:

■ Verstärkung des Treibhauseffektes (TE) infolge der Verbrennung fossiler Rohstoffe:

Bekanntlich erhöht die Verbrennung der fossilen Rohstoffe – primär zu Wasser und CO₂ – die globale CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Dadurch verstärkt sich der Treibhauseffekt, was zu globalen Temperaturerhöhungen führen kann. Zum Treibhauseffekt tragen auch noch andere anthropogene Emissionen bei: Methan aus der Landwirtschaft und von der Energieversorgung, FCKW, Ozon, Stickstoffoxide (v.a. Distickstoffoxid N₂O aus der Landwirtschaft). Temperaturerhöhungen verändern das Weltklima mit regional stark unterschiedlichen Auswirkungen. Die Folgen dieser globalen Klimaveränderungen sind ein intertemporaler externer Effekt der Nutzung der fossilen Ressourcen: Die CO₂-Akkumulation in der Atmosphäre verursacht bei den künftigen Generationen Schäden. Die Berücksichtigung dieser externen Kosten setzt einen langen Betrachtungshorizont voraus. Die externen Kosten ergeben sich dann als Gegenwartswert der langfristigen Schäden infolge der CO₂-Akkumulation.

■ Intertemporale Verteilungsgerechtigkeit bei der Nutzung der fossilen Rohstoffe:

Die fossilen Rohstoffe stellen einen nichterneuerbaren Energiekapitalstock dar. Der Verbrauch fossiler Energieträger reduziert für künftige Generationen den Nutzen, den sie aus diesen Rohstoffen gewinnen können. Im Unterschied zu anderen Produktionsfaktoren können fossile Energieträger nicht wiedergewonnen werden, sie sind erschöpflich, ihre Knappheit steigt mit zunehmendem Verbrauch. Es stellt sich die Frage, wie weit in den heutigen Ressourcenpreisen die Interessen der künftigen Generationen enthalten sind und wie optimal die intertemporale Allokation dieser Ressourcen zwischen den Generationen ist. Der Konsum der nichterneuerbaren Ressourcen kann als (zeitliche) Externalität bezeichnet werden, wenn dadurch die Wohlfahrt der künftigen Generationen beeinträchtigt wird. Dabei ist folgendes zu beachten: Der oben dargestellte Treibhauseffekt wird durch den Verbrauch der fossilen Rohstoffe massiv verstärkt. Wenn nicht unkalkulierbare Klimarisiken in Kauf genommen werden sollen,¹²⁾ dann muss der Verbrauch dieser Rohstoffe wegen der resultierenden Treibhausgasemissionen begrenzt werden, noch bevor die Rohstoffe erschöpft sind.

Diese beiden Externalitäten sind deshalb sachlich miteinander verbunden und stellen gewissermassen zwei Seiten derselben Problematik dar. Bei der Ermittlung der externen Kosten des Treibhauseffektes geht es primär um die Allokationseffizienz unter Berücksichtigung der zukünftigen Auswirkungen der heutigen Allokationsentscheidungen. Bei den intertemporalen Effekten steht dagegen die Verteilungsfrage über die Generationen im Vordergrund. Da mit der Nutzung der fossilen Ressourcen sowohl die Treibhausproblematik als auch die Frage der intertemporal gerechten Nutzung der fossilen Ressourcen tangiert wird, drängt sich das folgende Vorgehen auf:

¹²⁾

Gemäss IPCC wird bei einer CO₂-Konzentration von etwa 560 ppm (doppelte vorindustrielle Konzentration) eine Grenze erreicht, wonach die Klimaeffekte unkalkulierbar werden; heutige CO₂-Konzentration: 353 ppm.



3 Nutzung der fossilen Rohstoffe

- Die mit dem Treibhauseffekt verbundenen Externalitäten werden mit zwei Quantifizierungsansätzen abgeschätzt. Die verfügbaren **Schadenskostenschätzungen** weisen stark divergierende Reichweiten auf und basieren auf unterschiedlichen Schadensszenarien bzw. Annahmen für die Ermittlung der Schadenkosten. Die resultierende Bandbreite der ausgewiesenen Kosten ist so gross, dass die Schätzungen keine brauchbare Basis für Energiepreis- und Emissionszuschläge abgeben.

Daher werden die Emissions- und Energiepreiszuschläge aufgrund der Vermeidungskosten ermittelt, welche bei einer kostenoptimalen CO₂-Reduktionsstrategie bis 2025 entstehen (Reduktion der CO₂-Emissionen im Jahr 2025 um 50%, gemäss Zielsetzung des Intergovernmental Panel on Climate Change). Diese Vermeidungskosten bei Zugrundelegung der IPCC-Zielsetzung (Standard-Preis-Ansatz) überschätzen tendenziell die effektiv zu erwartenden künftigen Kosten, da sie dem technischen Fortschritt nur ungenügend Rechnung tragen können. Auf der andern Seite sind auch die Durchschnittskosten, welche tiefer als die Grenzvermeidungskosten sind.

- Betrachtung der mit der intertemporal gerechten Nutzung der fossilen Rohstoffe verbundenen Externalitäten: Berechnungsansätze, welche von einer funktionalen Erhaltung des Energiekapitalstocks der fossilen Rohstoffe in Form von Backstop-Technologien mit erneuerbaren Energien ausgehen, treffen Annahmen über Bevölkerungs-, Verbrauchs- und Technologieentwicklungen etc., welche bis ins 22. Jahrhundert reichen. Wir gehen davon aus, dass der Treibhauseffekt der limitierende Faktor der Ressourcennutzung ist. Die Externalitäten der heutigen Ressourcennutzung können dann unter diejenigen des Treibhauseffektes subsumiert und mit dem Vermeidungskostenansatz ermittelt werden. Die Massnahmen zur Vermeidung der CO₂-Emissionen entsprechen dabei weitgehend den Backstop-Technologien zur funktionalen Erhaltung des Ressourcenkapitalstocks.

3.8.2 Die Treibhausgasemissionen als Externalität

■ Die treibhausrelevanten Spurengase: Treibhauswirkung und Emissionsentwicklung

Durch die menschlichen Aktivitäten (v.a. seit der Industrialisierung) steigt die Konzentration der treibhausrelevanten Spurengase in der Atmosphäre. Diese Spurengase reflektieren die Wärmeabstrahlung der Erde, wodurch weltweit die Temperaturen steigen und Klimaveränderungen ausgelöst werden können. Relevante anthropogene Treibhausgase sind Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW) und Ozon (O₃). Der Beitrag der verschiedenen Gase an den Treibhauseffekt – das sogenannte Global Warming Potential (GWP) – ist abhängig von der Konzentration (Menge pro Volumen), von der mittleren Verweilzeit in der Atmosphäre und vom relativen Treibhauspotential je kg Spurengas normiert auf CO₂. CO₂ ist das wichtigste Treibhausgas. Es entsteht weltweit bei der Verbrennung fossiler Energieträger (80–85%) und bei Brandrodungen (15–20%). Die atmosphärische CO₂-Konzentration ist seit 1800 von 280 ppm auf etwa 353 ppm (parts per million) gestiegen.

Die Schweiz emittierte 1990 insgesamt 84,6 Mio. t CO₂-Äquivalente. 62% sind durch den Energieverbrauch bedingt (davon 20% aus dem Verkehr). 12% stammen aus der Landwirtschaft, 22% aus FCKW-Anwendungen, und 7,5% sind durch indirekte Effekte verursacht (Ozon in der Troposphäre) (PSI, Okt. 1992).



1990	CO ₂	FCKW	CH ₄	N ₂ O	NO _x	NMHC	Total
CO ₂ -Äquivalente (Mio. t/a)	45	19,2	3,1	10,9	2	4,4	84,6
in %	53	22,7	3,7	13	2,4	5,2	100

Tabelle 3.12

Äquivalente CO₂-Emissionen in der Schweiz 1990. Den grössten Anteil an den Treibhausgasen in der Schweiz haben die CO₂-Emissionen. Sie sind grösstenteils durch den Energieverbrauch bedingt (PSI, 1992)

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 1991) und die deutsche Enquête-Kommission (1991) erwarten bei einer ungebremsten Entwicklung («business as usual»: BAU) eine Verdoppelung der CO₂-Äquivalente gegenüber dem vorindustriellen Niveau bis 2030–2060. In der Schweiz wird bis 2025 mit einem Anstieg der CO₂-Emissionen um 12 % (1990–2025) gerechnet.

■ Auswirkungen des Treibhauseffektes

In den letzten 130 Jahren hat sich die Durchschnittstemperatur weltweit um 0,5 °C erhöht. Fahren wir so weiter wie bis anhin, so erhöht sich gemäss den zur Zeit verfügbaren Klimamodellen die Temperatur um 0,3–0,5 °C pro Dekade. Bis Mitte des nächsten Jahrhunderts ist auf der Nordhalbkugel mit einer Verschiebung der Klimazonen um 300–600 km nordwärts zu rechnen. Wenn die Temperaturerhöhung 0,1–0,2 °C/Dekade überschreitet, resultieren unkalkulierbare Risiken. Nur wenn also die äquivalenten CO₂-Emissionen bis 2005 um 20 % bzw. im Jahr 2050 um 50 % reduziert werden (Temperaturerhöhung von 0,1–0,2 °C/Dekade), können die schlimmsten Folgen abgewendet werden.

Gemäss Trendentwicklung (Business as usual: Verdoppelung des CO₂-Gehalts bis 2030–2060) wird die Temperatur im nächsten Jahrhundert um 1,5–4,5 °C ansteigen. Niederschläge werden dabei zunehmen, weil unter Treibhausbedingungen mehr Wasser verdunstet. Allgemein werden sich die extremen Wetterereignisse häufen. Diese Klimaveränderungen laufen aber regional ganz unterschiedlich ab. Es ist denkbar, dass die Klimaveränderung nicht kontinuierlich verläuft, sondern abrupt erfolgt. Die Klimaforschung zeigt, dass ein solcher Wechsel innerhalb von wenigen Jahren geschehen kann, es bliebe kaum Zeit für Anpassungen. Die Temperaturerhöhung wird an den Polen am stärksten sein. Wegen der Erwärmung dehnt sich auch das Meer aus, und die Gebirgsgletscher schmelzen ab. Als Folge wird der Meeresspiegel ansteigen (ca. 1 m in 100 Jahren).

Etwa 20–25 % der Landoberfläche sind ganzjährig in gefrorenem Zustand. Steigt die Temperatur um 1 °C an, so verschiebt sich die Permafrostgrenze um 200 bis 300 km nordwärts. Auch das Schneeaufkommen wird durch die Erwärmung der Erdatmosphäre zurückgehen, die Schneegrenze wird sich nach Norden und in höhere Lagen verschieben. In der Schweiz wird bei einem Temperaturanstieg von 3 °C mit einer Verschiebung der Schneegrenze um 200 m nach oben gerechnet. Die gegenwärtige Gletscherfläche würde um 75 % schrumpfen. Bei 3 °C Erwärmung würden fast alle alpinen Permafrostvorkommen unterhalb 3000 m Höhe schmelzen, die durch Eis zusammengehaltenen Geröllhalden würden zusammensacken. Dadurch destabilisieren sich viele hochalpine Hänge.

Die temperaturbedingte Verschiebung der Klimazonen führt zu veränderten Ökosystemen. Falls diese Veränderungen schnell ablaufen (Temperaturanstieg >0,1–0,2 °C pro Dekade), ergibt sich eine Artenverarmung. Der Meeresspiegelanstieg und die Verschiebung von Klimazonen dürfte weltweite **Migrationsströme** auslösen mit **grossem politischem, sozialem und wirtschaftlichem Konfliktpotential**.



3 Nutzung der fossilen Rohstoffe

a) Schadenskosten des Treibhauseffektes

In diversen Ländern wurden in den vergangenen Jahren Schätzungen zu den in Zukunft zu erwartenden Schadenskosten des Treibhauseffektes vorgenommen. Die Ermittlung dieser Schadenskosten ist äusserst problematisch:

- Die Entwicklung der Klimaveränderungen infolge der CO₂-Emissionen ist zur Zeit immer noch schwer abschätzbar. Zum Beispiel besteht das Risiko singulärer Ereignisse wie dem Kippen des Golfstromes mit kaum abschätzbaren Auswirkungen.
- Die Schadensszenarien sind noch relativ wenig entwickelt. Vor allem erlauben sie keine zuverlässigen (gross)-regionalen Aussagen, so dass die Voraussagen der Auswirkungen der Klimaveränderungen noch mit sehr grossen Unsicherheiten verbunden sind.
- Die bisherigen Kostenschätzungen sind entweder sehr pauschal oder dann beschränken sie sich fallstudienartig auf bestimmte Schadensbereiche (z.B. Bau von Küstendämmen) und/oder Regionen.
- Die Quantifizierung der Schäden wirft heikle Bewertungsprobleme auf: Wahl der Diskontrate, Bewertung von Schäden und Menschenleben in den verschieden entwickelten Weltregionen.

Realistischerweise muss davon ausgegangen werden, dass es unmöglich ist, «die Schadenskosten» des Treibhauseffektes zu ermitteln. Aufgrund der ganz speziellen Risikosituation – hohe Eintretenswahrscheinlichkeit der Klimaveränderungen, aber grosse Unsicherheiten beim resultierenden Ausmass der Schäden, sehr grosse politisch-soziale Risiken (Wanderungen, etc.) – stellt sich ohnehin die Frage, ob die Ermittlung von Schadenskosten als Grundlage für kalkulatorische Energiepreiszuschläge problemadäquat ist. Wir werden daher im folgenden Abschnitt auch die Vermeidungskosten für eine CO₂-Reduktionsstrategie, welche die schlimmsten Klimaveränderungen verhindern soll, ermitteln. Der folgende Abschnitt vermittelt einen Überblick über die wichtigsten verfügbaren Schadenskostenschätzungen.



Quelle	Kosten des Treibhauseffektes			
	[Fr./t CO ₂]	Öl ¹⁾ [Rp./kWh]	Gas ¹⁾ [Rp./kWh]	Kohle ¹⁾ [Rp./kWh]
Nordhaus (1991, Durchschnittskosten) (unvollständig, nicht vergleichbar)				
Untergrenze	2,5	0,07	0,05	0,08
mittlere Variante	10,0	0,27	0,20	0,33
Obergrenze	90,0	2,40	1,80	3,00
Morgenstern (1991, Durchschnittskosten) (zu tief, da nur 20% CO ₂ -Reduktion)				
Untergrenze	13,6	0,37	0,27	0,45
Obergrenze	102,0	2,80	2,10	3,40
Hill (1990, Durchschnittskosten) zitiert nach Hohmeyer (1991) (obere Grenze Durchschnittskosten)				
Untergrenze	1'330	36,00	26,00	45,00
Obergrenze ²⁾		(3'600)	(2'600)	(4'500)
Pace (1990, Durchschnittskosten) (unvollst., nur Vermeidungskosten Aufforstung) zitiert nach Hohmeyer (1991)				
	24,0	0,64	0,48	0,80
ÖKO-Institut (1990, Durchschnittskosten) (Vermeidungskosten, nur bedingt vergleichbar) zitiert nach Hohmeyer (1991)				
Untergrenze	8,0	0,22	0,16	0,27
Obergrenze	79,8	2,20	1,60	2,70
Hohmeyer (1992, Durchschnittskosten) (obere Grenze Durchschnittskosten)				
Schadenskosten «business as usual»	680	18,4	13,5	23,0
Vermeidungskosten: –80% CO ₂ -Emissionen um 2040	310	8,4	6,2	10,5

1) 75 kg CO₂/GJ_{Öl}, 55 kg CO₂/GJ_{Gas}, 93 kg CO₂/GJ_{Kohle}

2) Die Obergrenze wird nicht weiter verwendet, da unplausibel hohe Werte.

■ Nordhaus stellt in einer Schadensfunktion die Kosten des Treibhauseffektes (Ernteverluste, Landverluste, touristische Einbussen etc.) einer Vermeidungsfunktion gegenüber (Änderungskosten Energieversorgungsstruktur). Für drei Schadensszenarien (tief, mittel, hoch) ermittelt er diejenigen Schäden, bei denen die Grenzschadens- und die Grenzvermeidungskosten in etwa gleich gross sind. Die ausgewiesenen Schätzungen sind Durchschnitts- und nicht Grenzkostenschätzungen. Sie werden zudem als unvollständig kritisiert. Daher sind sie viel zu tief.

■ Morgenstern schätzt die erforderliche Höhe einer CO₂-Abgabe, um eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 10% bzw. 20% zu erzielen (Standard-Preis-Ansatz -> Vermeidungskosten). Sie sind jedoch in bezug auf das hier verfolgte IPCC-Ziel (–50% CO₂-Emissionen) deutlich zu tief.

Tabelle 3.13

Schätzungen zu den Kosten des Treibhauseffektes (Basis: Ecoplan, 1992; Hohmeyer, Juli 1992)



3 Nutzung der fossilen Rohstoffe

- Hohmeyer (Juli 1992) untersucht sowohl die globalen **Schadenskosten** des Treibhauseffektes als auch die Vermeidungskosten (–50%, –60%, –70% und –80% CO₂-Emissionen um 2040 gegenüber «business as usual»: BAU). Hauptkostenelement sind die zusätzlichen Todesfälle infolge der Klimaveränderungen beim BAU-Szenario:

CO ₂ -bedingte Schadenskosten	
– Todesfälle	540–1080 Billionen \$
– Anstieg Meeresniveau	8,1–9,4 Billionen \$
– Veränderung der Wasserressourcen	0,25–0,5 Billionen \$
– Vermögensverluste, Strukturschäden	0,53–1,5 Billionen \$
Total Kosten der Verdoppelung/Verdreifachung der Treibhausgaskonzentrationen (Hohmeyer, Juli 1992, S. 42 ff.)	
	550–1090 Billionen \$

Eine Verdoppelung der CO₂-Konzentration würde demnach rund 485 \$/t CO₂ bzw. 680 Fr./t CO₂ kosten. Die ausgewiesenen Kosten hängen jedoch entscheidend von der Schätzung der Todesfallkosten ab und damit von der Bewertung des menschlichen Lebens und der Qualität der Schätzung der Anzahl künftiger Todesfälle infolge der Klimaveränderungen. Neueste Erkenntnisse der Klimaforschung deuten darauf hin, dass die vom IPCC geschätzten künftigen Temperaturerhöhungen eher etwas zu hoch sind. Die Durchschnittskostenschätzung von Hohmeyer dürfte damit eine obere noch vertretbare Grenze für die Durchschnittskosten des Treibhauseffektes darstellen.

Daneben schätzt Hohmeyer die **(durchschnittlichen) Vermeidungskosten**. Dabei zeigt sich, dass selbst eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration ab 2040, welche bei den industrialisierten Ländern eine Reduktion der CO₂-Emissionen von 80% um 2040 erfordert, wesentlich billiger ist als ein ungebremstes BAU-Szenario (Hohmeyer, Juli 1992, S. 50):

CO ₂ -Reduktion um 2040	60%	70%	80%
Ø Vermeidungskosten pro t CO ₂ (1 \$ = 1,40 Fr.)	42 Fr./t	168 Fr./t	310 Fr./t

- Ferguson geht von 1–10 Mio. zusätzlichen Toten pro Jahr infolge der durch die Klimaveränderungen ausgelösten Stürme, Überschwemmungen, Hungersnöte, Kriege, Krankheiten etc. aus (vgl. Prognos, Bd. 4, 1992, S. 77 f.). Die Bewertung des Lebens erfolgt mit etwa 1–10 Mio. £/Person oder 2,4–24 Mio. Fr./Person. Rund 60% der klimarelevanten Emissionen werden der Energieversorgung angelastet. Auch hier werden Durchschnittskosten ausgewiesen, die Schätzung dieser Durchschnittskosten dürfte ebenfalls an der oberen noch vertretbaren Grenze liegen.
- Barbir stellte die geschätzten Kosten verschiedener Auswirkungen zusammen (Barbir et al, 1990) und erhielt eine Schadensumme von 330 Mrd. \$/a. Sie umfassen jedoch nur einen Teil der Kosten und teilweise nur Kosten in den USA (s. Prognos, Bd. 4, 1992, S. 76 f.). Die Reichweite dieser (Durchschnitts)-Kostenschätzung ist für den hier verfolgten Zweck ungenügend. Die Schätzung kann nicht direkt mit den übrigen Kostenschätzungen verglichen werden.



■ Cline untersuchte für die OECD die Nutzen einer globalen Treibhauspolitik (OECD, 1992). Er betont dabei die Notwendigkeit einer sehr langfristigen Betrachtung: Die Kosten der Treibhauspolitik fallen sofort an, die Nutzen ergeben sich jedoch erst stark verzögert in der Zukunft. Bei Kosten-Nutzen-Analysen erhält dadurch die Diskontrate eine besondere Bedeutung (Vorschlag Cline: 1–2% p.a.). Eine Grobschätzung der Schäden für die USA bei einem «business as usual»-Szenario ergibt folgende Schadenskosten (Durchschnittskosten):

- Schadenskosten ca. 2025, bei $\Delta 2,5^\circ\text{C}$ Erwärmung $\approx 1\%$ des US-BSP $\approx 2 \text{ Rp./kWh}_{\text{fossil}}$
- Schadenskosten langfristig (2250) bei $\Delta 10^\circ\text{C}$ Erwärmung $\geq 6\%$ des US-BSP

Autor	spez. Kosten Originaleinheit	spez. Kosten (Rp./kWh) (Fr./GJ)		Energie- träger
Ferguson (1990, Durchschnittskosten) (obere Grenze Durchschnittskosten)	0,1–10 £/kWh	22–2240 ¹⁾	61–6230 ¹⁾	fossil
Ottinger (1990, Durchschnittskosten)	1,4 cts/kWh	1,9	5,3	Kohle
	1,2 cts/kWh	1,6	4,5	Öl
	0,7 cts/kWh	1,0	2,8	Gas
Koomey (1990, Durchschnittskosten)	0,76– 2,6 cts/kWh	1,0– 2,1	2,8– 5,8	fossil
Barbir (1990, Durchschnittskosten)	1,39 \$/GJ	0,74	2,1	Kohle
(unvollständig, nicht vergleichbar)	1,13 \$/GJ	0,60	1,7	Öl
	0,84 \$/GJ	0,43	1,2	Gas

¹⁾ Obere Grenze wird nicht weiter verwendet, Werte unplausibel hoch.

Tabelle 3.14
Schätzungen der Kosten des Treibhaus-
effektes: Spezifische Schadenskosten
nach Energieträger/Treibhauswirksam-
keit (aus Prognos, Bd. 4, April 1992)

Aus den eingangs erwähnten Gründen weisen die Ergebnisse der hier ausgewerteten Arbeiten aus den Jahren 1990 bis 1992 eine riesige Bandbreite auf. Werden nur die Arbeiten berücksichtigt, die eine vergleichbare Reichweite aufweisen, ergibt sich in etwa die folgende Bandbreite für die Schadenskosten (Durchschnittskosten):

Spezifische Schadenskosten des Treibhauseffektes

bei Öl	1,4 Rp./kWh – 36 Rp./kWh bzw. 3,8 Fr./GJ – 100 Fr./GJ
bei Gas	1,0 Rp./kWh – 26 Rp./kWh bzw. 2,8 Fr./GJ – 72 Fr./GJ
bei Kohle	1,7 Rp./kWh – 45 Rp./kWh bzw. 4,7 Fr./GJ – 125 Fr./GJ

Oben wird die Bandbreite der **durchschnittlichen** Schadenskosten ausgewiesen. Im Hinblick auf eine effiziente Allokation interessieren dagegen die Grenz-Schadenskosten und nicht die durchschnittlichen Schadenskosten. Ist die Umweltqualität aus volkswirtschaftlicher Sicht ungenügend, dann sind die resultierenden Grenz-Schadenskosten grösser als die durchschnittlichen Schadenskosten und grösser als die Grenzvermeidungskosten von



3 Nutzung der fossilen Rohstoffe

Umweltschäden. Mindestens im unteren Bandbreitenbereich der oben ausgewiesenen (durchschnittlichen) Schadenskosten liegen die Grenzschaadenskosten deutlich über diesen durchschnittlichen Schadenskosten. Im Bereich der oberen Bandbreitengrenze nähern sich die durchschnittlichen Schadenskosten und Grenzschaadenskosten an, da die geschätzten Durchschnittskosten etwas zu hoch sein dürften.

b) Vermeidungskosten

Die Vielzahl der methodischen Probleme bei der Abschätzung der Schadenskosten des Treibhauseffektes und die Unvollständigkeit der verfügbaren Schadenskostenschätzungen (räumlich-regional und sachlich) legen es nahe, mit anderen Quantifizierungsansätzen weitere Hinweise auf die Kosten des Treibhauseffektes zu gewinnen.

Die zeitliche Entwicklung des anthropogen bedingten Treibhauseffektes und die künftigen Auswirkungen der Klimaveränderungen sind ungewiss. Die durch die Emissionen ausgelösten Effekte sind irreversibel. In einer Situation von Irreversibilität und Ungewissheit ist der Einsatz von Umweltstandards, welche verhindern, dass die vermuteten irreversiblen Auswirkungen auftreten können, eine rationale Verhaltensstrategie (Vorsorgeprinzip). Diese Umweltstandards müssen mit minimalen volkswirtschaftlichen Kosten erreicht werden (→ Standard-Preis-Ansatz). Die resultierenden Vermeidungskosten sind die Opportunitätskosten des umweltschonenden Verhaltens.

Mit dem Vermeidungskostenansatz werden die (Zusatz)-Kosten geschätzt, welche durch die aktive Reduktion der Treibhausgasemissionen auf ein als tolerierbar erachtetes Emissionsniveau (Standard) entstehen. Diese Kosten hängen natürlich entscheidend vom Reduktionsziel ab. Theoretisch müsste dieses Ziel so festgelegt werden, dass die Grenzvermeidungskosten zur zusätzlichen Reduktion der Emissionen gerade den Grenzschaadenskosten infolge einer zusätzlichen Emissionseinheit entsprechen. Da jedoch gerade diese Informationen fehlen, wird anschliessend die **Zielsetzung des IPCC** verwendet (IPCC, 1990):

Reduktion der CO₂-Emissionen gemäss Referenzentwicklung um **50% im Jahr 2025**. Damit soll eine Stabilisierung der CO₂-Emissionen auf dem Niveau von 1985 erreicht werden.

Beim Standard-Preis-Ansatz werden die Preiszuschläge so gewählt, dass der anvisierte Standard erreicht wird. Hier werden die Vermeidungskosten von einem kostenminimalen Reduktionsszenario ermittelt, welches die IPCC-Zielsetzung erfüllt. Aus diesen Vermeidungskosten lassen sich die zugehörigen Preiszuschläge ableiten, mit welchen dieses Reduktionsziel erreicht werden sollte.

Vorgehen bei der Ermittlung der Vermeidungskosten:

1. Festlegung einer Referenzentwicklung von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen bis 2025 → quantifiziertes Reduktionsziel: –50% des Referenzverbrauches von 2025.
2. Bestimmung einer kostenminimalen Reduktionsstrategie, welche die angestrebten Emissionsminderungen um 2025 gewährleistet (gem. Prognos, August 1992).
3. Ermittlung der Zusatzkosten dieser Reduktionsstrategie verglichen mit der Referenzentwicklung.



■ Referenzentwicklung der CO₂-Emissionen bis 2025

Die Referenzentwicklung basiert auf einem Bevölkerungswachstum von 0,3% p.a. und Produktivitätssteigerungen von 1,55% p.a. bis 2000 bzw. von 1,25% p.a. danach, was eine Zunahme des BSP von 1995–2025 um rund 60% ergibt.

	Öl/Benzin	Gas	Kohle	Strom	Holz	Total
Endenergieverbrauch – Referenzentwicklung						
1990 [PJ/a]	538,3	71,6	13,7	158,8	41,4	823,5
2025 [PJ/a]	578,2	101,7	17,4	218,3	27,4	943,0
CO₂-Emissionen – Referenzentwicklung						
1990 [Mio. t/a]	38,9	4,8	1,3	5,7 ¹⁾	– –	50,7
2025 [Mio. t/a]	41,8	6,9	1,6	8,5 ¹⁾	– –	58,8

¹⁾ Prognos belegt den Importstrom mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 91 kg CO₂/GJ (gem. Tecova, 1992). Diese Annahme ist für 1990 eigentlich nicht gerechtfertigt, da die Schweiz Netto-Stromexporteur ist – für die Verbrauchszunahme bis 2025 dagegen schon. Für unsere Überlegungen spielt jedoch nur die Differenz 1990/2025 eine Rolle.

Tabelle 3.15
Referenzentwicklung 1990–2025:
Endenergieverbrauch und CO₂-
Emissionen nach Energieträger
(Prognos, August 1992)

■ Reduktionsszenario

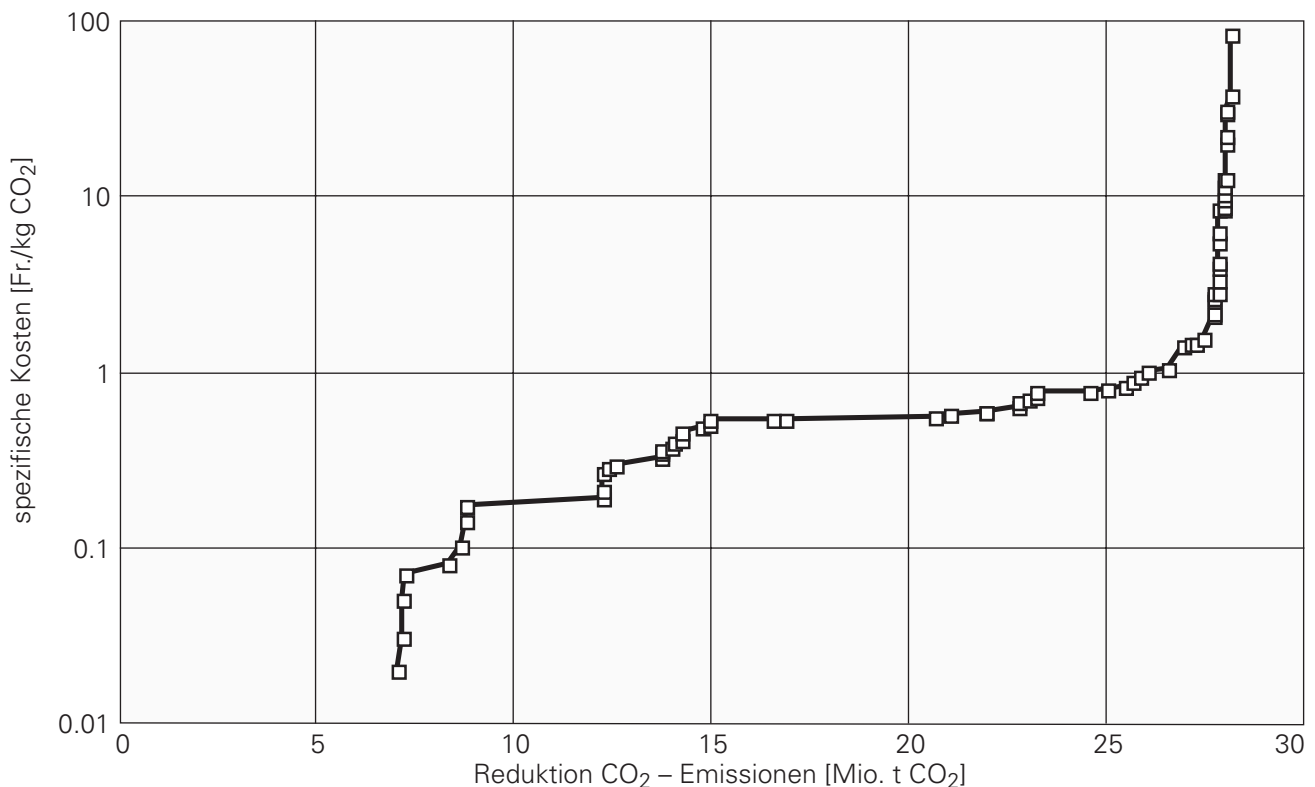
Prognos entwickelte vier Szenarien (A–D) zur Reduktion der CO₂-Emissionen der Schweiz bis 2025 (Prognos, Aug. 1992). Szenariovariante C wird von uns als am aussichtsreichsten erachtet und hier weiter verwendet.

Prognos setzt die CO₂-Vermeidungsmassnahmen gemäss ihren spezifischen Kosten (Fr./kg CO₂-Reduktion) in eine Rangfolge. Die Kosten entsprechen den Mehrkosten im Vergleich zum Referenzszenario. Die Mehrkosten ergeben sich aus den zusätzlichen Kapital- und Betriebskosten infolge der CO₂-Reduktionsmassnahmen, eingesparte Energiekosten werden abgezogen. Für jede Massnahme werden die spezifischen Kosten (für die Rangfolge), das CO₂-Reduktionspotential und die Gesamtkosten ermittelt. Danach können die Massnahmen in der Rangfolge ihrer spezifischen Kosten – kostenminimal – kumuliert werden, bis das anvisierte CO₂-Reduktionsziel erreicht ist.

Um die angestrebte Reduktion von 29,4 Mio. t CO₂ im Jahr 2025 zu erreichen, müssen noch zusätzliche Massnahmen eingesetzt werden. Deshalb werden zusätzlich fossile Brennstoffe mit Energieholz substituiert (17,1 PJ/a um 2025). Der Verbrauch von Energieholz als Energieträger ist in der langen Frist CO₂-neutral.

■ Vermeidungskosten

Die Substitution von Öl- durch Gasheizungen ist die kostengünstigste Massnahme: 2 Rp./kg CO₂, Reduktionspotential um 2025: 27'000 t CO₂/a. Die Grenzkosten für die letzten von Prognos vorgeschlagenen Massnahmen steigen massiv: von 22 Fr./kg CO₂ auf 81,5 Fr./kg CO₂ für die Vermeidung der letzten 35'000 t CO₂/a (s. Prognos, Aug. 1992, Anhang C-16).



Figur 3.4
Kosten der CO₂-Reduktionsmassnahmen in Abhängigkeit vom Reduktionserfolg, gemäss Prognos, August 1992. Die durchschnittlichen Reduktionskosten für die Verminderung der 29,4 Mio. t CO₂-Emissionen betragen 0,53 Fr./kg CO₂

Werden nur die Massnahmen im Strom- und Wärmebereich in die Betrachtung einbezogen, dann ergeben sich die folgenden jährlichen Vermeidungskosten (Preisbasis 1990):

Im Jahr	2005	5'400 Mio. Fr./a	(3'800 – 5'400 Mio. Fr./a)
	2025	12'780 Mio. Fr./a	(8'950 – 12'800 Mio. Fr./a)

Ab 1990 sollen sukzessive immer mehr Massnahmen eingesetzt werden, bis im Jahr 2025 das Reduktionsziel erreicht ist. Wir nehmen daher an, dass die jährlichen Kosten von 1990–2005 linear auf 5,4 Mrd. Fr./a und dann bis 2025 auf 12,78 Mrd. Fr./a steigen werden (zu Preisen von 1990). Bis 2025 dürften technische Weiterentwicklungen heute noch nicht absehbare Kosteneinsparungen erlauben. Deshalb wird bei den Vermeidungskosten mit einem Streubereich von 0% bis –30% gerechnet.

■ Emissions- und kalkulatorische Energiepreiszuschläge

Die Vermeidungskosten der CO₂-Reduktionsstrategie entsprechen den zusätzlichen jährlichen Kosten infolge der Reduktionsmassnahmen. Diese jährlichen Kosten werden in Energiepreis- und Emissionszuschläge für den jeweiligen fossilen Energieverbrauch bzw. die resultierenden CO₂-Emissionen umgerechnet. Für die Periode 1990–2025 werden zwei verschiedene Umlageverfahren durchgerechnet:

– Dynamisch steigende Zuschläge:

Die Zuschläge steigen in der Periode von 1990–2025 gleich wie die jährlichen Kosten, das heisst, sie steigen mit den eingesetzten Reduktionsmassnahmen.

– Konstante Zuschläge:

Die zusätzlichen jährlichen Kosten der Reduktionsmassnahmen geben zwischen 1990 und 2025 einen sukzessive steigenden Kostenstrom.



Dieser wird in einen konstanten Kostenstrom umgerechnet und auf den durchschnittlichen jährlichen Verbrauch bzw. die durchschnittlichen jährlichen CO₂-Emissionen in der Periode von 1990–2025 bezogen. Das führt zu konstanten Zuschlägen in der Periode von 1990–2025. Ab 2025 erhöhen sich diese Zuschläge auf den Wert gemäss dem dynamischen Umlagemodell und bleiben danach bei beiden Umlageverfahren konstant.

Die **Emissionszuschläge** pro Tonne der verbleibenden CO₂-Emissionen betragen in den Jahren

1991:	8 – 11 Fr./t CO ₂
2005:	128 – 183 Fr./t CO ₂
2025:	244 – 348 Fr./t CO ₂

Werden in der Periode von 1990–2025 die durchschnittlichen jährlichen Vermeidungskosten (= Mehrkosten der CO₂-Reduktionsmassnahmen) auf die mittleren jährlichen CO₂-Emissionen geschlagen, ergibt sich folgender Emissionszuschlag für CO₂:

CO₂-Emissionszuschlag 1990–2025: ø 227 Fr./t CO₂ (159–227 Fr./t CO₂)

c) Externe Kosten des Treibhauseffektes – Schlussbemerkungen und Folgerungen

Die künftigen räumlichen und zeitlichen Wirkungen der anthropogenen Treibhausgasemissionen sind äusserst ungewiss. Es besteht deshalb eine **aussergewöhnliche Risikosituation**:

Die Eintretenswahrscheinlichkeit von Temperaturanstieg und Klimaveränderungen sind hoch, dagegen bestehen grosse Unsicherheiten über die Auswirkungen, selbst über ihre ungefähre Grössenordnung.

Die resultierenden Auswirkungen sind nicht reversibel und entfalten erst mit einer grossen zeitlichen Verzögerung ihre volle Wirkung, welche in Zukunft eine nachhaltige Entwicklung in Frage stellt (siehe PSI, 1992, S. 29 ff.). Es muss deshalb heute – in einer Situation noch grosser Ungewissheit über die künftigen Auswirkungen – entschieden werden, damit in 20 bis 30 Jahren die befürchteten Effekte vermieden werden können. Entscheidungen unter Ungewissheit bei potentiell weitreichenden, nicht reversiblen Effekten rufen nach einem spezifischen Vorgehen: **Im Vordergrund steht das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung** und das Bestreben, irreversible Grossschäden zu vermeiden (Vorsorgeprinzip). Eine CO₂-Konzentration von max. 560 ppm (Verdoppelung des vorindustriellen CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre) wird als maximal akzeptierbare Schwelle betrachtet (PSI, 1992, S. 30), bis zu der eine nachhaltige Entwicklung noch denkbar ist. Aus diesen Gründen wird hier den Vermeidungskostenansätzen grösseres Gewicht beigemessen: Sie gehen von Emissionszielen aus, welche unkalkulierbare Klimaveränderungen verhindern sollen. Die KEPZ sind dabei eine Art «Versicherungsprämie» gegen mögliche Klimaschäden.

Die verschiedenen Schätzungen der **externen Schadenskosten** sind sehr inhomogen, was zu einem sehr grossen Streubereich führt. Sie geben zwar Hinweise auf die Kosten bei einzelnen Schadenkategorien in einzelnen Regionen. Aufgrund der ausgewiesenen Schadenkostenbereiche können jedoch kaum sinnvolle kalkulatorische Energiepreiszuschläge abgeleitet werden.



3 Nutzung der fossilen Rohstoffe

Die folgende Tabelle vermittelt einen zusammenfassenden Überblick über die mit den verschiedenen Ansätzen ermittelten kalkulatorischen Energiepreiszuschläge, welche den externen Kosten des anthropogen verursachten Treibhauseffektes Rechnung tragen.

	Öl Rp./kWh	Gas Rp./kWh	Kohle Rp./kWh	Import- strom Rp./kWh	CO ₂ - Emissionen Fr./t CO ₂
Schadenskosten	1,4 – 36	1,0 – 26	1,7 – 45	1,7 – 44	50 – 1'330
Vermeidungskosten					
Dynamisch steigende Zuschläge					
1991	0,2 – 0,3	0,2 – 0,3	0,3 – 0,4	0,3 – 0,4	8 – 11
2005	3,4 – 4,9	2,5 – 3,6	4,3 – 6,2	4,1 – 5,9	128 – 183
2025	6,7 – 9,5	4,9 – 7,0	8,3 – 11,8	8,0 – 11,4	244 – 348
ab 2026	6,8 – 9,7	5,0 – 7,2	8,4 – 12,0	8,1 – 11,6	244 – 348
Konstante Zuschläge					
1990 – 2025	4,4 – 6,3	3,2 – 4,6	5,5 – 7,8	5,3 – 7,6	159 – 227
ab 2026	6,8 – 9,7	5,0 – 7,2	8,4 – 12,0	8,1 – 11,6	244 – 348
Heutige Endenergiepreise (1990)	3	4	2		--
CO ₂ -Emissionsfaktor [kg/GJ]	75	55	93	91	

Tabelle 3.16
Externe Schadenskosten bzw. Vermeidungskosten: Energiepreiszuschläge für Öl, Gas, Kohle und Importstrom sowie Emissionszuschlag für CO₂

Die Vermeidungskosten einer kostenoptimierten CO₂-Reduktionsstrategie liefern eine brauchbare Grundlage für die Ableitung von Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen, die dem anthropogen verursachten Treibhauseffekt Rechnung tragen. Die Schwierigkeiten liegen primär bei der Festlegung des CO₂-Reduktionszieles, bei der Zusammenstellung der kostenoptimalen Reduktionsmassnahmen unter Berücksichtigung des technischen Fortschrittes und bei der Abschätzung der künftigen unbeeinflussten Bevölkerungs- und Energienachfrageentwicklung. Für ein Land wie die Schweiz mit wenig Grundstoffindustrie und einer marginalen fossilen Stromproduktion ist die Reduktion von 50% der CO₂-Emissionen von 2025 (gem. Referenzentwicklung) ambitiös. Es wäre für die Schweiz wahrscheinlich einiges billiger, einen Teil dieser Reduktionen im Ausland zu «kaufen» (z.B. durch CO₂-Sparmassnahmen im ehemaligen Ostblock). Es müsste auch geprüft werden, ob im Falle der Schweiz nicht andere Treibhausgas-Emissionen kostengünstiger reduziert werden könnten (FCKW, Methan). «Last but not least» dürfte die den vorliegenden Schätzungen zugrunde liegende Optimierungsstrategie bei den Reduktionsmassnahmen den technischen Fortschritt bis 2025 unterschätzen und daher zu hohe Vermeidungskosten ergeben¹³⁾. Das hier verwendete Reduktionsziel könnte sich aber auch unter dem Druck, der von der Bevölkerungsentwicklung und dem wirtschaftlichen Nachholbedarf der Entwicklungsländer ausgeht, als ungenügend erweisen, was dann zu höheren Vermeidungskosten führen würde!

¹³⁾
Die Grenzkosten der letzten von Prognos geprüften Massnahmen betragen 81'500 Fr./t CO₂. Mit Sicherheit gibt es dazu billigere Alternativen (z.B. stärkeren Holzeinsatz).



3.8.3 Intertemporale Verteilungsgerechtigkeit bei der Nutzung fossiler Rohstoffe im Strom- und Wärmebereich

Die Besonderheit fossiler Energieträger liegt darin, dass sie nicht nur knapp sind wie andere Güter, sondern dass ihre Knappheit mit fortschreitendem Verbrauch steigt. Geht man davon aus, dass mit dem erschöpflichen Ressourcenbestand Energiedienstleistungen bereitgestellt werden, so schmälert die heutige Nutzung den Energiekapitalstock der zukünftigen Generationen. Unser Konsum reduziert somit für künftige Generationen die Möglichkeit, mit fossilen Energieträgern Energiedienstleistungen bereitzustellen. Das Problem der intertemporalen Allokation erschöpflicher Ressourcen ist primär eine Frage der Verteilungsgerechtigkeit zwischen den Generationen.

■ Intertemporale Verteilungsgerechtigkeit mittels der Konservierung eines Ressourcenkapitalstocks

Bei der gerechten Verteilung der nicht erneuerbaren Ressourcen über einen unendlich langen Zeitraum geht es darum, mit zunehmender Erschöpfung der nicht erneuerbaren Rohstoffe Ersatztechnologien auf der Basis von erneuerbaren Energien zu entwickeln (sog. Backstop-Technologien). Der Vorrat nicht erneuerbarer Ressourcen wird dabei als ein in seiner Funktion zu erhaltender Kapitalstock betrachtet. Im Zeitablauf wird ein Teil des Kapitalstocks verbraucht, es müssen daher Rückstellungen für «Ersatzinvestitionen» getätigt werden. Diese Ersatzinvestitionen sollen in die Entwicklung von Backstop-Technologien fließen. Diese sollen unabhängig von den nicht erneuerbaren Ressourcen die künftige Bereitstellung der entsprechenden Energiedienstleistungen ermöglichen und damit den «Energiekapitalstock» für zukünftige Generationen konservieren (Hohmeyer, 1992).

Als (normatives) intertemporales Verteilungs- bzw. Gerechtigkeitsziel wird ein **pro Kopf konstantes Volumen an Energiedienstleistungen** vorgeschlagen (Hohmeyer, 1992, S. 18), eine recht willkürliche, aber eine – zumindest für die entwickelten Länder – einigermaßen plausible Arbeitshypothese.

■ Kalkulatorische Energiepreiszuschläge für die Schweiz zur Erhaltung des Energiekapitalstocks

Der Energiepreis- oder Wiederbeschaffungszuschlag hängt von der Entwicklung der Bereitstellungskosten der Backstop-Technologien und der nicht erneuerbaren Energieträger, von der statischen Reichweite der Ressourcenvorräte¹⁴⁾, die der Schweiz anteilmässig zustehen und vom langfristigen Realzinssatz (bzw. der Diskontrate) ab. Die statischen Reichweiten für Öl und Gas betrugen 1990 94 Jahre bzw. 188 Jahre. Mit Hilfe grob geschätzter Bereitstellungskosten für Backstop-Technologien¹⁵⁾ bis 2100 ergeben sich die folgenden Energiepreis- oder Reinvestitionszuschläge W:

■ **Öl:** $W_{94} = 2,1 \text{ Rp./kWh} \div 3,5 \text{ Rp./kWh}$

■ **Gas:** $W_{188} = 0,5 \text{ Rp./kWh} \div 0,8 \text{ Rp./kWh}$

Resultierende Öl- und Gaspreise mit Reinvestitionszuschlag 1990 (statische Betrachtung):

Ölpreis mit Zuschlag: $5,1 \div 6,5 \text{ Rp./kWh}$ bzw. $58 \div 73 \text{ Fr./100 kg}$

Gaspreis mit Zuschlag: $4,5 \div 4,8 \text{ Rp./kWh}$

Durch solche Zuschläge würden sich die relativen Preise von Öl und Gas verändern, was zu einem stärkeren Gasabsatz, zu einer Annäherung der

¹⁴⁾

Statische Reichweite: CH-Anteil am Ressourcenvorrat: Ressourcenverbrauch CH (ø Verbrauch während der statischen Reichweite).

¹⁵⁾

Einbezogene Backstop-Technologien, welche die fossilen Energieträger ersetzen und selbst geringe externe Kosten aufweisen: Wärme- und Stromsparmassnahmen im Gebäudebereich und in der Wirtschaft; Einsatz von Energieholz; Einsatz von Energie aus Erdwärme, Biogas und Wind (vgl. INFRAS, Teilbericht 3, Okt. 1993, S. 51ff).



3 Nutzung der fossilen Rohstoffe

¹⁶⁾

Öl dürfte aber langfristig wertvoller sein, wegen seiner petrochemischen Verwendungsmöglichkeiten.

Reichweiten und daher auch der jeweiligen Zuschläge führen dürfte¹⁶⁾. Werden Öl und Gas gemeinsam betrachtet, beträgt die **mittlere statische Reichweite 115 Jahre** und der resultierende Zuschlag für **Öl 1,6 ÷ 2,5 Rp./kWh** bzw. für **Gas 1,4 ÷ 2,4 Rp./kWh**.

Die errechneten Zuschläge hängen im wesentlichen von der Reichweite des betrachteten erschöpflichen Energieträgers ab, da diese den Zeitpunkt T des Einsatzes der Backstop-Technologie bestimmt, weiter vom Preis der Backstop-Technologie im Zeitpunkt T und von der Preisentwicklung des erschöpflichen Energieträgers. Bei all diesen Grössen bestehen grosse Unsicherheiten, da sie über einen Zeitraum von über 100 Jahren prognostiziert werden müssen. Besonders problematisch sind die grossen Reichweiten sowie die Preis- bzw. Technologieprognosen für die Backstop-Technologien. Die Reichweiten werden mit einer Vielzahl von Annahmen errechnet. Der Bestand an Ressourcen muss geschätzt werden; wieviel Ressourcen ausgewiesen werden, ist stark abhängig von der Institution, welche die Schätzung vornimmt, dem Marktpreis der Ressource, der Entwicklung der Fördertechnologie und den Investitionen in Prospektion und Lagerstättenaufschluss. **Zudem wird angenommen, der jährliche Verbrauch der betrachteten erschöpflichen Ressourcen bleibe konstant über die Zeit, was in Anbetracht der vielen Einflussfaktoren** (Bevölkerungswachstum, Wirtschaftswachstum, Entwicklung von Alternativtechnologien) **kaum zu erwarten ist.**

Ebenso kritisch ist die Voraussage der Preisentwicklung und der Technologieentwicklung der Backstop-Technologien über mehr als 100 Jahre, wenn man bedenkt, welche Technologiesprünge in den letzten 100 Jahren stattgefunden haben. Deshalb wird hier die Schätzung der Vermeidungskosten zur Begrenzung des Treibhauseffektes in den Vordergrund gestellt. Die dabei resultierenden kalkulatorischen Energiepreiszuschläge zur Verminderung der CO₂-Emissionen führen ebenfalls zum Einsatz von sogenannten Backstop-Technologien, welche fossile Energieträger substituieren und gleichzeitig ihre Vorräte schonen.



3.9 Externe Kosten der Kernenergienutzung

Die Identifizierung der externen Effekte der Kernenergienutzung muss die gesamte Prozesskette dieses Energiepfades von der Uranerzförderung bis zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen erfassen. Innerhalb dieser Prozesskette tritt in zwei Stufen ein «qualitativer Sprung» auf, weil hier das Element des Risikos eines Grossunfalls relevant wird. Dies betrifft die beiden Stufen Reaktorbetrieb und Wiederaufarbeitung der Brennstoffe. Um diesem qualitativen Sprung gerecht werden zu können, wird im vorliegenden Bericht eine zweigeteilte Darstellung verfolgt, die sich im ersten Teil mit externen Kosten im **Normalbetrieb** der einzelnen Prozessstufen, im zweiten Teil mit den Schwierigkeiten und Quantifizierungsversuchen für einen **grossen Kernschmelzunfall** befasst.

Die Darstellung wird zeigen, dass bereits bei den vermuteten externen Effekten des Normalbetriebes grosse Unsicherheiten über Art und Ausmass der Schadensabläufe bestehen. Bei Kernschmelzunfällen bezieht sich die Unsicherheit

- sowohl auf die Schadensabläufe selbst, als auch
- auf die Eintrittswahrscheinlichkeit solcher Abläufe.

Gleichzeitig können die Schadenspotentiale bei Unfällen unvergleichlich höher sein als im Bereich der «Normalbetriebsschäden».

3.9.1 Die externen Kosten des Normalbetriebs

Die Kernenergienutzung verursacht externe Kosten auf praktisch allen Stufen einer langen Prozesskette. Vereinfachend lässt sich diese Prozesskette beschreiben als

- Uranerzabbau
- Uranaufbereitung, -anreicherung
- Kraftwerksbetrieb
- Wiederaufarbeitung bzw.
- Endlagerung
- Kraftwerksdemontage.

Externalitäten entstehen in verschiedener Hinsicht:

- Auf praktisch allen Prozessstufen geben kerntechnische Anlagen im Normalbetrieb geringe Mengen an radioaktiver Strahlung ab, die bei Menschen zu **Gesundheitsschäden und Todesfällen** führen.
- Hierbei können auch **Flora und Fauna** beeinträchtigt werden.
- Kerntechnische Anlagen beeinträchtigen das **Landschaftsbild**.
- Bei Flusswasserkühlung der Kraftwerke kann eine **ökologische Belastung** (Erwärmung) des Flusswassers auftreten.
- Turmkühlung führt zu **mikroklimatischen Veränderungen**.
- Auf den vorgelagerten Prozessstufen kommt es zur Emission von **Luftschadstoffen** und klimarelevanten Spurengasen.



3 Kernenergie

Bei einer Aufteilung dieser Kosten- bzw. Schadenskategorien in die beiden grossen Blöcke Gesundheitsschäden/Mortalität und Naturraumschäden zeigt sich wie in vielen anderen Teilbereichen der Energieversorgung, dass genauere quantitative Untersuchungen über Naturraumschäden nicht oder nur für (nicht zu verallgemeinernde) Einzelfälle und Detailspekte vorliegen. Die Analysen des Arbeitsberichts zum Teilbericht 2 (Prognos; TB2, Aug. 1993) konzentrieren sich deshalb vor allem auf die Externalitäten durch Gesundheitsschäden und hier – in Ermangelung weiterführender Daten – auf Gesundheitsrisiken mit tödlichem Ausgang. Zusätzlich wird auch der Kostenblock berücksichtigt, der durch die CO₂-Belastung in vorgelagerten Prozessen entsteht. Insgesamt ist bei der Bewertung der externen Kosten des Normalbetriebs nicht zu übersehen, dass insbesondere die **Wirkung geringer Dosen radioaktiver Strahlung** auf die menschliche Gesundheit in der Fachwelt sehr kontrovers diskutiert wird. Auf der einen Seite stehen Experten, die bei Unterschreitung einer bestimmten kleinen Dosismenge überhaupt keine gesundheitlichen Schäden erwarten, auf der anderen Seite Experten, die von einer drastischen Unterschätzung von Niedrigdosiseffekten sprechen. Die empirische Überprüfung der einen oder anderen These ist äusserst schwierig, weil die Dosiswirkungsbeziehungen nur aus einer **rechnerischen** Extrapolation der Wirkung hoher Dosen (z.B. Hiroshima/Nagasaki) in den Bereich niedriger und niedrigster Dosen abgeleitet werden kann. Eine abschliessende Klärung ist nicht in Sicht.

Zum Thema Gesundheitsschäden gibt es eine ganze Reihe von Studien, die sich allerdings meist nur auf einzelne Stufen der Prozesskette Kernenergienutzung beziehen. Eine **Gesamt**betrachtung von **Gesundheitsschäden** mit tödlichem Ausgang ist die Arbeit von (Fritzsche 1988), in der versucht wurde, die bislang vorhandenen Studien zu diesem Themenkomplex zusammenzufassen. Tabelle 3.17 gibt eine Übersicht.



a) Beschäftigte

Prozessstufe	Todesfallrisiken durch	
	Unfall	Erkrankung
– Uranerzförderung (Bergbau)	0,02 – 0,1	0,104 – 0,16
– Erzaufbereitung	0,002 – 0,01	0,0005 – 0,08
– Konversion zu UF ₆	0,0003 – 0,004	0,0005 – 0,001
– Urananreicherung	0,001 – 0,002	0,0005 – 0,001
– Brennelementefabrikation	0,0006 – 0,007	0,002 – 0,03
– nukleare Transporte	0,002 – 0,01	0,00003 – 0,004
– Kernkraftwerk (Bau und Betrieb)	0,06 – 0,3	0,015 – 0,08
– Wiederaufbereitung	0,002 – 0,02	0,002 – 0,01
– Entsorgung (Abfälle und Stilllegung)	0,0012 – 0,013	0,0015 – 0,005
Total	0,089 – 0,466	0,126 – 0,372

b) Bevölkerung

Prozessstufe	Todesfallrisiken durch	
	Unfall	Erkrankung
– Uranerzförderung, Erzaufbereitung		0,0005 – 0,025
– Erzresthalde		0,001 – 0,01
– Konversion zu UF ₆		0,001 – 0,04
– Urananreicherung		0,00001
– Brennelementefabrikation		0,00004 – 0,0002
– nukleare Transporte	0,001 – 0,01	0,00001 – 0,004
– Kernkraftwerk (Betrieb)		0,001 – 0,02
– Wiederaufbereitung		0,001 – 0,05
– Entsorgung (Abfälle und Stilllegung)		0,00002 – 0,0401
Total	0,001 – 0,01	0,0046 – 0,189

Tabelle 3.17
Todesfallrisiken der elektrischen
Energieproduktion durch Kernkraft-
werke je GWa (nach Fritzsche, 1988)

Die Tabelle weist für das Todesfallrisiko im Normalbetrieb der Prozesskette äusserst niedrige Werte aus. Summiert man die Risiken aller Prozessstufen auf, so zeigt sich, dass – bezogen auf eine nukleare Stromproduktion von 1 GWa (8,76 Mrd. kWh) – bei den in den Prozessstufen **Beschäftigten** mit 0,2 bis 0,9 Todesfällen zu rechnen ist (sofortige und verzögerte Todesfälle zusammen). Ein wesentlicher Teil ist dabei auf konventionelle Unfälle zurückzuführen, die in keinem Zusammenhang mit radioaktiver Verstrahlung stehen. Die zu erwartenden Todesfälle für die **Bevölkerung** liegen mit 0,004 bis 0,21 je GWa_{el} noch niedriger. Insgesamt zeigt sich ein Risiko von etwa 0,2 bis 1,1 Todesfällen je GWa.



3 Kernenergie

Eine Hochrechnung für den gesamten nuklearen Kraftwerkpark der Schweiz basiert auf der Erwartung, dass in diesem Kraftwerkpark – bei modellmässig angenommenen 30 Betriebsjahren je Reaktor und 7000 Vollbenutzungsstunden der installierten Leistung von 2950 MW – insgesamt 70,7 GWh Strom erzeugt werden. Für die gesamte Prozesskette nuklearer Stromerzeugung ergäbe sich dann **über die gesamte Lebensdauer** der Anlagen gerechnet eine Zahl von Todesfällen des Normalbetriebs in der Grössenordnung zwischen 14 und 78.

Diese Risikowerte zeigen allerdings nur einen Ausschnitt der externen Effekte.

- **Morbiditätsrisiken** werden nicht bewertet. Mutagene und teratogene Langzeitschäden bei einer Exposition einer Vielzahl von Menschen mit radioaktiven Niedrigdosen sind nicht erfasst.
- Untersuchungen im Schadensfeld **«Naturraumschäden»** sind bislang weder für die Prozesskette noch für einzelne Bausteine im Bereich der Kernenergie erstellt worden.
- **Psychosoziale Schäden** werden nicht quantifiziert.

Ungeklärt bleibt damit natürlich die Frage, ob das verfügbare Datenmaterial quantitativ nur die «Spitze eines Eisbergs» erfasst oder ob nicht doch die «wesentlichen Elemente» der Externalitäten beschrieben sind. Hier ist keine Lösung erkennbar, wie eine solche Frage überhaupt beantwortet werden kann.

Im Kern gilt dies auch für die Problematik der monetären Bewertung, weil es sich hier um eine «Monetarisierung menschlichen Lebens» handeln muss. Die Analysen der Arbeitsberichte stützen sich hier auf Ansätze der sogenannten «Hedonistischen Preisanalyse» (vgl. Abschnitt 3.2), die für die **Wertschätzung der Verminderung des Todesrisikos** einen Betrag von 5,5 Mio. Fr. ausweist.

Das Gesamtschadensvolumen durch Todesfälle errechnet sich damit auf der Basis des oben vorgestellten Zahlenmaterials (bezogen auf einen Zeitraum von 30 Jahren) auf 77 bis 429 Mio. Fr. und – umgelegt auf die nukleare 30-Jahres-Stromproduktion – auf 0,01–0,07 Rp./kWh. Diese Werte sind als absolute Untergrenze der möglichen externen Kosten des Normalbetriebs anzusehen.

Hinzuzurechnen sind Externalitäten, die darauf zurückzuführen sind, dass auch die Prozesskette Kernenergie in den vorgelagerten Prozessstufen klimarelevante Gase emittiert. Hier ist analog zu den Berechnungen in Kapitel 3.8 ein Wert von 0,3–3,3 Rp./kWh (Schadenskosten bei Einbeziehung der möglichen Folgen des Treibhauseffekts) bzw. 0,6–1,0 Rp./kWh (Vermeidungskosten) anzusetzen.

3.9.2 Externe Kosten von Kernschmelzunfällen

Unfälle in Kernkraftwerken, die zu einer (mehr oder weniger grossen) Freisetzung von Radioaktivität führen, können durch die verschiedensten Ereignisabläufe im Reaktorbetrieb ausgelöst werden. Risikoanalysen zeigen in ihrer Grundstruktur, dass es zahlreiche Ereignisabläufe gibt, die zu geringen oder zu vernachlässigenden Freisetzungen führen, wobei die Eintrittswahrscheinlichkeit **relativ** hoch ist. Grosse Kernschmelzunfälle, bei denen das Containment des Reaktors versagt und grosse Mengen des radioaktiven Inventars in die Umgebung entweichen, sind nach diesen Analysen nicht auszuschliessen, ihre Wahrscheinlichkeit wird aber von vielen Experten als **extrem gering** eingeschätzt.



Der zuletzt erwähnte «worst case» zeigt neben der Dimension des Schadens eine zusätzliche Dimension des Phänomens «externe Effekte der Energieversorgung» auf, nämlich das Zusammentreffen eines potentiell extrem hohen Schadens mit einer extrem niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeit. **Bei der Betrachtung von möglichen Kernschmelzunfällen ist damit nicht nur die Identifizierung der Folgen eines möglichen Unfalls, sondern auch der Umgang mit dem Phänomen des Risikos selbst ein zentrales Problem.**

Die möglichen Schäden von Kernschmelzunfällen sind vielfältig, in ihren extremen Ausprägungen sind sie unabsehbar. Die Untersuchungen zeigen, dass von den möglichen Schadenswirkungen von Unfällen die Todesrisiken durch radioaktive Verstrahlung bei grösseren Freisetzungsmengen die absolut dominierende monetarisierbare Schadenskategorie wären. Hinzuzurechnen sind Gesundheitsschäden ohne Todesfolge und Produktionsausfälle bei einer grossräumigen Kontaminierung von Siedlungsräumen. Auswirkungen auf andere Lebewesen, soziale und politische Auswirkungen und ökologische Auswirkungen können dagegen nicht quantifiziert werden. Folgen dieser Art müssen Gegenstand eines **gesellschaftspolitischen Diskussions- und Bewertungsprozesses** sein.

Zum besseren Verständnis der in die Berechnungen einflussenden Parameter ist es hilfreich, die Grundstruktur der hierbei zur Anwendung kommenden Analysemethoden kurz zu erläutern.

Zunächst gilt es zu bestimmen, mit welchen Ereignisabläufen bei Kernschmelzunfällen zu rechnen wäre und welche **Mengen des radioaktiven Inventars** dabei freigesetzt werden könnten (sogenannte Quellterme).

In einem zweiten Schritt wird die Ausbreitung der Radioaktivität unter Berücksichtigung der verschiedensten klimatischen und geographischen Faktoren, der eingeleiteten Schutzmassnahmen und vor allem der Bevölkerungsdichte im betroffenen Raum bis zur Einwirkung auf die in diesem Raum lebenden Menschen verfolgt und quantitativ in die sogenannte **biologisch wirksame Kollektivdosis** umgesetzt. Masseinheit sind hier Personen-Sievert (bzw. Personen-rem: 100 Personen-rem = 1 Personen-Sv).

Konzentriert man sich bei der Folgenbetrachtung auf die durch radioaktive Strahlung induzierten somatischen Krebschäden, so ist eine dritte wichtige Grösse die Anzahl der Personen, die (zusätzlich) an Krebs erkranken, wenn sie durch einen Reaktorunfall einer bestimmten Dosis ausgesetzt sind. Dieses **Krebsrisiko** wird meist in der Einheit «Tumore pro Mio. Personen-Sv» (Dosis-Wirkungsparameter) angegeben.

■ Mögliche Quellterme und Kollektivdosen

In der Schweiz werden 5 Leichtwasserreaktoren unterschiedlicher Bauart und unterschiedlichen Alters betrieben. 1991 lag der Erzeugungsanteil mit 21.654 GWh bei fast 39% der gesamten schweizerischen Stromproduktion. Bei der Analyse möglicher Quellterme muss man sich erneut darüber im klaren sein, dass es nicht einen, sondern eine Vielzahl von Kernschmelzunfällen mit den unterschiedlichsten Freisetzungsraten (und Eintrittswahrscheinlichkeiten) geben könnte.

Für die Schweiz werden derzeit von der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) für alle Kernkraftwerke probabilistische Sicherheitsanalysen durchgeführt. Die Berechnungen für Beznau, Gösgen und Leibstadt sind jedoch noch nicht abgeschlossen. Ergebniszusammenfassungen für Mühleberg (unter Berücksichtigung des seit 1992 im Betrieb befindlichen



3 Kernenergie

Venting-Systems) wurden von der HSK freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Die HSK hat eine grosse Zahl möglicher Quellterme untersucht und hierbei auch die Eintrittswahrscheinlichkeiten angegeben. Es zeigt sich, dass von der HSK bei dem weitaus grössten Teil der analysierten Quellterme nur geringfügige bis zu vernachlässigende Freisetzungen ermittelt werden, dass die meisten untersuchten Ereignisabläufe also relativ günstig verlaufen würden.

Die nachfolgende Tabelle fasst die Angaben zu den radiologisch besonders relevanten Nukliden der Nuklidgruppen Jod und Cäsium zusammen.

Freisetzungsquellterme für Jod und Cäsium (% des Kerninventars)	Mittelwert	Eintrittswahrscheinlichkeit
unter 0,001%	0,0005%	1 : 200.000
0,001% – 1%	0,5%	1 : 1.000.000
1% – 10%	5%	13 : 10.000.000
10% – 30%	15%	4 : 100.000.000
30%	30%	1 : 100.000.000

Tabelle 3.18
Mögliche Quellterme bei Kernschmelz-
unfällen im KKW Mühleberg für Jod
und Cäsium (Näherungswerte)

Quellterme mit Freisetzungsraten über 30% werden von der HSK nicht untersucht. Solche Quellterme wurden für Mühleberg vom Öko-Institut analysiert. Auch die Deutsche Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) hält Freisetzungen von 50–90% von Jod, Cäsium und Tellur für nicht ausgeschlossen. Aus diesem Grund werden in den Untersuchungen zusätzlich zu den HSK-Termen ein grosser Quellterm mit einem Mittelwert von 70% in die Berechnungen einbezogen¹⁷⁾.

¹⁷⁾
Als Eintrittswahrscheinlichkeit wird hier der kleinste HSK-Wert von 10^{-8} übernommen. Obwohl die GRS für solche Schadensabläufe keine eigenen Wahrscheinlichkeitsberechnungen durchgeführt hat, lassen die Ausführungen erkennen, dass näherungsweise von 10^{-7} ausgegangen wird.

Die aus den genannten Quelltermen resultierende **Kollektivdosis** für die Bevölkerung im exponierten Raum ist von einer ganzen Reihe von Faktoren abhängig. Wichtige Parameter sind das radioaktive Inventar der jeweiligen Anlage, der Quellterm des Unfalls, die Freisetzungshöhe, die meteorologischen Verhältnisse, die getroffenen Massnahmen zur Dosisreduzierung, die Jahreszeit.

Genauere Ausbreitungsrechnungen für die Unfälle in schweizerischen Kernkraftwerken konnten in der vorliegenden Untersuchung nicht durchgeführt werden. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass austretende Radioaktivität bei den gegebenen durchschnittlichen Windverhältnissen vor allem in Richtung Ost wirksam wird. Alle Anlagen sind so gelegen, dass sich die Belastung auf das schweizerische Mittelland und ggf. auf Gebiete des angrenzenden Auslands beziehen könnte.

In dem Prognos-Arbeitsbericht wird alternativ angenommen, dass in einem **Ausbreitungsfall 1** die nördlichen Kantone der Schweiz und die grenznahen Kreise der Bundesrepublik (Waldshut, Konstanz, Bodenseekreis) mit einer gesamten durchschnittlichen Bevölkerungsdichte von 230 E/qkm betroffen wären. Der **Ausbreitungsfall 2** bezieht ein grösseres Areal mit den südlichen Regierungsbezirken der Bundesrepublik, Westösterreich und Tschechien mit ein. Dieses Gebiet weist einschliesslich der in der Schweiz



betroffenen Räume eine durchschnittliche Bevölkerungsdichte von 140 E/qkm auf.

Die Berechnungen zeigen für alle schweizerischen Anlagen eine sehr grosse Bandbreite möglicher Kollektivdosen auf. Diese Bandbreite ist zum einen Folge des Analyseansatzes selbst, der letztlich versucht, eine Vielzahl unterschiedlicher Schadensabläufe zu integrieren. Sie ist aber auch Ausdruck der **erheblichen Unsicherheiten, die sowohl bei der Quantifizierung der Quellterme selbst als auch der daraus resultierenden Kollektivdosen besteht. Bei der Interpretation der Schadensberechnungen müssen diese Unsicherheiten stets mitberücksichtigt werden. Es sind ohne weiteres Abweichungen von einer Zehnerpotenz nach oben, aber auch nach unten möglich.**

Insgesamt zeigt sich, dass Unfälle mit einer Kollektivdosis von nur wenigen Personen-Sv, aber auch Unfälle mit Dosen von bis zu 3 Mio. Personen-Sv (Mühleberg und Beznau I/II) bzw. 9 bis 10 Mio. Personen-Sv (Gösgen, Leibstadt) nicht auszuschliessen sind.

■ Monetarisierung der Schäden

Für die **Berechnung der Folgeschäden** wird der Dosis-Wirkungskoeffizient der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) verwendet, der je 10 000 Personen-Sv 500 langfristig tödliche Strahlenkrebschäden, 100 nicht-tödliche Krebsfälle und 130 schwere Erbschäden angibt. Auch hier sei darauf hingewiesen, dass es über diese Werte seit Jahren eine erhebliche wissenschaftliche Kontroverse gibt. In der Fachwelt werden deutlich höhere (Langzeit)-Krebshäufigkeiten nicht ausgeschlossen.

Bedingt durch die erhebliche Bandbreite der Ausgangsparameter (hier insbesondere des jeweils möglichen Quellterms) variieren auch die unfallbedingten Mortalitäts- und Morbiditätszahlen extrem. Sie reichen von einer praktisch zu vernachlässigenden Zahl bei Kernschmelzunfällen mit geringster bis geringer radioaktiver Freisetzung bis zu einer halben Million Toten und einer ebenso grossen Zahl von nicht-tödlichen Krebserkrankungen im Fall eines Grösstunfalls.

Für die **Monetarisierung** wird auf die Bewertungen der Hedonistischen Preisanalyse zurückgegriffen («Kosten» eines Menschenlebens 5,5 Mio. Fr.). Da für die Morbiditätsfälle keine Angaben zur Zahlungsbereitschaft vorliegen, müssen hier die Ansätze der Human-Capital-Methode (Berechnung der krankheitsbedingten Produktionsausfälle) verwendet werden. Pro nicht-tödlichem Krebsfall und pro Erbschadensfall wird ein «Produktionsausfall» von 10 Jahren unterstellt; bei einem Jahreseinkommen von 59 000 Fr. ergeben sich Kosten von 590 000 Fr. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 3.19. Die Werte reichen hier von sehr kleinen Schäden von wenigen Mio. Franken bis zu Grössenordnungen von mehreren Billionen Franken. Maximalschäden der hier ausgewiesenen Höhe machen das 5- bis 10fache des realen Bruttosozialprodukts der Schweiz aus und würden somit die volkswirtschaftlichen Möglichkeiten auch einer reichen Industrienation bei weitem überschreiten.

Nochmals soll auf die erheblichen Unsicherheiten bei den Eingangsannahmen hingewiesen werden.

- Die Quellterme werden in den Berechnungen durch die Nuklidgruppe Cäsium repräsentiert. Andere leichtflüchtige Nuklide, aber auch die Anteile schwerflüchtiger Nuklide können eine andere «Wirkungsstruktur» der Quellterme aufweisen.



3 Kernenergie

- Die Umrechnung in Kollektivdosen kann nur näherungsweise vorgenommen werden. Zahlreiche Faktoren, insbesondere die klimatischen Bedingungen jedes Einzelfalls können deutlich höhere oder niedrige Dosen bewirken.
- Die Dosis-Wirkungsbeziehungen sind umstritten.
- Die monetäre Bewertung menschlichen Lebens und körperlicher Unversehrtheit ist äusserst problematisch. Auch hier sind erhebliche Bandbreiten denkbar.

Insgesamt sind vor diesem Hintergrund die in der Tabelle dokumentierten Schadensvolumina stets nur als Orientierungswerte zu interpretieren. Wie bereits weiter oben betont, sind insbesondere in den extrem hohen Schadensklassen ohne weiteres Abweichungen von einer Zehnerpotenz nach unten, aber auch nach oben nicht ausgeschlossen.

Zudem ist zu beachten, dass die Tabelle nur relativ «leicht» fassbare Schadenskategorien wie Tod, Produktionsausfälle etc. berücksichtigt. Grossunfälle der hier angenommenen Art können aber insgesamt **die Grenzen des «Regulierungssystems Volkswirtschaft und Gesellschaft» überschreiten und alle Lebensbereiche der schweizerischen Bevölkerung schwer in Mitleidenschaft ziehen.** Die Schadenspotentiale solcher Auswirkungen lassen sich in ihrer ganzen psychischen und sozialen Tragweite a priori nicht monetarisieren. Das Bewertungsinstrument «Monetarisierung» hat damit natürlich stets einen Mangel, nämlich den, dass es **implizit** Schadenspotentiale der genannten Art mit null Franken in die Rechnungen einbringt.



Quellterme mit Freisetzungsraten von Cäsium (Mittelwert in%)	Ausbreitungsfall 1	Ausbreitungsfall 2
Mühleberg		
0,0005	7	4
0,5	7.084	4.353
5	151.465	91.905
15	293.145	178.965
30	685.664	417.555
70	1.252.383	765.794
Beznau I und II		
0,0005	8	5
0,5	7.748	4.761
5	150.231	91.261
15	305.193	186.483
30	1.003.949	609.103
70	1.623.798	989.990
Gösgen		
0,0005	21	13
0,5	20.809	12.787
5	312.717	190.644
15	728.901	446.383
30	1.776.178	1.083.790
70	3.440.915	2.106.744
Leibstadt		
0,0005	22	13
0,5	21.916	13.467
5	291.911	178.321
15	730.233	447.662
30	1.854.028	1.131.462
70	3.607.315	2.208.829

Tabelle 3.19
Gesamtschäden ausgewählter KKW-
Unfälle (in Mio. Fr.)

■ Das Problem der Erwartungswerte

Erhebliche Unsicherheiten bestehen auch in einem zweiten Komplex der Monetarisierungsoperationen: der **Eintrittswahrscheinlichkeit** eines oder mehrerer der in der vorhergehenden Darstellung angenommenen Schadensfälle. Eine konsequente Monetarisierung kann nicht bei der Bestimmung der absoluten Schadenshöhe halt machen, sondern muss um die Bestimmung des sogenannten **Erwartungswerts** (als multiplikative Verknüpfung von Schadensausmass und Eintrittswahrscheinlichkeit) und die sogenannte **Standardabweichung** der Wahrscheinlichkeitsverteilung der einzelnen Quellterme ergänzt werden.



3 Kernenergie

Über den Wert der Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Belastbarkeit von sogenannten probabilistischen Analysen gibt es in der Literatur erheblichen Streit. Die von der HSK ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeiten für Mühleberg sind in Tabelle 3.18 dokumentiert worden.

Verschiedene Autoren weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die in Risikoanalysen verwendeten Werte nicht als **absolutes** Mass für die tatsächlich bestehenden Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Ereignisse dienen können, sondern ihren Wert vor allem als **vergleichende** Zuverlässigkeitsanalyse für eine verbesserte Auslegung komplexer technischer Systeme entfalten. Im gleichen Sinne äussert sich die Deutsche Gesellschaft für Reaktorsicherheit, die zudem die erheblichen Unsicherheiten vor allem bei der Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit grosser Unfälle einräumt. Angesichts dieses Sachverhalts erscheint es angemessen, nicht allein die probabilistische Bewertung der HSK, sondern eine **Bandbreite von Wahrscheinlichkeiten** zu verwenden, die auch die Möglichkeit höherer Eintrittswahrscheinlichkeiten einschliesst. In den nachfolgenden Berechnungen wird deshalb neben den HSK-Werten zusätzlich eine Variante «Höhere Eintrittswahrscheinlichkeiten» berücksichtigt:

Quellterm (Cäsium in % des Inventars)	Eintrittswahrscheinlichkeit (Ereignis in x Betriebsjahren)
0.0005	1 : 10.000
0.5	1 : 50.000
5	1 : 150.000
15	1 : 300.000
30	1 : 1.000.000
70	1 : 1.000.000

Für die Bewertung der in Tabelle 3.19 dokumentierten Schadenspotentiale verschiedener Ereignisabläufe liegt es nahe, zunächst zu versuchen, die Schadenshöhe dieser Ereignisse mit deren Eintrittswahrscheinlichkeit zu gewichten und aufzusummieren. Hieraus ergeben sich Erwartungswerte von Wahrscheinlichkeitsverteilungen in bezug auf die Schadenshöhe. Tabelle 3.20 fasst die Ergebnisse für die einzelnen Kraftwerke zusammen. Es zeigt sich, dass je nach Szenario der Eintrittswahrscheinlichkeiten und je nach Art der Ausbreitungsszenarien die Erwartungswerte zwischen 35'000 Fr./a und 4 Mio Fr./a (Mühleberg) bzw. 88'000 Fr./a und 10,2 Mio. Fr./a (Leibstadt) schwanken. Die Summe der Erwartungswerte für den gesamten KKW-Park beläuft sich auf **250'000 Fr./a bis 34 Mio. Fr./a**.

Abgesehen von der erheblichen Bandbreite der Berechnungen erscheint der Erwartungswert zwar sehr plausibel und wird oft auch als das «objektive» Mass für eine Schadensbewertung angesehen. Jedoch wird auch klar, dass mit solchen mathematischen Operationen das wahre Ausmass der **möglichen Schäden** nicht zum Ausdruck kommt. Der Erwartungswert, berechnet mit wie auch immer abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten, ist eine rein statistische Grösse, die nichts darüber aussagen kann, wann tatsächlich ein Unfall eintritt. Dies kann in einem Jahr, aber auch erst im 10'000sten oder 100'000sten Betriebsjahr der Fall sein.

Ein rational handelndes Individuum wird hier neben den Erwartungswert auch die **mögliche Streuung der Schadenshöhe** ins Kalkül ziehen, es wird eine **Risikobewertung** vornehmen. Ein gängiges statistisches Mass für dieses «Risiko» ist die sogenannte **Standardabweichung** der Wahrscheinlichkeitsverteilung von bestimmten Schadenshöhen. Die Herleitung dieser



Standardabweichungen wird in den Arbeitsdokumenten beschrieben. Anschaulich gesprochen handelt es sich bei der Standardabweichung um ein Mass, das in der Lage ist, die «mittlere» Streubreite der Schadensvolumina einzelner Gruppen von Quelltermen um den Erwartungswert zu quantifizieren.

Durch die Kombination von Erwartungswert und Standardabweichung lässt sich ein vor allem in der Entscheidungstheorie bedeutsames Prinzip ableiten. Dieses sogenannte Erwartungswert-Standardabweichungs-Prinzip ist im Gegensatz zum reinen Erwartungswertprinzip in der Lage, die **Risikotoleranz** bzw. die **Risikoscheu** der Entscheidungsträger widerzuspiegeln. Risikobewusste Menschen werden dem Kriterium Standardabweichung eher ein hohes Gewicht beimessen. Risikoneutrale Menschen werden dagegen dem Risiko eine geringe oder gar keine Beachtung schenken und nur den **durchschnittlichen** erwarteten Schaden, den Erwartungswert in den Vordergrund stellen.

In den Arbeitsdokumenten werden die konzeptionellen Vor- und Nachteile des Erwartungswert-Standardabweichungs-Prinzips ausführlich diskutiert. Insbesondere wird darauf hingewiesen, dass mit der Einbeziehung von Aspekten wie Risikoscheu oder Risikotoleranz keineswegs irrationale Elemente (wohl aber subjektive) in die Bewertungsprozeduren eingebracht werden. Dies zeigt sich nicht zuletzt an der weiten Verbreitung, die dieses Prinzip in der Praxis bei Portfolio- oder Investitionsentscheidungen gefunden hat.

Die Arbeitsdokumente weisen aber auch auf Defizite hin. Insbesondere liesse sich die Frage, mit welchen Gewichtungsfaktoren die beiden Parameter in die Berechnungen eingehen sollen, empirisch nur klären, wenn genauere Informationen über die den Entscheidungen eigentlich zugrundeliegenden (kollektiven) Risikonutzenfunktionen vorlägen. In dieser Frage steht die Forschung im Zusammenhang mit der Kernenergienutzung noch am Anfang. Die Untersuchung geht hier – im Sinne eines Ausweisens von möglichen Eckpunkten der Risikopräferenz – von einer Situation der «Risikoneutralität» (Gewichtungsfaktor für die Standardabweichung 0) einerseits und einer Situation des «Risikobewusstseins» (Gewichtungsfaktor für die Standardabweichung 1) aus.

In der Tabelle 3–20 sind die Berechnungsergebnisse zusammengefasst. Die Tabelle macht auf eindrückliche Art und Weise deutlich, dass mit dem Bewertungskriterium Standardabweichung weit höhere Schadenspotentiale ins Blickfeld kommen als durch die Erwartungswerte. Für den gesamten KKW-Park liegen diese Werte (wiederum je nach Eintrittswahrscheinlichkeits- und Ausbreitungsszenario) zwischen **430 Mio. Fr./a und 6'850 Mio. Fr./a**.



3 Kernenergie

Mio. Fr./a (E: Erwartungswert (s: Standardabweichung))		Niedrige Eintrittswahrscheinlichkeiten		Höhere Eintrittswahrscheinlichkeiten	
		Ausbreitungs- fall 1	Ausbreitungs- fall 2	Ausbreitungs- fall 1	Ausbreitungs- fall 2
Mühleberg	E s	0,058 (164)	0,035 (100)	4,067 (1'574)	2,480 (961)
Beznau I und II	E s	0,065 (208)	0,040 (126)	4,802 (2'026)	2,924 (1'234)
Gösgen	E s	0,142 (429)	0,087 (263)	10,149 (4'174)	6,206 (2'554)
Leibstadt	E s	0,143 (444)	0,088 (271)	10,282 (4'336)	6,291 (2'653)
Total der 5 KKW	E s	0,473 (704)	0,250 (430)	34,102 (6'850)	20,821 (4'188)

Tabelle 3.20
Erwartungswerte E und Standard-
abweichungen s der Schadenshöhe
(in Mio. Fr./a, Standardabweichungen
in Klammern)

Für die beiden oben genannten Konstellationen der Risikopräferenz («Risiko-
neutralität» und «Risikobewusstsein») lassen sich damit zwei Wertepaare
der Schadensbewertung identifizieren:

1. Risikoneutral (Orientierung am Erwartungswert)
290'000 – 34'000'000 Fr./a
2. Risikobewusst (Orientierung an der Standardabweichung)
430 – 6'850 Mio. Fr./a

Diese Wertepaare beziehen sich auf den gesamten KKW-Park der Schweiz
und die gesamte Stromerzeugung dieses Parks (21'690 GWh pro Jahr).
Umgelegt auf die mittlere jährliche Stromproduktion lassen sich folgende
Risikozuschläge ermitteln:

Zuschläge bei Risikoneutralität: 0,001 – 0,17 Rp./kWh

Zuschläge bei Risikobewusstsein: 1,0 – 31,8 Rp./kWh

Nochmals sei hier betont, dass es sich bei diesen Risikozuschlägen um
mögliche Eckwerte der in der schweizerischen Bevölkerung gegebenen
Risikopräferenzen handelt. Weitere empirische Absicherungen und Präzisie-
rungen sind hier dringend geboten.

Insgesamt steht bei der Debatte um die externen Kosten im Zusammenhang
mit der Kernenergie nicht nur die blosse monetäre Umlage eines statistisch
ermittelten Erwartungswertes, sondern auch der Umgang mit dem Phäno-
men Risiko selbst im Vordergrund.



Zunächst ist darauf hinzuweisen, dass die oben ausgewiesenen Rappenbeträge je kWh einen grundsätzlich anderen Stellenwert haben als die in anderen Teilen des vorliegenden Berichts berechneten Rappen je Energieinhalt (fossiler Brennstoff) zum Beispiel zur Monetarisierung von Gesundheitsschäden oder Beschädigungen von Flora und Fauna durch die Luftverschmutzung. Diese Schadensvorgänge laufen kontinuierlich ab. Die Kosten entstehen mit einer gewissen Regelmässigkeit Jahr für Jahr. **Die Schäden eines grossen Kernschmelzunfalls sind dagegen ein singuläres einzigartiges Ereignis, die lediglich durch eine mathematische, probabilistisch begründete «Manipulation» in Jahreskosten umgerechnet werden.**

Dies hat tiefgreifende Konsequenzen für viele der Externalitätsanalysen zugrundeliegenden Überlegungen zur Internalisierung der externen Kosten: Bei den laufend anfallenden externen Kosten, zum Beispiel durch Gesundheitsschäden, besteht in der ökonomischen Theorie mitunter die Vorstellung, diese Kosten den Verursachern in Form von Steuern oder Abgaben anlasten zu können, wonach sich die Nachfrage nach gesundheitsschädigenden Aktivitäten verringert – im Idealfall gerade so stark, dass die Grenzschadenskosten den Grenznutzeneinbussen bzw. -vermeidungskosten entsprechen.

Bei grossen singulären Ereignissen ist diese Operation sinnlos, der Anlastungsgedanke in bezug auf die Möglichkeiten einer volkswirtschaftlichen Optimierung der Nachfrage nach KKW-Elektrizität bzw. laufenden jährlichen Akkumulation der Mittel inhaltsleer. Wie mehrfach beschrieben, ist die Berechnung von jährlichen Erwartungswerten mit Hilfe des absoluten Schadensausmasses und der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten eine rein stochastische Doktrin. Es ist nichts bekannt darüber, wann zum Beispiel bei einer Wahrscheinlichkeit von 1:100'000 Betriebsjahren der Unfall tatsächlich eintritt: Morgen, in 100 Jahren oder eben erst in 100'000 Jahren.

Eine Versicherung des Risikos ist aus diesen Gründen nicht durchführbar, zu gross ist das Schadensausmass, auch wenn es extrem selten eintritt (bei einer üblichen Versicherung, die sich nur am Erwartungswert orientierte, wäre beispielsweise im Jahr 100 erst 1 Promille der notwendigen Summe akquiriert). Diesen Unterschied gegenüber den in anderen Bereichen errechneten Energiepreiszuschlägen muss man sich bei der Verwendung der hier ermittelten «Jahreskosten» stets vor Augen halten. Vor allem ist zu beachten, dass eine einfache Aufaddierung der Zuschläge aus anderen Bereichen mit den hier bestimmten Risikowerten zwar statthaft ist, dass diese Vorgehensweise aber stets einer sorgfältigen Kommentierung bedarf.

Bei der Frage nach dem **«Umgang mit dem Risiko»** wird insgesamt sehr schnell erkennbar, dass mit dem üblicherweise verwendeten Risikobegriff, der «formalen» Bewertung von Risiken je nach Grad ihrer Wahrscheinlichkeit und Folgen (Erwartungswert), nur ein Element des Phänomens Risiko erfasst wird. Gerade das Beispiel der für Kernkraftwerke durchgeführten Risikostudien hat in der Vergangenheit gezeigt, dass der «formale» Risikobegriff vollkommen an der Risikowahrnehmung und -bewertung weiter Bevölkerungskreise vorbeigegangen ist: Verursacht durch eine Art «Katastrophenschwelle» (Luhmann, 1991) wird vor allem dann «formalen» Risikoberechnungen ein geringer Wert zugemessen, wenn selbst bei sehr kleinen ausgewiesenen Wahrscheinlichkeiten ein möglicher Unfall eine Katastrophe ist und auch als solche **empfunden** wird.

Insgesamt ist nicht zu übersehen, dass bei der Risikodebatte notwendigerweise der sehr «weiche» Bereich des gesellschaftlichen Diskurses über den Wert oder Unwert einer Technologie betreten werden muss. Unvermeidlich wird dabei aber auch erkennbar, dass die Bewertung von modernen Techno-



3 Kernenergie

logien, die ein grosses Risiko in sich bergen, ein **eminent gesellschaftlicher Prozess** sein muss. **Das Risiko der Kernenergie – externalisiert oder internalisiert – ist ein soziales und nur zu ganz geringen Teilen ein ökonomisches Konstrukt.**



3.10 Externe Kosten der Wasserkraftnutzung

Bei der Identifizierung der externen Effekte der Stromerzeugung aus Wasserkraft ist grundsätzlich zu unterscheiden

- nach externen Effekten im Zusammenhang mit dem Normalbetrieb von Wasserkraftanlagen und denen im Zusammenhang mit einem Stör- bzw. Grossunfall (Wehrbruch bei Laufkraftwerken, Staudamm-Mauerbruch bei Speicherkraftwerken) sowie
- nach externen Effekten von Laufkraftwerken und denen von Speicherkraftwerken.

Dieser Differenzierung liegen folgende Vorstellungen zugrunde.

Wie bereits in Kapitel 3.9 dargestellt, besteht zwischen der Bewertung von externen Effekten des Normalbetriebs (Bau-/Betriebsphase) und denen des Ereignisses eines Stör- bzw. Grossunfalls ein «qualitativer Sprung». Ein Stör- bzw. Grossunfall ist nicht nur mit einem spezifischen Schädigungsprofil und einem potentiell höheren Schadensvolumen verknüpft. Er unterliegt als Ereignis insbesondere einem sehr spezifischen Risikokalkül bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Schadensablaufs.

Für die Differenzierung nach dem Betriebstypus, d.h. nach Laufkraftwerken einerseits und Speicherkraftwerken andererseits, spricht zunächst ein unterschiedlich grosses Volumen der externen Effekte. Beispielsweise werden die quantitativen Folgewirkungen eines Wehrbruchs von Laufkraftwerken geringer als die eines Staudamm-Mauerbruchs eines grossen Speicherkraftwerks ausfallen.

Für die betriebstypenspezifische Trennung spielen jedoch insbesondere Überlegungen zum methodischen Quantifizierungs- und Monetarisierungsansatz eine Rolle. Die externen Effekte der Wasserkraftnutzung bestehen in hohem Ausmass in Beeinträchtigungen des Naturraumes. Die Verfügbarkeit von unberührten, naturbelassenen Gebieten – und darunter subsummiert Artenvielfalt bei Fauna und Flora, zivilisatorisch nicht berührte Landschaften – stellt einen Wert an sich dar. Beeinträchtigungen durch eine Wasserkraftanlage in noch relativ naturbelassenen Räumen sind folglich anders zu bewerten als die durch Anlagen in schon weitgehend zivilisatorisch geprägten Räumen.

Bezogen auf die Standortverteilung von Wasserkraftanlagen in der Schweiz ist eine vom Landschaftscharakter abhängige ausgeprägte Anlagenstruktur nach dem Betriebstypus gegeben. Der typische Standort für Laufkraftwerke ist die Ebene und das Hügelland, Gebiete die in einem hochentwickelten Land wie der Schweiz traditionell bevorzugte Siedlungs- und Wirtschaftsräume darstellen, folglich zivilisatorisch stark geprägt sind. Für Speicherkraftwerke liegt der typische Standort in höheren Mittelgebirgslagen sowie in hochalpinen Landesregionen; Gebieten also, die noch relativ ausgeprägt als naturbelassene Räume eingestuft werden können.

3.10.1 Die externen Kosten des Normalbetriebs

■ Quantifizierung der externen Effekte

Die Nutzung der Wasserkraft, sei es in Form von Laufkraftwerken, sei es in Form von Speicherkraftwerken, verursacht externe Kosten, die zwei Prozessstufen zugeordnet werden können. Zunächst fallen externe Kosten während der Phase der Anlagenerrichtung an. Weiterhin entstehen externe Kosten im Zusammenhang mit dem Betrieb der Anlage (Normalbetrieb).



3 Wasserkraftnutzung

Die mit der Errichtung und dem Betrieb von Wasserkraftanlagen zusammenhängenden Externalitäten bilden ein differenziertes Wirkungsgeflecht. Holzschnittartig geht es um folgende Ursache-Wirkungszusammenhänge:

1. Mit der Installierung einer Wasserkraftanlage geht unmittelbar der **Verbrauch** von **Flächen** (Betriebsgebäude, Verkehrsstrassen, Deponieflächen, überstaute Fläche) einher, die vorher land- bzw. forstwirtschaftlich genutzt wurden und/oder Lebensraum für terrestrische **Fauna** und **Flora** darstellten.
2. Während der **Bauphase** der Anlage verursachen die Bautätigkeit selbst sowie die über den Baustellenbereich hinausgehenden Transporte **Emissionen** (Lärm, Staub, Abgase), die für den **Menschen** in den betroffenen Gebieten Beeinträchtigungen der **Gesundheit, der Lebensqualität** und wirtschaftlicher Erwerbsmöglichkeit (Tourismus) mit sich bringen, gleichermaßen aber auch für die **Fauna und Flora** als **Belastungseffekt** auftreten.
3. Schon in der Phase der Anlagenerrichtung, insbesondere aber während des Anlagenbetriebs erfolgen starke **Eingriffe** im von der Anlage insgesamt berührten **Gewässernetz** (gesamter Unterlauf):
 - Veränderungen in der Fliessgeschwindigkeit generell und speziell auch damit induzierte Verschlechterungen der Wasserqualität (Anreicherung mit chemischen Stoffen/Schwemmstoffen) reduzieren die natürlichen **Lebensbedingungen** der **aquatischen Flora und Fauna**.
 - Die Eingriffe in die Wasserverhältnisse beeinträchtigen indirekt auch die **terrestrische Flora und Fauna** in den angrenzenden Gebieten des betroffenen Gewässernetzes. Durch Reduktion von Oberflächenwasser und Absenkung des Grundwasserspiegels verändert sich die Bodenfeuchtigkeit mit der Folge von Ertragseinbussen land- und forstwirtschaftlich genutzter Kulturlächen sowie von Reduktionen in den Lebensraumbedingungen als Garant für die Artenvielfalt terrestrischer Flora und Fauna.
4. Die Wasserkraftanlage selbst, weiterhin die potentiell erforderliche bauliche Infrastruktur (Schutzbauten wie z.B. Lawinenverbauungen, Hochwasserdämme) sowie auch grossräumige Flussregulierungen beeinträchtigen das **Landschaftsbild**.
 - Die Landschaft ist für den Menschen eine wichtige Identifizierungs-/Orientierungsbasis, besitzt Erholungswert (Naherholung), kann Grundlage für spezifische Erwerbsmöglichkeiten (Tourismus) sein.
 - Veränderungen im Landschaftsbild stören die angesprochenen Funktionen der Landschaft.

Als Schadenskategorien sind ökologische Schäden (Naturraumschäden), Schädigungen der Gesundheit des einzelnen menschlichen Individuums sowie des sozio-kulturellen Wertesystems und Schädigungen der wirtschaftlichen Erwerbsmöglichkeit identifizierbar.

Zum Thema der Schädigungen im Zusammenhang mit der Nutzung der Wasserkraft steht eine grosse Zahl von Untersuchungen auf internationaler Ebene sowie auch in der Schweiz zur Verfügung. Ein Grossteil dieser Untersuchungen beschäftigt sich damit, das Ursache-Wirkungsgeflecht (bis in die Schadenskategorien) in all seinen Facetten darzustellen, allerdings nur qualitativ und nicht quantitativ. Andere Untersuchungen wie die Umweltverträglichkeitsanalysen zu konkreten Wasserkraftanlagen weisen bis ins Detail



Art und Umfang einzelner artenspezifischer Schädigungen aquatischer und terrestrischer Fauna und Flora aus. Eine Quantifizierung der aller Voraussicht nach gewichtigsten Kategorie «ökologischer Schäden (Naturraumschäden)» mit Hilfe der Umweltverträglichkeitsanalysen scheitert jedoch. Diese Analysen betreffen Einzelfälle und beziehen sich jeweils auf die Überprüfung eines einzelnen Anlageprojektes und seiner spezifischen Bedingungen. Die Hochrechnung der Ergebnisse der Einzelfallanalysen auf den Gesamtanlagenbestand der Speicher- und Laufkraftwerke in der Schweiz würde eine sehr detaillierte Analyse (Primärevaluationen) dieses Gesamtbestands und seiner Umfeldbedingungen erfordern, um wenigstens näherungsweise den Repräsentativitätsanforderungen zu entsprechen.

Gegen einen derartigen Ansatz sprechen u.E. jedoch forschungsökonomische Gründe. Es ist zweifelsohne von Interesse, Kenntnis über Schädigungen einer einzelnen Tier- und Pflanzenspezies zu haben. Für die hier anstehende Quantifizierung und Monetarisierung der Schädigungen allerdings steht der Kostenaufwand für eine Analyse über die Einzelspezies in keinem Verhältnis mehr zur erforderlichen Aussagefähigkeit des Ergebnisses.

Für die Quantifizierung der Schadenskategorie «ökologische Schäden (Naturraumschäden)» – auf die wir uns konzentrieren – kann vielmehr mit folgendem pragmatisch angelegten Ansatz gearbeitet werden.

In der Bau- und Betriebsphase von Wasserkraftanlagen fällt direkt Flächenverbrauch (Gebäude, überstaute Fläche, Fläche für die Versorgungsinfrastruktur) an, der einen Verlust an Lebensraum für die terrestrische Flora und Fauna bedeutet. Mit der Anlage ist weiterhin ein Eingriff in der Wasserführung im Unterlauf des jeweils betroffenen Gewässernetzes verbunden. In den angrenzenden Flächen des betroffenen Gewässernetzes verändert sich durch Reduktion von Oberflächenwasser und Absenkung des Grundwasserspiegels die Bodenfeuchtigkeit, mithin auch die Umfeldbedingung für das Artenspektrum der terrestrischen Flora und Fauna.

Das Flächenvolumen allein ist nicht hinreichend für die Quantifizierung der Schadenskategorie «ökologische Schäden». Der Quantifizierungsschritt setzt die Charakterisierung des Flächenvolumens nach ökologischen Klassifikationskriterien voraus. Ansatzpunkt dafür ist nicht die einzelne Spezies von Fauna und Flora, sondern der der **«Globalbetrachtung»**.

Grundgedanke ist, dass die Artenvielfalt in kausaler Beziehung zum naturbelassenen Raum steht, da der naturbelassene Raum Voraussetzung für die Existenz von Artenvielfalt ist. Jeder Eingriff in den naturbelassenen Raum ist folglich gleichzusetzen mit einer Verminderung der Existenzgrundlage der Artenvielfalt. Der auf die Wasserkraftnutzung zurückzuführende Schaden für die Artenvielfalt steigt also mit der «Naturnähe» der beanspruchten bzw. berührten Fläche. Für die hier anstehende Quantifizierung heisst das, dass die quantitativ von Wasserkraftanlagen berührte Fläche, spezifiziert nach «naturbelassenem Raum» und «zivilisatorisch vorgeprägtem Raum» als Bemessungsgrundlage herangezogen werden kann. Zivilisatorisch bedeutet, dass das Gebiet einen spürbaren Besatz an Siedlungs- und Verkehrsinfrastruktur aufweist und/oder erkennbar **intensiv** land- und forstwirtschaftlich genutzt wird.

Da Angaben über die von den Wasserkraftanlagen der Schweiz dauerhaft genutzte bzw. beeinträchtigte Fläche z.B. in Form eines Flächenkatasters nicht existieren, wurde mit eigenen Schätzungen gearbeitet. Schätzgrundlage bildet die Länge des in spürbarer Weise von der Wasserkraftnutzung beeinträchtigten schweizerischen Gewässernetzes. Gemäss Diskussionen mit Experten erscheint die Annahme, dass im Durchschnitt pro km Länge des relevanten Gewässernetzes eine berührte Fläche (Bodenareal) von



3 Wasserkraftnutzung

0,5 km² besteht, plausibel. Zu betonen ist aber, dass im konkreten Einzelfall die berührte Fläche deutlich grösser, aber auch kleiner sein kann als der geschätzte Durchschnittswert.

Bei der Bestimmung der Länge des relevanten Gewässernetzes stehen hilfsweise zwei Werte zur Verfügung. In einer schon länger zurückliegenden Untersuchung des Bundesamtes für Wasserversorgung wird die Länge des spürbar beeinträchtigten Gewässernetzes mit 2000 km angegeben. Verknüpft man diese Streckenlänge mit dem Durchschnittswert für die berührte Fläche von 0,5 km², beläuft sich die beeinträchtigte Fläche auf ca. 1000 km².

Mit dem Hydrologischen Atlas (1992) bietet sich eine zweite Informationsquelle. Die kartographische Darstellung ermöglicht zwar unmittelbar keine kilometermässige Längenbestimmung. Anlässlich der Vorstellung des Hydrologischen Atlas in der Öffentlichkeit (Pressekonferenz August 1992) wurde jedoch die kilometermässige Beeinträchtigung des Gewässernetzes in einer Höhe von 10 bis 20% angegeben. Legt man den Mittelwert dieses Schätzkorridors von 15% zugrunde, ergibt sich eine beeinflusste Gewässerstrecke von 6000 km. Verknüpft mit dem Durchschnittswert für die berührte Fläche von 0,5 km², beläuft sich die beeinträchtigte Fläche in diesem Fall auf ungefähr 3000 km².

Bei den Werten der beiden Informationsquellen zur beeinflussten Gewässerstrecke handelt es sich um **wasserwirtschaftliche** Angaben (Gewässerstrecken mit Beeinträchtigungen des natürlichen Abflussregimes), die keine direkten Rückschlüsse auf das Ausmass der **ökologischen** Beeinträchtigungen erlauben. Angesichts der Tatsache, dass im Rahmen des Gesamtprojekts dieses grundlegende Informationsdefizit nicht beseitigt werden konnte, erscheint es angemessen, beide Angaben in Form von Alternativrechnungen zu berücksichtigen.

Zu den im Unterlauf von Wasserkraftanlagen beeinträchtigten Flächen (ca. 1000 bzw. 3000 km²) kommen die durch Überstauung verlorenen Flächen hinzu. Bei Laufkraftwerken handelt es sich um eine «quantité négligable». Aber auch bei Speicherkraftwerken ist die von uns geschätzte Fläche von maximal 240 km² vergleichsweise gering.

Angesichts der Standortverteilung der Wasserkraftanlagen, der berührten Gewässernetze und in der Folge der beeinträchtigten Bodenareale ist es statthaft, das auf gesamtschweizerischer Ebene gegebene Verhältnis von «Gebieten mit relativer Naturbelassenheit» zu «Gebieten mit erkennbar land- und forstwirtschaftlicher Nutzung (zivilisatorisch geprägtes Gebiet)» in Höhe von 40% : 35% auf die durch Wasserkraftanlagen beeinträchtigte Fläche zu übertragen. Damit wären knapp 47% (583 bzw. 1523 km²) der von Wasserkraftanlagen beeinträchtigten Fläche als «intensiv land- und forstwirtschaftlich genutztes Gebiet (zivilisatorisch vorgeprägt)» und gut 53% (657 bzw. 1717 km²) als «Naturraum» zu charakterisieren. Der «Naturraum» ist allerdings für weitere Betrachtungen insofern zu reduzieren, als er nicht gänzlich Lebensraum für Fauna und Flora darstellt. Als Lebensraum für Fauna und Flora gehen wir von ca. 80% des «Naturraums», das heisst 526 bzw. 1374 km² aus.

Die Standorte von Speicherkraftwerken befinden sich in der Schweiz schwergewichtig im Alpenraum und zu einem erheblichen Teil in hochalpinen Regionen. Die jeweils berührten Gewässer (Unterlauf) und angrenzend beeinträchtigten Bodenareale im Zusammenhang mit Speicherkraftwerken dürften folglich überwiegend der Gebietskategorie «Naturraum» zuzuordnen sein. Für Laufkraftwerke gilt, dass ihre beeinträchtigten Bodenareale aufgrund des Standortes weitgehend auf «zivilisatorisch» geprägte Gebiete, also «intensiv land- und forstwirtschaftlich genutztes Gebiet» entfallen.



Grob geschätzt ist

- für **Speicherkraftwerke** von einer beeinträchtigten «Naturraumfläche» von 526 bzw. 1374 km² und «intensiv land- und forstwirtschaftlich genutzten Fläche» von 233 bzw. 609 km² sowie
- für **Laufkraftwerke** von einer beeinträchtigten «intensiv land- und forstwirtschaftlich genutzten Fläche» von 350 bzw. 914 km²

auszugehen.

■ Monetarisierung der externen Effekte

Artenvielfalt, naturbelassene Landschaft bzw. ein unzerstörtes Landschaftsbild als Kennzeichen des «Naturraumes» besitzen funktionalen Stellenwert in einer Gesellschaft sowohl als Orientierungsbasis für traditionelles Brauchtum als auch als individueller Erlebniswert. Schon die reine Existenz stellt einen Wert an sich dar, ihr Erhalt für zukünftige Generationen ist ein Wert. In seiner Nutzung als Erholungs- und Regenerationsfaktor manifestiert sich der individuelle Erlebniswert.

Gleichwohl handelt es sich nicht um Güter, für die ein Markt besteht und sich der Preis über einen Marktmechanismus bildet. «Konventionelle» Monetarisierungsansätze stehen hier nicht mehr zur Verfügung. Im Zusammenhang mit ökonomischen Monetarisierungs- und letztlich Internalisierungsstrategien können hier jedoch Zahlungsbereitschaftskonzepte eingesetzt werden. Über eine Erfragung der Zahlungsbereitschaft wird die Nutzenbewertung immaterieller Werte in der Gesellschaft in monetären Einheiten quantifiziert.

Hinsichtlich der Ermittlung der Zahlungsbereitschaft der Gesellschaft zur Erhaltung von Artenvielfalt, naturbelassener Landschaft bzw. eines unzerstörten Landschaftsbildes unter funktionalen Gesichtspunkten (Existenz-, Erlebnis- und Erholungswert) kann auf die Ergebnisse einiger Befragungen zurückgegriffen werden.

Drei Ergebnisse können kurz skizziert werden:

- Unterstellt, für intakte Erholungslandschaften müssten Eintrittspreise entrichtet werden, läge in der Bundesrepublik Deutschland die durchschnittliche Zahlungsbereitschaft pro Familie und Jahr bei rund 85 DM. Umgerechnet auf die Gesamtzahl bundesdeutscher Familien ergäbe das einen Betrag von 1,43 Mrd. DM pro Jahr.
- Der Wert des stadtnahen Waldes von Lugano stellt sich aufgrund der Abfrage der Zahlungsbereitschaft bei den Bürgern Luganos wie folgt dar: Die Existenz des Waldes wird im Schnitt pro Person und Jahr mit 420 Fr. bewertet, der Erlebnisnutzen für die Waldbesucher wird pro Person mit 1'500 Fr. bewertet.
- Allein die Existenz von Artenvielfalt respektive Biotopen ist befragten Bürgern der Bundesrepublik Deutschland pro Person und Jahr 133 DM wert. Der Erlebniswert fällt mit 261 DM pro Person und Jahr fast doppelt so hoch aus.

Von den zitierten Untersuchungen kommt unserer Fragestellung die letztgenannte am nächsten. Gearbeitet wird mit dem unspezifischen Kriterium «Artenvielfalt und Biotopschutz», das dem gleichfalls unspezifizierten von uns verwendeten Begriff «Naturraum» recht ähnlich ist.

Setzt man pro Person und Jahr den Existenzwert des «Naturraums» mit 130 Fr. und den Erlebniswert mit 260 Fr. an, rechnet diese Werte für die



3 Wasserkraftnutzung

Gesamtbevölkerung der Schweiz (6,75 Mio.) hoch und legt die Wertvolumina auf den gesamten Naturraum der Schweiz von schätzungsweise 16'514 km² um, ergibt sich pro km² Naturraum ein Existenzwert in Höhe von 53'000 Fr. und ein Erlebniswert von 106'000 Fr.

Das würde bedeuten, dass die von **Speicherkraftwerken** beeinträchtigte Naturraumfläche von 526 km² ein Schadensvolumen von 83,6 bzw. 218,5 Mio. Fr. pro Jahr repräsentiert.

Hinzu kommt das Schadensvolumen in Form von Ertragseinbussen «intensiv land- und forstwirtschaftlich genutzter» Bodenareale. In Ermangelung empirisch ermittelter Daten wurde angenommen, dass der monetäre Betrag der Ertragseinbüsse pro km² beeinträchtigte Fläche dem Wert pro km² «Naturraumfläche» (Durchschnitt Existenz-/Erlebniswert), also 79'500 Fr. entspricht. Bei einer beeinträchtigten Fläche von 229 km² ergäben sich damit Ertragseinbussen von 18,5 bzw. 48,4 Mio. Fr. pro Jahr.

Legt man das ermittelte monetäre Schadensvolumen von insgesamt 102,1 bzw. 266,9 Mio. Fr. pro Jahr auf die jährliche Arbeit der Speicherkraftwerke von 18'944 GWh um, ergäbe sich ein Betrag von 0,5 bzw. 1,4 Rp./kWh.

Die Monetarisierung der externen Effekte im Zusammenhang mit dem Betrieb von **Laufkraftwerken** beschränkt sich auf den Bereich der Ertragsminderung «intensiv land- und forstwirtschaftlich genutzter Bodenareale». Die von Laufkraftwerken beeinträchtigte Fläche beläuft sich auf der Grundlage der beiden Basisannahmen auf 350 bzw. 914 km². Für die Ertragseinbussen wird hilfsweise wiederum mit dem Durchschnittsbetrag aus Existenz- und Erlebniswert des Naturraumes von 79'500 Fr./km² gerechnet. Das so ermittelte Schadensvolumen von 27,8 bzw. 72,7 Mio. Fr. pro Jahr würde – umgelegt auf die jährliche Arbeit der Laufkraftwerke der Schweiz von 14'247 GWh – einen Strompreisaufschlag von 0,20 bzw. 0,51 Rp./kWh bedeuten.

3.10.2 Die externen Kosten von Stör- bzw. Grossunfällen

Die möglichen Schäden eines Grossunfalls von Wasserkraftanlagen, das heisst eines Staudamm-Mauerbruchs bei Speicherkraftwerken sowie eines Wehrbruchs bei Laufkraftwerken sind vielfältig und unabsehbar. Die in der Fachliteratur für Europa und weltweit dokumentierten Grossunfälle (Staudamm-Mauerbrüche) belegen nachhaltig die zum Teil hohen Verluste an Menschenleben und materieller Werte. Die Schädigungen immaterieller Werte wie Naturraumbeeinträchtigungen (Fauna und Flora), Baudenkmälern etc. werden in der Literatur zwar nicht explizit aufgeführt, dürften aber auch ein gewisses Volumen besitzen.

Die genannten Folgewirkungen von Grossunfällen (Menschenleben, materielle Werte) – auf die wir uns beschränken – stossen im Hinblick auf ihre Quantifizierung auf folgende Schwierigkeiten:

- Das Schadensausmass eines Grossunfalls wird durch die Rahmenbedingungen der Anlage (Grösse, Standort und Topographie) determiniert. Die Pläne über die wahrscheinlichen geographischen Auswirkungsradien von Grossunfällen (Staudamm-Mauerbrüche der Speicherkraftwerke in der Schweiz) werden aus sicherheitspolitischen Erwägungen der Öffentlichkeit nicht zugänglich gemacht.
- Die Risikoabschätzung im Zusammenhang mit Grossunfällen der Wasserkraftanlagen der Schweiz ist explizit noch nicht diskutiert.



Im Rahmen der Untersuchung muss folglich mit Schätzungen auf der Basis der vorhandenen Literatur und gezielt beschaffter Informationen gearbeitet werden.

■ Quantifizierung und Monetarisierung bei Speicherkraftwerken

Staumauer- bzw. Staudammbrüche verursachen den Verlust an **Menschenleben**. Die Sicherheit der Speicherkraftwerksanlagen gilt in der Schweiz, gemessen an den weltweiten Bedingungen, als ausgesprochen gross. Diese Kondition erlaubt u.E. eine Halbierung des auf der Grundlage von international aufgetretenen Staudamm-Mauerbrüchen berechneten Todesfallrisikos von 1,3 Todesfällen pro GWa. Die Monetarisierung des Wertes eines Menschenlebens stützt sich erneut auf die hedonistische Preisanalyse. Sie beziffert den Wert eines Menschenlebens – abgeleitet aus amerikanischen Analysen – auf 5,5 Mio. Fr. Für die Schweiz besteht damit ein Schadensvolumen von 3,58 Mio. Fr. pro GWa bzw. pro 8'760 GWh (1 GWa entspricht 8'760 GWh). Auf die Gesamterzeugung bezogen sind dies 7,75 Mio. Fr. Die Internalisierung des Schadensvolumens für das Todesfallrisiko ergäbe einen Preisaufschlag auf den von Speicherkraftwerken erzeugten Strom in Höhe von 0,0408 Rp./kWh.

Für die nicht durch die Haftpflicht abgedeckten **materiellen Schäden** (externe Kosten) stützen wir uns bei der Quantifizierung und Monetarisierung auf versicherungstechnischen Gegebenheiten ab. Geschätzt wurde, dass bei einer Ausdehnung des Walliser Versicherungsobligatoriums für die Betreiber von Talsperren auf die gesamte Schweiz ein jährliches Prämienvolumen in Höhe von 6 Mio. Fr. anfallen würde. Nach Expertenmeinung entsprechen die diesem Prämienvolumen zugrundegelegten Deckungssummen dem effektiven Schadensvolumen nicht. Unterstellt, das effektive Schadensvolumen läge – gemessen an dem versicherten Schaden (Deckungssumme) – um den Faktor 4 höher (eine Grössenordnung, die in internen Diskussionen genannt wird), wäre eine Versicherungssumme von 24 Mio. Fr. fällig. Nach Abzug der 6 Mio. Fr. als Prämie für die obligatorische Versicherung (im Strompreis internalisiert) verblieben 18 Mio. Fr. Versicherungsprämie pro Jahr für nicht abgedeckte materielle Schäden (externe Kosten). Umgelegt auf die jährliche Arbeit der Speicherkraftwerke der Schweiz von 18'944 GWh müssten 0,095 Rappen dem Strompreis pro kWh im Zusammenhang mit den materiellen Schäden zugeschlagen werden.

Es ist hier zu beachten, dass die beiden Kostenblöcke Todesfallrisiken (mit 7,75 Mio. Fr.) wie materielle Schäden (mit 18 Mio. Fr.) bereits wahrscheinlichkeits-theoretisch abgeleitete **Erwartungswerte** sind. Über die Bandbreite der jeweils möglichen Einzelschadensabläufe (von Kleinstschäden bis zur Katastrophe), vor allem aber über die jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten ist nichts bekannt. Gerade im Bereich der Risikoforschung besteht damit in der Schweiz erheblicher Forschungsbedarf.

■ Quantifizierung und Monetarisierung bei Laufkraftwerken

Auch die verfügbaren Informationen zu den Schadensvolumina von Wehrbrüchen, d.h. dem **Verlust an Menschenleben** sowie den **materiellen Schäden** und zu den Risikoabschätzungen für derartige Grossunfälle, sind noch rudimentär. Als Schätzgrundlage wurde deshalb unter Berücksichtigung von Plausibilitätsüberlegungen auf den für die Speicherkraftwerke verfügbaren Informationen aufgebaut.

Selbst wenn man unterstellt, dass das Risiko von Wehrbrüchen niedriger liegt als das von Staudamm-Mauerbrüchen spricht die Lage der Laufkraftwerke in vielfach dicht besiedelten Gebieten für ein annähernd gleiches **Todesfallrisiko**, also 0,65 Todesfälle pro GWa. Setzt man den Wert eines



3 Wasserkraftnutzung

Menschenlebens mit 5,5 Mio. Fr. an, ergibt sich für die Schweiz ein Schadensvolumen von 3,58 Mio. Fr. pro GWh bzw. pro 8'760 GWh. Die Internalisierung des Schadensvolumens für das Todesfallrisiko ergäbe damit einen Preisaufschlag auf den von Laufkraftwerken erzeugten Strom in Höhe von 0,0408 Rp./kWh.

Für die Quantifizierung und Monetarisierung **materieller Schäden** von Wehrbrüchen kann gemäss Aussagen der Versicherungswirtschaft approximativ angenommen werden, dass die von der Haftpflicht gedeckten Schadensvolumina bei Laufkraftwerken etwa ein Viertel der bei Speicherkraftwerken gedeckten Schadensvolumina ausmachen. Die äquivalente Gesamtversicherungsprämie für die Laufkraftwerke beläuft sich damit auf 1,5 Mio. Fr. Unterstellt, das effektive Schadensvolumen läge gemessen an dem versicherten Schaden (Deckungssumme) um den Faktor 4 höher (siehe oben), wäre für Laufkraftwerke eine Versicherungsprämie pro Jahr von 6 Mio. Fr. zu entrichten. Nach Abzug der Versicherungsprämie für die obligatorische Haftpflichtversicherung (internalisiert) verblieben 4,5 Mio. Fr. pro Jahr für nicht abgedeckte materielle Schäden. Umgelegt auf die jährliche Arbeit der Laufkraftwerke der Schweiz von 14'247 GWh, ergäbe sich ein Zuschlag von 0,032 Rp./kWh auf den Strompreis.

3.10.3 Zusammenfassende Bewertung

Das Unterfangen einer Quantifizierung und Monetarisierung der externen Kosten im Zusammenhang mit der Wasserkraftnutzung zur Stromerzeugung für den gesamten Anlagenpark eines Landes ist ein Novum.

Selbst wenn man berücksichtigt, dass bei der Quantifizierung und Monetarisierung der externen Effekte die Schadenskategorien nicht flächendeckend erfasst werden konnten, zudem mit Schätzungen gearbeitet werden musste, die noch viele Wünsche nach wissenschaftlich abgesicherter Genauigkeit offenlassen, bleibt festzuhalten:

- Die Nutzung der Wasserkraft zur Energieerzeugung gilt bis heute speziell unter Umweltgesichtspunkten als ideale weil unverfängliche Technologie. Sie wird im Vergleich zur Kernenergie als risikoarm, zur thermischen Energie als emissionsarm eingestuft. Zudem stellt sie keinen irreversiblen Verbrauch von Primärenergieträgern dar.
- Erst in neuester Zeit wächst die Sensibilisierung gegenüber der Wasserkraft. Die der Wasserkraft attestierte natürliche Regenerationsfähigkeit hat teilweise den Blick dafür verstellt, dass mit dieser Technologie ein starker Eingriff in den Naturhaushalt mit zum erheblichen Teil irreversiblen Folgeschäden verbunden ist.
- In der Energiediskussion finden diese Überlegungen zwar zunehmend Eingang, allerdings ohne sich dabei auf eine valide Basis abstützen zu können.

Die in den Arbeitsberichten vorgestellte Untersuchung kann vor diesem Hintergrund nicht den Anspruch erheben, definitiv abgesicherte monetäre Beträge bereitzustellen. Der Wert der Untersuchung liegt vielmehr darin, einen gangbaren methodischen Ansatz aufzuzeigen und konkrete Hinweise für vertiefende Arbeiten zu liefern. Gerade weil in der Schweiz der Anteil der aus Wasserkraft erzeugten elektrischen Energie fast 60% ausmacht, wird eine Vertiefung der Fragestellung umso dringlicher.



3.11 Externe Kosten der Übertragung und Verteilung von Elektrizität

Das Übertragungs- und Verteilungsnetz von Elektrizität in der Schweiz ist etwa 145'000 km lang. Es besteht zu mehr als drei Vierteln aus Erdkabeln und zu knapp einem Viertel aus Freileitungen. Im Niederspannungsnetz, das zur örtlichen Feinverteilung dient, beträgt der Erdkabelanteil 97%. Die regionale Feinverteilung über Mittelspannungsleitungen ist zu gut der Hälfte verkabelt, wobei Freileitungen in ländlichen Gebieten dominieren. Auf den höheren Spannungsebenen der grossräumigen Verteilung und der nationalen und internationalen Fernverteilung werden Kabel bisher nur in Ausnahmefällen eingesetzt.

Erdkabel vermeiden viele der externen Wirkungen, die von Freileitungen ausgehen, sind jedoch selbst nicht frei von externen Wirkungen. Zwar verschwinden sie im Boden und sind für das Auge nicht sichtbar, aber die Kabelgraben können durch Aufgrabung und Einbringen von Fremdstoffen die Bodenstruktur stören. Ferner haben sie eine gewisse Drainagewirkung. Die Verlustwärme der Kabelleitungen kann zu lokalen Bodenerwärmungen, ja sogar zur Austrocknung führen. Kabeltrassen werden oft entlang bestehenden Strassen gelegt und führen durch bereits erschlossene und durchquerte Landschaften. Bei einer Trasse, die querfeldein führt, entstehen durch den Kabelgraben und die damit verbundenen Erschliessungsmassnahmen stärkere Eingriffe in die Natur. Die Zerschneidungswirkung ist um so gravierender, je wertvoller sich die durchquerte Landschaft darstellt.

Freileitungen weisen eine erhebliche Wirkung auf. Sie beeinträchtigen die optische Qualität der Landschaft zum Teil gravierend. Bei der vorhandenen Dichte des Freileitungsnetzes kann man zu dem Schluss kommen, dass es in der Schweiz nur noch relativ wenige Standorte gibt, bei denen der Blick von Horizont zu Horizont nicht durch Freileitungen gestört ist. Grosse, wald-überspannende Freileitungen auf Höhenrücken sind über viele Kilometer hin sichtbar. Freileitungen beeinträchtigen die Siedlungsfunktion der Landschaft. Es ist nicht unplausibel, anzunehmen, dass sie bei den Bewohnern benachbarter Siedlungen Gefühle der Bedrohung hervorrufen können. In diesem Zusammenhang ist die nach wie vor nicht ganz von der Hand zu weisende Möglichkeit zu nennen, dass Hochspannungs-Freileitungen auch die menschliche Gesundheit beeinträchtigen (höheres Risiko von Leukämie bei Kindern). Freileitungen beeinträchtigen die Natur. Insbesondere Vögel sind in erheblicher Zahl Opfer von Freileitungen. Dies gilt in verstärktem Masse, wenn Freileitungen herausgehobene Schlaf-, Rast- oder Brutplätze von Vögeln überqueren. Wenn Wälder nicht überspannt werden (was wegen der höheren Masten zu einer stärkeren optischen Beeinträchtigung führt), sind Schneisen anzulegen und auf Dauer freizuhalten.

Die wichtigsten nicht internalisierten Effekte von Freileitungen können durch Verkabelung vermieden werden. Die Mehrkosten der Verkabelung gegenüber dem Bau von Freileitungen können in diesem Sinne als Vermeidungskosten der externen Effekte der Freileitungen interpretiert werden. Mit pauschalierten Kostensätzen je Kilometer betragen sie für die Schweiz etwa 60 Mrd. Franken. Bezogen auf den Stromverbrauch der nächsten 30 bis 40 Jahre in Höhe von 2000 Mrd. kWh ergeben sie **Vermeidungskosten** in Höhe von rund **3 Rp./kWh**. Dieser Ansatz soll aber an dieser Stelle wegen der schon mehrfach erwähnten methodischen Mängel nicht weiter verfolgt werden.

Die tatsächlichen externen **Schadenskosten** der Freileitungen und der Erdkabel (also nicht die Vermeidungskosten) können nicht im einzelnen bestimmt werden. Bei einer konkret vorliegenden Problemstellung kann



3 Übertragung und Verteilung von Elektrizität

abgeschätzt werden, welche Alternative insgesamt und auch unter dem Aspekt der sozialen Kosten günstiger ist, und welche Trasse die Forderung nach flächensparendem und landschaftsschonendem Vorgehen am besten erfüllt. Dabei wird es sehr auf den bisherigen kleinteiligen Charakter der jeweils beeinträchtigen Landschaft ankommen müssen. Werden seltene, wertvolle oder geschützte Flächen gestört, wird dies deutlich höher zu bewerten sein als das Durchqueren einer weitgehend ausgeräumten, landwirtschaftlich genutzten Fläche.

Ein Versuch, die externen Kosten der Übertragung und Verteilung von Elektrizität zu bestimmen, muss notgedrungen mit pauschalen Verfahren arbeiten. Hier wird so vorgegangen, dass alle beeinträchtigenden Wirkungen in Flächen ausgedrückt werden. Der erste Anhaltspunkt dabei ist die von einer Trasse unmittelbar in Anspruch genommene Fläche. Diese reicht von 0,001 km²/km bei Kabelleitungen im Niederspannungsnetz (1 m Trassenbreite) bis zu 0,07 km²/km bei 380 kV-Höchstspannungs-Freileitungen (70 m Trassenbreite). Die verschiedenen Wirkungen, die von einer Trasse ausgehen, reichen jedoch zum Teil weit über die reine Trassenfläche hinaus. Das wird hier durch entsprechend festgelegte Vervielfältigungsfaktoren zu berücksichtigen versucht. Diese betragen

- 1 bei Niederspannungsleitungen (Kabel und Freileitung)
- 2 bei Mittelspannungsleitungen (Kabel 1)
- 3 bei Hochspannungsleitungen 50–170 kV (Kabel 1,5)
- 5 bei Hochspannungsleitungen 220 kV (Kabel 2)
- 8 bei Höchstspannungsleitungen 380 kV (kein Kabel).

In einer nach Trassenlängen differenzierten Rechnung ergeben sich damit 3524 km² beeinträchtigte Fläche als mengenmässiges Äquivalent für alle externen Effekte.

Eine Monetarisierung dieser Fläche ist ausserordentlich schwierig und nicht frei von sehr groben und pauschalisierenden Annahmen. Sie steht und fällt mit der Validität dieser Annahmen. Wie schon an anderer Stelle dieses Berichtes wird hier hilfsweise mit Bewertungsgrössen gearbeitet, die sich bei einer deutschen Untersuchung über die Zahlungsbereitschaft von Personen für den (gesamten) Arten- und Biotopschutz ergeben haben. Sie betragen rd. 400 Fr. pro Person und 66'000 Fr. je km². Ob darin die besondere Schönheit der Schweizer Landschaft und die an vielen Stellen sichtbar bekundete Liebe der Schweizer Bevölkerung zu ihrer Heimat zum Ausdruck kommt, sei dahingestellt. Andererseits sind die von einer Freileitung auf die Umgebung ausgehenden Wirkungen im Verhältnis zu einem vollständigen Flächenverbrauch durch Überdeckung/Versiegelung und einer nicht mehr vorhandenen Artenvielfalt doch sehr mässig. Deswegen wird hier der monetäre Bewertungsansatz auf 5–10% des Werts eines vollständigen Flächenverbrauchs reduziert.

Bei einer insgesamt beeinträchtigten Fläche von 3534 km² und einem Wert von 3300 bis 6600 Fr./km² ergeben sich externe Kosten der Übertragung und Verteilung von Elektrizität in Höhe von **12 bis 23 Mio. Fr./a**. Im Verhältnis zu der produzierten Menge von durchschnittlich 56.000 Mio. kWh sind dies **0,02 Rp./kWh bis 0,04 Rp./kWh**.

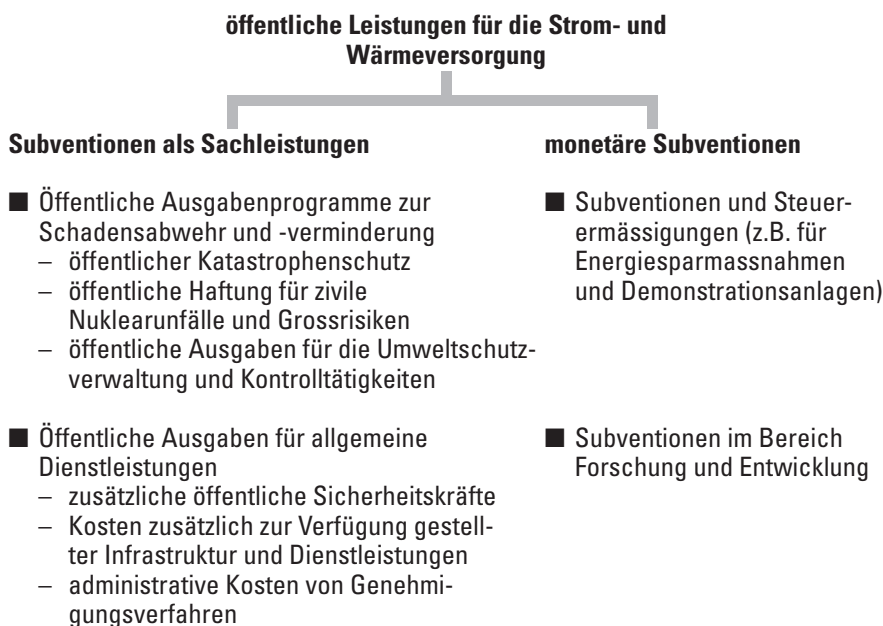


3.12 Öffentliche Leistungen und Externalitäten

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 von den NutzniesserInnen, sondern von der Allgemeinheit getragen. Bei öffentlichen Gütern ergibt sich der Entscheid über Art und Ausmass des Angebotes nicht als Resultat des Marktes, sondern als Ergebnis eines politischen Prozesses. Der für sie erforderliche Ressourcenverbrauch wird nicht am Markt alloziert, sie haben keinen Marktpreis, und daher geht es bei ihnen auch nicht darum, externe Effekte in ihren Preis zu integrieren. Aus diesen Gründen werden hier die staatlichen Forschungs- und Entwicklungsausgaben sowie die übrigen subventionsähnlichen öffentlichen Ausgaben nicht in die kalkulatorischen Energiepreiszuschläge eingebaut. Die staatlichen F+E-Ausgaben und die übrigen staatlichen Aufwendungen im hier betrachteten Strom- und Wärmebereich werden anschliessend identifiziert und quantifiziert, jedoch nicht zu den externen Kosten gezählt.

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

Die hier interessierenden öffentlichen Leistungen lassen sich wie folgt charakterisieren:



3.12.2 Bewertung der öffentlichen Leistungen im Strom- und Wärmebereich

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. Viele staatliche Einrichtungen machen keine detaillierte Kostenrechnung (Kostenstellen- und Kostenartenrechnung). Es wird dadurch sehr schwierig, die Kosten einzelner Aktivitäten zu ermitteln. Zudem muss darauf geachtet werden, dass innerhalb eines Projektes, das die externen Effekte der Wärme- und Stromversorgung



3 Öffentliche Leistungen

quantifizieren soll, keine Doppelzählungen stattfinden. Aus diesen Gründen sind die folgenden Angaben unvollständig. Die Zurechnung auf die verschiedenen Energieträger und ihre Quantifizierung sind als Grobschätzungen zu betrachten.

■ 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/ Aufwendungen	Öffentliche Ausgaben		Verbrauch 1990 [TJ/a]	Aufwendungen	
	1991 Kantone [1000 Fr.]	1990 Bund [1000 Fr.]		1990/91 [Rp./kWh]	1990/91 [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 ¹⁾	1'669 ¹⁾
8. Umweltwärme/ Geothermie	2'700	32	2'246	0,13 ¹⁾	370 ¹⁾

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

Mit Ausnahme der Aufwendungen für Biomasse, Sonnenenergie und die Umweltwärme/Geothermie sind die spezifischen Ausgaben pro TJ bzw. pro kWh vernachlässigbar. Die Zuordnung der Aufwendungen der Kantone auf die Bereiche ist infolge fehlender Detailinformationen seitens der Kantone hypothetisch. Das spielt vor allem in den Bereichen Biomasse, Sonnenenergie und Umweltwärme/Geothermie eine Rolle, weil dort die ermittelten spezifischen Aufwendungen nicht ganz vernachlässigbar sind.

■ Ausgaben der öffentlichen Hand für F+E im Strom- und Wärmebereich

Über die Ausgaben der öffentlichen Hand für Forschung und Entwicklung liegen relativ gute statistische Unterlagen vor. Die folgende Tabelle zeigt die Aufwendungen für verschiedene Forschungsgebiete. Davon abgezogen werden die Ausgaben des Nationalen Energieforschungsfonds¹⁸⁾ und die Forschungsaufwendungen für die Energienutzung im Verkehr. Die Ausgaben für Forschung im Bereich der Systeme der Wärmenutzung (5,1 Mio. Fr.)

Tabelle 3.21
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

¹⁸⁾

Dessen Aufwendungen werden durch eine Abgabe auf dem Benzin direkt von den Verursachern getragen und sind keine öffentlichen Ausgaben.



werden prozentual (entsprechend den Forschungsanteilen) auf die verschiedenen Energiebereiche aufgeteilt. Bei den traditionellen Energieträgern Erdölprodukte, Gas, Kohle, Elektrizität und Biomasse/Holz werden die F+E-Ausgaben vereinfachend nicht als Investitionen für zusätzliche Anwendungen, sondern als laufende Beiträge für die jeweilige Jahresproduktion behandelt. Bei den Energieeinsparungen können aber keine spezifischen Kosten ermittelt werden, da die zugehörige Bezugsmenge fehlt. Bei den neuen Technologien ist die Zuordnung der öffentlichen Forschungs- und Entwicklungsausgaben problematisch. 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.

Ausgabenbereiche	Forschungsaufwendungen 1989 ²⁾ [Mio. Fr./a]	Endenergieverbrauch 1989 [TJ/a]	Ausgaben 1989	
			[Rp./kWh]	[Fr./TJ]
1. Energiesparen und übergreifende Forschung	(12,7)³⁾	—	—	—
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	125
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» und für «Systeme Wärmeeinnutzung» wurden gemäss den Anteilen an den Forschungsaufwendungen auf die Positionen 1–9 verteilt.

3) Wurde gemäss Energieverbrauchsanteil 1989 auf die Positionen 1–6 verteilt.

Tabelle 3.22
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



3.13 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellte Anhäufung von technischen Daten, physikalischen Details und konzeptionellen Varianten zeigt in eindrucksvoller Weise die Multidimensionalität der externen Effekte unserer Energieversorgung.

Die **Identifizierung**, also die **qualitative** Beschreibung möglicher externer Effekte, ist dabei in der Analyse ein noch eher «einfacher» Schritt. Viele Effekte können wahrgenommen werden und es besteht die Möglichkeit, einige Kausalbeziehungen prinzipiell zu beschreiben.

So bestehen relativ gut gesicherte Erkenntnisse darüber, dass bestimmte Luftschadstoffemissionen

- die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion mindern,
- Atemwegs- und Herz-/Kreislaufkrankungen und
- Gebäudeschäden verursachen.

Aber bereits auf dieser ersten Stufe gibt es zahlreiche Unsicherheiten. So sind vor allem die Potentiale an Schadstoffakkumulationen und -synergien in ihrer Wirkung bisher noch nicht bekannt oder – was noch problematischer ist – die Wirkung ist bisher noch gar nicht eingetreten. Beispiele sind:

- Die Szenarien zur künftigen Waldschadensentwicklung sind noch nicht abgesichert, weil die energiebedingten Schadstoffe wahrscheinlich nur zusammen mit anderen Stressoren Schäden verursachen.
- Die Schadstoffakkumulationen im Boden und hier insbesondere die Schwermetallanreicherungen sind in ihrer Schadwirkung auf Flora und Fauna unklar.
- Das gleiche gilt für den Einfluss der verschiedensten Luftschadstoffe auf die Morbidität und Mortalität der Gesamtbevölkerung. Hier sind erst wenige Schadstoffe (SO_2 , NO_x , Stäube, VOC) in bezug auf wenige Krankheitsbilder untersucht. Synergetisch bedingte Syndromerkrankungen, z.B. Schwächung des Immunsystems oder die unübersehbare Vielfalt von Allergien, können nur vermutet werden.
- Die Anreicherung von CO_2 , NO_x , Lachgas, Methan etc. in der Atmosphäre ist zwar im «Primäreffekt», nämlich einem globalen Temperaturanstieg als ziemlich sicher identifiziert. Die Folgen bleiben aber noch im Dunkeln. Wahrscheinlich sind eine deutliche Häufung von zerstörerischen Wetteranomalien und Massenmigrationen als Folge von grossräumigen Klimaverschiebungen. Aber auch Threshold-Effekte, wie die Veränderungen oder das Versiegen grosser globaler Meeresströmungen, sind nicht ausgeschlossen, allerdings bisher noch spekulativ.
- Die Langfristfolgen von radioaktiven Niedrigdosen aus dem Normalbetrieb von Kernkraftwerken oder aus einem grossen Kernschmelzunfall sind in der Wissenschaft heftig umstritten. Naturraumschäden, die mit der Wasserkraftnutzung verbunden sind, lassen sich in einer flächendeckenden Bewertung nur überschlägig beschreiben.

Wohlgemerkt: Auf der Erkenntnisstufe «Identifizierung» geht es noch nicht um Quantitäten, sondern nur darum, zu erkennen, was sich überhaupt ereignen könnte.



3 Bewertung der Ergebnisse

Insgesamt ist aber die Fülle des Materials beeindruckend genug. In fast allen Erfahrungsbereichen unseres Lebens treten externe Effekte der unterschiedlichsten Art massiv auf. Materialschäden oder landwirtschaftliche Produktionsausfälle sind hier noch das geringste Übel. Der Hinweis, dass im Gesundheitsbereich oder bei der Gefährdung der Artenvielfalt derzeit keine genaue qualitative Beschreibung verfügbar ist, beeinträchtigt die Sicherheit der Aussage, dass Beschädigungen erheblichen Ausmasses wahrscheinlich sind, in keiner Weise. Auch bei der drohenden globalen Katastrophe umfassender Klimaveränderungen oder beim Risiko einer atomaren Katastrophe bestehen grosse Externalitäten, deren Ausmass allerdings kontrovers diskutiert wird.

Selbstverständlich schränken die Defizite bei der Identifizierung auch die **Quantifizierungsmöglichkeiten** ein: Was nicht bekannt ist, kann nicht gemessen werden.

Zusätzlich bestehen aber auch konzeptionelle oder empirische Probleme der technisch/physikalischen **Messung** qualitativ identifizierter externer Effekte.

Bei Materialschäden oder Gesundheitsschäden gibt es zumindest prinzipiell die Möglichkeit, durch Dosis-Wirkungs-Analysen und/oder durch epidemiologische Untersuchungen **quantitative** Bezüge zwischen bestimmten Verursachern und Schadenswirkungen herzustellen. So konnte gezeigt werden, dass es eindeutige quantitative Zusammenhänge zwischen bestimmten Schadstoffen (SO₂, NO_x, Stäube, Ozon) und der Häufigkeit von (ausgewählten) Krankheitsbildern gibt. Auch die Kausalkette Luftverschmutzung – Gebäudeschäden lässt sich empirisch gut absichern. Eine belastbare empirische Basis für landwirtschaftliche Produktionsausfälle als Folge hoher Ozonbelastungen ist herstellbar.

In anderen Bereichen sind aber Defizite unverkennbar: Die Beeinträchtigung der Tier- und Pflanzenwelt ist naturwissenschaftlich kaum zu messen und zum Teil noch wenig untersucht. Die Dosis-Wirkungs-Werte einer radioaktiven Verstrahlung in bezug auf tödliche Krebserkrankungen muss sich im empirischen Bereich auf den nur kümmerlichen und scheinbarweise stattfindenden Informationsfluss aus der Tschernobyl-Katastrophe oder – auf die nur bedingt aussagefähigen – Analysen der Spätfolgen in Hiroshima und Nagasaki stützen. Bei der Kernkraftnutzung sind zudem empirische Schwächen bei den technisch-physikalischen Risikoanalysen in bezug auf die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter möglicher Schadensabläufe nicht zu übersehen. Auch die drohende Klimakatastrophe ist hier wieder angesprochen: Meeresspiegelerhöhung um 1 m oder 2 m? 400 Millionen umzusiedelnde Menschen oder 1 Milliarde? 1 Million Tote infolge von Hungerkatastrophen und Wetteranomalien oder 5 Millionen? Ein Spiel mit Zahlen, das wahrscheinlich nicht weiterführt (und bei diesen Externalitäten letztlich auch eine Abkehr von der eigentlichen Schadensmessung hin zu Konzepten der Vermeidungskosten nahelegt).

Insgesamt wirft dies alles einen Schatten auf den Versuch, Externalitäten zu **monetarisieren**. Die **unmittelbare monetäre Ermittlung der Schadenshöhe** bei empirisch gesicherten Sachverhalten ist nur in wenigen Schadensfeldern möglich. Hierzu zählen:

- landwirtschaftliche Produktionsausfälle,
- Gebäudeschäden,
- Teile der Waldschadenskosten (Ausfälle von forstwirtschaftlichen Einkommen, Kosten für zusätzlich notwendige Verbauungen oder Schutzmassnahmen),



- Teile der Gesundheitskosten (Produktionsausfälle durch Krankheit, Behandlungskosten)
- minime Teile der Kosten des Treibhauseffekts (z.B. Deicherhöhungen).

Viele andere Schäden sind dagegen einer direkten Monetarisierung nicht zugänglich, weil sie immaterielle Werte betreffen. Solche Werte sind zwar im Prinzip «entschädigbar», sie können aber nur aus der allgemeinen Nutzen- und Präferenzsphäre der Menschen (monetär) bewertet werden.

Dieser Tatbestand gilt insbesondere für die Externalität «Verlust an Menschenleben», aber auch für Schadenskategorien wie

- Gefährdung der Erholungs- und Erlebnisfunktion im Naturraum,
- Verlust der Artenvielfalt in Flora und Fauna,
- Zerstörung des Landschaftsbildes,
- Verlust der Heimat,
- Schmerz, Trauer,
- Aufbrechen gesellschaftlicher Konflikte (national und international) im Katastrophenfall.

Da hier die Schadenskosten direkt nicht monetär messbar sind, müssen die unmittelbar oder mittelbar durch externe Effekte Betroffenen nach ihren Präferenzen befragt werden, nach dem (monetären) Stellenwert, den sie der Beseitigung oder Verhinderung eines Schadens zumessen: Das Ausmass der Verletzung der Präferenzen (hier dann allerdings in harten Franken ausgedrückt) sind «die Kosten des externen Effekts».

Die in den vorhergehenden Abschnitten verwendeten Monetarisierungskonzepte sind in der nachfolgenden Übersicht zusammenfassend dargestellt. Aus dieser Tabelle wird die eigentlich dominierende Stellung der Monetarisierung durch Präferenzermittlung, die sogenannten Zahlungsbereitschaftskonzepte oder Contingent-Valuation-Methoden deutlich. Hervorzuheben sind hier die in den vorliegenden Untersuchungen verwendeten Monetarisierungsansätze für den «Wert eines Menschenlebens» in Höhe von 5,5 Mio. Fr. und die Naturraumbewertungen von Nielsen (Existenz- und Erlebnissenutzen des Waldes) und Hampicke (Zahlungsbereitschaft der Gesellschaft für eine Erhaltung der Arten- und Biotopvielfalt). Es soll allerdings nicht unerwähnt bleiben, dass insbesondere bei den «Bewertungen des Lebens» noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. Der oben genannte Wert stammt aus Untersuchungen in den USA (Frage der Übertragbarkeit) und ist zudem ein Mittelwert aus verschiedensten Analyseansätzen.

Mit dem Hinweis auf die Bedeutung von Präferenzstrukturen, die ja ein generelles Kennzeichen aller gesellschaftlichen Abstimmungsprozesse sind, lassen sich abschliessend die eher monetär orientierten ökonomischen Ansätze zum Umgang mit externen Effekten nahtlos in das Gesamtgefüge des gesellschaftlichen Willensbildungsprozesses einfügen: Die ökonomischen Internalisierungsinstrumente sind Teile – und zwar nicht die unbedeutendsten – des gesamten gesellschaftlichen Umgangs mit externen Effekten. Der gesellschaftliche Umgang mit externen Effekten umfasst aber mehr. Er muss sich auch auf die zahlreichen Interdependenzen zwischen technisch/ physikalischen, ökonomischen und sozialen Wechselwirkungen bei externen Effekten erstrecken.



3 Bewertung der Ergebnisse

Identifizierte externe Effekte	Quantifizierbarkeit	Monetarisierbarkeit und Monetarisierungsansätze			Risiko-bewertung
		Schadens-kosten	Bewertung von Präferenzen	Vermeidungs-kosten	
Materialschäden	● ●	● ● ●	○		
Gesundheitsschäden					
– Morbidität	● ●	●	● ●		
– Mortalität	●	●	● ●		
– Folgen der Klimaveränderung	●	○	○ ○ ○	● ● ●	○ ○ ○
– Grossflächige Verseuchung	● ●	●	○ ○ ○		○ ○ ○
Psychische Beeinträchtigung	●	○			
Schäden an Nutztieren und -pflanzen	● ●	● ● ●			
Gefährdung der Artenvielfalt	●	○	○ ○ ○		
Boden- und Wassergefährdung	●	●	○ ○		
Störung des Landschaftsbildes	●	○	○ ○ ○		
Verletzung der intertemporalen Verteilungsgerechtigkeit	● ●	○	○ ○ ○	● ● ●	

Figur 3.5
Quantifizierbarkeit und mögliche
Monetarisierungsansätze externer
Effekte der Energieversorgung

Prinzipielle Eignung als Monetarisierungsansatz:

- ● ● : gut
- ● : mittel
- : schlecht

○ Es liegen noch keine oder unbefriedigende empirische Arbeiten vor.

● Es sind bereits empirische Arbeiten mit diesem Ansatz durchgeführt worden.

Im Sinne eines **pragmatischen Vorgehens** sollten die ausgewiesenen monetarisierten Schäden daher stets als Untermenge der tatsächlichen Gesamtschäden interpretiert werden, wobei der Begriff «Gesamtschäden» hier explizit nicht nur als monetärer Wert zu verstehen ist. Durch eine weitgespannte – und dennoch stets unvollständige – Monetarisierung kann eine Untergrenze der externen Kosten aufgezeigt und die Multidimensionalität der Fragestellung reduziert werden. Verbleibende, nicht erfassbare oder nicht monetarisierbare externe Effekte können hier nur durch qualitative Würdigung angemessen berücksichtigt werden.



3.14 Zusammenfassende Ergebnisübersicht

In der folgenden Übersicht werden die Ergebnisse nach Schadensbereich zusammenfassend gewürdigt. Im Vordergrund steht dabei eine knappe und übersichtliche Bewertung der Qualität der Kostenschätzungen. Die Darstellung basiert auf der folgenden Systematik:

■ **Unterscheidung Schadenszenario/physische Schäden – Monetarisierung:**

Die Qualität und die Probleme/Lücken bei der Identifikation und physischen Quantifizierung der Schäden werden unter der Rubrik «Schadenszenario/physische Schäden» dargelegt.

Die Rubrik «Monetarisierung» betrifft die Resultate der Monetarisierung, beurteilt grob ihre Qualität und weist auf Probleme/Lücken hin.

■ Die **«Schadensszenarien/physische Schäden»** und die **«Monetarisierung»** werden in den Spalten **nach ihrer Qualität geordnet** ausgewiesen. Die letzten Spalten weisen auf nicht erfasste bzw. nicht erfassbare Effekte oder Kosten hin. Mit den «Bemerkungen» werden Interpretationshinweise und Ergänzungen vermittelt.

■ In der folgenden Übersicht werden die **externen Kosten der Luftverschmutzung durch den Energieverbrauch in der Schweiz** pro Schadenbereich ausgewiesen, mit Ausnahme der externen Kosten der luftschadstoffbedingten **Gebäudeschäden**: Dort enthalten die angegebenen Kosten **nur die Kosten der Strom- und Wärmeversorgung**.

	gesichert	teilweise gesichert	vermutet	nicht erfassbar/nicht erfasst	Bemerkungen
Waldschäden – Schadenszenario Physische Schäden – Monetarisierung		Forstwirtschaft: 330–560 Mio Fr./a Naturgefahren: 410–1770 Mio Fr./a Berglandwirtschaft: 40–50 Mio Fr./a Tourismus: 310 Mio Fr./a Erholungsnutzen: 0–200 Mio Fr./a Total ohne Schadenanteil LW (rund 50%): 550–1450 Mio Fr./a	Waldschadensszenarien schlecht abgesichert, da Ursachen Waldschäden unklar; Schadenentwicklung etwa gemäss Trend 1984–1990 Naturgefahren ausser Lawinen sehr pauschal geschätzt, Erholungsnutzen ebenfalls sehr pauschal	Auswirkungen der Luftschadstoffe auf das Grundwasser, Aufwendungen für die Waldforschung, Wertminderungen, verbleibende Bestände und Böden; übrige regionalwirtschaftl. Effekte (Abwanderung); andere Schäden an Flora und Fauna	Die Waldschadensszenarien bestimmen die Ergebnisse; die neuesten Erkenntnisse der Waldzustands- und Waldschadensforschung deuten darauf hin, dass die künftige Schadensentwicklung eher moderater verlaufen könnte; weiterer Bedarf an Ursachenforschung Forschungsbedarf bei der monetären Bewertung von Erlebnis- und Existenznutzen
Landwirtschaftliche Produktionsausfälle – Schadenszenario Physische Schäden – Monetarisierung	Schadenszenario auch durch die neuesten Versuche in der Schweiz weitgehend abgesichert 65–140 Mio Fr./a			Nur die wichtigsten ozonempfindlichen Kulturen berücksichtigt, keine Naturwieesen, Weiden; Synergiewirkungen anderer Schadstoffe; langfristige Gefährdung der Bodenqualität; Einflüsse auf die Tierhaltung	
Gesundheit – Schadenszenario Physische Schäden – Monetarisierung	Atemwegs- und Herz-/Kreislaufkrankungen bei Erwerbstätigen durch die ausgewählten Schadstoffe	Atemwegs- und Herz-/Kreislaufkrankungen bei Nicht-Erwerbstätigen durch die ausgewählten Schadstoffe Atemwegserkrankungen: 260–790 Mio Fr./a Herz- und Kreislaufkrankungen: 120–1060 Mio Fr./a Total: 380–1850 Mio Fr./a davon bei Nichterwerbstätigen: 80–390 Mio Fr./a	Schädigungen durch Synergieeffekte Gesamtschadensbetrag wahrscheinlich deutlich höher (Mortalität, andere Schadstoffe, Synergieeffekte)	Erhöhung der Mortalität nicht abgeklärt, nur Morbiditätserhöhungen erfasst; nur Atemwegs und Herz-/Kreislaufkrankungen, keine Allergien, Synergieeffekte, Schmerzen, Leid, etc. erfasst Krankheitsfälle ohne Arbeitsunfähigkeit; Nutzen der ausgefallenen informellen Arbeit; Nutzen der Freizeit bei Kranken; psychosoziale Kosten, Schmerzen, Leid	Forschungsbedarf Epidemiologie in der Schweiz (diverse Projekte in Arbeit: z.B. SAPALDIA) Übertragbarkeit der festgestellten Gesundheitsschäden in BRD-Belastungsgebieten auf die Schweiz ist nicht unproblematisch: In CH weniger Staub und SO ₂ dafür mehr O ₃



	gesichert	teilweise gesichert	vermutet	nicht erfassbar/nicht erfasst	Bemerkungen
Gebäudeschäden – Schadenszenario Physische Schäden – Monetarisierung	Normalgebäudebestand Immissionsbedingte Erhöhung der Kapitalkosten der Gebäudehülle: 260–760 Mio Fr./a	Immissionsbedingte Erhöhung der Reinigungskosten der Fenster von Geschäftsbauten, Immissionskategorie «Stadt»: 60–200 Mio Fr./a Total Kapital- und Reinigungskosten: 450–830 Mio Fr./a		Historische Gebäude, Denkmäler, immissionsbedingte Schäden im Gebäudeinnern und an anderen Infrastrukturen. Keine Kosten in ländlichen Gebieten; keine Reinigungskosten von Metallfassaden, Storen, Rolläden, Fensterläden; keine Reinigungskosten an Wohngebäuden, keine ästhetischen Kosten	
Transport, Lagerung Raffination von Öl – Schadenszenario Physische Schäden – Monetarisierung	Meeresverunreinigungen durch Tanker, Off-Shore-Förderung und Raffinerien weltweit; Transport und Lagerung in der Schweiz	Bezogen auf den Weltverbrauch: 3–15 Mrd Fr./a bezogen auf den Verbrauch in der Schweiz: 6–29 Mio Fr./a		Ölunfälle und -verschmutzungen bei der Förderung auf dem Festland, beim Transport auf dem Rhein, in anderen Ländern; schnell vorübergehende Schäden an Flora und Fauna	
Transport und Lagerung von Gas – Schadenszenario Physische Schäden – Monetarisierung		Gasunfälle bei Hochdruck-Erdgasanlagen und bei Niederdruckanlagen in der Schweiz In der Schweiz: externe Kosten vernachlässigbar, Rest ist internalisiert		Flüssiggasunfälle; nur Ereignisse in der Schweiz Risikoanalysen mit Berücksichtigung der lokalen Exposition bei Hochdruckanlagen fehlen weitgehend	



	gesichert	teilweise gesichert	vermutet	nicht erfassbar/nicht erfasst	Bemerkungen
Treibhauseffekt – Schadenszenario Physische Schäden – Monetarisierung		Weltweite Erhöhung der Durchschnittstemperaturen; künftige Klimaveränderungen infolge der Treibhausgasemissionen Generell: Meeresspiegelanstieg, globale Wetteranomalien Vermeidungskostenansatz: Mittlerer Emissionszuschlag pro Tonne CO ₂ in der Periode von 1990–2025: 160–230 Fr./t CO ₂ ; d.h. für die Schweiz 1990: 5200–7400 Mio Fr./a	Ausmass der Klimaveränderungen, zeitlicher Verlauf und regionale Verteilung von Temperaturveränderungen, Niederschlägen und Unwettern. Schadenkosten bezogen auf 1t CO ₂ : 50–1330 Fr./t CO ₂ ; d.h. für die Schweiz 1990: 1670–43'600 Mio Fr./a; Vermeidungskostenansatz ist angemessener	Viele Auswirkungen der Klimaveränderungen und der ausgelösten sozialen Prozesse (Migration) sind noch nicht erfassbar oder auch nur abschätzbar Alle Schadenkostenschätzungen sind unvollständig	Alle Schadenkostenschätzungen sind unvollständig; Bewertungsprobleme; die Vermeidungskosten sind infolge des zu erwartenden technischen Fortschrittes eher zu hoch angesetzt
Kernenergie – Schadenszenario Physische Schäden – Monetarisierung	Gesundheitsschäden und Todesfälle im Normalbetrieb; Möglichkeit eines grossen Kernschmelzunfalles	Folgen radioaktiver Bestrahlung nur bei höheren Dosen gesichert Schäden in Billionenhöhe sind nicht auszuschliessen	Ablauf, Ausmass und räumliche Verteilung eines KKW-Unfalles Bewertung mit bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeiten ist schlecht abgesichert	Psychosoziale Schäden, gesellschaftliche und wirtschaftliche Destabilisierung bei einem Grossunfall	Monetäre Bewertung in Form von Erwartungswerten verdeckt das mögliche Ausmass von Katastrophenschäden
Wasserkraft – Schadenszenario Physische Schäden – Monetarisierung	Beeinträchtigung der Wasserhaushalte, Möglichkeit von Damm- und Wehrbrüchen	Landwirtschaftliche Produktionseinbussen. Gefährdung der Naturräume qualitativ beschreibbar Normalbetrieb aller Speicherkraftwerke: 102 bzw. 287 Mio Fr./a Grossunfälle: 0,14 Rp./kWh Normalbetrieb der Laufwasserkraftwerke: 28 bzw. 73 Mio Fr./a Grossunfälle: 0,07 Rp./kWh (Erwartungswerte)	In Einzelfällen sehr hohe Naturschäden möglich	Die konkrete Gefährdung kann nur in Einzelfällen abgeschätzt werden	Die Naturraumschäden können nur überschlägig bewertet werden; Zahlungsbereitschaftskonzepte müssten weiterentwickelt werden
Übertragung und Verteilung Strom – Schadenszenario Physische Schäden – Monetarisierung		Wirkung auf die Natur (Vogelwelt, naturnahe Wälder) 17–35 Mio Fr./a	Wirkung auf die menschliche Gesundheit (Magnetfelder)		Schadenabschätzung stark abhängig von der visuellen Beeinträchtigung der Landschaft





4 Die Ermittlung von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen und von Risikozuschlägen

Aus den bereichsweise ermittelten externen Kosten der Strom- und Wärmeversorgung (Kap. 3.3–3.12) werden sogenannte kalkulatorische Energiepreiszuschläge (KEPZ) abgeleitet (siehe Figur 4.1).

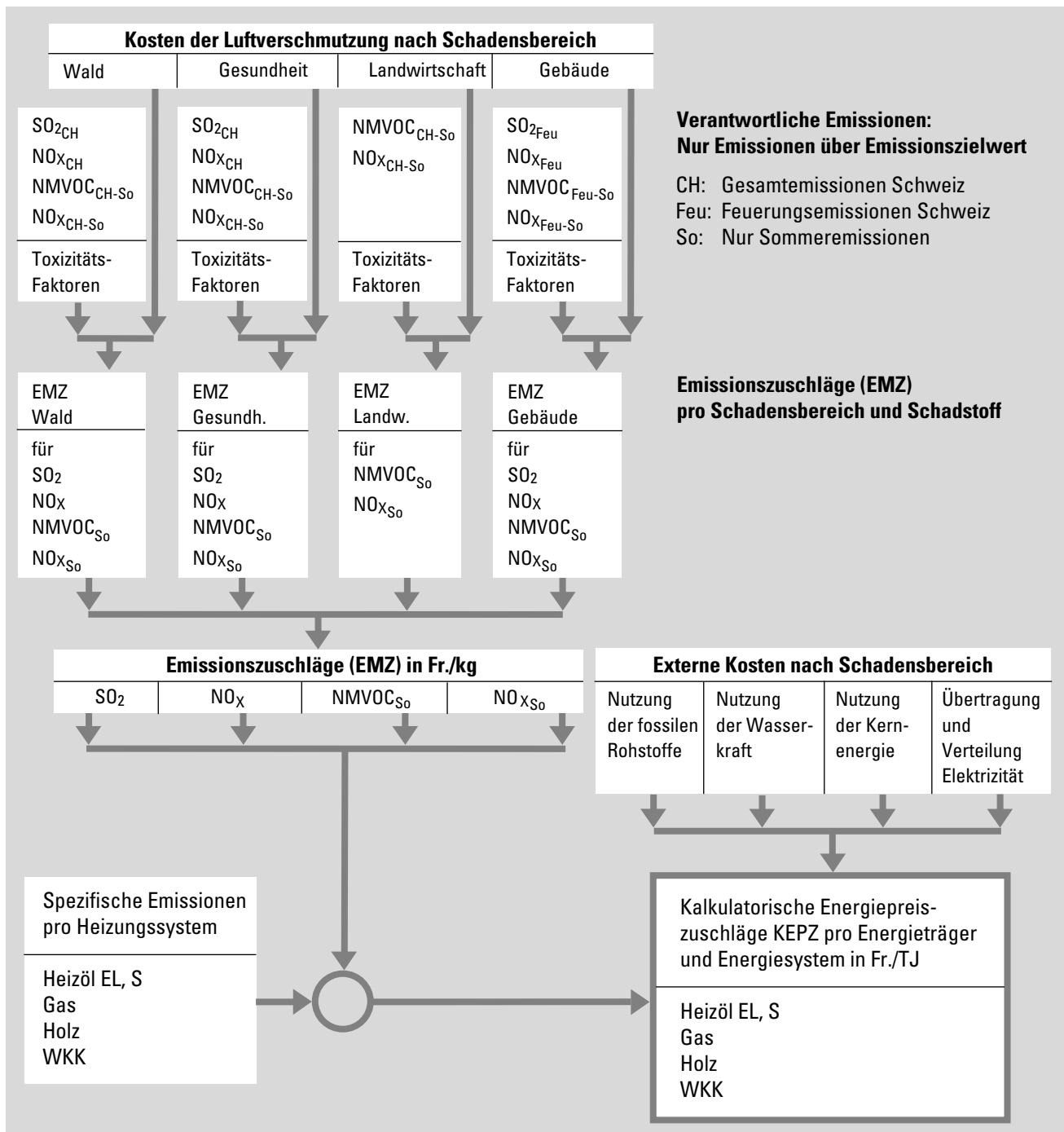
- Die Schäden der Luftverschmutzung werden in einem ersten Schritt den verantwortlichen Luftschadstoffemissionen angelastet. Das ergibt sogenannte **Emissionszuschläge** (in Franken pro kg Schadstoff). Mit Hilfe der spezifischen Emissionen eines Energiesystems (kg Schadstoff/TJ) kann für dieses System und den dort eingesetzten Energieträger ein KEPZ (Fr./GJ) ermittelt werden, der den spezifischen externen Kosten der Luftverschmutzung entspricht.
- Die externen Kosten der Nutzung der fossilen Rohstoffe, der Kernenergie, der Wasserkraft und der Übertragung und Verteilung von Elektrizität werden direkt in KEPZ pro Energieträger umgerechnet. Sie sind nur vom eingesetzten Energieträger und nicht vom Energiesystem und dessen Emissionen abhängig.
- Die KEPZ enthalten nur die externen Risikokosten von relativ häufig auftretenden «Normalunfällen». Sehr selten auftretende Ereignisse mit potential sehr grossen Schadenwirkungen müssen methodisch anders behandelt werden und werden separat ermittelt. Dabei wird eine Bandbreite angegeben, welche unter anderem auf unterschiedliche Annahmen über die Risikopräferenzen zurückgehen.



4.1 Zuordnung der externen Kosten der Luftverschmutzung auf die verursachenden Emissionen der Wärmeversorgung

Bei der Zurechnung der externen Kosten der Luftverschmutzung auf die sie verursachenden Emissionen bzw. auf den Energieverbrauch ergeben sich die folgenden Probleme:

- **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 Schadenskosten ist.
- **Räumliche und zeitliche Differenzierung** von KEPZ bzw. Emissionszuschlägen (EMZ).



Figur 4.1
 Ermittlung der kalkulatorischen
 Energiepreiszuschläge pro Energie-
 träger und Energiesystem aus den in
 den untersuchten Schadensbereichen
 bestimmten externen Kosten



4.1.1 Grenzsadenskosten als Grundlage für die Ableitung von Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen

Die Ableitung der EMZ/KEPZ aus den 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 Grenzsadenskosten – unabhängig vom Ausmass der Luftverschmutzung – konstant sind, können die KEPZ aufgrund einer **Durchschnittskostenbetrachtung** ermittelt werden (d.h. $\emptyset$ KEPZ = Externe Sadenskosten: Energieverbrauch).

Die praktische Umsetzung der Grenzkostenbetrachtung erfordert starke Vereinfachungen (vgl. dazu die Ausführungen in Ecoplan, 1992, S. 20 ff.). Die Zusammenhänge **Energieverbrauch → Emissionen → Immissionen** und **Immissionen → Schäden** müssten sonst räumlich, zeitlich und nach Schadstoff differenziert spezifiziert werden, was aufgrund der vorhandenen Kenntnisse nur sehr bedingt möglich ist.

Grenzkostenorientierte EMZ/KEPZ werden hier wie folgt abgeleitet:

- Wir nehmen an, dass die ermittelten Schäden nur durch diejenigen Emissionen verursacht werden, welche die Emissionsziele überschreiten.
- Vereinfachend gehen wir davon aus, dass beim Erreichen der Emissionsziele des Luftreinhaltekonzepts des Bundesrates (1986) die Immissionsgrenzwerte in der Regel eingehalten werden und dass die verbleibenden Immissionen keine Schäden verursachen.
- Die Sadenskosten werden nur denjenigen Emissionsmengen zugerechnet, welche Zielwertüberschreitungen erzeugen → die Emissionszuschläge in Franken pro kg Emission sind grösser als [Sadenskosten: Gesamtemissionen]. Die so ermittelten (grenzkostenorientierten) EMZ werden anschliessend der Berechnung der KEPZ pro Energiesystem zugrundegelegt.

	Emissionen 1990 [1000 t/a]	Emissions- ziel ¹⁾ [1000 t/a]	Schädigende Emissionen [1000 t/a]
SO ₂	62,6	54,4	8,2
NMVOC	297,0	146,9	150,1
Schwebstaub	20,5	41,6 ²⁾	—

Tabelle 4.1
Emissionszielwerte des Luftreinhaltekonzepts (bei NO_x und NMVOC 1960; bei SO₂ und Staub/Russ 1950) und die für die Schäden verantwortlichen Emissionsmengen für die relevanten Schadstoffe

¹⁾ Gemäss Luftreinhaltekonzept: bei NMVOC und NO_x Stand der Emissionen von 1960, bei SO₂ und Staub/Russ Stand 1950.

²⁾ Kein Ziel des Luftreinhaltekonzeptes.

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).



4 Zuordnung der externen Kosten

4.1.2 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. Aus einer vergleichenden Gegenüberstellung von Beurteilungswerten im internationalen Massstab ergeben sich die unten aufgeführten **Toxizitätsfaktoren**. 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 ₂	100	100	125
NO _x	125	125	125
NM VOC	100	100	100–200 ¹⁾
Staub	100	100	100

Tabelle 4.2
Toxizitäts- bzw. Schädlichkeitsfaktoren
von Luftschadstoffen bezogen auf
Kohlenmonoxid nach Schadensbereich
(Grupp, 1986, S. 361)

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

4.1.3 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 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, ist eine saisonale Differenzierung der EMZ bzw. KEPZ nicht sinnvoll. Davon ausgenommen sind die NO_x- und NMVOC-Emissionen im Sommer, welchen als Ozonbildnern die Schäden der sommerlichen Ozonimmissionen angerechnet werden.

Bei den Waldschäden und den landwirtschaftlichen Produktionsausfällen kann davon ausgegangen werden, dass der Emissionsort keine grosse 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 in ländlichen Gebieten verursachen kaum Gesundheits- oder Gebäudeschäden. Die Gesundheits- und Gebäudeschäden müssten demnach den Zielwert überschreitenden Emissionen in den Belastungsgebieten Stadt und Agglomeration angelastet werden. Das erfordert eine Differenzierung der EMZ und der KEPZ nach Stadt/Agglomerationen und ländlichen Gebieten. Unter Berücksichtigung der bestehenden Ungewissheiten wird das folgende vereinfachte Vorgehen gewählt:



■ In der Basisvariante werden die EMZ/KEPZ nicht lokal differenziert.

■ In einer Variante werden die KEPZ pro **Energiesystem für ländliche Gebiete** ohne Gesundheits- und Gebäudeschadenanteile ermittelt.

Eine differenziertere Betrachtung der Zuordnung der Kosten auf die verursachenden Emissionen würde eine Reihe weitergehender Fragen aufwerfen, zum Beispiel:

- Sind die Gesundheitsschäden pro kg Emission von Feuerungen bzw. vom Verkehr gleich gross?
- Treten die Emissionen, welche die Emissionsziele des Luftreinhaltekonzepts überschreiten, diffus auf oder primär in Belastungsgebieten? etc.

Aufgrund der verfügbaren Daten und Informationen erachten wir eine weitere Differenzierung der Zurechnung der Kosten der Luftverschmutzung als nicht sinnvoll. Angesichts der Streubreite der Kostenschätzung drängt sie sich sachlich nicht auf. Die gemachten Vereinfachungen sollten keine wesentlichen Verzerrungen zwischen den Energieträgern ergeben.

4.1.4 Emissionszuschläge (EMZ)

Die externen Kosten der Luftverschmutzung werden auf die Emissionsmengen, welche die Zielwerte des Luftreinhaltekonzepts überschreiten, umgelegt. Die toxizitätsgewichtete Umlegungsvariante beruht auf den Toxizitätsfaktoren von Tabelle 4.2. 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_x- und VOC-Emissionen verantwortlich sind. Wie stark die beiden Schadstoffe jedoch beteiligt sind, hängt von diversen Faktoren ab. Wir gehen hier stark vereinfachend davon aus, dass die sommerlichen Emissionen von Stickstoffoxiden (NO_x) und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen (NMVOC) gleich stark für die Schäden verursachenden zusätzlichen Ozonimmissionen verantwortlich sind.

Tabelle 4.3
Emissionen, welche die externen Kosten der Luftverschmutzung 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

Schadensbereich	Externe Kosten 1990 [Mio. Fr./a]	Schadenverursachende Emissionen [in t] 1990				Total
		SO ₂	NO _x	NMVOC Sommer	NO _x 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 ¹⁾	450 – 830	5'100	24'400	10'000	9'700	49'200
Toxizitätsgewichtet						
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 ¹⁾	450 – 830	4'350	26'000	8'520	10'330	49'200

¹⁾ nur Feuerungsemissionen

Aus den Angaben von Tabelle 4.4 ergeben sich die spezifischen Emissionszuschläge pro Schadstoff.



4 Zuordnung der externen Kosten

Die Toxizitätsgewichtung führt nur bei SO₂-Emissionen zu Veränderungen, die 10% übersteigen (ca. –12%). Diese Reduktion des Gewichtes der SO₂-Emissionen ist unseres Erachtens in der heutigen Situation (weiter abnehmender Anteil der SO₂-Emissionen, Unterschreitung des Emissionszieles in naher Zukunft) berechtigt. Wir verwenden daher nur die **toxizitätsgewichteten Emissionsmengen**.

	1)	Verursachende Emissionen 1990 [Fr./t]			
		SO ₂ 1990	NO _x 1990	NMVOC-Sommer ²⁾	NO _x -Sommer ²⁾
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 – 6'590	2'280 – 5'880
Gesundheit	1	1'620 – 7'900	1'620 – 7'900	1'620 – 7'900	1'620 – 7'900
	2	1'380 – 6'720	1'720 – 8'410	1'720 – 8'400	1'720 – 8'400
Landwirtschaft	1	--- ---	--- ---	595 – 1'280	595 – 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 (EMZ)	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
EMZ-Variante: Emissionszuschlag in ländlichen Gebieten	1	2'350 – 6'070	2'350 – 6'070	2'950 – 7'350	2'950 – 7'350
	2	2'280 – 5'890	2'280 – 5'880	3'180 – 7'930	2'840 – 7'080

Tabelle 4.4
Ermittlung der **Emissionszuschläge** (Fr./t) für die SO₂- und NO_x-Emissionen (Jahresemissionen) sowie für NMVOC- und NO_x-Emissionen im Sommer aus den Schadenskosten pro Schadensbereich. EMZ-Variante für Energiesysteme in ländlichen Gebieten ohne Anrechnung von Gesundheits- und Gebäudeschäden

Variante 1: gleichmässige Verteilung der Schadenskosten auf die schädigenden Emissionsmengen oberhalb der Emissionszielwerte

Variante 2: toxizitätsgewichtete Verteilung der Schadenskosten auf die Emissionen (Variante 2 wird anschliessend weiterverwendet)

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 NMVOC bzw. NO_x



4.2 Ausgewählte Energiesysteme – Emissionsfaktoren

Die Auswahl der Energiesysteme, für die hier KEPZ hergeleitet werden, richtet sich nach den folgenden Kriterien:

- Emissionsdaten verfügbar
- Relevanz, Häufigkeit des Auftretens des Systems bzw. Anteil am Energieverbrauch in der Schweiz
- Verschiedene Technologien pro Energieträger
- Unterschiedlicher Technologiestand: bestehende Anlagen (Technologiestand ca. 1987); neueste Anlagen (Technologiestand 1992–1994).

Die hier verwendeten **Emissionsfaktoren** gelten für bestehende Systeme (aufgrund der verfügbaren Messdaten wird der Stand 1987 verwendet, der Durchschnitt der bestehenden Anlagen [vor 1990] dürfte noch etwas schlechtere Emissionsfaktoren aufweisen) oder für moderne Systeme (Stand 1992–1994). Wir unterscheiden zwei Emissionsfaktoren:

■ **Emissionsfaktoren CH:** Berücksichtigen nur die Feuerungsemissionen in der Schweiz. Vorgelagerte Prozessstufen werden ausgeklammert.

■ **Emissionsfaktoren CH+:** Neben den Feuerungsemissionen 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.

Falls die Emissionsdaten verfügbar sind, kann mit den hier ausgewiesenen EMZ der KEPZ für beliebige System- und Technologievarianten berechnet werden.

Feuerungssystem (Datenquelle)	Emissionen CH in kg/TJ					Emissionen CH+ mit vorgelagerten Prozessstufen				
	SO ₂	NO _x	NMVOC	CH ₄	CO ₂	SO ₂	NO _x	NMVOC	CH ₄	CO ₂
Erdgas										
Gebälse, Anlage 87, ETH, <1MW	0.5	30	1	1	55'000	6.8	44	62	244	58'800
Atmosphärisch 87, ETH, <1MW	0.5	60	5	5	55'000	6.8	74	66	248	58'800
Gebälse, Neuanlage 90, ETH, <0,1MW	0.5	30	5	5	55'000	6.8	44	66	248	58'800
Atmosphärisch, 90, ETH, <0,1MW	0.5	50	5	5	55'000	6.8	64	66	248	58'800
Low NO _x , Neuanlage 90, ETH, <0,1MW	0.5	15	2	2	55'000	6.8	29	63	245	58'800
Industrie-Neuanlage 90, ETH, >0,1MW	0.5	40	5	5	55'000	6.4	54	62	109	58'800
Industrie-Low NO _x 90, ETH, >0,1MW	0.5	20	2	2	55'000	6.4	34	59	106	58'800
Gas-Dampfturbinen-Kraftw., Gemis 2.0	0.3	56	2.8	1.4	55'000	6.2	70	60	106	58'800
Erdöl										
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 _x , 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, 1MW ¹⁾	450	160	5	5	79'000	486	193	43	22	87'500
HS-Dampfturbinen-Kraftw., Gemis 2.0 ²⁾	88	86	7.2	0.1	79'000	124	119	46	17	87'500
Holz										
Holzschnitzel feucht 90, GEMIS, 0,01 MW	50	100	150	150	—	62	207	182	156	9'150
WKK										
Gas-WKK 90, 0,1-0,5 MW	0.6	25	0.5	—	55'000	6,9	39	62	243	58'800
AKW-Schweiz										
vorgelagerte Prozesse, GEMIS 2.0						13	25	7,2	8.4	5'820

Tabelle 4.5
Emissionsfaktoren [kg/TJ Input] für
verschiedene Systeme mit und ohne
vorgelagerte Prozessstufen 1990
(Quellen: ETHZ, GEMIS 2.0, INFRAS
Aug. 1991/1+2). Die vorgelagerten
Prozessstufen bei den Kernkraftwerken
berücksichtigen die Emissionen bei der
Uranförderung und Anreicherung, der
Brennelementfertigung und dem Trans-
port

¹⁾ ohne Rauchgasentschwefelung

²⁾ mit Rauchgasentschwefelung



4.3 Kalkulatorische Energiepreiszuschläge und Risikozuschläge

4.3.1 Kalkulatorische Energiepreiszuschläge

Aus den in Kapitel 3 erwähnten Gründen weisen die in den verschiedenen Schadensbereichen ermittelten externen Kosten unterschiedliche Qualität auf: Es ist beispielsweise unklar, ob die künftige Waldschadenentwicklung den hier angenommenen Verlauf nehmen wird, ob der Einfluss der Luftverschmutzung auf die Waldschäden richtig eingeschätzt wird, ob die Übernahme luftschadstoffbedingter Gesundheitsschäden aus der BRD durch die schweizerische Forschung bestätigt wird, etc.

Unabhängig von diesen Unsicherheiten ist zunächst auf einen ganz wesentlichen Unterschied in der Gruppierung der externen Kosten hinzuweisen: Ein grosser Teil der in Kapitel 3 betrachteten Externalitäten gehört zum sogenannten «Normalbetrieb» der Energiewirtschaft. Sie treten stetig, regelmässig und/oder relativ häufig auf. Diese Externalitäten sind in den Tabellen 4.6 bis 4.8 dokumentiert. Wie mehrfach betont, passen die Grossrisiken bei der Kernenergienutzung und zum Teil auch bei der Wasserkraftnutzung nicht in diesen Analyseraster und können auch nicht unmittelbar in der Form von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen internalisiert werden. Die entsprechenden Bewertungsparameter nehmen hier eher die Form von **Risikozuschlägen** an. Sie sind gesondert in Tabelle 4.9 in Abschnitt 4.3.2 aufgeführt.

Bei den Externalitäten des «Normalbetriebs» dominieren die externen Kosten des Treibhauseffektes die gesamthaft ermittelten externen Kosten. Die Probleme bei ihrer Abschätzung sind gross und die Resultate entsprechend unscharf. Werden die Kosten mit Hilfe des Vermeidungskostenansatzes abgeschätzt, ergibt sich ein methodischer Bruch zu den Schadenskostenschätzungen bei den übrigen externen Effekten. Das muss bei der Addition der einzelnen Kosten zu einem aggregierten KEPZ berücksichtigt werden. Neben den unterschiedlichen methodischen und datenmässigen Problemen bei der Abschätzung der externen Kosten in den verschiedenen Bereichen, weisen die betrachteten Schadenbereiche unterschiedliche sachliche und zeitliche Reichweiten auf:

- Der anthropogen verursachte Treibhauseffekt hat globalen Charakter. Die resultierenden Schäden werden erst in Zukunft bedeutend werden.
- Die betrachteten Risiken und Schäden von Luftverschmutzungen, Ölverschmutzungen, Kernenergie- und Wasserkraftnutzung und aus der Elektrizitätsverteilung entstehen primär in der Schweiz und sind heute voll wirksam.

Um dem unterschiedlichen Charakter dieser Externalitäten Rechnung zu tragen, werden zwei Hauptgruppen von aggregierten kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen gebildet:

■ KEPZ mit Treibhauseffekt

enthalten die folgenden externen Kosten: Luftverschmutzung (inkl. vorge-lagerte Prozesse), Treibhauseffekt (Vermeidungskosten bzw. Variante mit Schadenskosten), Ölverschmutzungen, Kernenergie- und Wasserkraftnutzung in der Schweiz, Elektrizitätsverteilung.

■ KEPZ ohne Treibhauseffekt

wie oben, aber ohne Treibhauseffekt.



4 Kalkulatorische Energiepreiszuschläge und Risikozuschläge

Die aggregierten KEPZ bei den fossilen Energieträgern und beim Holz ergeben sich aus der Addition der Teil-KEPZ aus den verschiedenen Schadensbereichen (Luft-, Ölverschmutzungen, Treibhauseffekt mittels Schadenskosten). Werden die Vermeidungskosten des Treibhauseffektes abgeschätzt, können die Schadenkosten der Luftverschmutzung und die Vermeidungskosten des Treibhauseffektes nicht direkt addiert werden: Bei der Ermittlung der Vermeidungskosten des Treibhauseffektes wird angenommen, dass der Energieverbrauch der Feuerungen – und damit auch die Luftverschmutzung – zurückgeht, um 2025 etwa 46% unter dem Verbrauch gemäss Referenzentwicklung liegt und gegenüber 1990 um etwa 45% abnimmt. Dadurch vermindern sich die luftschadstoffbedingten Schäden bis 2025 auf etwa 10–20% der 1990 ausgewiesenen Schäden. Die mittleren Jahreskosten der Luftverschmutzung sinken deswegen in der Periode von 1990–2025 durchschnittlich um etwa 47%. Deshalb werden nur **53% der externen Kosten der Luftverschmutzung zu den externen Kosten des Treibhauseffektes gemäss Vermeidungskostenansatz addiert**.

Die aggregierten KEPZ werden zusätzlich in einer Variante für Energiesysteme in ländlichen Gebieten **ohne Anrechnung der Gesundheits- und Gebäudeschäden** ausgewiesen.

Aus den einzelnen KEPZ bei der Elektrizität wird ein $KEPZ_{el, 1990}$ für die Produktionsverhältnisse in der Schweiz in den Jahren 1990–1992 gebildet (Stromproduktionsmodell CH 90–92), wobei die Stromproduktion aus Abfall (in KVA's) vernachlässigt wird.

Produktionsanteile:	Speicherkraftwerke	32,7%	Laufkraftwerke	25,5%
	Kernkraft	39,6%	Erdgas-KW ($\eta=0,41$)	1,1%
	Heizöl schwer (HS, $\eta=0,4$)	1,1%		

$$KEPZ_{el, 1990} = 0,327 KEPZ_{Speicher} + 0,255 KEPZ_{Lauf} + 0,396 KEPZ_{KKW} + 0,011 KEPZ_{Gas} + 0,011 KEPZ_{HS}$$

Die Emissionsfaktoren bei der fossilen Stromproduktion (aus HS und Gas) stammen aus GEMIS 2.0 (1992).

Die folgenden Tabellen geben im **Gesamtergebnis** ein eindrucksvolles Bild von der ökonomischen Relevanz der energiebedingten Externalitäten. Es zeigt sich, dass diese Externalitäten keineswegs nur marginale Bestandteile der volkswirtschaftlichen Gesamtkosten der Energieversorgung darstellen. Gleichzeitig ist aber unverkennbar, dass bei der Monetarisierung erhebliche **Unsicherheiten** bestehen, mit der Folge, dass die Schätzungen teilweise extreme **Bandbreiten** annehmen. Hervorgerufen werden diese Bandbreiten vor allem durch die analytischen Unwägbarkeiten bei der Erfassung der möglichen **Schäden durch den Treibhauseffekt**: Einerseits sind die möglichen Kosten einer Klimakatastrophe neben dem **Risiko** eines grossen Kernkraftwerkunfalls die absolut dominierende Grösse bei den gesamthaft ermittelten Externalitäten. Gleichzeitig bestehen aber bei der quantitativen und monetären Untermauerung der möglichen globalen Schadensszenarien besondere Schwierigkeiten. Zusätzlich wird in diesem Schadensfeld bei der Kostenschätzung mit dem sogenannten **Vermeidungskostenkonzept** methodisch ein völlig anderer Ansatz als in den sonstigen Schadensbereichen gewählt (dort stehen die Schadenskosten selbst im Vordergrund). Auf diesen Sachverhalt wird in den Abschnitten 3.2, 3.9 und 4.3 ausführlich eingegangen. Die folgenden Tabellen stellen für verschiedene Energiesysteme bzw. Energieträger die resultierenden KEPZ den heutigen Energie-



preisen gegenüber. **Um den unterschiedlichen Monetarisierungsansätzen Rechnung zu tragen, werden drei KEPZ-Varianten ausgewiesen:**

- **KEPZ, bei denen die Kosten des Treibhauseffektes aufgrund von Schadenskostenschätzungen** ermittelt werden (erste KEPZ-Kolonne). Die KEPZ berücksichtigen die Luftschadstoffemissionen in der Schweiz und zusätzlich die Emissionen **aus vorgelagerten Prozessstufen** im Ausland zur Bereitstellung der Energieträger (Brennstoffförderung, Umwandlung und Transport, sog. Precombustion). Die Schäden aufgrund der Emissionen aus vorgelagerten Prozessstufen im Ausland werden mit den für die Schweiz ermittelten Kostensätzen (Emissionszuschlägen) bewertet. Für die Abschätzung der Schadenskosten des Treibhauseffektes werden nur Arbeiten verwendet, welche in etwa die gleiche Reichweite aufweisen; partielle oder nur regionale Kostenschätzungen sind nicht direkt mit den umfassenderen Arbeiten vergleichbar und sind daher in den hier ausgewiesenen KEPZ- bzw. Kostenbandbreiten nicht enthalten.
- **KEPZ, bei denen die Kosten des Treibhauseffektes aufgrund der Schätzung der Vermeidungskosten** zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Jahr 2025 um 50% (IPCC-Zielsetzung) ermittelt werden (zweite KEPZ-Kolonne). Wie bereits erwähnt, werden nur 53% der externen Kosten der Luftverschmutzung zu den externen Kosten der CO₂-Emissionen addiert, da das unterstellte CO₂-Reduktionsszenario auch zu einem starken Rückgang der Luftschadstoffbelastung führen würde. Auch hier werden die vorgelagerten Prozessstufen (Precombustion) mitberücksichtigt.
- **KEPZ ohne externe Kosten des Treibhauseffektes** (dritte KEPZ-Kolonne). Jüngste Meldungen von Klimaforschern deuten darauf hin, dass die künftigen Klimaveränderungen infolge des Treibhauseffektes weniger gross sein könnten als bisher (IPCC, Rio 1992) angenommen. Sowohl die Treibhausproblematik als auch die bezüglich der Lösungsstrategien damit verwandte Frage der intertemporal gerechten Verteilung erschöpflicher Ressourcen sprengen den Rahmen der übrigen hier betrachteten Externalitäten (mit Ausnahme der Endlagerung radioaktiver Abfälle und eines KKW-Grossunfalles): Diese externen Effekte bauen sich langsam über einen langen Zeitraum auf, die physischen Folgen treten erst mit grosser zeitlicher Verzögerung auf. Sie werden daher auch zeitliche oder Stockexternalitäten genannt. Die externen Kosten des Treibhauseffektes dominieren aber die ausgewiesenen KEPZ. Zur Illustration wird eine KEPZ-Variante ohne die externen Kosten von Treibhauseffekt und intertemporal gerechter Ressourcennutzung angegeben. Diese KEPZ enthalten nur die (Fluss)-Externalitäten der Luftschadstoffbelastung (inkl. vorgelagerte Prozessstufen), der Ölfälle und der Elektrizitätserzeugung.

Tabelle 4–6 und 4–7 weisen die drei KEPZ-Varianten in Rp./kWh, (Tabelle 4–6) bzw. in den jeweiligen Originaleinheiten (Tabelle 4–7) pro Energiesystem sowie für die Stromproduktion und -verteilung aus. Die KEPZ sind schweizerische Durchschnittswerte, welche die unterschiedliche regionale Luftverschmutzung nicht berücksichtigen.

Tabelle 4–8 enthält als Variante KEPZ, welche bei einer regionalen Differenzierung in ländlichen Gebieten verwendet werden könnten (ohne immissionsbedingte, externe Gesundheits- und Gebäudeschäden).

Energiesystem/ Energieträger	Aktuelle Endenergie- preise 1992	Kalkulatorische Energiepreiszuschläge Schweiz 1990		
		Schadenskosten (inkl. Treibhaus- effekt) inkl. vor- gelagerte Prozesse	Schadenskosten, Vermeidungskosten Treibhauseffekt inkl. vorgelagerte Prozesse	Schadenskosten, ohne externe Kosten Treibhauseffekt, inkl. vorgelagerte Prozesse
Erdgas	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Gebäude, Anlage 87 <1MW	5	1.4 – 27	3.4 – 5.1	0.4 – 0.8
Atmosphärisch 1987 <1MW	5	1.5 – 27	3.5 – 5.3	0.5 – 1.3
Gebäude, 1990 <0,1MW	5	1.4 – 27	3.4 – 5.1	0.4 – 0.8
Atmosphärisch 90 <0,1MW	5	1.5 – 27	3.5 – 5.3	0.5 – 1.1
Low NO _x 1990 <0,1MW	5	1.3 – 27	3.4 – 5.0	0.3 – 0.6
Industrie-Anlage 90 >0,1MW	5	1.4 – 27	3.5 – 5.2	0.4 – 1.0
Erdöl	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Bestehende Anlage 1987	3.5	2.5 – 39	4.9 – 7.8	1.2 – 2.7
Low NO _x , Neuanlage 1990	3.5	2.4 – 38	4.9 – 7.6	1.0 – 2.4
Brennwertkessel 1990	3.5	2.4 – 38	4.9 – 7.6	1.0 – 2.4
Industrie HEL-CH 1990	3.5	2.4 – 38	4.9 – 7.6	1.0 – 2.3
Industrie HS 1990	1.7	4.6 – 44	6.0 – 10.3	3.2 – 7.6
Holz	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Holzschnitzel feucht 1990	4.0	1.7 – 3.9	0.9 – 2.1 (*)	1.7 – 3.9
WKK	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Gas-WKK 1990	5	1.3 – 27	3.4 – 5.1	0.3 – 0.8
Elektrizität	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Laufkraftwerke				
Normalbetrieb		0.20 – 0.51	0.20 – 0.51	0.20 – 0.51
Speicherkraftwerke				
Normalbetrieb		0.50 – 1.4	0.50 – 1.4	0.50 – 1.4
Dampfturbinen-KW Heizöl S		6.7 – 98	12.5 – 19.8	3.2 – 7.5
Gas-Dampfturbinen-KW		3.7 – 68	8.5 – 12.7	1.2 – 2.9
Kernkraftwerke				
Normalbetrieb		0.33 – 3.3	0.6 – 1.4	0.2 – 0.5
Transport/Verteilung		0.02 – 0.05	0.02 – 0.05	0.02 – 0.05
Elektrizität Mix CH 90–91 ohne ext. Risikokosten	14.5	0.5 – 3.8	0.7 – 1.6	0.4 – 1.0

Tabelle 4.6
Kalkulatorische Energiepreiszuschläge
(KEPZ) im Vergleich mit aktuellen Ener-
giepreisen; **Angaben in Rp./kWh**,
Durchschnittswerte für die Schweiz.

* Die Schadenkosten der Luftverschmutzung werden um 47% reduziert (CO₂-Vermeidungsstrategie)
Drei Varianten von KEPZ, ohne Zuschläge zur Anlastung der externen Risikokosten von Unfällen bei der Elektrizitätser-
zeugung: – KEPZ aufgrund von **Schadenskosten des Treibhauseffektes** und inkl. vorgelagerte Prozesse bei der
Bereitstellung der Energieträger
– KEPZ aufgrund von **Vermeidungskosten des Treibhauseffektes**, inkl. vorgelagerte Prozesse; die Schadens-
kosten infolge der Luftverschmutzung werden vor der Addition um 47% reduziert, um der Verbrauchsreduktion der
CO₂-Vermeidungsstrategie Rechnung zu tragen
– KEPZ ohne externe Kosten des Treibhauseffektes, inkl. vorgelagerte Prozesse der Energiebereitstellung



Energiesystem/ Energieträger	Aktuelle Endenergie- preise 1992	Kalkulatorische Energiepreiszuschläge Schweiz 1990		
		Schadenskosten (inkl. Treibhaus- effekt) inkl. vor- gelagerte Prozesse	Schadenskosten, Vermeidungskosten Treibhauseffekt inkl. vorgelagerte Prozesse	Schadenskosten ohne externe Kosten Treibhauseffekt inkl. vorgelagerte Prozesse
Erdgas	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Gebäude, Anlage 87 <1MW	5	1.4 – 27	3.4 – 5.1	0.4 – 0.8
Atmosphärisch 1987 <1MW	5	1.5 – 27	3.5 – 5.3	0.5 – 1.3
Gebäude, 1990 <0,1MW	5	1.4 – 27	3.4 – 5.1	0.4 – 0.8
Atmosphärisch 90 <0,1MW	5	1.5 – 27	3.5 – 5.3	0.5 – 1.1
Low NO _x 1990 <0,1MW	5	1.3 – 27	3.4 – 5.0	0.3 – 0.6
Industrie-Anlage 90 >0,1MW	5	1.4 – 27	3.5 – 5.2	0.4 – 1.0
Erdöl	[Fr./100 kg]	[Fr./100 kg]	[Fr./100 kg]	[Fr./100 kg]
Bestehende Anlage 1987	40	30 – 451	57 – 90	13 – 32
Low NO _x , Neuanlage 1990	40	28 – 447	56 – 88	12 – 28
Brennwertkessel 1990	40	28 – 447	56 – 88	12 – 28
Industrie HEL-CH 1990	40	28 – 447	56 – 88	12 – 27
Industrie HS 1990	20	53 – 506	70 – 120	37 – 88
Holz	[Fr./Sm ³]	[Fr./Sm ³]	[Fr./Sm ³]	[Fr./Sm ³]
Holzschnitzel feucht 1990	35	15 – 34	8 – 18 (*)	15 – 34
WKK	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Gas-WKK 1990	5	1.3 – 27.0	3.4 – 5.1	0.3 – 0.8
Elektrizität	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Laufkraftwerke				
Normalbetrieb		0.20 – 0.51	0.20 – 0.51	0.20 – 0.51
Speicherkraftwerke				
Normalbetrieb		0.50 – 1.4	0.50 – 1.4	0.50 – 1.4
Dampfturbinen-KW Heizöl S		6.7 – 98	12.5 – 19.8	3.2 – 7.5
Gas-Dampfturbinen-KW		3.7 – 68	8.5 – 12.7	1.2 – 2.9
Kernkraftwerke				
Normalbetrieb		0.33 – 3.3	0.6 – 1.4	0.2 – 0.5
Transport/Verteilung		0.02 – 0.05	0.02 – 0.05	0.02 – 0.05
Elektrizität Mix CH90–91 ohne ext. Risikokosten	14.5	0.5 – 3.8	0.7 – 1.6	0.4 – 1.0

* Die Schadenkosten der Luftverschmutzung werden um 47% reduziert (CO₂-Vermeidungsstrategie)
Drei Varianten von KEPZ, ohne Zuschläge zur Anlastung der externen Risikokosten von Unfällen bei der Elektrizitätserzeugung: – KEPZ aufgrund von **Schadenskosten des Treibhauseffektes** und inkl. vorgelagerte Prozesse bei der Bereitstellung der Energieträger
– KEPZ aufgrund von **Vermeidungskosten des Treibhauseffektes**, inkl. vorgelagerte Prozesse; die Schadenskosten infolge der Luftverschmutzung werden vor der Addition um 47% reduziert, um der Verbrauchsreduktion der CO₂-Vermeidungsstrategie Rechnung zu tragen
– KEPZ ohne externe Kosten des Treibhauseffektes, inkl. vorgelagerte Prozesse der Energiebereitstellung

Tabelle 4.7
Kalkulatorische Energiepreiszuschläge (KEPZ) im Vergleich mit aktuellen Energiepreisen; **Angaben in den jeweiligen Origineleinheiten**, Durchschnittswerte für die Schweiz.



4 Kalkulatorische Energiepreiszuschläge und Risikozuschläge

Energiesystem/ Energieträger	Aktuelle Endenergie- preise 1992	KEPZ für ländliche Gebiete 1990		
		Schadenskosten (inkl. Treibhaus- effekt) inkl. vor- gelagerte Prozesse	Schadenskosten, Vermeidungskosten Treibhauseffekt inkl. vorgelagerte Prozesse	Schadenskosten, ohne externe Kosten Treibhauseffekt inkl. vorgelagerte Prozesse
Erdgas	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Gebäude, Anlage 87 < 1MW	5	1.1 – 26	3.2 – 4.7	0.1 – 0.2
Atmosphärisch 1987 < 1MW	5	1.1 – 26	3.3 – 4.7	0.1 – 0.2
Gebäude, 1990 < 0,1MW	5	1.1 – 26	3.2 – 4.7	0.1 – 0.2
Atmosphärisch 90 < 0,1MW	5	1.1 – 26	3.2 – 4.7	0.1 – 0.2
Low NO _x 1990 < 0,1MW	5	1.1 – 26	3.2 – 4.7	0.1 – 0.1
Industrie-Anlage 90 > 0,1MW	5	1.1 – 26	3.2 – 4.7	0.1 – 0.1
Erdöl	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Bestehende Anlage 1987	3.5	1.6 – 37	4.3 – 6.6	0.2 – 0.6
Low NO _x , Neuanlage 1990	3.5	1.5 – 36	4.3 – 6.6	0.2 – 0.5
Brennwertkessel 1990	3.5	1.5 – 36	4.3 – 6.6	0.2 – 0.5
Industrie HEL-CH 1990	3.5	1.5 – 36	4.3 – 6.6	0.2 – 0.5
Industrie HS 1990	1.7	2.0 – 37	4.7 – 7.2	0.6 – 1.6
Holz	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Holzschnitzel feucht 1990	4.0	0.3 – 0.8	0.1 – 0,4 (*)	0.3 – 0.8
WKK	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Gas-WKK 1990	5	1.1 – 26.0	3.2 – 4.7	0.1 – 0.2
Elektrizität	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
Laufkraftwerke				
Normalbetrieb		0.20 – 0.51	0.20 – 0.51	0.20 – 0.51
Speicherkraftwerke				
Normalbetrieb		0.50 – 1.4	0.50 – 1.4	0.50 – 1.4
Dampfturbinen–KW Heizöl S		4.0 – 92	11.1 – 16.6	0.6 – 1.6
Gas–Dampfturbinen–KW		2.7 – 66	7.9 – 11.5	0.2 – 0.6
Kernkraftwerke				
Normalbetrieb		0.33 – 3.3	0.6 – 1.4	0.2 – 0.5
Transport/Verteilung		0.02 – 0.05	0.02 – 0.05	0.02 – 0.05
Elektrizität Mix CH90–91 ohne ext. Risikokosten	14.5	0.5 – 3.8	0.7 – 1.6	0.4 – 1.0

Tabelle 4.8
Kalkulatorische Energiepreiszuschläge
(KEPZ) für ländliche Gebiete im
Vergleich mit aktuellen Energiepreisen
(ohne Gesundheits- und Gebäude-
schäden).

* Die Schadenkosten der Luftverschmutzung werden um 47% reduziert (CO₂-Vermeidungsstrategie)
Drei Varianten von KEPZ, ohne Zuschläge zur Anlastung der externen Risikokosten von Unfällen bei der Elektrizitätserzeugung: – KEPZ aufgrund von **Schadenskosten des Treibhauseffektes** inkl. vorgelagerte Prozesse bei der Bereitstellung der Energieträger
– KEPZ aufgrund von **Vermeidungskosten des Treibhauseffektes**, inkl. vorgelagerte Prozesse; die Schadenkosten infolge der Luftverschmutzung werden vor der Addition um 47% reduziert, um der Verbrauchsreduktion der CO₂-Vermeidungsstrategie Rechnung zu tragen
– KEPZ **ohne externe Kosten des Treibhauseffektes**, inkl. vorgelagerte Prozesse der Energiebereitstellung



4.3.2 Risikozuschläge zur Berücksichtigung der Unfallrisiken in der Elektrizitätsversorgung

Während in den Tabellen 4.6 bis 4.8 die hier monetarisierten externen Kosten der Energieversorgung ausgewiesen werden, die kontinuierlich oder zumindest mit einer gewissen Regelmässigkeit anfallen, zeigt Tabelle 4.9 eine ganz andere Art von externen Kosten. In dieser Tabelle wird versucht, Ereignisabläufe zu bewerten, deren **Folgen** zwar relativ gut beschrieben und quantifiziert werden können, deren tatsächlicher **Eintritt** aber nur in Form von **Wahrscheinlichkeitsaussagen** näher zu bestimmen ist. Hier spielen vor allem die Schadenspotentiale grosser Unfälle bei der Kernenergie- und (abgeschwächt) bei der Wasserkraftnutzung eine Rolle.

Wegen des grundsätzlich anderen Charakters dieser Kostenbewertung wird in diesem Zusammenhang auch nicht von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen, sondern von Risikozuschlägen gesprochen. Aus dem gleichen Grund ist eine simple Aufaddierung mit den in Tab. 4.6 bis 4.8 genannten Werten nicht möglich.

Wie in Kapitel 3.9 gezeigt wurde, gibt es im Zusammenhang mit der Risikoanalyse erhebliche Schwierigkeiten, für die monetäre Bewertung der Externalitäten ein geeignetes «Kostenmass» zu finden. In vielen Fällen wird hier versucht, der Besonderheit der betrachteten Schadensfälle (der Möglichkeit von Unfällen mit extremen Schadensfolgen bei gleichzeitig sehr niedriger Eintrittswahrscheinlichkeit solcher Unfälle) dadurch Rechnung zu tragen, dass durch die Multiplikation von Schadensausmass und Eintrittswahrscheinlichkeit sogenannte **Erwartungswerte** gebildet werden. Erwartungswerte «verteilen», bildlich gesprochen, das Ausmass des Schadens auf einen sehr langen Zeitraum (z.B. 1 Million Betriebsjahre), in dem der Schaden mit einiger Sicherheit eintreten wird.

Obwohl die in der Tabelle ausgewiesenen Erwartungswerte oft als «objektives» Mass für eine Schadensbewertung angesehen werden, kommt natürlich bei einer solchen mathematischen Operation das wahre Ausmass der möglichen Schäden nicht mehr hinreichend zum Ausdruck. Wie im Kapitel 3.9 erläutert, muss hier neben dem **Erwartungswert** auch die **mögliche Streuung der Schadenshöhe** ins Kalkül gezogen werden. Ein gängiges statistisches Mass für dieses «Risiko» ist die sogenannte Standardabweichung der Wahrscheinlichkeitsverteilung von bestimmten Schadensabläufen. Wiederum bildlich gesprochen, handelt es sich hier um ein Mass, das in der Lage ist, die «mittlere» Streubreite der möglichen Schäden um den Erwartungswert zu veranschaulichen.

Für eine Bewertung bei **ausgeprägtem Risikobewusstsein** werden daher in der Tabelle Risikozuschläge ausgewiesen, die auf der Standardabweichung bzw. auf der Streuung der Schadenshöhe beruhen. Daneben gibt die Tabelle Auskunft über die (natürlich deutlich niedrigeren) Risikozuschläge bei **Risikoneutralität**, d.h. für eine Bewertung, die dem Risiko keine oder nur eine untergeordnete Bedeutung zumisst und welche lediglich den durchschnittlichen erwarteten Schaden pro Jahr beachtet. Die Berechnungen bedienen sich hier mit dem sogenannten Erwartungswert-Standardabweichungs-Prinzip eines vor allem in der Portfolio- und Investitionstheorie weit verbreiteten Entscheidungskalküls. Auch an dieser Stelle soll nochmals mit Nachdruck betont werden, dass mit den ausgewiesenen Wertepaaren **mögliche** Eckpunkte der Risikopräferenz in der schweizerischen Bevölkerung abgegriffen werden. Welches Gewicht jeweils dem einen oder anderen Parameter zukommt, muss Gegenstand einer – deutlich intensivierten – empirischen Forschung sein.



4 Kalkulatorische Energiepreiszuschläge und Risikozuschläge

		Elektrizitätserzeugung: Unfallrisiken		
		Kernkraftwerke	Speicherwasser-Kraftwerke	Laufwasser-Kraftwerke
Mögliches Schadenausmass	Mrd. Fr./a	0 – 3'500	0 – 26 (?)	?
Erwartungswert (bezogen auf alle Kraftwerke des jeweiligen Typs)	Mio. Fr./a	0.25 – 34.1	25,7	11,2
Standardabweichung (bezogen auf alle Kraftwerke des jeweiligen Typs)	Mio. Fr./a	430 – 6'850	813 (?)	?
Auf die jeweilige Stromproduktion umgelegter Erwartungswert	Rp./kWh	0.001 – 0.17	0.14	0.07
Auf die jeweilige Stromproduktion umgelegte Standardabweichung	Rp./kWh	1.9 – 31.6	4.2 (?)	?
Elektrizitätsmix CH 90-02				
Durchschnittliche Risikozuschläge bei:				
Risikoneutralität (Erwartungswert)	Rp./kWh	0.07 – 0.13		
Risikobewusstsein (Standardabweichung)	Rp./kWh	2.2 – 14.2		

Tabelle 4.9
Unfallrisiken bei der Elektrizitätserzeugung; Schadenausmass, Erwartungswert der Unfallschäden, Standardabweichung und Risikozuschläge für risikoneutrale bzw. für risikobewusste Personen

4.3.3 Zusammenfassende Schlussbemerkungen

Werden die externen Kosten des Treibhauseffektes mit Hilfe des Vermeidungskostenansatzes geschätzt, führen die KEPZ bei den fossilen Energieträgern ungefähr zu einer Verdoppelung (Gas) bis Versechsfachung (Heizöl schwer, HS; HS ist zurzeit allerdings fast um die Hälfte billiger als HEL!) der aktuellen Energiepreise. Die Preise für Elektrizität steigen relativ wenig (5–11 % beim Mix CH 90–92).

Werden statt der Vermeidungskosten die Schadenskostenschätzungen des Treibhauseffektes verwendet, vergrössert sich die Bandbreite der gesamten externen Kosten sowohl nach oben als auch nach unten (infolge der erwähnten Heterogenität der verfügbaren Kostenschätzungen und der prinzipiellen methodischen und datenmässigen Probleme bei der Abschätzung der externen Kosten des Treibhauseffektes).

Ohne die externen Kosten des Treibhauseffektes sinken die resultierenden, monetarisierbaren externen Kosten der Strom- und Wärmeversorgung massiv: Die resultierenden KEPZ liegen dann bei den fossilen Brennstoffen im Bereich von 10–20 % (Gas) bzw. 30–70 % (Heizöl EL) der heutigen Endenergiepreise. Nur Heizöl schwer (und natürlich die hier nicht mehr ausgewiesene Kohle) wird weiterhin massiv belastet (KEPZ = 85–440 % der heutigen Heizöl Schwer-Preise bzw. 43–220 % der heutigen HEL-Preise), primär wegen der hohen Schwefelemissionen. Bei Anlagen mit Rauchgasentschwefelung ergäben sich demzufolge wieder geringere KEPZ.



Die hier ausgewiesenen KEPZ sind statisch ermittelte Schattenpreise, welche den hier monetarisierten externen Kosten der Strom- und Wärmeversorgung im Jahr 1990 in etwa entsprechen würden. Sobald jedoch solche KEPZ effektiv angewendet und damit diese externen Kosten integriert würden, ergäben sich auf den Energiemärkten Anpassungsprozesse bei den Produzenten und bei den Konsumenten. Diese Anpassungsprozesse würden zu veränderten Energiepreisverhältnissen führen, welche den KEPZ Rechnung tragen. Die Nachfragereaktionen dürften zudem zu einer deutlichen Abnahme der Umweltbelastungen und damit der externen Kosten führen, welche dann eine Neubestimmung dieser externen Kosten und der dann noch verbleibenden KEPZ erfordern würde. Eine Internalisierung über KEPZ ist deshalb als dynamischer Prozess zu verstehen, der in die Nähe einer, aus volkswirtschaftlicher Sicht, optimalen Umweltbelastung führen sollte (theoretisch entsprächen im Optimum die Energiepreise inklusive kalkulatorische Energiepreiszuschläge gerade den vollen volkswirtschaftlichen Kosten einer zusätzlich konsumierten Energieeinheit [inkl. Kosten für Umweltbelastungen und -risiken]). Die hier erarbeiteten Grundlagen stellen aber in einem solchen Prozess nur einen ersten Schritt dar, welcher quantitative Hinweise dafür liefert, dass der aktuelle Zustand deutlich von einem solchen Optimum entfernt ist. Die hier ermittelten kalkulatorischen Energiepreiszuschläge sind somit eindeutig nicht die Energiepreiszuschläge, welche den volkswirtschaftlich optimalen KEPZ entsprechen würden. Wie bereits erwähnt, ergeben sich schon bei der Identifizierung, Quantifizierung und Monetarisierung der heutigen externen Kosten grosse Probleme. Die hier ausgewiesenen KEPZ weisen einzig die Richtung, in die heute die Internalisierung gehen müsste, geben Grössenordnungen für die heutigen externen Kosten vor und liefern Hinweise auf nicht erfasste oder nicht erfassbare Externalitäten, auf methodische Probleme und auf Daten-, Informations- und Forschungslücken. Die ausgewiesenen externen Schadenskosten sind infolge der vielen Erfassungslücken als **Minimal-schätzungen** zu verstehen – für den oberen Bereich der Bandbreite der Schadenskosten des Treibhauseffektes müsste diese Aussage allenfalls relativiert werden.

Die hier abgeleiteten KEPZ führen je nach Energieträger zu stark unterschiedlichen Belastungen: Die Konkurrenzfähigkeit von Erdgas gegenüber Erdöl wird generell verbessert, Heizöl schwer und Kohle werden massiv belastet, falls die entsprechenden Systeme keine Reinigungstechnologie aufweisen. Bei Holz ist die Situation unterschiedlich: Werden nur die externen Kosten der Luftverschmutzung und der Ölverschmutzungen mittels KEPZ internalisiert, verschlechtert sich die Konkurrenzfähigkeit der heutigen Holzfeuerungs-technologie gegenüber Erdöl und Erdgas. Werden jedoch die Kosten des Treibhauseffektes in die KEPZ integriert, wird Holz schlagartig viel konkurrenzfähiger. Das wirft die Frage auf, wie stark die KEPZ-induzierten Veränderungen im Gefüge der relativen Energiepreise sein dürfen und wie weit bei der Anwendung der KEPZ die zu erwartenden Anpassungsprozesse vorweggenommen werden müssen, um allzugrosse – eventuell nur vorübergehende – Verzerrungen zu vermeiden.

In diesem Zusammenhang stellt sich natürlich die Frage, ob die abgeleiteten KEPZ wegen der vielen Lücken, Vereinfachungen und Ungenauigkeiten nicht ungerechtfertigte Verzerrungen im Gefüge der relativen Energiepreise verursachen, d.h. ob bei allen Energieträgern bzw. Energiesystemen die effektiven externen Kosten etwa im gleichen relativen Ausmass monetarisiert werden und ob die Bewertung der jeweiligen Effekte in etwa adäquat ist. Genausowenig wie **die** KEPZ ermittelt werden können, ist eine präzise Antwort auf diese Frage möglich. Folgende Hinweise können jedoch gemacht werden:



4 Kalkulatorische Energiepreiszuschläge und Risikozuschläge

- Die Kosten des Treibhauseffektes werden nur aufgrund der jeweiligen CO₂-Emissionen auf die einzelnen Energieträger umgelegt. Der Einbezug weiterer wichtiger Treibhausgase (v.a. Methan, FCKW, NO_x) wird die relativen Belastungen der verschiedenen Energieträger etwas verändern (bei Holz und Erdgas etwas mehr).
- Die erwähnten Probleme beim Umgang mit den Grossrisiken der Kernenergie finden im KEPZ der Kernenergienutzung notgedrungen keinen adäquaten Niederschlag. Es ist durchaus möglich, dass das Resultat der gesellschaftlichen Debatte um diese Risiken implizite einen höheren KEPZ erfordern würde.



4.4 Anwendung der kalkulatorischen Energiepreiszuschläge

Die kalkulatorischen Energiepreiszuschläge verteuern den Energieeinsatz im Strom- und Wärmebereich, wodurch die Preisrelationen zugunsten von energiesparenden Technologien verändert werden. Es stellt sich die Frage, wie stark sich die Konkurrenzfähigkeit von Alternativ-Energien (Solarzellen und Sonnenkollektoren) und von Energiesparmassnahmen (Dämmstoffe, Sparfenster) durch kalkulatorische Energiepreiszuschläge verbessert, falls berücksichtigt wird, dass bei ihrer Herstellung, beim Betrieb und bei ihrer Entsorgung auch Energie verbraucht und die Umwelt belastet wird. In einem ersten Schritt werden deshalb Energieverbrauch und Emissionen bei der Herstellung, der Nutzung und der Entsorgung dieser Güter ermittelt, woraus mit den hier erarbeiteten Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen externe Zusatzkosten abgeleitet werden. Anhand von einigen Modellgebäuden werden in einem zweiten Schritt die Auswirkungen von Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen auf die Wirtschaftlichkeit der umgesetzten Energiesparmassnahmen illustriert.

4.4.1 Ausgewählte Dämmmaterialien, Fenster und alternative Produktionsanlagen

Für die folgenden Anlagen und Bauelemente werden Preiszuschläge ermittelt, welche – entsprechend den kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen bei Energiesystemen – den monetarisierbaren Effekten bei der Herstellung, der Nutzung und der Entsorgung entsprechen (s. INFRAS, Teilbericht 5, Aug. 1993):

- **Solarzellenanlage**, 3 kW_{peak} p-Silizium mit einem Wechselrichter auf Schrägdach. Dies ist die häufigste in der Schweiz verwendete Anlage. (Daten zur Produktelinienanalyse: ETH, 1993).
- Zwei **Sonnenkollektor-Anlagen**: 6 m²-Flachkollektor aus Kupfer für die Warmwasserversorgung eines Einfamilienhauses. 32 m²-Aluminium-Wabenkollektoranlage für ein Mehrfamilienhaus.
- **Fenster**: Je ein doppelt verglastes Holz- und PVC-Fenster, Glasdicke je 2x3 mm (Variante 1) bzw. je 2x4 mm (Variante 2), **nur Herstellung, ohne Transport, Montage, Entsorgung**.
- Vier **Dämmstoffe**, je 10 cm bzw. 14 cm Dicke: Zellulose, Glaswolle, Steinwolle, PU-Hartschaum, **nur Herstellung, ohne Transport, Montage, Entsorgung**.

Die materialmässige Detailspezifikation der untersuchten Elemente und Anlagen befindet sich in (INFRAS, Teilbericht 5, Okt. 1993).

4.4.2 Erfassung des Energieverbrauchs und der Emissionen

Mit Hilfe von Produktelinienanalysen (PLA) werden die Lebenszyklen der untersuchten Materialien (d.h. Herstellung, Gebrauch und Entsorgung) in einzelne Teilschritte zergliedert. Für jeden Teilschritt wird eine Input/Output-bilanz erstellt. Diese fasst – vereinfacht gesagt – die Material- und (End)-Energieflüsse (Input) sowie die Abwärme, Emissionen und Abfälle (Output) zusammen. Die Resultate werden in sogenannten Stoff- und Energiebilanzen zusammengestellt.

Die Emissionen und Energieverbrauchsdaten, die gemäss dem skizzierten Vorgehen berechnet werden, sind sehr desaggregiert. Um sie interpretieren



4 Anwendung kalkulatorischer Energiepreiszuschläge

zu können, müssen die Daten aggregiert werden. Dabei wird folgendes Aggregationsschema gewählt:

– Vorleistungen

Gesamter Energieaufwand und alle Emissionen, die durch die Bereitstellung der benötigten Rohstoffe (z.B. Quarz bei der PV-Anlage), Halbfabrikate (z.B. Dichtungen/ Kunststoffe bei der Panelfabrikation) und Hilfsmittel (z.B. HF zur Damage-Ätzung der Panels) anfallen.

– Herstellungsprozesse

Energieaufwand und die Emissionen, die durch die eigentliche Produktion verursacht werden (z.B. Strombedarf zur electronic-grade-Siliziumherstellung, NMVOC-Emissionen bei der Sinterung der Zellen).

– Precombustion – vorgelagerte Prozesse

Energieaufwand und Emissionen für die Bereitstellung der benötigten fossilen Energieträger.

– Strombereitstellung

Umweltbelastung und Energieverbrauch für die Bereitstellung der Elektrizität, die bei Vorleistungen und Herstellungsprozessen verbraucht wird.

Um die aggregierten Kennzahlen interpretieren zu können, sind folgende Hinweise notwendig:

– Energie

Energie wird bis zuletzt auf dem Niveau der Endenergie erfasst, und zwar getrennt für fossile (in MJ) und elektrische Energieträger (in kWh bzw. MJ). Ebenfalls wird der sogenannte «Feedstock» oder energetische Materialeintrag berücksichtigt. Der Primärenergiebedarf ergibt sich durch die Berücksichtigung der Bereitstellung der Endenergie nach dem UCPT-88-Modell. Für die Bewertung des Energieverbrauchs mit kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen wird die Produktion des schweizerischen Kraftwerkparkes in den Jahren 1990–1992 verwendet (Stromproduktionsmodell CH 90–92, s. INFRAS, Teilbericht 5, Okt. 1993).

– Gutschriften

In den nachfolgenden Emissionsmatrizen werden weder energetische noch emissionsseitige Gutschriften gemacht, sondern die tatsächlichen Energieverbräuche und Emissionen berücksichtigt.

– Störfälle

Bei den Emissionsmatrizen werden Störfälle oder Unfälle grundsätzlich nicht berücksichtigt.

– Emissionen

Folgende Emissionen werden ermittelt: CO-, CO₂-, NMVOC-, NO_x-, SO_x- und CH₄-Emissionen.



4.4.3 Emissionen und Energieverbrauch

Der Primärenergieverbrauch und die hier interessierenden Emissionen bei Herstellung, Montage, Nutzung und Entsorgung der betrachteten Anlagen bzw. bei der Herstellung (Fenster, Dämmmaterial) sind in den zwei folgenden Tabellen zusammengefasst.

		Primärenergieverbrauch pro Anlage/Element					
		Heizöl schwer	HEL Diesel	Erdgas	Kohle	Material- eintrag	Elektrizität
		[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]
(Herstellung, Montage, Gebrauch, Entsorgung)							
3 kW _p PV 1990		11,2	6,0	5,4	8,7	14,5	240,7
3 kW _p PV 1995		8,7	5,3	5,0	6,5	12,7	177,8
Sonnenkollektoren	6 m ²	3,4	5,8	2,0	3,3	0,1	19,6
MFH:	32 m ²	19,6	13,5	18,1	51,2	20,4	136,0
		[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]
(nur Herstellung)							
m ² Holzfenster		47	17	109		58	42
m ² PVC-Fenster		248	21	109		17	234
m ² Zellulose	10 cm	5,1	13,4	0,1	0,7		2,5
m ² Zellulose	14 cm	7,1	18,7	0,1	1,0		3,5
m ² Glaswolle	10 cm		8,1	1,2			1,4
m ² Glaswolle	14 cm		11,3	1,6			2,0
m ² Steinwolle	10 cm		23,8		18,4		3,9
m ² Steinwolle	14 cm		33,3		25,8		5,5
m ² PU-Hartschaum	10 cm		147,4				85,1
m ² PU-Hartschaum	14 cm		206,4				119,1

Tabelle 4.10
Primärenergiebedarf für die hier
betrachteten Elemente/Anlagen
(INFRAS, TB5, Okt. 1993)

			Emissionen pro Anlage / Element:			
			CO ₂	NMVOC	NO _x	SO ₂
(Herstellung, Montage, Nutzung, Entsorgung)			[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
3 kW _p PV	Technologie 1990		13'300	24	39	44
	Technologie 1995		10'100	20	31	33
Sonnenkollektoren	6 m ²		1'800	9	5	7
	32 m ²		21'700	87	64	68
(nur Herstellung)			[g]	[g]	[g]	[g]
Holzfenster		1 m ²	19'300	155	90	85
PVC-Fenster		1 m ²	42'100	217	145	142
Zellulose	10 cm	1 m ²	1'700		7,0	6,5
	14 cm	1 m ²	2'400		9,7	9,0
Glaswolle	10 cm	1 m ²	1'100		4,4	3,9
	14 cm	1 m ²	1,500		6,1	5,5
Steinwolle	10 cm	1 m ²	3'700		14,7	13,0
	14 cm	1 m ²	5'200		20,6	18,2
PU-Hartschaum	10 cm	1 m ²	25'200		68,2	137,7
	14 cm	1 m ²	35'300		95,4	192,7

Tabelle 4.11
Schadstoffemissionen bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung der untersuchten Anlagen bzw. bei der Herstellung der betrachteten Elemente (INFRAS, TB5, Okt. 1993)

4.4.4 Externe Kosten

Im Rahmen dieses Projektes werden die externen Kosten infolge der Luftschadstoffemissionen in der Form von Emissionszuschlägen (Fr./kg Emission, s. Kap. 4.1) ermittelt. Dazu kommen die externen Kosten der Ressourcennutzung, welche direkt als kalkulatorische Energiepreiszuschläge ausgewiesen werden. Mit Hilfe dieser Ausgangsgrössen und den Angaben über Primärenergieverbrauch und Luftschadstoffemissionen (s. oben) lassen sich die externen Kosten der Herstellung, Nutzung und Entsorgung der hier untersuchten Anlagen/Bauelemente ermitteln. Die Bewertung der externen Kosten des Elektrizitätsverbrauchs erfolgt (in INFRAS, TB5, Okt. 1993) für die Elektrizitätserzeugungsmodelle UCPT 1988 sowie CH 90–92 (aufgrund der schweizerischen Produktionsverhältnisse in den Jahren 1990–1992). Die hier ausgewiesenen externen Kosten basieren auf dem Stromerzeugungsmodell CH 90–1992 – einmal mit Berücksichtigung von Treibhauseffekt und intertemporalen Effekten (Vermeidungskosten) und einmal ohne. Es werden jeweils die vorne ausgewiesenen KEPZ- und EMZ-Mittelwerte (Tabellen 4.4 und 4.6 bis 4.8) und bei der Stromproduktion und -verteilung die externen Kosten im Normalbetrieb verwendet. Die Berechnungen erfolgen für zwei Varianten:

- Mit Berücksichtigung der externen Kosten des Treibhauseffektes (Vermeidungskostenansatz).
- Ohne Berücksichtigung der externen Kosten des Treibhauseffektes.



	Heutige Anlagen-/ Elementpreise [Fr.]	Externe Kosten [Fr.]		Externe Kosten [Fr.]	
		ohne Treibhauseffekt		mit Treibhauseffekt (Vermeidungskosten)	
		Min.	Max.	Min.	Max.
3 kW _p -PV-Anlage 1992	46'000–50'000	550	1'190	1'200	2'110
3 kW _p -PV-Anlage 1995	40'000– 50'000	440	960	950	1'690
6 m ² Flachkollektor EFH	11'000– 14'000	130	300	300	550
32 m ² Wabenkollektor MFH	50'000– 65'000	1'550	3'600	4'180	7'360
m ² Holzfenster H1	800– 900	2	6	5	9
m ² PVC-Fenster P1	800– 900	4	8	9	16
m ² Zellulose 10 cm ¹⁾	26– 30	0,2	0,4	0,5	0,9
m ² Zellulose 14 cm ¹⁾	35– 40	0,3	0,6	0,7	1,2
m ² Glaswolle 10 cm ¹⁾	10– 14	0,1	0,2	0,3	0,5
m ² Glaswolle 14 cm ¹⁾	14– 20	0,2	0,4	0,4	0,8
m ² Steinwolle 10 cm ¹⁾	11– 20	0,4	0,9	1,0	1,8
m ² Steinwolle 14 cm ¹⁾	16– 29	0,5	1,2	1,4	2,5
m ² PU-Hartschaum 10 cm ¹⁾	14– 17	2,7	6,5	8	14
m ² PU-Hartschaum 14 cm ¹⁾		3,9	9,1	11	20

¹⁾ Nur Kosten des Dämmmaterials. Kosten für Installation und Anpassungen: 20–30 Fr./m¹ bei Kollektoren, 150–200 Fr./m² bei Fassaden.

Tabelle 4.12
Externe Kosten für verschiedene Anlagen und Bauelemente (INFRAS, TB5, Okt. 1993) und Vergleich mit den aktuellen Kosten dieser Anlagen/ Bauelemente

Erwartungsgemäss ist der Einfluss der externen Kosten auf die hier untersuchten Anlagen und Elemente relativ gering. Selbst die Maximalzuschläge, welche bei Einbezug der Vermeidungskosten des Treibhauseffektes zu einer Verdoppelung (Gas) bis Versechsfachung (HS) der fossilen Energiepreise führen, liegen in der Regel unter 10% der Kosten der betrachteten Anlagen und Elemente.



4 Anwendung kalkulatorischer Energiepreiszuschläge

4.4.5 Auswirkungen der externen Kosten auf die Wirtschaftlichkeit von Energiesparmassnahmen

Zur Illustration werden die Kosten von zwei Energiesparpaketen an drei Modellgebäuden mit und ohne externe Kosten ermittelt. Die Beispiele stammen aus der Untersuchung «Energiesparpotentiale und Energiesparkosten im Raumwärme- und Warmwasserbereich» (B+H, Februar 1992):

Massnahme	Einfamilienhaus alt vor 1947 EBF: 160 m ² (B+H, S.C1)	Mehrfamilienhaus Mittel: 1947– 1975 EBF: 2000 m ² (B+H, S.C10)	Dienstleistungsgebäude Neu: 1976– 1989 EBF: 2000 m ² (B+H, S.C17)
1	WD Dach, 14 cm	WD Dach, 10 cm	WD Dach, +5 cm
2	WD Estrichboden, 10 cm	WD Kellerdecke, 10 cm	WD Kellerdecke, +5 cm
3	WD Kellerdecke, 8 cm	WD Heiz-WW-Verteilung	WD Heiz-WW-Verteilung
4	WD Heiz-WW-Verteilung	WD Fassade, 10 cm	WD Fassade, +5 cm
5	WD Fassade innen, 6 cm	Ersatz Fenster	Ersatz Fensterglas
6	Ersatz Fenster	WD Sturz	WD Sturz

Tabelle 4.13
Energiesparmassnahmen an den
drei ausgewählten Modellgebäuden
gemäss (B+H, 1992)

WD: Wärmedämmung; EBF: Energiebezugsfläche; WW: Warmwasser

Die Berechnung der Kosten dieser Massnahmen erfolgte mit einem realen Zinssatz von 2,0% und in Zukunft real konstanten Energiepreisen; die Amortisationsdauer der Dämmassnahmen beträgt in der Regel 30 Jahre.

Die von B+H vorgeschlagenen Massnahmen sind bei einem aktuellen Endenergiepreis von 11,8 Fr./GJ bzw. 4,25 Rp./kWh (50% HEL, 50% Gas) nicht wirtschaftlich. Der Einbezug der externen Kosten verbessert die Wirtschaftlichkeit entscheidend: Der Nutzenergiepreis mit Energiepreiszuschlag beträgt bei einer modernen Low-NO_x-Feuerung (50% Gas, 50% HEL, Wirkungsgrad 90%) 25,8 Fr./GJ bis 32,8 Fr./GJ (inkl. Kosten des Treibhauseffektes gemäss Vermeidungskostenansatz und inkl. vorgelagerte Prozesse; Grenzkosten, d.h. ohne Kapitalkosten und ohne Kosten für Wartung, Unterhalt, etc.).



	Einfamilienhaus vor 1947	Mehrfamilien- haus 1947–1975	Dienstleistungs- gebäude 1975–1989
Energieeinsparung GJ/a	52 GJ/a	346 GJ/a	611 GJ/a
Heute:			
1 Kosten der Sparmassnahmen bei aktuellen Energiepreisen	35,0 Fr./GJ	20,9 Fr./GJ	30,4 Fr./GJ
2 Heutiger Energiepreis ohne externe Kosten	13 Fr./GJ ¹⁾	13 Fr./GJ ¹⁾	13 Fr./GJ ¹⁾
3 Wirtschaftlichkeit [2:1]	0,37	0,62	0,43
Mit externen Kosten:			
4 Kosten der Sparmassnahmen inkl. externe Kosten	35,3–35,8 Fr./GJ	21,1– 21,2 Fr./GJ	30,5– 30,7 Fr./GJ
5 Energiepreis inkl. Energie- preiszuschläge ¹⁾	25,8– 32,8 Fr./GJ	25,8– 32,8 Fr./GJ	25,8– 32,8 Fr./GJ
6 Wirtschaftlichkeit [5:4]	0,73–0,92	1,22–1,55	0,85–1,07

¹⁾ Wirkungsgrad der Feuerungen: 90%, je 50% Erdgas und HEL; KEPZ, welche die vorgelagerten Prozesse enthalten, Berücksichtigung der Kosten des Treibhauseffektes gemäss Vermeidungskostenansatz.

Der Einbezug der externen Kosten verbessert die Wirtschaftlichkeit von Energiesparmassnahmen entscheidend. Das grundsätzlich auch dann, wenn berücksichtigt wird, dass bei der Montage, dem Gebrauch und der Entsorgung dieser Elemente weitere externe Kosten anfallen, die hier noch nicht berücksichtigt werden konnten.

Bei den Anlagen zur Nutzung der Sonnenenergie führt der Einbezug der externen Kosten zu keiner grundsätzlichen Verbesserung der Wirtschaftlichkeitsverhältnisse, bei den Photovoltaikanlagen verschlechtert sich sogar die absolute Differenz zur konventionellen Stromproduktion (allerdings enthalten die Vergleichs-Strompreise noch keine Risikozuschläge!). Der Wärmepreis von Sonnenkollektoranlagen wird hier nur mit den variablen Kosten einer konventionellen Wärmeversorgung verglichen, weil wir davon ausgehen, dass das solare System nicht die volle Deckung übernehmen kann und daher das konventionelle System trotzdem vorhanden sein muss. Hier werden auch die externen Kosten von Montage, Gebrauch und Entsorgung berücksichtigt. Gerade bei den Photovoltaikanlagen sind jedoch in Zukunft massiv tiefere externe Kosten zu erwarten (viel weniger Aluminiumrahmen, umweltfreundlichere, materialsparende Zellen etc.).

Tabelle 4.14
Kosten und Wirtschaftlichkeitsvergleich der Energiesparmassnahmen an drei Modellgebäuden (bestehende Gebäude) bei heutigen Energiepreisen und bei Einbezug der externen Kosten (inkl. Vermeidungskosten Treibhauseffekt und vorgelagerte Prozesse, nur für die Herstellung, ohne Montage/Entsorgung).

Alle Massnahmen mit Wirtschaftlichkeitsfaktor >1 sind wirtschaftlich.



4 Anwendung kalkulatorischer Energiepreiszuschläge

	PV-Anlage 3 kW _p [Rp./kWh]	Warmwasser-Sonnenkollektoren 6 m ² für EFH [Rp./kWh]	32 m ² für MFH [Rp./kWh]
Heutiger Strom-/Wärmepreis	14,9	4,7 ¹⁾	4,7 ¹⁾
Heutiger Strom-/Wärmepreis mit externen Kosten	15,7–16,1³⁾	8,1–10,3²⁾	8,1–10,3²⁾
Gestehungskosten von heutigen Anlagen ohne externe Kosten	80–100	30–37	25–30
Gestehungskosten: Heutige Anlagen mit externen Kosten (inkl. Treibhauskosten)	82–103	31–38	27–33

Tabelle 4.15

Energiepreise für Elektrizität und Wärme aus Gas-/Ölheizungen im Vergleich mit den Gestehungskosten von Elektrizität und Nutzwärme aus Sonnenenergieanlagen **mit und ohne externe Kosten** (Lebensdauer Solarzellen: 30 Jahre, Sonnenkollektoren: 20 Jahre)

¹⁾ 50% HEL, 50% Erdgas, Wirkungsgrad der Feuerung: 90%, nur variable Kosten

²⁾ Je 50% HEL- und Erdgas-Low-NO_x, Wirkungsgrad Feuerung: 90%; inkl. Vermeidungskosten CO₂

³⁾ Strommix CH90–92, inkl. Vermeidungskosten CO₂, ohne Risikozuschläge



Literaturverzeichnis

- Altwegg D.
«Die Folgekosten von Waldschäden»
Dissertation HSG St. Gallen, Bamberg 1988
- BAM, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
«Volkswirtschaftliche Verluste durch umweltverschmutzungsbedingte Materialschäden in der BRD»
im Auftrag des UBA, Berlin, Oktober 1990
- Barbir F., Veziroglu T.N., Plass H.J.
«Environmental Damage Due to Fossil Fuels Use»
Int. J. Hydrogen Energy, vol. 15, # 10, p. 739–749, 1990
- BEW, Bundesamt für Energiewirtschaft
«Schweizerische Gesamtenergiestatistik»
Bern 1990
- BFS, Bundesamt für Statistik
«Abgrenzung der Agglomerationsräume in der Schweiz 1980»
1984
- B+H, Basler & Hofmann AG
«Energiesparpotentiale und Energiesparkosten im Raumwärme- und Warmwasserbereich»
im Auftrag des BEW, Zürich/Bern, Februar 1992
- BMFT, Bundesminister für Forschung und Technologie
«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
- B&P, Basler & Partner
«Die wirtschaftlichen Folgen des Waldsterbens in der Schweiz»
im Auftrag der Schweiz. Gesellschaft für Umweltschutz, Zürich 1986
- Bundesrat Schweiz
«Luftreinhaltekonzept»
Bericht 86.047, 10. Sept. 1986
- Bützer P.
«Gefährdungsanalyse von Flüssiggas (Propan, Butan) und Erdgas, Grundlagen»
Altstätten, Oktober 1988
- Ecoplan
«Soziale Kosten von Verkehrsunfällen in der Schweiz»
im Auftrag des Dienstes für Gesamtverkehrsfragen des EVED, GVF-Auftrag Nr. 186, Bern, April 1991



L Literatur

Ecoplan

«Externe Kosten im Agglomerationsverkehr – Fallbeispiel Region Bern»

NFP «Stadt und Verkehr», Bericht Nr. 15B, Vorabzug, Bern, April 1992

Erdöl-Vereinigung

«Geschäftsbericht 1990»

Zürich 1991

Ferguson R.

«Environmental Cost of Energy Technologies»

unveröff. mid term report aus Prognos, 1992, Bd. 4, Sept. 1990

Fuhrer J., et al.

«Der Einfluss der Luftverschmutzung auf die Pflanzenproduktion»

Sonderdruck aus «Schweizer Verband der Ingenieur-Agronomen und der Lebensmittelingenieure», Weiterbildungskurs vom 24./25. 9. 1986 in Murten, Zollikofen 1986

Fuhrer J.

«Die Wirkungen von Ozon auf landwirtschaftliche Kulturen»

in: «Landwirtschaft und Umwelt», UFA-Revue Nr. 7– 8, S. 39– 41, 1988

Fuhrer J., Lehnher 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, Oktober 1992

Grupp H.,

«Die sozialen Kosten des Verkehrs»

Teil I, in: «Verkehr und Technik», Heft 9, 1989

Heinz I., Klaassen-Mielke R.

«Krankheitskosten durch Luftverschmutzung»

Physica-Verlag, Heidelberg 1990

Hohmeyer O.

«Least Cost Planning und soziale Kosten»

in: Hennicke P. (Hrsg.). «Den Wettbewerb im Energiesektor planen, least cost planning – ein neues Konzept zur Optimierung von Energiedienstleistungen», S. 105– 135, Berlin 1991

Hohmeyer O.

«Adäquate Berücksichtigung der Erschöpfbarkeit nicht erneuerbarer Ressourcen»

in: Prognos-Schriftenreihe Bd. 4, 1992

INFRAS

«Monetäre Kosten der Luftverschmutzung an Gebäuden im Kanton Zürich»

im Auftrag des ATAL Kt. Zürich, Zürich, Oktober 1986



INFRAS

«Monetäre Kosten der Luftverschmutzung an SBB-Infrastrukturen»
im Auftrag des NFP 14, Zürich, 20. Januar 1988

INFRAS

«Gebäudeschäden durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung»
im Auftrag des Dienstes für Gesamtverkehrsfragen, GVF-Auftrag Nr. 197,
Zürich, Dezember 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

INFRAS

«Gebäudeschäden durch Immissionen der Strom- und Wärmeversorgung»
Arbeitsbericht, Zürich, 16. November 1992

INFRAS

«Die externen Kosten von Luftverschmutzung und staatlichen Leistungen im Wärmebereich»
Teilbericht 1 des Projektes «Externe Kosten der Strom- und Wärmeversorgung», im Auftrag von BEW/BFK/AFB, Zürich, Oktober 1993

INFRAS

«Die externen Kosten der fossilen Ressourcennutzung im Wärmebereich»
Teilbericht 3 des Projektes «Externe Kosten der Strom- und Wärmeversorgung», im Auftrag von BEW/BFK/AFB, Zürich, Oktober 1993

INFRAS

«Externe Kosten von Photovoltaikanlagen, Sonnenkollektoren, Fenstern und Wärmedämmstoffen»
Teilbericht 6 des Projektes «Externe Kosten der Strom- und Wärmeversorgung», im Auftrag von BEW/BFK/AFB, Zürich, Oktober 1993

INFRAS/EWI AG

«Externalitäten im Energiebereich»
Vorstudie im Auftrag des BFK und der Kommission zur Nutzung der Sonnenenergie, Zürich, 6. Dezember 1990



Koomey J.

«Comparative Analysis of Monetary Estimates of External Costs Associated with Combustion of Fossil Fuels»

Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-28313, 1990

Landwirtschaftsbericht (Siebter), Bern, 1992

Morgenstern R.D.

«Towards a Comprehensive Approach to Global Climate Change Mitigation»

in: The American Economic Review, 81(2), p. 140–145, 1991

Nordhaus W.D.

«A Sketch of the Economics of the Greenhouse Effect»

in: The American Economic Review, 81(2), p. 146–150, 1991

OECD, Cline W.

«Global Warming – The Benefit of Emission Abatement»

Paris 1992

Ottinger R.L. et al

«Environmental Externality Costs from Electric Utility Operations»

N.Y. State Energy Research and Development Authority and the US Dept. of Energy, Draft Final Report, Feb. 28, 1990 (aus: Prognos 1992, Bd. 4)

Näf W.

«Ökonomische Konsequenzen der Luftverschmutzung für die schweizerische Landwirtschaft»

Dissertation der wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg, 1991

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

Pfister F.

«Walderhaltung und Schutzaufgaben im Berggebiet»

Bericht Nr. 294 der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen EAFV/WSL, Birmensdorf 1987

PROGNOS

«Identifizierung und Internalisierung externer Kosten der Energieversorgung»

Basel, 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 CO₂/CH₄-Akkumulation / Adäquate Berücksichtigung der Erschöpfbarkeit nicht erneuerbarer Ressourcen»
Endbericht, Basel, Juni 1992

PROGNOS

«Untersuchung der Substitutionsmöglichkeiten zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Wärmesektor und Gesamtoptimierung einer CO₂-Strategie»

im Auftrag des BEW, Basel, August 1992

PROGNOS

«Die externen Kosten der Stromerzeugung aus Kernenergie»

Teilbericht 2 des Projektes «Externe Kosten der Strom- und Wärmeversorgung», im Auftrag von BEW/BFK/AFB, Basel, Oktober 1993

PROGNOS

«Die externen Kosten der Stromerzeugung aus Wasserkraft»

Teilbericht 4 des Projektes «Externe Kosten der Strom- und Wärmeversorgung», im Auftrag von BEW/BFK/AFB, Basel, Oktober 1993

PROGNOS

«Die externen Kosten der Übertragung und Verteilung von Elektrizität»

Teilbericht 5 des Projektes «Externe Kosten der Strom- und Wärmeversorgung», im Auftrag von BEW/BFK/AFB, Basel, Oktober 1993

PSI, Paul-Scherrer-Institut

«The Economics of Global Warming»

Würenlingen, Okt. 1992

Sanasilva, Bundesamt für Forstwesen und Landschaftsschutz

«Sanasilva Waldschadensbericht 1986–1991»

Bern/Birmensdorf, November 1986–1991

SKS Ingenieure AG

«Sicherheit von Erdgashochdruckanlagen»

Rahmenbericht; GVM, GVO, Zürich, 30. September 1991

Städteverband

«Statistik der Schweizer Städte 1990»

Stat. Jahrbuch des Schweiz. Städtverbandes, 52. Ausgabe, 1990

TISG, Technisches Inspektorat des Schweiz. Gasfaches

«Tätigkeitsbericht 1991»

Zürich 1992

Wüest und Gabathuler

«Bauwerk Schweiz»

Zürich 1989



Tabellen- und Figurenverzeichnis

Tabelle 1.1	17
Arbeitsaufteilung und Teilberichte (TB). Teilberichte 1–6 sind Materialienbände zum Schlussbericht (SB)	
Tabelle 3.1	30
Technisch-physikalische Primärwirkungen des Energieversorgungssystems	
Tabelle 3.2	32
Identifizierbare externe Effekte der Strom- und Wärmeversorgung	
Tabelle 3.3	46
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)	
Tabelle 3.4	50
Berechnete relative Ertragsverluste für die ausgewählten Kulturen und Regionen in Prozent der Erträge (Fuhrer et al., 1989)	
Tabelle 3.5	51
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)	
Tabelle 3.6	55
Immissionsbedingte Gesundheitskosten in Belastungsgebieten für Erwerbs- und Nichterwerbstätige im Jahr 1990 (Fr. pro Person und Jahr). Basis: BRD-Gesundheitskosten in Belastungsgebieten nach Heinz et al., 1990	
Tabelle 3.7	58
Bereiche für durchschnittliche (schweizerische Mittelwerte) Immissionsanteile der Feuerungen an den gemessenen Immissionskonzentrationen (aus INFRAS, Juli 1992, S. 12)	



Tabelle 3.8	59
Schätzung der Lebensdauerverkürzungen durch Schadstoffeinfluss nach Immissionskategorien auf der Grundlage von (INFRAS, 1986; BAM, 1990)	
Tabelle 3.9	60
Zusätzliche Kapitalkosten bei Gebäudehüllen nach Immissionskategorie für die verkehrsexponierten/nicht verkehrsexponierten Gebäude, Schweiz 1991; und Ermittlung des feuerungsbedingten Anteils	
Tabelle 3.10	61
Gebäudeschadenskosten infolge von Feuerungsimmissionen, Ermittlung der Streubreite für das Gesamtergebnis mit der Methode der Fehlerfortpflanzungsrechnung (vgl. die Berechnungen in INFRAS, Juli 1992, Anhang 10)	
Tabelle 3.11	64
Verschmutzung von Erdreich, Oberflächen- und Grundwasser durch Ölungfälle bei Transport und Lagerung in der Schweiz in den Jahren 1989–1991 (Quelle: BUWAL, Abt. Immissionsschutz)	
Tabelle 3.12	71
Äquivalente CO ₂ -Emissionen in der Schweiz 1990. Den grössten Anteil an den Treibhausgasen in der Schweiz haben die CO ₂ -Emissionen. Sie sind grösstenteils durch den Energieverbrauch bedingt (PSI, 1992)	
Tabelle 3.13	73
Schätzungen zu den Kosten des Treibhauseffektes (Basis: Ecoplan, 1992; Hohmeyer, Juli 1992)	
Tabelle 3.14	75
Schätzungen der Kosten des Treibhauseffektes: Spezifische Schadenskosten nach Energieträger/Treibhauswirksamkeit (aus Prognos, Bd. 4, April 1992)	
Tabelle 3.15	77
Referenzentwicklung 1990–2025: Endenergieverbrauch und CO ₂ -Emissionen nach Energieträger (Prognos, August 1992)	
Tabelle 3.16	80
Externe Schadenskosten bzw. Vermeidungskosten: Energiepreiszuschläge für Öl, Gas, Kohle und Importstrom sowie Emissionszuschlag für CO ₂	



Tabelle 3.17	85
Todesfallrisiken der elektrischen Energieproduktion durch Kernkraftwerke je GWa (nach Fritzsche, 1988)	
Tabelle 3.18	88
Mögliche Quellterme bei Kernschmelzunfällen im KKW Mühleberg für Jod und Cäsium (Näherungswerte)	
Tabelle 3.19	91
Gesamtschäden ausgewählter KKW-Unfälle (in Mio. Fr.)	
Tabelle 3.20	94
Erwartungswerte E und Standardabweichungen s der Schadenshöhe (in Mio. Fr./a, Standardabweichungen in Klammern)	
Tabelle 3.21	108
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	
Tabelle 3.22	109
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	
Tabelle 4.1	123
Emissionszielwerte des Luftreinhaltekonzepts (bei NO _x und NMVOC 1960; bei SO ₂ und Staub/Russ 1950) und die für die Schäden verantwortlichen Emissionsmengen für die relevanten Schadstoffe	
Tabelle 4.2	124
Toxizitäts- bzw. Schädlichkeitsfaktoren von Luftschadstoffen bezogen auf Kohlenmonoxid nach Schadensbereich (Grupp, 1986, S. 361)	
Tabelle 4.3	125
Emissionen, welche die externen Kosten der Luftverschmutzung 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	



Tabelle 4.4	126
Ermittlung der Emissionszuschläge (Fr./t) für die SO ₂ - und NO _x -Emissionen (Jahresemissionen) sowie für NMVOC- und NO _x -Emissionen im Sommer aus den Schadenskosten pro Schadensbereich. EMZ-Variante für Energiesysteme in ländlichen Gebieten ohne Anrechnung von Gesundheits- und Gebäudeschäden	
Variante 1: gleichmässige Verteilung der Schadenskosten auf die schädigenden Emissionsmengen oberhalb der Emissionszielwerte	
Variante 2: toxizitätsgewichtete Verteilung der Schadenskosten auf die Emissionen (Variante 2 wird anschliessend weiterverwendet)	
Tabelle 4.5	128
Emissionsfaktoren [kg/TJ Input] für verschiedene Systeme mit und ohne vorgelagerte Prozessstufen 1990 (Quellen: ETHZ, GEMIS 2.0, INFRAS Aug. 1991/1+2). Die vorgelagerten Prozessstufen bei den Kernkraftwerken berücksichtigen die Emissionen bei der Uranförderung und Anreicherung, der Brennelementfertigung und dem Transport	
Tabelle 4.6	132
Kalkulatorische Energiepreiszuschläge (KEPZ) im Vergleich mit aktuellen Energiepreisen; Angaben in Rp./kWh , Durchschnittswerte für die Schweiz	
Tabelle 4.7	133
Kalkulatorische Energiepreiszuschläge (KEPZ) im Vergleich mit aktuellen Energiepreisen; Angaben in den jeweiligen Original-einheiten , Durchschnittswerte für die Schweiz	
Tabelle 4.8	134
Kalkulatorische Energiepreiszuschläge (KEPZ) für ländliche Gebiete im Vergleich mit aktuellen Energiepreisen (ohne Gesundheits- und Gebäudeschäden)	
Tabelle 4.9	136
Unfallrisiken bei der Elektrizitätserzeugung; Schadenausmass, Erwartungswert der Unfallschäden, Standardabweichung und Risikozuschläge für risikoneutrale bzw. für risikobewusste Personen	
Tabelle 4.10	141
Primärenergiebedarf für die hier betrachteten Elemente/Anlagen (INFRAS, TB5, Okt. 1993)	



Tabelle 4.11	142
Schadstoffemissionen bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung der untersuchten Anlagen bzw. bei der Herstellung der betrachteten Elemente (INFRAS, TB5, Okt. 1993)	
Tabelle 4.12	143
Externe Kosten für verschiedene Anlagen und Bauelemente (INFRAS, TB5, Okt. 1993) und Vergleich mit den aktuellen Kosten dieser Anlagen/Bauelemente	
Tabelle 4.13	144
Energiesparmassnahmen an den drei ausgewählten Modellgebäuden gemäss (B+H, 1992)	
Tabelle 4.14	145
Kosten und Wirtschaftlichkeitsvergleich der Energiesparmassnahmen an drei Modellgebäuden (bestehende Gebäude) bei heutigen Energiepreisen und bei Einbezug der externen Kosten (inkl. Vermeidungskosten Treibhauseffekt und vorgelagerte Prozesse, nur für die Herstellung, ohne Montage/Entsorgung). Alle Massnahmen mit Wirtschaftlichkeitsfaktor >1 sind wirtschaftlich.	
Tabelle 4.15	146
Energiepreise für Elektrizität und Wärme aus Gas-/Ölheizungen im Vergleich mit den Gestehungskosten von Elektrizität und Nutzwärme aus Sonnenenergieanlagen mit und ohne externe Kosten (Lebensdauer Solarzellen: 30 Jahre, Sonnenkollektoren: 20 Jahre)	



Figur 3.1	36
Externe Kosten: Struktur der Erfassungskonzepte	
Figur 3.2	43
Auswirkungen der wichtigsten Luftschadstoffe auf ober- und unterirdische Pflanzenteile	
Figur 3.3	66
Unfälle mit Flüssiggas und Erdgas in der Schweiz (9 Kantone) (Bützer, 1988, S. 119)	
Figur 3.4	78
Kosten der CO ₂ -Reduktionsmassnahmen in Abhängigkeit vom Reduktionserfolg, gemäss Prognos, August 1992. Die durchschnittlichen Reduktionskosten für die Verminderung der 29,4 Mio. t CO ₂ -Emissionen betragen 0,53 Fr./kg CO ₂	
Figur 3.5	114
Quantifizierbarkeit und mögliche Monetarisierungsansätze externer Effekte der Energieversorgung	
Figur 4.1	122
Ermittlung der kalkulatorischen Energiepreiszuschläge pro Energieträger und Energiesystem aus den in den untersuchten Schadensbereichen bestimmten externen Kosten	