



SCHRIFTENREIHE
UMWELT NR. 350

Luft



Benzol in
der Schweiz



Bundesamt für
Umwelt, Wald und
Landschaft
BUWAL

SCHRIFTENREIHE
UMWELT NR. 350

Luft

Benzol in der Schweiz

Bericht der Eidgenössischen Kommission
für Lufthygiene (EKL)

Herausgegeben vom Bundesamt
für Umwelt, Wald und Landschaft
BUWAL
Bern, 2003

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
(BUWAL)

*Das BUWAL ist ein Amt des Eidg. Departements für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)*

Autor

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL

Zitervorschlag

EKL – BUWAL 2003: Benzol in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 350. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 38 S.

Kontaktstelle

Peter Straehl, Sekretariat der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene, Abt. Luftreinhaltung,
BUWAL, 3003 Bern; Tel. + 41 (0) 31 322 99 84

Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Titelfotos

© BUWAL/Docuphot, Emanuel Ammon/AURA

Bezug

BUWAL

Dokumentation

CH-3003 Bern

Fax + 41 (0) 31 324 02 16

E-Mail: docu@buwal.admin.ch

Internet: www.buwalshop.ch

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache erhältlich.

Bestellnummer

SRU-350-D

Preis

CHF 8.– (inkl. MWSt)

© BUWAL 2003

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	5
Vorwort	7
Zusammenfassung	9
1 Einleitung	11
1.1 Problemstellung	11
1.2 Eigenschaften, Vorkommen und Verwendung von Benzol	12
2 Quellen der Benzol-Emissionen	13
3 Immissionen	15
3.1 Immissionssituation	15
3.2 Benzol Messungen – Messmethodik	16
4 Bevölkerungsexposition	17
5 Auswirkungen und Risikobewertung	23
5.1 Aufnahme, Stoffwechsel, toxikologische Wirkung	23
5.2 Epidemiologische Studien über das Krebsrisiko	24
5.3 Andere gesundheitliche Auswirkungen	25
5.4 Effektschätzer für die Wirkung bezüglich Leukämie und daraus abgeleitete Richtwerte	26
5.5 Risikoabschätzung für die gesamte Bevölkerung in der Schweiz	27
6 Reduktionsstrategien	28
6.1 Schutzziel – Gesetzliche Grundlagen	28
6.2 Erwägungen zum Benzol-Grenzwert der EU	29
6.3 Strategie	29
6.4 Mögliche Reduktionsmassnahmen	30
7 Beurteilung der Benzol-Problematik	33
8 Empfehlungen an die Vollzugsbehörden und an die Bevölkerung	35
9 Literatur	37

Abstracts

Keywords:

benzene, emissions/
emission target,
ambient air quality limit
value, population expo-
sure/risk

Towards the end of 2000, the European Union EU set down an ambient air quality limit value for benzene of $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (annual average). Member countries are obliged to adopt this limit value, to be met on 1 January 2010, in national legislation. In the light of the EU regulation, the Federal Commission for Air Hygiene EKL carried out a critical review of the air pollution control legislation in Switzerland with respect to benzene, and tabled proposals for further action. The EKL report identifies the sources of benzene emissions, and quantifies the population risk arising from benzene exposure. Moreover, a strategy and necessary measures for further reducing the risk are proposed.

The results show that the ambient air quality limit value for benzene as set down by the EU does not fulfil the requirements of the Swiss Federal Law relating to the Protection of the Environment LPE. It is expected that the more ambitious emission target applied by Switzerland will trigger additional measures to reduce benzene exposure, thereby contributing to the long-term protection of the population.

Stichwörter:

Benzol, Emissionen/
Emissionsziel,
Grenzwert für Immissio-
nen, Bevölkerungs-
exposition/Risiko

Ende 2000 hat die Europäische Union EU einen Grenzwert für Benzol-Immissionen in der Aussenluft von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert) festgelegt, welcher von den Mitgliedsstaaten in nationales Recht umgesetzt und ab dem 1. Januar 2010 eingehalten werden muss. Im Lichte des EU Vorschlags würdigt das Positionspapier der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene EKL die Luftreinhaltung in der Schweiz betreffend Benzol kritisch und macht Vorschläge für das weitere Vorgehen. Dabei werden die Quellen der Benzol-Emissionen identifiziert und die Benzol-Exposition und das Risiko für die Bevölkerung quantifiziert. Ausserdem wird eine Strategie und Massnahmen zur weiteren Reduktion Belastung vorgeschlagen.

Die Analyse zeigt, dass ein Immissions-Grenzwert für Benzol, wie ihn die EU erlassen hat, den Anforderungen des Umweltschutzgesetzes USG der Schweiz nicht genügt. Ein ambitioniertes Emissionsziel hingegen sollte zusätzliche Massnahmen zur weiteren Reduktion der Belastung auslösen und langfristig den Schutz der Bevölkerung garantieren.

Mots-clés:

benzène, émissions/
objectif d'émissions,
valeur limite d'immissi-
on, exposition/risque
pour la population

A la fin de l'année 2000, l'Union européenne UE a fixé une valeur limite pour les concentrations de benzène dans l'air à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (moyenne annuelle). Les pays membres sont tenus d'intégrer cette valeur dans leur législation et de la respecter dès le 1er janvier 2010. A la lumière de la proposition faite par l'UE, la Commission fédérale de l'hygiène de l'air CFHA se livre, dans sa prise de position, à une estimation critique de la protection de l'air en Suisse et elle fait des propositions pour la suite du processus. Elle procède à l'identification des sources d'émissions de benzène et à la quantification des expositions et du risque encouru par la population. Elle propose en outre une stratégie et des mesures visant à réduire davantage la charge polluante.

L'analyse montre qu'une valeur limite d'immissions pour le benzène, telle qu'elle a été définie par l'UE, ne suffit pas pour répondre aux exigences de la loi sur la protection de l'environnement LPE en Suisse. En revanche, un objectif d'émissions plus ambitieux permettrait de prendre des mesures complémentaires pour réduire les risques et assurer la protection de la population a long terme.

Parole chiave:
benzene, emissioni/
obiettivo d'emissioni,
valore limite per le
immissioni, esposizione/
rischio per la popolazione

Alla fine del 2000 l'Unione Europea UE ha fissato un valore limite per le immissioni di benzene nell'aria esterna a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (valore medio annuo). Gli Stati membri dell'UE dovranno inserire questo valore nella loro legislazione e osservarlo a partire dal 1° gennaio 2010. Alla luce della proposta UE, la presa di posizione della Commissione federale per l'igiene dell'aria valuta in modo critico la protezione dell'aria in Svizzera per quanto attiene al benzene e fa proposte per le azioni future. In particolare vengono identificate le emissioni di benzene in Svizzera e quantificati l'esposizione e il rischio per la popolazione. Vengono inoltre proposte una strategia e delle misure per ridurre ulteriormente il carico.

L'analisi mostra che il valore limite delle immissioni di benzene, così come è stato adottato dall'UE, non soddisfa le richieste della legge sulla protezione dell'ambiente LPA. Un obiettivo ambizioso invece, dovrebbe prevedere misure addizionali per un'ulteriore riduzione del carico e per garantire la protezione della popolazione a lungo termine.

Vorwort

Aus den Auspuffen der Benzinmotoren und bei den Tankstellen entweicht Benzol in die Atemluft. Auch Tabakrauch enthält Benzol. Benzol gehört zu den genotoxischen, d.h. Krebs erzeugenden Luftschadstoffen. Für Benzol hat die Wissenschaft bisher keine Schwelle nachgewiesen, unterhalb derer keine Gefahr für die Gesundheit besteht. In der Atemluft ist Benzol deshalb grundsätzlich unerwünscht.

Ende 2000 hat das Europäische Parlament und der Rat der EU einen Grenzwert für Benzol-Immissionen in der Aussenluft von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel festgelegt. Dieser Grenzwert muss in den Mitgliedsstaaten der EU ab 2010 eingehalten werden. Auch wenn dieser Grenzwert eingehalten sein wird, bleibt für die Bevölkerung ein geringes Leukämie-Risiko aufgrund der maximal zulässigen Benzol-Belastung bestehen.

Im Licht der EU Gesetzgebung hat die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL die Luftreinhalte-Politik in der Schweiz betreffend Benzol kritisch gewürdigt und das vorliegende Positionspapier erarbeitet. Insbesondere wurden die Quellen der Benzol-Emissionen identifiziert und die Belastung und das Risiko für die Bevölkerung quantifiziert.

Die EKL kommt zum Schluss, dass ein Immissionsgrenzwert für Benzol in der Aussenluft, wie ihn die EU erlassen hat, den Anforderungen des Umweltschutzgesetzes der Schweiz nicht genügt und den verfassungsmässig garantierten Schutzanspruch der Bevölkerung nicht gewährleistet. Zum Schutz der Bevölkerung schlägt die EKL deshalb keinen Immissionsgrenzwert, dafür aber ein ambitioniertes Emissionsziel vor. Damit sollten zusätzliche Massnahmen zur weiteren Reduktion der Benzol-Belastung auslöst werden.

Die persönliche Benzol-Belastung ist nicht nur von den Aussenluft-Konzentrationen, sondern auch vom Verhalten und der Aufenthaltsdauer an bestimmten Orten sowie vom Beruf abhängig. Nicht nur staatliche Vorschriften und technische Massnahmen, sondern auch Verhaltensänderungen z.B. bezüglich Rauchverhalten können deshalb zur Verminderung der Belastung beitragen.

Ich möchte den Autoren dieses Berichts und allen Mitgliedern der Kommission für die gute Zusammenarbeit herzlich danken. Die EKL hat das Positionspapier an ihrer Sitzung vom Juni 2002 einstimmig verabschiedet.

Eidgenössische Kommission
für Lufthygiene EKL

Ursula Ackermann-Liebrich
Präsidentin

Zusammenfassung

Benzol gehört zu den Krebs erzeugenden Luftschadstoffen. Für diese Stoffe wurde keine Schwelle nachgewiesen, unterhalb derer keine Gefahr für die Gesundheit besteht. Die Benzol-Belastungen sind deshalb immer als schädlich und lästig im Sinn des Umweltschutzgesetzes (USG) anzusehen.

In der Atemluft ist Benzol deshalb grundsätzlich unerwünscht. Im Jahr 2000 wurden immer noch rund 1400 Tonnen Benzol in die Atemluft emittiert. Aus den Auspuffen des motorisierten Strassenverkehrs entweichen ca. 75% der Emissionen. Für das Jahr 2010 wird ein Rückgang der Emissionen auf ca. 700 Tonnen pro Jahr prognostiziert. Um den verfassungsmässigen Schutzanspruch der Bevölkerung zu gewährleisten, sollten pro Jahr aber nicht mehr als ca. 100 Tonnen Benzol in die Atemluft gelangen.

Das vorliegende Positionspapier der EKL identifiziert die Quellen der Benzol-Emissionen, quantifiziert die Exposition und das Risiko für die Bevölkerung und nennt Massnahmen zur weiteren Reduktion der Belastung.

Die heutige Benzol-Belastung in der Schweiz verursacht ein Leukämie-Risiko für die Bevölkerung von rund 2 Fällen pro Jahr. Ein Rechtsgutachten hat gezeigt, dass der verfassungsmässige Schutzanspruch der Bevölkerung der Schweiz bei einem Risiko von 1 Fall in 10 Jahren gewährleistet ist, d.h. ein solches Risiko wäre USG-konform. Das vom Schadstoff Benzol ausgehende Risiko für die Bevölkerung liegt heute rund 20 Mal über dem USG-konformen Risiko.

Die maximalen Benzol-Konzentrationen in der Nähe von vielbefahrenen Strassen liegen in der Schweiz heute bei etwas über $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ende 2000 hat die EU einen Grenzwert für Benzol-immissionen in der Aussenluft von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert) festgelegt, welcher in den Mitgliedsstaaten ab 2010 eingehalten werden muss. Dieser Grenzwert sanktioniert ein Risiko, das etwa 20 Mal über dem USG-konformen Risiko liegt. Ein solcher Grenzwert wäre weder gesetztes- noch verfassungskonform. Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL sieht in der heutigen Situation deshalb keine Notwendigkeit, einen Grenzwert für Benzol-Immissionen in der Aussenluft vorzuschlagen, wie ihn die EU erlassen hat. Ein solcher Grenzwert würde auch kaum zusätzliche, verschärfte Massnahmen zur Reduktion der Belastung auslösen.

Weitere Massnahmen zur Reduktion der Benzol-Belastung sind aber unabdingbar. Zu diesen Massnahmen gehört z.B. der konsequente Vollzug der Vorgaben der Luftreinhalte-Verordnung im Bereich der Tankstellen. Bei ca. 20% der Tankstellen funktioniert die vorgeschriebene Gasrückführtechnik gar nicht, bei weiteren 15 bis 30% nur mangelhaft. Dies führt zu besorgniserregenden Belastungen in der Umgebung dieser Zapfsäulen. Die Verwendung von aromatenfreien Benzin nach Schweizer Norm, wenn 2-Takt Motoren unverzichtbar sind (z.B. bei Kettensägen), die vollständige Fassung und lufthygienisch optimale Ableitung der Abluft besonders bei Einstellhallen und Garagen und der Verzicht auf kurze Autofahrten sind weitere Massnahmen zur Reduktion der Benzol-Belastung.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Benzol gehört zu den Krebs erzeugenden Stoffen. Von der Internationalen Krebsagentur der WHO (IARC 1987) wird es als ein humangenotoxisches Karzinogen der Klasse 1 eingestuft. Für diese Stoffe wurde keine Schwelle nachgewiesen, unterhalb derer keine Gefahr für die Gesundheit besteht. Die Benzol-Immissionen sind deshalb immer als schädlich und lästig im Sinn von Artikel 11 Absatz 3 des Umweltschutzgesetzes (USG 1983) anzusehen.

Die Schweiz hat deshalb zum Schutz der Bevölkerung vor Benzol in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV 1985) keinen Immissionsgrenzwert, wohl aber strenge vorsorgliche Emissionsgrenzwerte (Anhang 1 Ziffer 8 «Krebserzeugende Stoffe» LRV) und Betriebsvorschriften (Anhang 2 Ziffer 33 «Anlagen zum Umschlag von Benzin» LRV) erlassen. Diese Vorschriften sind **Minimalanforderungen**. Gemäss Anhang 1 Ziffer 82 Absatz 2 LRV sind die Emissionen der in Ziffer 83 aufgeführten Krebs erzeugenden Stoffe «mindestens» so weit zu begrenzen, dass die Emissionskonzentrationen die festgelegten Grenzwerte nicht übersteigen. In Sinne eines **Minimierungsgebotes** besteht also zusätzlich die Verpflichtung, die Emissionen von krebserzeugenden Stoffen weiter zu begrenzen, auch wenn die Emissionsgrenzwerte bereits eingehalten werden. Die Vollzugsbehörden legen im Einzelfall einer Benzol emittierenden Anlage fest, welche weitergehenden Massnahmen zur Emissionsbegrenzung nach dem aktuellen Stand der Technik zu treffen sind. Weitere wichtige Vorschriften zur Emissionsminderung von Benzol, welche die Schweiz im Einklang mit der EU einführt, sind die Verordnungen über technische Anforderungen (TAFV1–3, 1995/98), wo die EURO Normen in schweizerisches Recht integriert werden und die Qualitätsanforderungen an Treibstoffe (Benzine) nach Anhang 5 Ziffer 5 LRV.

Durch die in den letzten 10 Jahren in der Schweiz bereits getroffenen Massnahmen zur Reduktion der Benzol-Emissionen an der Quelle wurden die Benzol-Emissionen um mehr als 50% reduziert.

Ende 2000 hat die EU einen Grenzwert für Benzol-Immissionen in der Aussenluft von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert) festgelegt (EU 2000), welcher von den Mitgliedsstaaten bis Ende 2002 in nationales Recht umgesetzt werden muss. Der Grenzwert muss ab 1. Januar 2010 eingehalten werden. Wenn die Anwendung von Massnahmen zur Einhaltung des Grenzwerts zu schwerwiegenden sozioökonomischen Problemen führt, kann ein Mitgliedstaat die Kommission um eine einmalige Verlängerung der Frist um bis zu 5 Jahre ersuchen. Es ist anzunehmen, dass Mitgliedstaaten mit hohen Benzol-Immissionen in Städten von dieser Ausnahmeregelung Gebrauch machen werden. Der Immissionsgrenzwert von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wird deshalb an den «Hot spots» in der EU voraussichtlich erst ab 2015 einzuhalten sein.

Das Positionspapier der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene EKL hat zum Ziel, die Luftreinhaltung in der Schweiz betreffend Benzol im Lichte des EU

Vorschlags kritisch zu würdigen und das weitere Vorgehen vorzuschlagen. Insbesondere sind:

- die Quellen der Benzol-Emissionen zu identifizieren
- die Benzol-Belastung und das Risiko für die Bevölkerung in der Schweiz zu quantifizieren
- ein möglicher Bedarf für ergänzende Benzol Messungen aufzuzeigen
- eine Strategie und Massnahmen zur weiteren Reduktion der Risiken vorzuschlagen.

1.2 Eigenschaften, Vorkommen und Verwendung von Benzol

Benzol mit der chemischen Formel C_6H_6 (MG: 78.11) ist eine farblose Flüssigkeit mit charakteristischem aromatischen Geruch. Der Stoff ist der einfachste und zugleich bekannteste Vertreter der aromatischen Kohlenwasserstoffe. Unter Normalbedingungen ist Benzol brennbar, chemisch stabil und in Wasser mässig löslich. Durch seinen hohen Dampfdruck (0.1×10^5 Pa bei 20°) liegt es in Abgas Emissionen und in der Umgebungsluft zum grössten Teil gasförmig vor.

Benzol ist in geringen Mengen im Rohöl vorhanden und entsteht bei der Raffination von Erdöl. Es entsteht auch bei der unvollständigen Verbrennung organischer Substanzen, also bei der Verbrennung von Kohle und bei Waldbränden. Heute sind ca. 3–5% der weltweiten Benzol-Emissionen natürlichen Ursprungs.

Benzol ist Ausgangsstoff für eine Vielzahl von Produkten wie Kunststoffe, Harze, Pflanzenschutzmittel, Farbstoffe oder Waschmittel. Benzol ist auch Bestandteil von Treibstoffen. Zur Zeit sind in der Schweiz und der EU maximal 1 Volumen % Benzol im Benzin zugelassen. Im Jahr 2000 wurden in der Schweiz ca. 5.5 Mio. m^3 (ca. 4 Mio. Tonnen) Autobenzin verbraucht.

2 Quellen der Benzol-Emissionen

Die Emissionen von Benzol in die Atmosphäre stammen vor allem aus anthropogenen Quellen. Die Hauptquellen sind Verbrennungsprozesse zur Energiegewinnung. Insgesamt wurden im Jahr 2000 in der Schweiz ca. 1370 bis 1430 Tonnen Benzol emittiert. Ca. 75% stammen vom motorisierten Strassenverkehr, der grösste Teil davon Fahrzeugen mit Benzinmotoren. Im Einzelnen gliedern sich die Emissionen wie folgt:

Durch den **motorisierten Strassenverkehr** wurden im Jahr 2000 ca. 1040 Tonnen Benzol emittiert (Auspuffemissionen der Benzin- und in geringerem Mass auch der Dieselfahrzeuge). Zwischen 1985 und 2000 sind die Benzol-Emissionen des motorisierten Strassenverkehrs um rund 80% gesunken.

70 bis 100 Tonnen Benzol wurden beim **Umschlag** und der **Lagerung** von Benzin und Dieselöl an den 3600 Tankstellen, in den diversen Tanklagern und den 2 Raffinerien in der Schweiz emittiert. Davon etwa 30 Tonnen beim Betanken der Autos an den Tankstellen.

Im **Offroad-Bereich** (Geräte Land/Forstwirtschaft sowie Gartenpflege und Hobby, Schifffahrt, Industrielle Fahrzeuge, Baumaschinen, Luftfahrt, Heizölumschlag usw.) wurden ca. 60 bis 90 Tonnen Benzol ausgestossen. Die Auspuff-, Lagerungs- und Umschlags-Emissionen sind zusammengerechnet.

Durch die **Feuerungen** bei den Haushalten (HH), der Industrie (Ind.), dem Gewerbe, der Landwirtschaft und den Dienstleistungen (GLD) wurden ca. 200 Tonnen Benzol emittiert. Der grösste Teil davon (ca. 140 Tonnen) stammt aus den Holzfeuerungen.

Tabelle 1: Benzol-Emissionen in der Schweiz 2000 und 2010

Quelle	Emissionen 2000		Emissionen 2010	
	t/a	%	t/a	%
Auspuff Benzin PW, Li	840	60.0	240	34.3
Auspuff Benzin MR, Mofa	120	8.6	105	15.0
Auspuff Diesel SNF, Li, PW, Bus	80	5.7	50	7.2
Umschlag/Lagerung Benzin, Diesel	70–100	6.1	35–65	5.6
Auspuff/Lagerung/Umschlag von Benzin/Kerosin/Diesel/ Heizöl im Offroad-Bereich. Geräte, Schiffe, Maschinen usw.	60–90	5.3	30–60	6.4
Holzfeuerungen HH, GLD, Ind.	140	10.0	155	22.2
Öl-/Gasfeuerungen HH, GLD, Ind.	60	4.3	65	9.3
Total	1370–1430	100	680–740	100

Aufgrund von bereits beschlossenen Massnahmen werden die Benzol-Emissionen in der Schweiz bis ins Jahr 2010 weiter sinken.

Beim motorisierten Strassenverkehr wird wegen weiter verschärften Abgasvorschriften ein Rückgang von 1040 auf ca. 400 Tonnen prognostiziert. Das sind 57% der verbleibenden, gesamten Emissionen.

Beim Umschlag von Treibstoffen an den Tankstellen sollten die Emissionen wegen verbesserten Rückhalte Technologien (automatische Funktionssicherung, selbst regulierende Systeme) ebenfalls noch deutlich (um ca. 2/3) zurückgehen.

Bei den Tanklagern sind keine neuen Vorschriften vorgesehen. Aufgrund von verbesserten Technologien kann aber mit einem Rückgang der Emissionen um ca. 20% gerechnet werden.

Im Offroad-Bereich sind die Emissionsentwicklungen am schwierigsten zu prognostizieren. Insgesamt wird mit einem Rückgang der Emissionen um ca. 40% gerechnet.

Bei den Feuerungen der Haushalte, der Industrie, dem Gewerbe, der Landwirtschaft und den Dienstleistungen werden die Emissionen in etwa gleich bleiben oder sogar leicht ansteigen. Durch bessere Technologien wären aber hier noch Einsparungen möglich.

Insgesamt werden im Jahr 2010 ca. 680–740 Tonnen Benzol emittiert werden. Das sind etwa 50% der heutigen Emissionen.

3 Immissionen

3.1 Immissionssituation

Die Konzentrationen von Benzol in der Atmosphäre sind abhängig von den Emissionsraten, der Meteorologie und dem chemischen Abbau. Die Verweildauer von Benzol in der Troposphäre beträgt circa neun Tage, an stark belasteten Standorten infolge des rascheren Abbaus ca. ein Tag.

Benzol wird in der Schweiz an knapp 20 Standorten mit unterschiedlichen Messmethoden erfasst (BUWAL 2001). An den höchst belasteten Standorten wurden in den Jahren 2000/2001 Benzol Jahresmittelwerte von etwas über $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen, so zum Beispiel in Basel an der Feldbergstrasse mit $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und in Zug an der Neugasse mit $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Eine mittlere Belastung zwischen 2 und $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurde zum Beispiel in Locarno mit $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, in Solothurn mit $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, in Lugano und Morbio Inferiore mit je $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, in Montreux mit $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sowie in Dübendorf, Basel St. Johann und Stabio mit je $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gefunden. An unbelasteten Standorten liegen die Benzol-Konzentrationen unter $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ so in Grenchen Witi mit $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und in Hagen SH mit $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Zwischen Mitte der 90er Jahre und 2001 haben die Konzentrationen praktisch an allen Stationen um 40–60% abgenommen. So zum Beispiel an der Feldbergstrasse in Basel von 9.5 auf $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, an der NABEL Station Dübendorf von 4 auf $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (siehe Abbildung 1), an der NABEL Station in Tänikon von 2.2 auf $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, am Bellevue in Zürich von 8 auf $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und an der Stampfenbachstrasse in Zürich von 4.7 auf $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die gemessenen Konzentrationen werden durch den Standort der Messstation beeinflusst. So sind die Benzol Werte in der relativ stark befahrenen Strassenschlucht Feldbergstrasse in Basel fast drei mal so hoch als am ca. 500 Meter entfernten, schwächer befahrenen und besser durchlüfteten Standort St. Johann.

Die Begrenzung des Benzol-Gehaltes im Benzin auf 1 Volumen % hat in den Jahren 2000/2001 gegenüber 1999 eine deutliche Reduktion der Belastung gebracht.

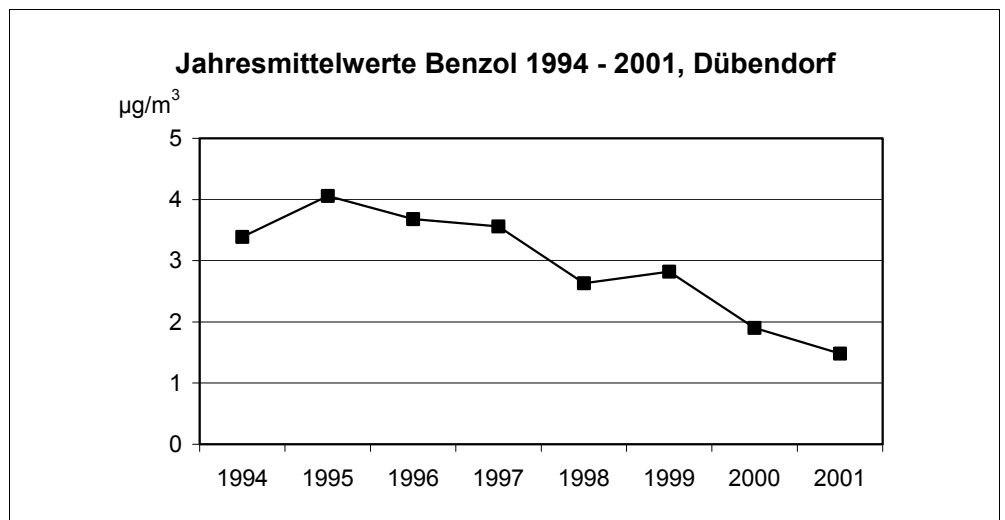


Abbildung 1:
Benzol-Konzentrationen
in Dübendorf (EMPA,
NABEL Station)

In der EU (EU 1998) variieren die städtischen Hintergrundkonzentrationen zwischen 2 und ca. 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jahresmittelwerte 96–98). An einzelnen «Hot spots» wurden 20 bis 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen (Mailand, Rom, Athen). Zwischen 1990 und 2010 wird – je nach Emissionsszenario – mit einer Abnahme der Benzol-Immissionen um 50–70% gerechnet.

3.2 Benzol Messungen – Messmethodik

Benzol wird durch Anreicherung auf einem Adsorptionsmedium aufkonzentriert. Von dem gewählten Medium wird das Benzol anschliessend durch eine geeignete Methode (thermisch oder flüssig) desorbiert und mit Hilfe der Gaschromatographie von den übrigen Kohlenwasserstoffen interferenzfrei getrennt. Die Detektion findet mit Hilfe eines Flammenionisationsdetektors (FID) oder einem anderen geeigneten Detektor (z.B. Massenspektrometer, Photoionisationsdetektor) statt.

Die Messeinrichtung muss in regelmässigen Abständen kalibriert werden. Das mit den Messungen betraute Personal muss eine angemessene Ausbildung haben und laufend die Qualität der Messungen überprüfen sowie eine Plausibilisierung der Messwerte vornehmen (zum Beispiel ein Vergleich mit den Konzentrationen der übrigen Luftschadstoffe an gleichen oder ähnlichen Standorten).

Eine von der obenstehenden Methode abweichende Analysetechnik kann verwendet werden, falls diese gleichwertige Ergebnisse erbringt und insbesondere innerhalb der im Anhang VI der Richtlinie 2000/69/EG genannten Unsicherheiten liegt, so zum Beispiel ein Passivsammler mit integrierender Probenahme über einige Tage (LIFE 98).

Allgemeines:

- Eine Referenzmethode für die Messung von Benzol wird im Moment im Rahmen von CEN entwickelt. Im Moment werden die einzelnen verfügbaren Methoden und Geräte verglichen. Eine Norm ist frühestens im Jahr 2003 zu erwarten.
- Die verschiedenen gebräuchlichen Methoden werden in einem guten Übersichtsartikel dargestellt, wobei der Autor zugleich der Leiter der CEN-Gruppe ist, welche die Norm erarbeitet (Skov 2001).

Eine Übersicht über die Benzol Messungen in der Schweiz zeigt, dass die Datenlage recht gut ist (BUWAL 2001). Zur besseren Abschätzung der Bevölkerungsexposition, als Erfolgskontrolle sowie zur besseren Validierung des Ausbreitungsmodells sind noch ergänzende, punktuelle Messungen besonders in grossen Agglomerationen empfehlenswert. Diese Messungen können zum Beispiel mit geeigneten Passivsammlern durchgeführt werden.

4 Bevölkerungsexposition

Die Exposition der Bevölkerung gegenüber Benzol der Aussenluft wurde mit einem empirischen Ausbreitungsmodell auf der Basis eines Gaussansatzes und unter Verwendung typisch schweizerischer Meteorologie berechnet. Das Modell wurde mit den Daten verschiedener Messstationen validiert (BUWAL 2003, in Vorbereitung). Die folgende Karte (Abbildung 2) zeigt die Benzol-Konzentrationen in der Schweiz für das Jahr 2000:

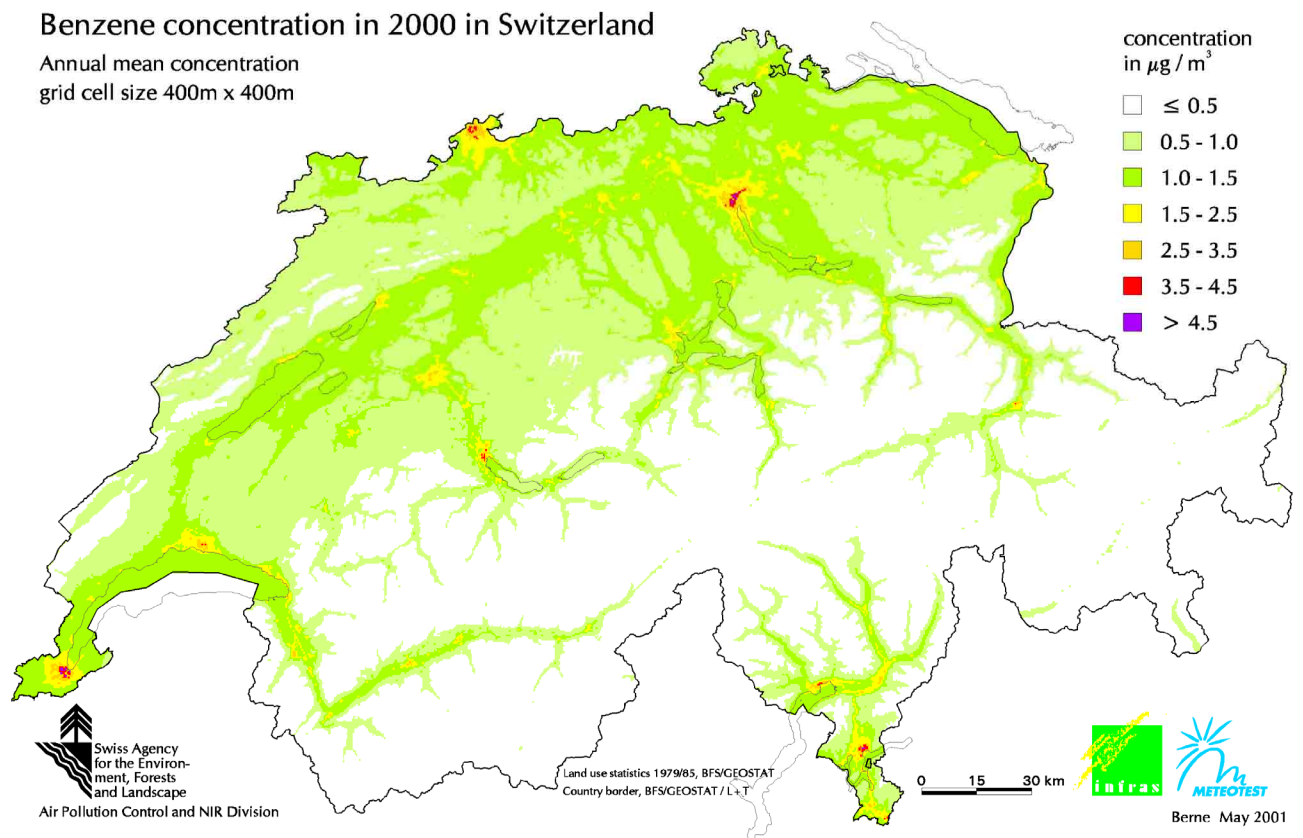


Abbildung 2: Benzol Aussenluft-Konzentrationen in der Schweiz im Jahr 2000

Auf der Grundlage der Immissionen und der Bevölkerungsstatistik wurde der Anteil Bevölkerung den verschiedenen Expositions Kategorien der folgenden Tabelle 2 zugeordnet.

Ca. 1 % der Bevölkerung lebt in Gebieten mit einer durchschnittlichen jährlichen Benzol-Belastung über $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 13% leben in Gebieten zwischen 3 und $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Weit aus der grösste Teil der Bevölkerung, ca. 85 %, wohnt in Regionen mit Aussenluft-Konzentrationen zwischen 1 und $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ca. 2 % leben in Regionen mit Werten unter $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Auf der Basis der modellierten und gemessenen Aussenluft-Konzentrationen und der Bevölkerungsstatistik ergibt sich ein bevölkerungsgewichteter Mittelwert der Benzol-Exposition in der Schweiz von $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel.

Tabelle 2: Benzol Aussenluft-Exposition der Bevölkerung der Schweiz 2000

Aussenluft Exposition in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	% der Bevölkerung
0.0–0.5	0.0%
0.5–1.0	1.6%
1.0–1.5	17.7%
1.5–2.0	38.2%
2.0–2.5	19.8%
2.5–3.0	8.6%
3.0–3.5	5.9%
3.5–4.0	3.3%
4.0–4.5	2.1%
4.5–5.0	1.5%
5.0–5.5	0.8%
5.5–6.0	0.3%
> 6.0	0.1%
	100.0%

Benzene concentration in 2010 in Switzerland

Annual mean concentration
grid cell size 400m x 400m

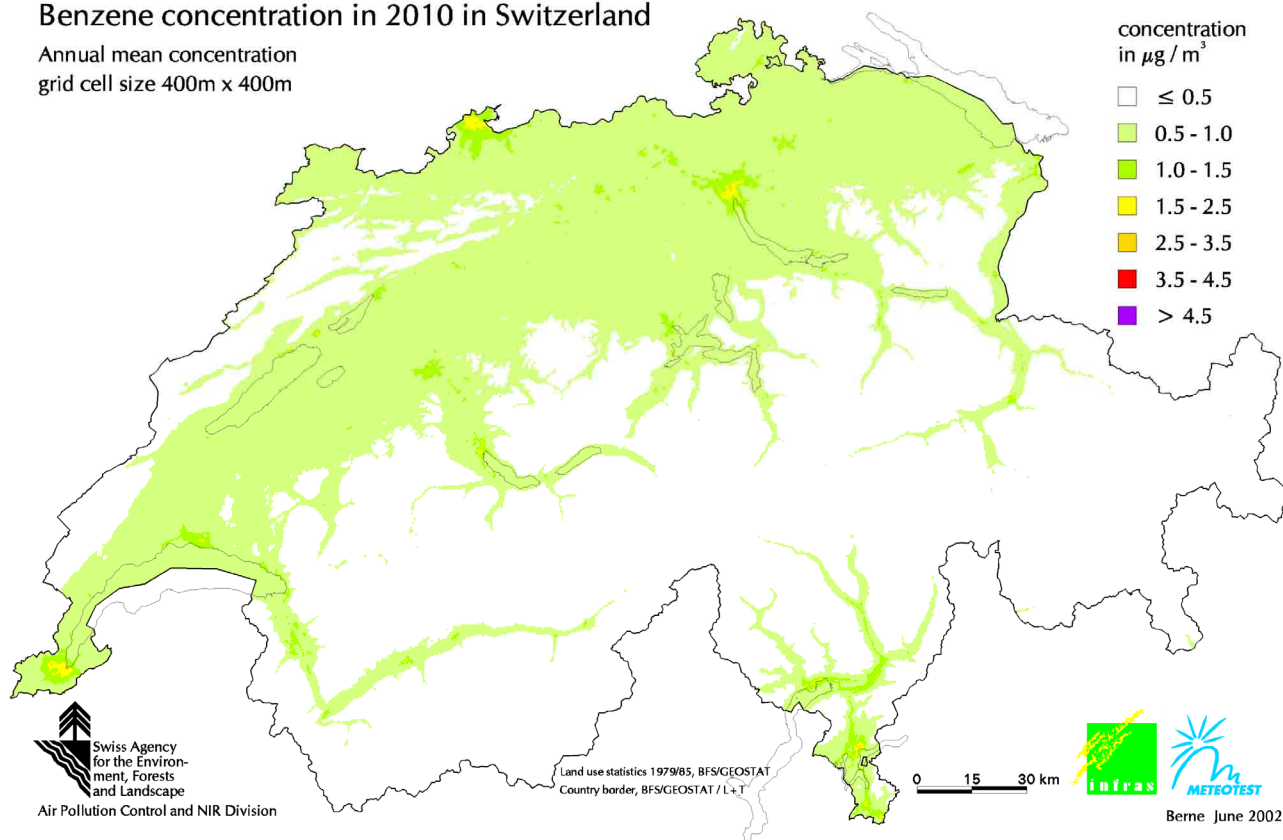


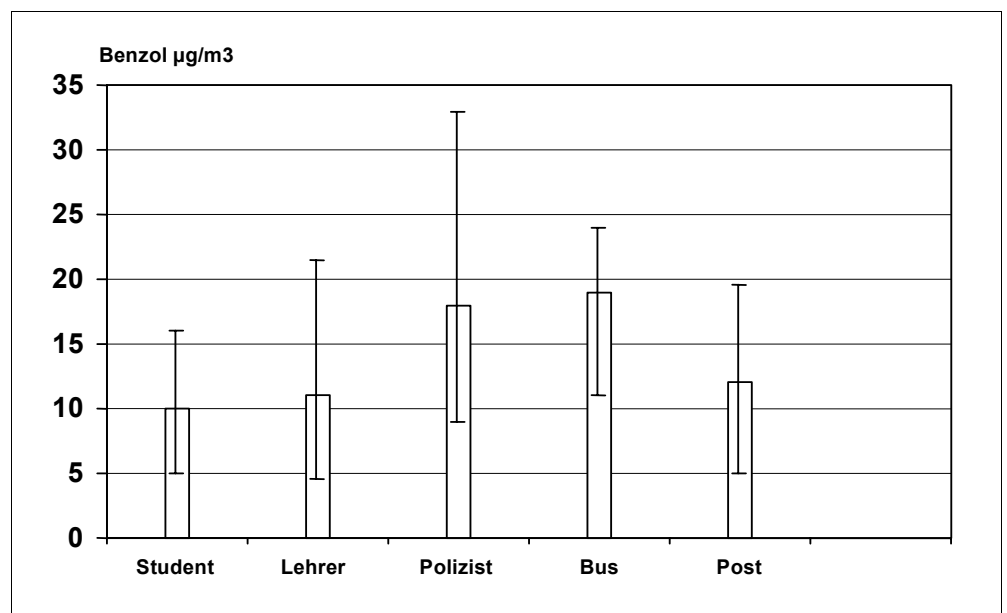
Abbildung 3: Benzol Aussenluft-Konzentrationen in der Schweiz im Jahr 2010

Aufgrund der prognostizierten Reduktion der Emissionen wird die Aussenluft-Exposition der Bevölkerung in den nächsten Jahren weiter sinken und im Jahr 2010 etwa die Hälfte der heutigen Belastung betragen. Dann wird der grösste Teil der Bevölkerung in Regionen mit Aussenluft-Konzentrationen zwischen 0.5 und 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ leben (siehe Abbildung 3).

Wie repräsentativ sind aber Aussenluftmessungen zur Abschätzung der Belastung der Bevölkerung wirklich?

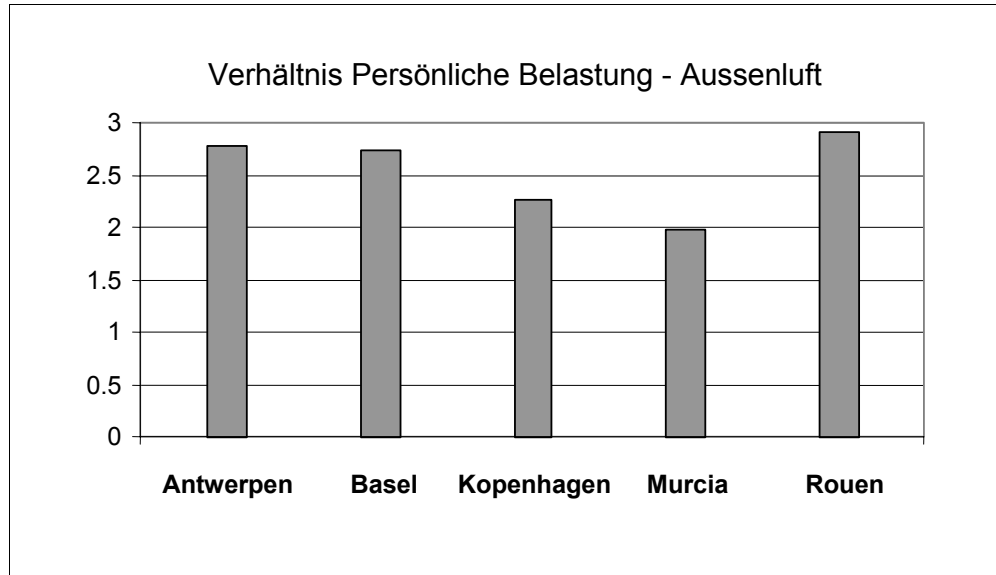
Zur Beantwortung dieser Frage können die Resultate der europäischen Studien EX-POLIS (Jantunen 98) und MACBETH (LIFE 1998) herangezogen werden. In diesen Studien wurden in verschiedenen Städten in Europa die Benzol-Konzentrationen der Aussenluft, der Innenluft sowie die persönliche Belastung einer bestimmten Zahl der Bewohner dieser Städte genau ermittelt. Ein erstes Resultat der Studien zeigt, dass die Benzol-Exposition in Abhängigkeit vom Beruf recht unterschiedlich sein kann und stark schwankt (Abbildung 4).

Abbildung 4:
Benzol-Exposition in
Abhängigkeit vom Beruf
(inkl. Streubereich der
Bestimmungen)



Ein weiteres Resultat ist, dass die durchschnittlichen persönlichen Belastungen der untersuchten Einwohner deutlich höher sind als die in der Aussenluft gemessenen Werte. In Basel (Schweizer 2002) sowie in weiteren mittel- und nordeuropäischen Städten und auch in Murcia ist das Verhältnis 2 bis 3 zu 1. (Abbildung 5). Es wird angenommen, dass zusätzliche, durch Aussenluft Messungen oft nicht direkt erfasste Quellen sehr wichtig sind. Autoabstellplätze, besonders gekapselte wie Garagen und Einstellhallen sowie die Umgebung von Tankstellen bilden lokale Schwerpunkte für Benzol-Emissionen und belasten Anwohner und Benutzer.

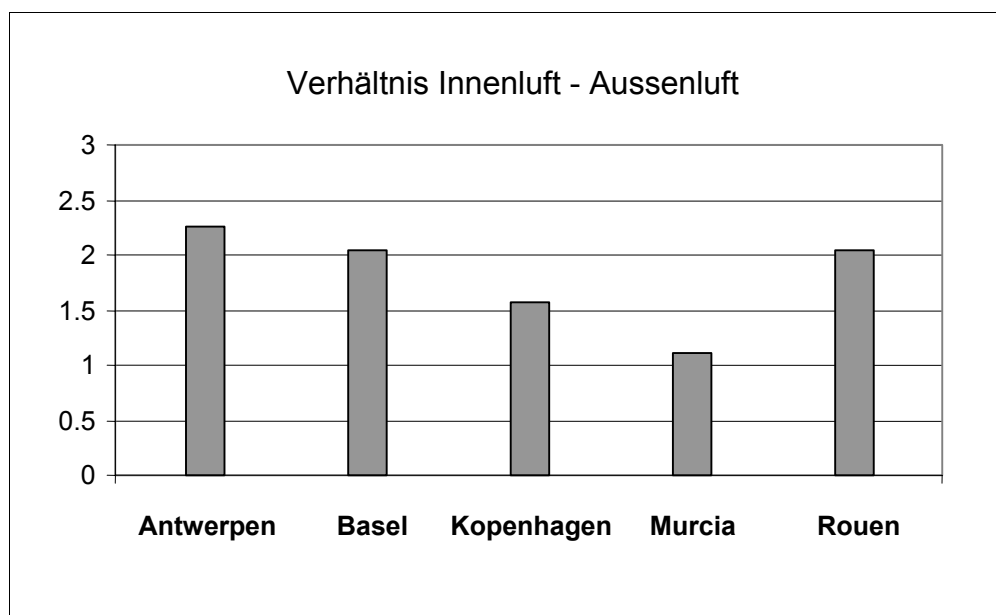
Abbildung 5:
 Persönliche Belastung
 im Vergleich mit der
 Aussenluft-Konzentration
 in 5 Städten in Europa
 (vergleichbar mit Verhält-
 nissen in der Schweiz)



Auch die Aufenthaltsdauer im Auto trägt zu einer erhöhten Belastung bei, da in Fahrzeuginnenräumen hohe Benzol-Konzentrationen auftreten können. In Linienbussen in Deutschland zum Beispiel wurden abhängig von der Verkehrsdichte Konzentrationen zwischen 15 und 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen (Römmelt 1994). Es gibt Studien, welche schätzen, dass etwa ein Drittel der Gesamtaufnahme von Benzol dem Aufenthalt in Fahrzeuginnenräumen anzurechnen ist (Fromme 1995).

In Innenräumen werden oft höhere Benzol-Konzentrationen gemessen als in der Aussenluft (Abbildung 6).

Abbildung 6:
 Verhältnis von Benzol
 Innenraum- und Aussen-
 luft-Konzentrationen in
 5 Städten in Europa



Die Benzol-Belastung in Wohnungen neben Tankstellen war gemäss einer Studie (Berlin, Laue 1994) gut doppelt so hoch wie in Vergleichswohnungen, in Wohnungen über Tankstellen sogar vier mal so hoch. Mit einer gut funktionierenden Gasrückführung kann die Belastung erheblich gesenkt werden. Messungen im Bereich von Grosstankstellen haben ergeben, dass die Benzol-Konzentrationen beim Tankvorgang in Kopfhöhe der Kunden nach Einführung der Gasrückführung um 90% zurückgegangen sind, im Tankstellengelände verringerte sich die mittlere Belastung gleichzeitig um 75% (Reitmeyer 2000).

Sehr hohe Benzol-Konzentrationen werden auch in Einstellhallen gemessen. Die folgende Tabelle 3 zeigt einige Messungen, welche 1999 an verschiedenen Stellen in der Schweiz durchgeführt wurden. Sie zeigen, dass lokal hohe Konzentrationen auftreten können, welche mit zentralen Messstellen nicht erfasst werden, welche aber zur Belastung der Bevölkerung in einem bedeutenden Mass beitragen können. Die Messdauer betrug z.T. 14 Tage, ein Vergleich mit Jahres-Grenz- oder Richtwerten ist nur beschränkt möglich.

Die Messungen machen deutlich, dass die Abluft von Parkgaragen lokale Emissionsschwerpunkte darstellen, deren Relevanz für die Anwohner berücksichtigt werden muss. Die Abluft sollte sicher gefasst und lufthygienisch und aus Sicht des Bevölkerungsschutzes optimiert abgeleitet werden (LRV 1985).

Tabelle 3: Benzol-Konzentrationen an einigen ausgewählten Stellen in der Schweiz und Deutschland

Innenraumbelastungen	Benzol Konz. $\mu\text{g}/\text{m}^3$ *	Bemerkungen
Raumlufte Lebensmitteladen Einkaufszentrum	17	Frischlufansaugung nahe Abluftaustritt Tiefgarage (AFU AR 1999)
Aussenluft Siedlungszentrum	3.5	Mittel über mehrere Monate (AFU AR 1999)
Aussenluftmessungen Siedlungsgebiete Schweiz	2–3.5	(BUWAL 2000/1)
Raumlufte Einstellhallen Verwaltungsgebäude Schweiz/Deutschland	bis zu 300	Schlechte Durchlüftung (AGB 1999, Simon 2001)
Raumlufte Tiefgarage Bürogebäude	94	(Gritsch 2001)
Raumlufte Keller	57	(AGB 1999)
Raumlufte Büros	18–25	(AGB 1999)
Aussenluft Garten	3.3	(AGB 1999)

* Sammeldauer Passivsammler 14 Tage

Es ist davon auszugehen, dass eine Senkung der Aussenluftbelastung auch zu einer Senkung der Innenraumbelastung führt. In Nichtraucherwohnungen stammt das Benzol fast ausschliesslich aus der Aussenluft sowie aus der Abluft von Parkgaragen.

Das Rauchverhalten spielt eine grosse Rolle. Tabakrauch ist innerhalb von Wohnungen praktisch die einzige zusätzliche Innenraumquelle für Benzol. Studien (z.B. Krause 1987) zeigen, dass die Benzol-Belastung in der Wohnung von Rauchern im Vergleich zu Nichtraucherwohnungen 30–50% höher ist (Medianwerte $9.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gegenüber $7.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Benzol-Exposition der Raucher wird durch die direkte Inhalation von Tabakrauch noch weiter erhöht. Die Exposition der Raucher kann 5 bis 10 mal höher sein als die Belastung der Nichtraucher.

In diesem Bericht wird das vom Schadstoff Benzol ausgehende Risiko für die Bevölkerung auf der Basis von Unit Risk Werten berechnet. Unit Risk Werte basieren auf den Resultaten von experimentellen Studien am Tier und Zellkulturen sowie von Studien am Arbeitsplatz. Die Exposition der Allgemeinbevölkerung wird mit diesen Studiendesigns – im Gegensatz zu epidemiologischen Studien, wo die Exposition der Bevölkerung relativ gut bestimmt werden kann – nur ungenügend erfasst. Werden Risikoabschätzungen für die Allgemeinbevölkerung auf der Basis von Unit Risk Werten vorgenommen, muss die Exposition der Bevölkerung zusätzlich bestimmt werden. Aufgrund der Resultate der MACBETH Studie (Städte in Süd-, Mittel- und Nordeuropa, LIFE 1998) schätzen europäische Experten (EU 1998), dass die Exposition der Bevölkerung gegenüber Benzol in ganz Europa im Mittel etwa 1.5 mal so hoch ist, wie der gewichtete Mittelwert der Aussenluft Messungen.

Zur Abschätzung der Bevölkerungsexposition in der Schweiz wurde, auf Grund der etwas höheren Verhältnisse in Basel sowie der Städte in Mittel- und Nordeuropa, der auf der Basis der Aussenluft Konzentrationen ermittelte bevölkerungsgewichtete Mittelwert mit dem Faktor 2 multipliziert. Der bevölkerungsgewichtete Mittelwert der Benzol-Exposition in der Schweiz beträgt somit (1.9×2) ca. $3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel.

5 Auswirkungen und Risikobewertung

5.1 Aufnahme, Stoffwechsel, toxikologische Wirkung

Der Hauptaufnahmepfad für Benzol ist bei der Allgemeinbevölkerung die Inhalation. Benzolhaltige Lebensmittel, d.h. der Weg über den Magen-Darmtrakt spielt nach heutigen Kenntnissen eine vernachlässigbare Rolle. Bei direktem Umgang mit Benzol kann der Stoff auch durch die Haut resorbiert werden.

Benzol ist fettlöslich, es wird im Plasma an Lipoproteide gebunden. Es passiert leicht die Zellwände und auch die Plazenta. Ein Teil des aufgenommenen Benzols wird am Ende der Exposition wieder abgeatmet, ein Teil wird von fetthaltigen Geweben wie z.B. dem Knochenmark gespeichert. Die Metabolisierung und Ausscheidung erfolgt zum grössten Teil über die Leber, ein kleinerer Teil wird über die Niere ausgeschieden. Die Benzol-Exposition kann nachgewiesen werden durch Bestimmung der Benzol Konzentration in der Ausatemluft, im Blut oder durch Bestimmung der Abbauprodukte trans,trans-Muconsäure oder S-Phenylmerkaptursäure im Urin.

In höheren Konzentrationen werden akut die Augen und Atemwege gereizt, das Zentralnervensystem deprimiert (Schläfrigkeit, Verwirrung, Ataxie, Arrhythmien, Bewusstlosigkeit), was zum Tod durch Erstickung, Atemstillstand oder Herzstillstand führen kann. Akute Vergiftung sind im allgemeinen reversibel.

Benzol wirkt toxisch auf alle drei Stammlinien der Blutbildung, Erythrozyten, Leukozyten und Plättchen. Im Ames Salmonella Test ist Benzol nicht mutagen. Es produziert aber in vitro und in vivo Chromosomenschäden. Vermutlich wirkt es auf die DNS der pluripotenten Stammzellen und der Stammzellen der Lymphozyten.

Nach chronischer Benzol-Belastung kann sich deshalb eine Panzytopenie (reversibel) oder eine aplastische Anämie entwickeln. Panzytopenie ist der Mangel, aplastische Anämie das gänzliche Fehlen der Produktion von roten und weissen Blutkörperchen und Blutplättchen. Die aplastische Anämie entwickelt sich häufig zu einer Leukämie weiter. Die Leukämie kann aber auch direkt, ohne vorgängige aplastische Anämie entstehen.

Der IDLH-Wert (Immediately Dangerous to Life and Health) wird mit 3000 ppm angegeben, eine unmittelbare Lebensgefährdung tritt ab etwa 7000 ppm ein, der OSHA-Wert (Occupational Safety and Health Administration) zum Schutz vor Krebs (Leukämien) mit 1 ppm mit einer Spitzenbegrenzung von 5 ppm.

Die IARC hat Benzol als eindeutiges Kanzerogen klassifiziert (Gruppe I).

Der MAK-Wert (Maximale Arbeitsplatz Konzentration) liegt bei 1 ppm= 3.25 mg/m³. Da Benzol als Kanzerogen gilt, muss die Exposition so niedrig wie möglich gehalten werden.

5.2 Epidemiologische Studien über das Krebsrisiko

Insgesamt gilt die Krebs erregende Wirkung von Benzol für Leukämien in epidemiologischen Studien als gesichert. Dabei werden nicht nur die eigentlichen Leukämien (hämatopoetische Neubildungen) sondern auch bösartige Neubildungen der lymphatischen Organe (Lymphome) einbezogen. (Savitz 1997, IARC 1987: Stoffklasse 1, genügend Evidenz für Kanzerogenität bei Menschen). Kohortenstudien zeigen, dass Benzol exponierte Personen am Arbeitsplatz ein ca. 4–8 mal so hohes Risiko tragen, an Leukämien zu erkranken als nicht speziell exponierte Personen.

Arbeitsmedizinische Studien

Aus Tierstudien und Studien mit menschlichen Zellen ging hervor, dass Chromosomenaberrationen, Schwesterchromatidaustausch und Mikronuklei in Lymphozyten nach Benzol-Exposition auftreten. Benzol ist daher eindeutig mutagen. Die Kanzerogenität wurde vor allem bei Benzol exponierten Arbeitern beobachtet.

Die frühen Studien stellten fest, dass Arbeitende in petrochemischen Betrieben, in der Lederverarbeitung, Gummiindustrie und mit Lösungsmittel Exposition häufiger an Leukämien erkrankten als die Durchschnittsbevölkerung. Vielfach waren die Betroffenen aber nicht nur Benzol, sondern einer Vielzahl von chemischen Stoffen ausgesetzt. Probleme bot und bietet die genaue Bestimmung der Exposition am Arbeitsplatz, welche zur Abschätzung einer Dosis-Wirkungsbeziehung und der Extrapolation der Daten auf geringer belastete Bevölkerungsgruppen nötig ist. Drei Studien werden am häufigsten zitiert:

Die am häufigsten zur Ableitung von Effektschätzern verwendete Studie ist diejenige an der sogenannten Pliofilm-Kohorte. Sie bestand aus 1212 Männern, welche von 1936–75 in der Produktion einer Schicht von Gummihydrochlorid beschäftigt waren, wobei grosse Mengen von Benzol als Lösungsmittel benötigt wurden (Rinsky 1987, Wong 2000). Die letzte Nachkontrolle hielt 111 Krebstodesfälle fest, wovon 14 an Leukämien (SMR 3.6, CI 2–6) mit einer engen Assoziation zur kumulierten Exposition. Je nach Annahme der Exposition und der Form der Dosis Wirkungsbeziehung wurden daraus verschiedene Effektschätzer abgeleitet. Die neusten Schätzungen ergaben 0.3–1.3 zusätzliche Leukämiefälle für 1000 Arbeiter bei einer 45 jährigen Exposition mit $3.2\text{mg}/\text{m}^3$.

Die chinesischen Studien an 74'800 Benzol exponierten Arbeitern und 35'800 Kontrollpersonen (Hayes 1996, Yin 1996), welche über 15 Jahre nachkontrolliert wurden, ergab gehäufte Malignome der lymphatischen und hämatopoetischen Gewebe und Lungenkrebs.

Eine Metaanalyse aller Kohortenstudien der Arbeiter in der Petroleumindustrie in den USA und Grossbritannien (Raabe 1996), bei der Daten von 208'000 Arbeitern mit eingeschlossen waren, ergab kein statistisch erhöhtes Risiko für akute myeloische, akute lymphatische oder chronisch lymphatische Leukämie. Das Problem der metaanalytischen Evaluation solcher zellspezifischen Leukämien sind die Vergleichbarkeit der Studien, die immer noch relativ kleinen Fallzahlen, die Unschärfe

bzw. verschiedenen Definitionen der Diagnosen usw. Bei der Evaluation der in dieser Metaanalyse verwendeten Einzelstudien treten weitere Probleme zu Tage wie der healthy worker effect (Austritt von kranken Arbeitern aus der Firma und der Kohortenstudie) und die Abhängigkeit des Effektes von der Wahl der Vergleichsgruppe.

Bemerkenswert ist die unterschiedliche Wirkung je nach Geschlecht und die Vielfalt der Zielorgane, was beides auch in Tierstudien beobachtet wurde. Eine neue pharmakokinetische Studie, welche den höheren Blut/Luft Partitionskoeffizient, die grössere Metabolisierungsrate von Benzol und den höheren Körperfettanteil bei Frauen berücksichtigt, lässt schliessen, dass Grenzwerte nicht nur aus Studien an Männern abgeleitet werden sollen, da bei Frauen bei gleicher Belastung stärkere Effekte zu erwarten sind (Brown 1999).

Bevölkerungsstudien

Die Zusammenhänge zwischen Benzol und Krebs bzw. Leukämie wurden bisher v.a. mit Fall-Kontrollstudien an Kindern untersucht. Allerdings wurde als Belastungsindikator meistens die Verkehrsdichte gewählt und nur einmal die Benzol-Immissionen bestimmt.

Vier kleinere Fall-Kontrollstudien an Kindern mit Krebs und oder mit Leukämie hatten Zusammenhänge mit der Verkehrsdichte am Wohnort der Kinder ergeben, sie hatten aber keine Benzolmessungen durchgeführt, sondern stützten sich auf teilweise ausgeklügelte Verkehrsbelastungsmodelle und/oder auf NO₂ als Indikatorsubstanz. In Situationen, wo die Luftverschmutzung vor allem durch Emissionen des Verkehrs verursacht wird, sind NO₂ und Benzol allgemein recht gut miteinander korreliert.

Eine grosse dänische Studie konnte diesen Zusammenhang nicht bestätigen (Raaschou-Nielsen 2001). Die Verkehrsdichte am Wohnort der Mutter in der Schwangerschaft oder des Kindes war weder mit Leukämien noch Gehirntumoren noch Lymphomen assoziiert, hingegen die Benzol-Belastung und die NO₂-Belastung in der Schwangerschaft mit späteren Lymphomen beim Kind, v.a. mit Hodgkin-Lymphomen.

5.3 Andere gesundheitliche Auswirkungen

Auch bei den Bevölkerungsstudien zu den nicht bösartigen langfristigen Auswirkungen dient Benzol meist als Indikator für die Verkehrsbelastung. So erwies sich in Leipzig Benzol als besserer Indikator für die Verkehrsbelastung als etwa NO₂, Partikel oder CO (Fritz 2001). Umgekehrt war aber die Verkehrsbelastung an der Wohnadresse in einer dänischen Studie (Raaschou-Nielsen 1997) ein recht ungenauer Indikator für die Benzol-Belastung vor der Haustüre. Die persönlichen Benzol Werte von Kindern waren hoch mit den Werten vor der Haustür korreliert und Autofahren hatte ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf die persönliche Benzol-Belastung.

In einer grossen Schulkinderstudie mit über 5400 Kindern in Dresden (Hirsch 1999) betrug die durchschnittlichen Belastung von Benzol $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Spannweite $1.9\text{--}8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), berechnet für die Wohnadresse aus einem Messnetz mit 1 km Maschenweite. Pro 1 Mikrogramm höhere Benzol-Belastung war chronischer Husten um 15% und Bronchitis im vergangenen Jahr um 11% häufiger. Diese Wirkungen sind wohl der ganzen Mischung von Autoabgasen zuzuschreiben, nicht Benzol allein.

5.4 Effektschätzer für die Wirkung bezüglich Leukämie und daraus abgeleitete Richtwerte

Als so genanntes Unit Risk wird das zusätzliche Risiko für eine Leukämie definiert, welches eine Person eingeht, wenn sie ein Leben lang $1 \mu\text{g}$ Benzol pro m^3 inhaliert. Diese Unit Risks wurden von verschiedenen Gremien aufgrund von Daten der oft gleichen, oben erwähnten arbeitsmedizinischen Studien abgeleitet. Den Unit Risk Berechnungen werden aber unterschiedliche Modelle zugrunde gelegt. Die Risikoabschätzung beruht meistens auf einer linearen Risikoextrapolation von Studienergebnissen an Arbeitern auf die weniger belastete Allgemeinbevölkerung. Einige Organisationen verwenden auch Berechnungsmodelle unter der Annahme eines Schwellenwerts. Die Weltgesundheitsorganisation WHO und die Umweltbehörde der USA EPA verwenden das lineare Extrapolationsmodell ohne Schwellenwert, was mit dem genotoxischen Wirkungsmechanismus von Benzol und dem Vorsorgeprinzip begründet wird. Solche Extrapolationen sind notwendig, weil das Leukämie Risiko der Allgemeinbevölkerung durch eine Benzol-Belastung von einigen Mikrogramm mit Hilfe von epidemiologischen Studien nicht erfasst werden kann. Auf der Basis dieser Unit Risks und einem maximal akzeptablen Risiko werden von einigen Ländern Richtwerte, Zielwerte oder Grenzwerte abgeleitet, um das Krebsrisiko für die Allgemeinbevölkerung zu begrenzen.

Tabelle 4: Unit Risks, Richt- und Grenzwerte verschiedener Organisationen und Länder

US EPA (1998)	Unit Risk: $2.2\text{--}7.8 \times 10^{-6}$
WHO (2000)	Unit Risk: 6×10^{-6} , geometrisches Mittel der Risikoschätzer ($4.4 \times 10^{-6}\text{--}7.5 \times 10^{-6}$).
Deutschland, LAI <i>Länderausschuss für Immissionsschutz (1992)</i>	Unit Risk: $6\text{--}20 \times 10^{-6}$ Empfohlen 9×10^{-6} bzw. Zielwert von $2.5 \mu\text{g Benzol}/\text{m}^3$ zur Begrenzung Gesamtrisikos durch krebserzeugende Luftschadstoffe auf 1: 2'500
Schweden (1993)	Jahresmittelwert $1.3 \mu\text{g Benzol}/\text{m}^3$ als low risk guideline value
Niederlande (1993)	Maximal akzeptierbarer Jahresmittelwert $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Zielwert $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$
UK 1994	Jahresmittelwert $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (5ppb), Zielwert $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1ppb)
EU 2000	Jahresmittelwert $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, einzuhalten bis 2010

5.5 Risikoabschätzung für die gesamte Bevölkerung in der Schweiz

Auf der Basis eines bevölkerungsgewichteten Mittelwerts der Benzol-Exposition von $3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (gewichteter Jahresmittelwert 2000), einer Bevölkerung von 7.1 Millionen Einwohner und dem WHO Unit Risk von 6×10^{-6} (6 Leukämiefälle pro Mio. Einwohner und pro $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) besteht in den nächsten 70 Jahren für ca. 162 Personen in der Schweiz das Risiko, an Leukämie – verursacht durch Benzol – zu erkranken (Berechnung: $3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 7.1 \text{ Mio.} \times 6 \text{ Fälle pro Mio. und pro } \mu\text{g}/\text{m}^3$). Das sind ca. 2 Fälle in der Bevölkerung der Schweiz pro Jahr. Wenn wir den Streubereich des WHO Unit Risk Schätzers (4.4×10^{-6} – 7.5×10^{-6}) und die Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung (+/- 20%) in die Berechnungen einbeziehen, ergibt sich ein Bereich von 95 –245 Fällen in 70 Jahren, was 1–3 Fällen pro Jahr entspricht. Dadurch entstehen externe Kosten zwischen 10 und 30 Millionen Franken pro Jahr (Yetergil 1998). Das zusätzliche Lebenszeit-Risiko beträgt in unserem Land somit ca. $23/1'000'000$ d.h. 23 Leukämiefälle pro Million Einwohner (Berechnung: 162 Fälle/ 7.1 Mio.). Es liegt damit heute rund 20 mal über dem von der EKL als maximal zulässig erachteten Risiko von $1/1'000'000$.

6 Reduktionsstrategien

6.1 Schutzziel – Gesetzliche Grundlagen

Das Schweizerische Umweltschutzgesetz (USG) verlangt, dass der Mensch und seine Umwelt gegen schädliche und lästige Einwirkungen von Luftverunreinigungen geschützt werden (Art. 11 in Verbindung mit Art. 13 und 14 USG). Benzol als Humankarzinogen der Klasse 1 (Einschätzung IARC – WHO) ist für den Menschen bereits in kleinsten Dosen schädlich, eine unschädliche Schwellenkonzentration konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Die Immissionen sind deshalb auch bei kleinsten Konzentrationen übermässig. Das USG enthält keine ausdrückliche Antwort auf die Frage, ob bzw. wie Immissionsgrenzwerte festzulegen sind, wenn sich keine Wirkungsschwelle beobachten lässt.

Ein Rechtsgutachten, welches im Auftrag des BUWAL erarbeitet worden ist (Brunner 2000), untersucht die Vorschriften über die Festlegung von Immissionsgrenzwerten zuerst anhand verschiedener im USG immanenter Elemente. Unter zusätzlicher Berücksichtigung materienspezifischer Elemente kommt es zum Schluss, dass der verfassungsmässige Schutzanspruch auf Nichtgefährdung durch anthropogene Einwirkungen durch Einzelsubstanzen bei einem Lebenszeit-Risiko von $1/1'000'000$ (10^{-6}), d.h. 1 Leukämiefall pro Million Einwohner, gewährleistet ist. Ein solches Risiko ist kaum nachweisbar und von Null praktisch nicht zu unterscheiden. Als Schutzziel zu betrachten ist deshalb bei kanzerogenen Luftschadstoffen, bei denen – wie beim Benzol – keine Wirkungsschwelle nachgewiesen wurde, ein Risiko von höchstens $1/1'000'000$.

Das von der Benzol-Belastung ausgehende heutige Risiko für die Bevölkerung in der Schweiz liegt rund 20 mal über dem Schutzniveau von $1/1'000'000$. Die Emissionen und damit auch die Immissionen von Benzol müssen weiter gesenkt werden. Rein rechnerisch gesehen müssten auch die Emissionen gegenüber dem Stand von 2000 um rund den Faktor 20 gesenkt werden, das heisst auf ca. 70 Tonnen pro Jahr gegenüber ca. 1400 Tonnen des Jahres 2000. Da aber nicht nur die durchschnittlichen Aussenluft-Konzentrationen zur Belastung der Bevölkerung beitragen, sondern auch die Aufenthaltsdauer und das Verhalten bezüglich «Hot spots», müssen zur Absenkung des Risikos nicht nur die Emissionen vermindert werden. Eine verbesserte Abluftfassung mit einer lufthygienisch optimierten Ableitung oder ein vermehrtes Lüften von Wohnungen, in denen geraucht wird, senken das Risiko ebenfalls. Zur Erreichung eines USG konformen Schutzniveaus sollte es genügen, wenn die gesamten Benzol-Emissionen in der Schweiz längerfristig rund 100 (70–140) Tonnen pro Jahr nicht übersteigen. Zwischen 2000 und 2010 wird aufgrund von schon vorgesehenen Massnahmen ein Rückgang der Emissionen um rund 50% – auf ca. 700 Tonnen pro Jahr – vorausgesagt. Zur Erreichung des Schutzniveaus und des Schutzziels von höchstens rund 100 Tonnen pro Jahr müssen aber noch zusätzliche Massnahmen ins Auge gefasst werden.

6.2 Erwägungen zum Benzol-Grenzwert der EU

Die EU hat einen Benzol-Grenzwert für die Aussenluft von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert) festgelegt, welcher von den Mitgliedstaaten in nationales Recht umgesetzt und bis 2010 bzw. 2015 eingehalten werden muss. Bei der Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates der EU über Grenzwerte für Benzol in der Luft handelt es sich um Mindestanforderungen. Mitgliedsstaaten dürfen strengere Werte und frühere Einhaltungstermine festlegen, nicht aber schwächere Werte und spätere Termine.

Die EKL will in der aktuellen Situation nicht einen Grenzwert für Benzol vorschlagen, wie ihn die EU erlassen hat, und begründet ihren Standpunkt mit den folgenden Argumenten:

Immissionsseite Ein Immissions-Grenzwert für Benzol von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ genügt den rechtlichen Anforderungen nicht: Er könnte den von der Bundesverfassung vorgegebenen Schutzanspruch des USG nicht einlösen und wäre deshalb weder gesetz- noch verfassungskonform.

Emissionsseite Ein solcher Grenzwert würde auch kaum zusätzliche, verschärfte Massnahmen zur Reduktion der Belastung auslösen. Der Schutz von Mensch und Umwelt kann und soll aufgrund der bestehenden Rechtslage sichergestellt werden: Zu verbessern sind erstens die Ausschöpfung des technisch Machbaren und zweitens die Konsequenz im Vollzug der LRV.

Schliesslich erweist sich auch der mit der Einführung eines Grenzwertes verbundene Messaufwand zur Überwachung der Luftbelastung als unverhältnismässig gross.

Indessen bleibt festzuhalten, dass die heute in der Schweiz beobachteten Benzol-Immissionen schädlich bzw. übermässig im Sinne der LRV sind und dass deshalb eine weitere Verminderung der Emissionen unbedingt anzustreben ist.

6.3 Strategie

Das heute vom Schadstoff Benzol ausgehende Risiko für die Bevölkerung in der Schweiz liegt ca. 20 mal über dem USG konformen Zustand. Zum Schutz der Bevölkerung und aus präventivmedizinischen Gründen ist es deshalb erforderlich, die Emissionen von Benzol gegenüber dem Stand von heute deutlich – auf maximal 100 Tonnen pro Jahr – weiter zu senken und so gering wie möglich zu halten. Die Sicherheitsstrategien zum Schutz vor Umweltkanzerogenen in der Atemluft beruhen auf der Vermeidung oder Verminderung von Emissionen Krebs erzeugender Substanzen. Dies ist im sogenannten Minimierungsgebot gemäss Ziffer 82, Anhang 1 LRV für stationäre Anlagen festgehalten, gilt aber auch für mobile Quellen (Art 11 Abs. 3 USG).

Insbesondere weiter zu senken sind die Benzol-Emissionen und Belastungen durch:

- benzinbetriebene Personenwagen
- die Lagerung und beim Umschlag von Benzin (Tankstellen, Tanklager)
- benzinbetriebene 2-Takt-Motoren mit hohen Spülverlusten bis 35% im Offroad-Bereich (Gartenpflege und Hobby, Forst- und Landwirtschaft, Schifffahrt, usw.) und auch 4-Takt-Motoren in diesem Bereich
- benzinbetriebene 2-Takt-Motoren mit hohen Spülverlusten im Onroad-Bereich (Scooter, kleine Motorräder)
- eine vollständige und sichere Abluftfassung von Einstellhallen und Garagen mit lufthygienisch optimierter Abluftleitung
- Holzfeuerungen
- industrielle Fahrzeuge
- den Umschlag von Heizöl, Diesel, Kerosin

6.4 Mögliche Reduktionsmassnahmen

1. Vollzug Bund

- Mit den EURO 4 Abgasnormen (ab 2005/6) werden die gesamten HC und somit auch der Benzol-Gehalt der PW Abgase gegenüber den heute gültigen EURO 3 Normen um weitere 50% gesenkt. Übermässig viel Benzol wird während der Kaltstartphase und bei erhöhten Geschwindigkeiten emittiert. Technisch wäre es möglich, den Katalysator vorzuheizen und/oder die Abgase während einer Minute in einem Kanister zu sammeln und über den Katalysator entweichen zu lassen, wenn er warm ist. Die Autoindustrie arbeitet an diesen Verfahren und es scheint möglich, dass sie ab 2005/6 mit Einführung der EURO 4 Normen zu Zug kommen. Der Bundesrat beabsichtigt, diese Normen im Gleichschritt mit der EU übernehmen.
- Ab 1. Januar 2000 darf in Schweiz nur noch Benzin mit einem Benzol-Gehalt von max. 1 Volumen % eingeführt und abgegeben werden. Durch die Senkung des Benzol-Gehalts von ca. 2.8 Vol. % (Stand 1999) auf knapp 1 Vol. % wurden sowohl die Benzol-Emissionen wie auch die Immissionen messbar reduziert. Obwohl die Benzol-Auspuff-Emissionen nicht nur vom Benzol- sondern auch vom Aromatengehalt des Benzins abhängig sind, würde eine weitere Senkung des Benzol-Gehalts im Benzin auch die Emissionen weiter senken. Der Bundesrat hat beschlossen, die EU Treibstoffnormen zeitgleich auch in der Schweiz zu realisieren. Nachdem der Benzol-Gehalt im Benzin erst kürzlich gesenkt wurde, ist eine weitere Senkung zur Zeit aber nicht geplant.
- Bei den Holzfeuerungen und anderen Feststoff-Feuerungen sind die Benzol-Emissionen stark mit den Kohlenmonoxid-Emissionen korreliert. Namhafte Benzol-Emissionen (1–10 mg/m³) treten nur bei hohen Kohlenmonoxid Emissionen über 1000 mg/m³ Abgas auf. Betroffen davon sind kleine Öfen, die mit stückigem Holz oder Kohle betrieben werden. Bei der nächsten LRV-Revision wird zu prüfen sein, wie die Verbrennungsqualität bei diesen Kleinanlagen verbessert werden kann. Die Schweiz könnte z.B. vorschreiben, dass Anlagen nur in Verkehr gebracht werden dürfen, wenn sie bei der europäischen Typenprüfung nach

CEN die Anforderungen nach Klasse 3 erfüllen (strengste Anforderungsklasse bezüglich Emissionen).

2. Vollzug Kantone

- Gemäss LRV müssen Tankstellen so ausgerüstet und betrieben werden, dass beim Betanken von Fahrzeugen höchstens 10% der in der Verdrängungsluft enthaltenen organischen Stoffe emittiert werden. Dazu ist eine gute, sachgerecht gewartete Gasrückführtechnik erforderlich. Gemäss Cercl' Air (Stand Januar 2002) müssen allerdings noch rund 35% der gemessenen Zapfsäulen beanstandet werden, bei einzelnen Systemen sogar bis zu 50%. Besorgniserregend ist der hohe Anteil von Totalausfällen (bis zu 20%). In der Praxis werden im Schnitt eher 50% statt der geforderten 10% der VOC emittiert. Der Cercl' Air hat daher Anfang 2001 (Cercl' Air 2001) eine verschärfte Vollzugsempfehlung zur Gasrückführung bei Benzintankstellen herausgegeben, welche in den Kantonen seitdem umgesetzt wird. Eine weitere Verbesserung der Emissionssituation ist durch den Einsatz von neuen Komponenten zu erwarten, welche die Funktion der Gasrückführung kontinuierlich überwachen oder regeln, und welche somit als neuer Stand der Technik in den Vollzug einbezogen werden könnten. Im Sinne des Verhältnismässigkeitsprinzips ist ein konsequenter Vollzug der geltenden Vorschriften der LRV (BUWAL 2001) einer allgemeinen Verschärfung der Anforderungen vorzuziehen.
- Eine Verschärfung der Emissionsgrenzwerte der LRV für Benzol ist bei der nächsten LRV Revision vorgesehen (voraussichtlich 2004). Benzol wird dann anlog dem Entwurf zur neuen TA Luft klassiert. Der maximal zulässige Benzol-Gehalt im Abgas wird von 5 mg/m^3 auf 1 mg/m^3 gesenkt ab einem Massenstrom von 2.5 g/h anstatt bisher 25 g/h . Dies entspricht etwa der heutigen LRV Klasse 2 und widerspiegelt das technisch und betrieblich mögliche und wirtschaftlich tragbare. Die Kantone werden dann diese LRV-Vorgabe vollziehen.
- Abluftabführung bei Garagen: Die Abluft von Einstellhallen und Garagen bilden lokale Schwerpunkte für Benzol-Emissionen. Zum Schutz vor Belastungsspitzen im Umfeld von Parkieranlagen ist deshalb auf eine sichere Abluftfassung (Unterdruck) und eine lufthygienisch optimierte Abluftableitung, ausserhalb der gebäudebedingten Turbulenzzone, zu achten. Allenfalls sind entsprechende Bauvorschriften zu erlassen oder anzupassen. Grundlage dafür bietet Art. 6 LRV, wonach die Abluft an der Quelle möglichst vollständig zu fassen und so abzuleiten ist, dass übermässige Immissionen vermieden werden.

3. Verbrauchsarme Mobilität

- Beim Kaltstart sind die Benzol-Emissionen hoch. Das Vermeiden von kurzen Fahrten senkt die Belastung der Atemluft mit Krebs erzeugendem Benzol. Jede achte Autofahrt ist höchstens einen Kilometer lang, 34% der Autofahrten sind nicht länger als 3 Kilometer. Nur 30% der Autofahrten sind 10 Kilometer oder länger. Kurze Distanzen sollen zu Fuss, mit dem Fahrrad, Inline Skates, Kickboards usw. zurückgelegt werden; das fördert die eigene Gesundheit und schützt die Gesundheit der Mitmenschen und die Umwelt. Das Benutzen des umweltfreundlichen öffentlichen Verkehrs (z.B. Dieselbusse mit Partikelfiltern, Elektrobusse, Bahn) für kurze und auch längere Distanzen entlastet die Atemluft von Schadstoffen.

- Benzinmotoren emittieren bei hohen Tempi übermässig viel Benzol. Wenn die Geschwindigkeitslimiten auf Autobahnen, auf Hauptstrassen und rund um die Agglomerationen eingehalten werden, sinkt die Benzol-Belastung entlang dieser Strassen und in den Agglomerationen.
- Kleinmotorräder mit 2-Takt-Motoren und hohen Spülverlusten emittieren übermässig viel Benzol. Wenn möglich sollten Scooter mit Elektromotoren oder mit 4-Takt-Motoren und (geregelten) Katalysatoren verwendet werden. Beim Fahren mit 2-Takt-Motoren sollte aromatenfreies Gerätebenzin verwendet werden.
- Aromatenfreies Gerätebenzin (Alkylatbenzin) enthält weniger als 0.1% Benzol und kann die Benzol-Emissionen von Geräten in den Bereichen Gartenpflege und Hobby, Land- und Forstwirtschaft und bei der Schifffahrt usw. deutlich senken. Das schützt Menschen bei der Arbeit und in der Freizeit. Der Einsatz von Elektrogeräten ohne Abgasemissionen, besonders im Bereich Gartenpflege und Hobby, ist wenn möglich vorzuziehen.
- Beim Gebrauch von 2-Takt-Motoren sollte die Verwendung von aromatenfreiem Gerätebenzin obligatorisch werden. Aromatenfreies Gerätebenzin sollte gleich teuer sein wie 2-Takt-Motorenbenzin.

**4. Massnahmen im
Offroad-Bereich**

**5. Massnahmen im
Innenraum-Bereich**

- Wohnungen, in denen geraucht wird, sind vermehrt zu lüften.
- Bei Wohnungen im Einflussbereich von Fahrzeugabstellrichtungen ist auf eine vollständige Erfassung und sichere Ableitung der Fahrzeug-Emissionen zu achten.
- Da bei Wohnungen in der Nähe von Tankstellen die Benzolbelastung hoch sein kann, sind speziell bei Tankstellen in der Nähe von Wohnungen die LRV-Vorschriften strikte einzuhalten.

7 Beurteilung der Benzol-Problematik

Benzol ist ein Krebs erregender Luftschadstoff der Klasse 1. Für diese Stoffe wurde bisher keine Schwelle nachgewiesen, unterhalb derer keine Gefahr für die Gesundheit besteht. Benzol-Immissionen sind deshalb immer als schädlich und lästig im Sinn von Artikel 11 Absatz 3 des Umweltschutzgesetzes (USG) anzusehen. Die Benzol-Immissionen, resp. die Emissionen müssen weiter reduziert werden.

Die heutige Benzol-Belastung in der Schweiz verursacht ein Leukämie-Risiko für die Bevölkerung von rund 160 Fällen in 70 Jahren, d.h. von rund 2 Fällen pro Jahr. Von der EKL und auch international wird für Krebs erregende Schadstoffe ein zusätzliches Lebenszeit-Risiko von höchstens 1/1'000'000 als Schutzziel anerkannt (Einzelsubstanz-Bewertung). Für die Schweiz bedeutet das 7 Fälle in 70 Jahren. Ein Rechtsgutachten hat gezeigt, dass der verfassungsmässige Schutzanspruch der Bevölkerung der Schweiz bei einem solchen Risiko gewährleistet ist, d.h. ein solches Risiko wäre USG-konform.

Das vom Schadstoff Benzol ausgehende Risiko für die Bevölkerung liegt heute rund 20-mal über dem USG-konformen Risiko. Es genügt dem Schutzanspruch nicht und muss weiter reduziert werden. Das Risiko kommt durch die individuelle Exposition im Bezug auf die Aussen- und Innenluft sowie auf bestimmte «Hot spots» zustande. Um das Risiko auf das USG-konforme Schutzniveau zu senken, müssen die Benzol-Emissionen in die Aussenluft gegenüber dem heutigen Stand um rund den Faktor 15, gegenüber dem prognostizierten Stand von 2010 um rund den Faktor 7 reduziert werden. Das heisst, längerfristig sollten nicht mehr als ca. 100 (70–140) Tonnen Benzol pro Jahr in die Atemluft der Schweiz gelangen. Gleichzeitig sind entsprechende Massnahmen im Innenraum-Bereich zu treffen.

Die persönliche Benzol-Belastung ist nicht nur von der Aussenluft-Konzentration sondern auch vom Verhalten, der Aufenthaltsdauer an bestimmten Orten und vom Beruf abhängig. Nicht nur staatliche Vorschriften sondern auch Verhaltensänderungen können deshalb zur Verminderung der persönlichen Benzol-Belastung beitragen. Besonders gefährdet sind Personen, die im Einwirkungsbereich von viel befahrenen Strassen und Kreuzungen, von Tankstellen sowie in der Abluffahne von Einstellhallen wohnen, ebenso Personen, die sich viel im motorisierten Verkehr und an Tankstellen aufhalten. Gefährdet sind auch Personen, welche oft benzinbetriebene Geräte im Arbeits- und Hobbybereich verwenden, vor allem 2-Takt-Motoren mit hohen Spülverlusten. Eine deutlich erhöhte Belastung haben die Raucher.

Die EKL sieht in der heutigen Situation keine Notwendigkeit, einen Grenzwert für Benzol-Immissionen in der Aussenluft vorzuschlagen, wie ihn die EU erlassen hat. Ein Grenzwert von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ genügt nach Meinung der Kommission den rechtlichen Anforderungen des USG nicht. Er könnte den von der Bundesverfassung vorgegebenen Schutzanspruch des USG nicht einlösen und wäre deshalb weder gesetzlich noch verfassungskonform. Ein solcher Grenzwert würde auch kaum zusätzliche, verschärfte Massnahmen zur Reduktion der Belastung auslösen.

Der Schutz von Mensch und Umwelt kann und soll aufgrund der bestehenden Rechtslage und mit den bestehenden rechtlichen Instrumenten sichergestellt werden. Die LRV ist konsequent zu vollziehen und die verfügbaren technischen Möglichkeiten sind auszuschöpfen.

8 Empfehlungen an die Vollzugsbehörden und an die Bevölkerung

Die Schweiz begegnet möglichen Belastungen der Bevölkerung mit Krebs erregenden Luftschadstoffen durch strenge Emissionsvorschriften. Als allgemeine Massnahme gilt gemäss der Luftreinhalte-Verordnung das so genannte Minimierungsgebot. Damit besteht die Verpflichtung, die Emissionen von Krebs erzeugenden Stoffen auch dann weiter zu begrenzen, wenn die vorsorglichen Emissionsgrenzwerte bereits eingehalten werden. Dagegen wäre die Einführung eines Grenzwertes für die Aussenluft anlog zur EU in der Schweiz weitgehend wirkungslos. Der schweizerische Ansatz zur Minimierung von Krebs erregenden Benzol-Emissionen sichert den optimalen Schutz für die Bevölkerung. Um die Belastung auf ein USG-konformes Risiko zu senken, müssen die Benzol-Emissionen in die Aussenluft gegenüber dem Stand von heute um rund den Faktor 15, gegenüber dem prognostizierten Stand von 2010 um rund den Faktor 7 reduziert werden, und auch im Innenluft-Bereich müssen entsprechende Massnahmen getroffen werden. Die höchste Priorität kommt deshalb dem konsequenten Vollzug der LRV und der Ausrichtung der Minderungsmöglichkeiten auf den Stand der Technik zu.

1. Ein Vollzugsdefizit besteht zur Zeit insbesondere noch im Bereich der Tankstellen. Gemäss LRV müssen Tankstellen so ausgerüstet und betrieben werden, dass beim Betanken von Fahrzeugen höchstens 10% der in der Verdrängungsluft enthaltenen organischen Stoffe emittiert werden. Heute müssen noch rund 35% der gemessenen Zapfsäulen beanstandet werden, bei einzelnen Systemen sogar bis zu 50%. Besorgnis erregend ist der hohe Anteil von bis zu 20% Totalausfällen. Ein starker Benzingeruch beim Tanken deutet auf eine mangelhafte Rückführung der Dämpfe hin. Der Cercl'Air hat Anfang 2001 eine verschärfte Vollzugsempfehlung zur Gasrückführung bei Benzintankstellen herausgegeben. Die EKL geht davon aus, dass die Vollzugsbehörden die LRV-Vorgaben im Bereich der Gasrückführung bei Tankstellen konsequent durchsetzen. Damit kann die Gefährdung des Personals und der Benutzer der belasteten Tankstellen sowie der Anwohner entscheidend reduziert werden.
2. Im Sinne von Art. 6 LRV ist die Abluft an der Quelle möglichst vollständig zu fassen und lufthygienisch optimal abzuleiten. Die EKL empfiehlt den Behörden, diese Vorschrift besonders bei der Abluffassung und -ableitung von Einstellhallen und Garagen zu überprüfen und durchzusetzen, so dass kein Benzol in Innenräume gelangt und die Bewohner keinen zusätzlichen Belastungen ausgesetzt werden. Allenfalls sind entsprechende Bauvorschriften zu erlassen oder anzupassen.
3. Es ist wichtig, dass die LRV laufend dem Stand der Technik angepasst wird. Bei der nächsten Revision der LRV ist eine Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für Benzol vorgesehen. Der maximal zulässige Benzol-Gehalt in der Abluft kann von 5 mg/m^3 auf 1 mg/m^3 gesenkt werden, ab einem Massenstrom von 2.5 g/h . Diese Emissionsbegrenzung ist technisch und betrieblich möglich sowie wirtschaftlich tragbar. Die EKL setzt sich für die rasche Einführung der strengeren Emissionsgrenzwerte für Benzol ein.

4. Der Kaltstart führt beim motorisierten Strassenverkehr zu besonders hohen Benzol-Emissionen. Das Vermeiden von kurzen Fahrten senkt die Belastung der Atemluft mit Krebs erzeugendem Benzol. Jede achte Autofahrt ist höchstens einen Kilometer lang, 34% der Autofahrten sind nicht länger als 3 Kilometer. Nur 30% der Autofahrten sind 10 Kilometer oder länger. Der vermehrte Einsatz von emissionsarmen, resp. emissionsfreien Fahrzeugen im Stadtbereich senkt die Benzol-Belastung der Insassen und der Bevölkerung in Städten. Die EKL empfiehlt, kurze Distanzen zu Fuss, mit dem Fahrrad oder mit dem öffentlichen Verkehr zurückzulegen.
5. Bei den Holzfeuerungen und anderen Feststoff-Feuerungen sind die Benzol-Emissionen stark mit den Kohlenmonoxid-Emissionen korreliert. Betroffen davon sind kleine Öfen, die mit stückigem Holz oder Kohle betrieben werden. Mit verbesserten Technologien können die Benzol-Emissionen dieser Anlagen deutlich gesenkt werden. Damit kann auch die Benzol-Belastung der Menschen, die sich in der Umgebung von solchen Feuerungen aufhalten, verringert werden. Bei der europäischen Typenprüfung nach CEN sind bezüglich Emissionen verschiedene Anforderungsklassen vorgesehen. Die EKL unterstützt eine Übernahme der strengsten Anforderungen durch die Schweiz und eine Technologieförderung zur Emissionsminderung bei kleinen Holzfeuerungen.
6. In den Bereichen Gartenpflege und Hobby, Land- und Forstwirtschaft, bei der Schifffahrt sowie bei den Kleinmotorrädern sind die Benzol-Emissionen durch die Verwendung von 2-Takt-Benzinmotoren ebenfalls hoch. Die EKL empfiehlt in diesem Bereich die Verwendung von Elektromotoren, bzw. von 4-Takt-Motoren mit (geregeltem) Katalysator.
7. Wenn 2-Takt-Benzinmotoren unverzichtbar sind (z.B. bei Kettensägen), empfiehlt die EKL auf jeden Fall aromatenfreies Gerätebenzin nach Schweizer Norm zu gebrauchen. Dieses sogenannte Alkylatbenzin enthält weniger als 0.1% Benzol und kann die Benzol-Emissionen von Motoren in diesen Bereichen deutlich senken. Das schützt Menschen bei der Arbeit und in der Freizeit. Aromatenfreies Gerätebenzin ist zur Zeit teurer als normales Benzin. Die EKL unterstützt darum die parlamentarische Forderung (Motion Suter), aromatenfreie Benzine von der Mineralölsteuer zu befreien. Als Ziel sollte aromatenfreies Gerätebenzin nicht teurer sein als normales 2-Takt-Benzin. Auch sollte Alkylatbenzin besser zugänglich gemacht werden.
8. Benzol wird an rund 20 Stationen in der Schweiz gemessen. Die Datenlage ist recht gut. Zur Erfolgskontrolle sowie zur noch besseren Abschätzung der Bevölkerungsexposition sind ergänzende, punktuelle Messungen besonders in grossen Agglomerationen empfehlenswert. Diese Messungen können auch mit geeigneten Passivsammlern durchgeführt werden. Die Bevölkerung soll in geeigneter Form über die Resultate informiert werden.

9 Literatur

- AFU AR 1999: Amt für Umweltschutz des Kantons Appenzell Ausserrhoden. F. Zürcher et al. Interne Berichte. Herisau 1999
- AGB 1999: Arbeitsgemeinschaft für Bioindikation, Bern: Herzig R et al. Interne Berichte. Bern, 1999
- Brown 1998: Brown EA, Shelley ML, Fisher JW: A pharmacokinetic study of occupational and environmental benzene exposure with regard to gender. *Risk Analysis* 1998; 18/2: 205–213.
- Brunner 2000: Brunner U.: Rechtsgutachten betreffend Grundlagen für die Anordnung verschärfter Emissionsbegrenzungen bei kanzerigenen Luftschadstoffen. Zürich August 2000.
- BUWAL 2001: Handbuch für die Kontrolle von Tankstellen mit Gasrückführung. Anleitung für den Vollzug. Ausgabe Oktober 2001.
- BUWAL 2001: Immissionsmesswerte2000. http://www.umweltschweiz.ch/de/fachgebiete/fg_luft/luftbelastung/blick_zurueck/index.html
- BUWAL 2003 (in Vorbereitung): NO₂ and Benzene Concentrations in Switzerland 2000 to 2020. Environment Series No..., Bern 2003.
- EU 1998: Council Directive on Ambient Air Quality Assessment and Management. Working Group on Benzene. Position Paper. Bruxelles, September 1998.
- EU 2000: Richtlinie 2000/69/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. November 2000 über Grenzwerte für Benzol und Kohlenmonoxid in der Luft.
- Fritz 2001: Fritz G, Herbarth O: Pulmonary function and urban air pollution in preschool children. *Int J Hyg Environ Health* 2001; 203: 235–244.
- Fromme 1995: Fromme H et al.: Gesundheitliche Bedeutung der verkehrsbedingten Benzolbelastung der allgemeinen Bevölkerung. *Zbl Hyg Umweltmedizin* 1995; 196:481–494
- Gritsch 2001: Gritsch TH: Tiefgaragenabluft – Analyse und Bewertung der Luftqualität. Bericht TÜV-Süd Deutschland, München 2001.
- Hayes 1996: Hayes RB, Yin SN, Dosemeci M, Li GL, Wacholder S, Chow WH et al.: Mortality among benzene-exposed workers in China. *Environ Health Perspect* 1996; 104 (supp 6): 1349–1352.
- Hirsch 1999: Hirsch T, Weiland SK, von Mutius E, Safeca AF, Gräfe H, Csaplovics E, Duhme H, Keil U, Leupold W: Inner city air pollution and respiratory health and atopy in children. *Eur Respir J* 1999; 14: 669–677.
- IARC 1987: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans. Benzene. Supplement 7. International Agency for Research on Cancer, Lyon 1987.
- Jantunen 1998: Jantunen MJ, Hänninen O et al.: Air Pollution Exposure in European Cities: The EXPOLIS Study. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 1998; 8: 495–518.
- Krause 1987: Krause C, Mailahn W et al.: Occurrence of Volatile Organic Compounds in the Air of 500 Homes in the Federal Republic of Germany. *Proceedings of Indoor Air 87*. Vol 1, Berlin 1987, 102–106
- Laue 1994: Laue W et al.: Benzolkonzentrationen der Luft unter besonderer Berücksichtigung von Wohnungen bei Tankstellen. In *VDI Berichte*: 1122, Luftverunreinigungen in Innenräumen, Düsseldorf 1994, 283–293
- LIFE 1998: MACBETH: Monitoring of Atmospheric Concentration of Benzene in European Town and homes. LIFE 96 ENV/IT/070. JRC –ERLAP 1998.

- LRV 1985: Luftreinhalte-Verordnung der Schweiz vom 16. Dezember 1985. Stand am 28. März 2000. SR 814.318.142.1
- Raabe 1996: Raabe GK, Wong O: Leukemia mortality by cell type in petroleum workers with potential exposure to benzene. *Environ Health Perspect* 1996; 104 (supp 6): 1381–1392.
- Raaschou-Nielsen 1997: Raaschou-Nielsen O, Lohse C, Thomsen BL, Skov H, Olsen JH: Ambient air levels and the exposure of children to benzene, toluene, and xylenes in Denmark. *Environ Res* 1997, 75: 149–159.
- Raaschou-Nielsen 2001: Raaschou-Nielsen O, Hertel O, Thomsen BL, Olsen JH: Air pollution from traffic at the residence of children with cancer. *Am J Epidemiol* 2001; 153 (5): 433–443.
- Reitmeier 2001: Reitmeier L: Abschätzung der Benzol-Immissionskonzentration im Umfeld von Tankstellen. Tätigkeitsbericht 2000. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz 2001.
- Rinsky 1987: Rinsky RA, Smith AB, Hornung R et al: Benzene and Leukemia, An Epidemiologic Risk Assessment. *N Engl J Med* 1987; 316: 1044–50.
- Römmelt 1994: Römmelt H et al.: Staub und Kfz-Abgase in städtischen Nahverkehrsmitteln. In VDI Berichte: 1122, Luftverunreinigungen in Innenräumen, Düsseldorf 1994, 169–179.
- Savitz 1997: Savitz DA, Andrews KW: Review of epidemiologic evidence on benzene and lymphatic and hematopoietic cancers. *Am J Ind Med* 1997; 31: 287–295.
- Schweizer 2002: Schweizer CH. Personenbezogenen Exposition gegenüber aromatischen VOC aus dem Strassenverkehr in Basel. Modellierung der individuellen Benzolbelastung. Diplomarbeit, Abteilung Naturwissenschaften ETH Zürich. Zürich 2002.
- Simon 2001: Simon H: Parkgaragen als Emissionsquellen im innerstädtischen Areal. Ergebnisse einer Studie zur Erfassung relevanter Garagenkenngrößen. Fachhochschule Mainz 2001.
- Skov 2001: Skov H. et al.: *Atmos. Environ.* 35, Suppl. 1, 2001, S141–148.
- USG 1983: Bundesgesetz über den Umweltschutz. (Umweltschutzgesetz) vom 7. Oktober 1993. Stand am 21. Dezember 1999. SR 814.01
- Wong 2000: Wong O: Recent findings and new initiatives for epidemiologic research on benzene. *J Toxicol Environ Health Part A*: 2000; 61: 457–466.
- Yetergil 1998: Yetergil D. Externe Kosten von Krebserkrankungen durch kanzerogene Luftschadstoffe. Fortschrittberichte VDI, Reihe 15: Umwelttechnik, Nr. 193. VDI Verlag Düsseldorf 1998.
- Yin 1996: Yin SN, Hayes RB, Linet MS, Li GL, Dosemeci M, Travis LB et al: An expanded cohort study of cancer among benzene-exposed workers in China. *Environ Health Perspect* 1996; 104 (supp 6): 1339–43.