

Luftverunreinigung in der Schweiz – Quellen und Ausmass

H. U. Wanner

Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, Eidg. Technische Hochschule, 8006 Zürich

1. Einleitung

Schmutzstoffe in der Luft, die zu gesundheitlichen Schädigungen und Belästigungen führen, bildeten lange Zeit nur lokale und auch zeitlich beschränkte Probleme. Heute haben aber bekanntlich die Luftverschmutzungen in dicht besiedelten Gebieten ein Ausmass erreicht, das zu einer Dauerbelastung der Bevölkerung führt. Zudem werden wir auch bereits mit weltweiten Aspekten der Luftverschmutzung konfrontiert: es besteht die Gefahr, dass durch die zunehmende Luftverschmutzung das ökologische Gleichgewicht gestört wird — wie zum Beispiel durch den Anstieg des Kohlendioxidgehaltes, durch grossräumige Verfrachtungen von Schwefeldioxid und erhöhten Säuregehalt im Niederschlag oder durch die sich in der Stratosphäre anreichernden, schwer abbaubaren Fluorverbindungen, wodurch die Ozonschicht beeinflusst werden kann. Sicher sind die «Pufferkapazitäten» von Wasser und Luft gross — man weiss aber auch, dass diese nicht unbegrenzt sind.

Aus diesen Tatsachen ergeben sich zwei Bereiche der Luftverunreinigungen: einerseits die grossräumigen, globalen Aspekte — und andererseits die kleinräumigen, lokalen Aspekte, wie sie heute in unseren Städten und industrialisierten Gegenden auftreten. Dass die Verschmutzungen der Luft hier in den letzten Jahren vermehrt zu gesundheitlichen Schädigungen und zu Belästigungen führen, ist bekannt. Auch hat man Kenntnisse über das Ausmass der Verschmutzung und über die Faktoren, die den jeweiligen lokalen Verschmutzungsgrad beeinflussen. Es bestehen jedoch noch zahlreiche Lücken — vor allem auch für die Verhältnisse in unserem Land.

Ergebnisse von Immissionsmessungen in der Schweiz liegen seit etwa 15 Jahren vor. Bei den ersten Messungen handelte es sich meistens um gezielte «Einzelaktionen»; gemessen wurde an den Orten, wo akute und sichtbare Wirkungen auftraten, wie etwa starke Verschmutzungen durch Staub in der Nähe von Industriebetrieben oder Klagen von Polizisten an verkehrsreichen Plätzen. In den letzten fünf Jahren wurden nun vermehrt und zum Teil systematisch Messungen in grösserem Umfang durchgeführt; die Fragestellungen sind dabei allerdings verschieden. Eine Gesamtbeurteilung im heutigen Zeitpunkt sowie auch ein Vergleich zwischen den verschiedenen Messreihen ist deshalb ziemlich schwierig. Dies etwa nicht nur wegen der zum Teil ungenügenden Koordination beim Durchführen von Messungen, sondern auch wegen der immer noch raschen und stetigen Entwicklung auf dem Gebiet der Luftanalytik, wodurch ein Festlegen auf vergleichbare Messverfahren erschwert wird.

Die folgenden Ausführungen sollen eine Übersicht über die wichtigsten Quellen sowie über Ergebnisse von Immissionsmessungen geben. Die Zusammenstellung stützt sich in erster Linie auf die im Bulletin des Eidg. Gesundheitsamtes sowie in Fachzeitschriften pu-

Welchen Ursprungs ist die Luftverunreinigung in der Schweiz? Welches ist ihr Ausmass? Diese Arbeit berichtet über die in der Schweiz durchgeführten Messungen und vergleicht die Resultate für verschiedene Wohn- und Industriegebiete.

blizierten Ergebnisse. Die in den letzten Jahren von verschiedenen Amtsstellen durchgeführten Messungen wurden nur dann berücksichtigt, wenn die Daten in offiziellen Berichten veröffentlicht wurden. Die verfügbaren Messwerte werden mit denjenigen ausländischer Untersuchungen sowie auch mit verschiedenen Grenzwerten verglichen.

2. Emissionen

In der Schweiz wird der weitaus grösste Teil der Luftverschmutzung durch die Verwendung fossiler Brenn- und Treibstoffe verursacht [4]. Im Jahre 1972 betrug der Verbrauch an Heizöl EL und leicht 6,3 Millionen Tonnen, an Heizöl mittel und schwer 2,4 Millionen Tonnen und an Dieselöl 0,7 Millionen Tonnen. Die von den wichtigsten Quellen — *Hausteuerungen, Motorfahrzeugverkehr und Industrie* — produzierten Abgasmengen sind ungefähr proportional den verbrauchten Brenn- und Treibstoffmengen. Dementsprechend stammen rund 50% der Abgase von den Heizungen, 20% von den Fahrzeugen mit Benzinmotor, 5% von den Fahrzeugen mit Dieselmotor und 25% von den Industriebetrieben.

Die Bedeutung der einzelnen Quellen hängt jedoch nicht allein von den Abgasmengen ab, sondern auch von den Anteilen der darin enthaltenen toxischen Komponenten, die je nach Art der Verbrennung variieren. Aus hygienischer Sicht am bedeutsamsten sind Schwebestaub und Schwefeldioxid, die vor allem von den Heizungen und Industriebetrieben stammen, sowie Kohlenmonoxid, Blei, Stickoxide und Kohlenwasserstoffe, die vorwiegend in den Motorfahrzeugabgasen vorkommen. Weitere Faktoren, die vor allem die Verteilung der Luftverschmutzungen im Bereich der Emitenten beeinflussen, sind die Abgastemperaturen und die Höhe des Ausstosses über Boden; entsprechend ändert die Bedeutung der einzelnen Quellen von Ort zu Ort sowie auch mit der Jahreszeit.

Die *Tabelle 1* gibt die Anteile der Hauptquellen am Gesamtschwefeldioxid wieder, wie sie von der EMPA (Eidg. Materialprüfungs-Anstalt) für das Jahr 1970 berechnet und für das Jahr 1980 prognostiziert wurden [4]. Ein ebenfalls von der EMPA für das Jahr 1970 erstellter *Emissionskataster* für die Schweiz zeigt, dass die höchsten durchschnittlichen SO_2 -Emissionen mit 10–20 t $\text{SO}_2/\text{km}^2/\text{Jahr}$ in den Gegenden von Zürich, Basel und Lausanne stattfinden [6]. Weitere Schwerpunkte liegen im Mittelland und in Genf (5–10 t/ km^2)

Tabelle 1
Schwefeldioxydausstoss in der Schweiz
Erhebungen für das Jahr 1970 und Prognosen für das Jahr 1980
durch die EMPA [4].

	1970	1980
Gesamt-Schwefeldioxydausstoss	127 300 t	151 200 t
davon aus:		
- Industrief Feuerungen	70 000 t	81 200 t
- Hausfeuerungen	50 300 t	61 000 t
- Motorfahrzeugen	7 000 t	9 000 t

Jahr) und in der Ostschweiz (2,5—5 t/km²/Jahr). In der übrigen Schweiz beträgt der durchschnittliche Ausstoss weniger als 2,5 t/km²/Jahr. Solche Kataster, wie sie zurzeit auch für stark besiedelte Regionen und Städte erstellt werden, sind ein Hilfsmittel zur Beurteilung einer mutmasslichen Belastung und dienen als Grundlage für die Planung.

Neben den erwähnten Hauptquellen bleiben noch eine Reihe weiterer Quellen, die in der näheren Umgebung besondere Belastungen mit Luftfremdstoffen verursachen können. Solche Emittenten haben eine mehr «lokale» Bedeutung; je nach Art der verunreinigenden Komponenten ist jedoch den möglichen Auswirkungen auf die betroffenen Anwohner sowie auch auf die Vegetation besondere Beachtung zu schenken, und es muss deshalb eine differenzierte Beurteilung vorgenommen werden.

Zu solchen «lokalen» Quellen gehören die *Kehrichtverbrennungsanlagen*; im Vordergrund der emittierten Schadstoffe steht hier die bei der Verbrennung von Polyvinylchlorid freigesetzte Salzsäure, die vor allem die Pflanzen in der Umgebung der Anlagen gefährdet [18]. Sehr oft führen *Abwasserreinigungsanlagen*, *Kehrichtkompostierungen* sowie die Behandlung und Lagerung von *Klärschlamm* zu Geruchsbelästigungen, die je nach Wetterlagen ein erhebliches Ausmass erreichen können [1]. Bei der Abwasserreinigung sind auch die *mikrobiellen Verunreinigungen* der Luft durch Belebtschlammbecken zu beachten; je nach Art des Belüftungsverfahrens können über dem Becken sehr hohe Keimdichten auftreten, die zu erhöhten Luftkeimzahlen bis in Entfernungen von 100 m führen können [23].

3. Immissionen

a) Schwebestaub

Die gesundheitsschädigenden Wirkungen des Schwebestaubes sind nicht nur von dessen chemischer Zusammensetzung abhängig, sondern in entscheidendem Mass auch von der Partikelgrösse. Partikel $>10 \mu\text{m}$ sedimentieren rasch, während kleinere Partikel über längere Zeit in der Luft bleiben. Beim Einatmen dieser schwebenden Partikel bleiben die

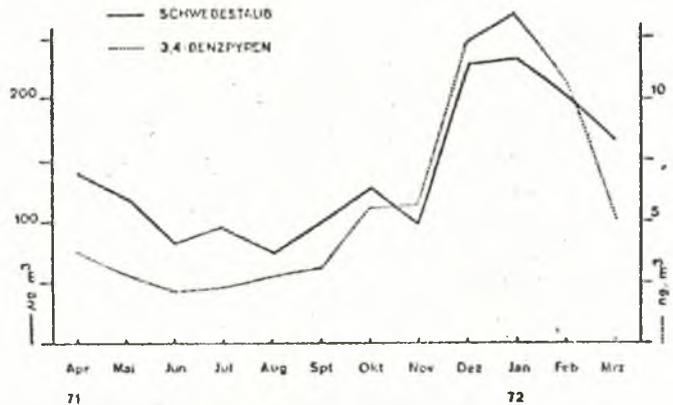


Abbildung 1
Monatsmittelwerte der Schwebestaub- und 3,4-Benzopyrenimmissionen vom April 1971 bis März 1972. Dargestellt sind die Durchschnittswerte der fünf Messstellen in der Stadt Zürich (ohne Uetliberg). Vgl. dazu Tabelle 2 [22].

grösseren ($>3 \mu\text{m}$) in den oberen Luftwegen auf der Schleimhaut haften, während die kleineren bis in die Bronchiolen und Alveolen vordringen können. Diese kleineren Partikeln sind vor allem als Träger toxischer Substanzen von Bedeutung.

Wegen der unterschiedlichen Staubsammelverfahren, die in erster Linie bezüglich der erfassbaren Anteile von grösseren Partikeln verschieden sind, lassen sich die Ergebnisse von Schwebestaubmessungen nicht ohne weiteres vergleichen. Die seit 1968 von der EMPA mit High-Volume-Samplern in *Payerne* (unbebaute Gegend) durchgeführten Messungen ergaben im Sommer durchschnittliche Werte von 8–15 µg/m³, im Winter 22–29 µg/m³; in *Dübendorf* (bebaute Gegend) lagen die Durchschnittswerte im Sommer zwischen 12 und 18 µg/m³, im Winter zwischen 36 und 43 µg/m³ [4].

Tabelle 2
Immissionen von Schwebestaub, 3,4-Benzopyren (BaP) und Blei (Pb) in der Stadt Zürich (Monatsmittelwerte) [12, 22]

Messstelle	Juni 1971			Dezember 1971		
	Staub µg/m ³	BaP ng/m ³	Pb µg/m ³	Staub µg/m ³	BaP ng/m ³	Pb µg/m ³
Escher-Wyss (Industriequartier)	83	1,6	0,84	197	9,4	2,19
Paradeplatz (Verkehrsreicher Platz)	97	2,0	1,29	256	10,9	2,34
Albisriederplatz (Verkehrsreicher Platz)	96	2,8	1,85	319	14,4	3,12
Untere Zäune (Wohnquartier, Zentrum)	69	2,1	1,12	204	12,3	2,31
Triemli (Wohnquartier, Randgebiet)	60	1,2	0,63	165	8,1	1,74
Uetliberg Erholungsgebiet	-	-	-	42	2,6	0,23

Seit dem Jahre 1971 werden in der Stadt Zürich Messungen mit dem LIB-Verfahren durchgeführt [22]. Die *Abbildung 1* zeigt die Mittelwerte der Messperiode 1971/72 von fünf Messstellen, die bezüglich ihrer näheren Umgebung verschieden waren. Der durchschnittliche Schwebstaubgehalt war im Winter etwa doppelt so hoch wie im Sommer; noch deutlicher waren die jahreszeitlichen Unterschiede beim 3,4-Benzpyren, das vor allem von den Hausfeuerungen stammt. In der *Tabelle 2* sind die Mittelwerte der einzelnen Messstellen eines Sommer- und eines Wintermonates aufgeführt: für den Gesamtstaub waren die Unterschiede zwischen den einzelnen Messstellen im Sommer nur gering; im Winter waren die Konzentrationen im Bereich der verkehrsreichen Plätze und im Zentrum bedeutend höher als im Randgebiet. Beim 3,4-Benzpyren waren die Unterschiede zwischen Sommer und Winter bei allen Messstellen sehr deutlich. Geringere Differenzen ergaben die Bleibestimmungen [12]: die etwas höheren Winter- als Sommerwerte dürfen mit den in Zürich ziemlich häufigen Inversionslagen zusammenhängen; grössere Unterschiede hätte man zwischen den «Wohnquartieren» und den «verkehrsreichen Plätzen» erwartet, da das Blei zum grössten Teil von den Autoabgasen stammt; auch hier dürften die jeweiligen Wetterlagen die Konzentrationen mitbeeinflusst haben. Weitere Bleibestimmungen, die 1963 und 1970 an stark befahrenen Strassen durchgeführt wurden, ergaben Tagesdurchschnittswerte von 2,7 bzw. 3,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [4].

Zu Vergleichszwecken sei auf einige Jahresmittelwerte von Schwebstaubmessungen in Deutschland hingewiesen, die ebenfalls mit dem LIB-Verfahren durchgeführt wurden [22]: Duisburg 257, Gelsenkirchen 199 und Essen 181 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Zürich 139 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). In amerikanischen Städten wurden mit High-Volume-Samplern, die gegenüber dem LIB-Verfahren je nach Partikelgrössen 10–20% niedrigere Werte ergaben, folgende 5-Jahres-Mittelwerte gemessen: Philadelphia 170, Detroit 143, Washington 104 und Miami 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Für 3,4-Benzpyren wurden in Düsseldorf in den Sommermonaten 6 und in den Wintermonaten 57 ng/m^3 gemessen; in Duisburg waren es 23 bzw. 131 ng/m^3 . Ein Vergleich mit den Zürcher Werten (vgl. *Abbildung 1*) ist wegen der unterschiedlichen Benzpyren-Bestimmungsmethoden allerdings fraglich. Die in Zürich gemessenen Blei-Konzentrationen liegen ungefähr in der gleichen Grössenordnung wie in ausländischen Städten: in Frankfurt a/M. wurden in einem Wohngebiet im Sommer 0,7 und im Winter 1,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen; in einem City-Geschäftsgebiet waren es im Sommer 2,7 und im Winter 3,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; ähnliche Werte ergaben weitere Messungen in verschiedenen deutschen Städten [19].

b) Schwefeldioxid

Schwefeldioxid-Messungen werden oft als eine Art «Index» für die Luftverschmutzung verwendet. Die Ergebnisse neuerer Untersuchungen haben allerdings

die Bedeutung eines solchen «SO₂-Indexes» in Frage gestellt, da die in den Städten beobachteten Morbiditäts- und Mortalitätsraten am meisten mit dem jeweiligen Gehalt an Schwebstaub und den darin enthaltenen Sulfat-Anteilen korrelieren [5]. Dennoch sind die heute in grosser Zahl vorliegenden SO₂-Werte ein gutes Mass für die Belastung einer Stadt und Region durch die Abgase vom Verbrennen von Heizöl; ferner ermöglichen diese Messungen — sofern sie über längere Zeitperioden erfolgen — auch Aussagen über den Einfluss der lokalen meteorologischen Verhältnisse.

Von den in der Schweiz in den letzten Jahren durchgeführten Messungen sei auf folgende Ergebnisse hingewiesen: Messreihen in den Jahren 1963 bis 1965 [14] ergaben deutliche Unterschiede zwischen den durchschnittlichen SO₂-Konzentrationen von drei Messstellen in der Stadt Zürich (im Sommer 0,01–0,02 ppm, im Winter 0,05–0,08 ppm) und Messstellen in Baden, Spreitenbach und Turbental (im Sommer bis 0,01 ppm, im Winter bis 0,02 ppm). Die *Abbildung 2* zeigt die Ergebnisse der in Zürich seit 1970 kontinuierlich durchgeführten Messungen [20]: die durchschnittlichen SO₂-Konzentrationen betragen im Winter 0,05 bis

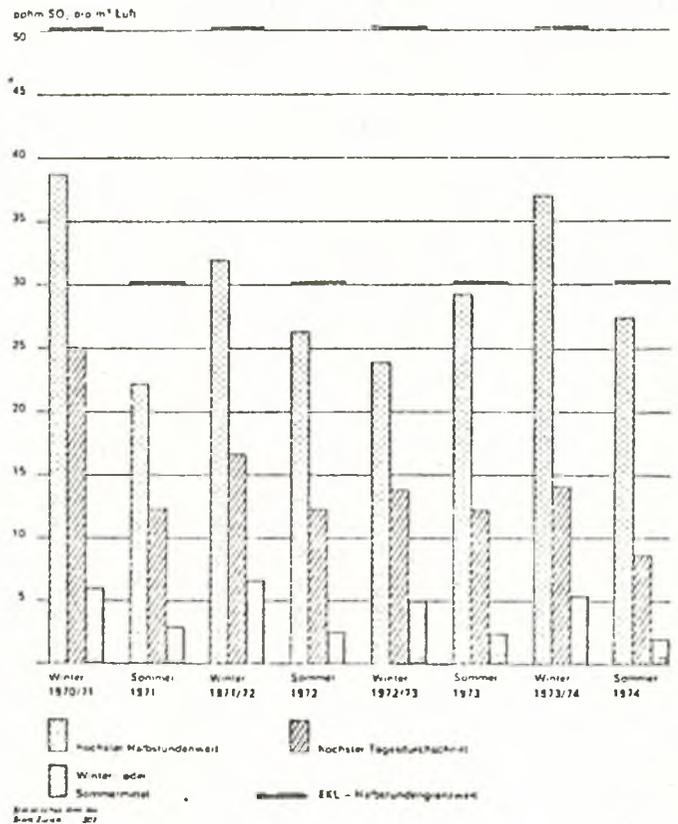


Abbildung 2
Schwefeldioxid-Konzentrationen in der Stadt Zürich. Höchstwerte und Durchschnittswerte der vom Gesundheitsamt der Stadt Zürich seit dem Winter 1970/71 durchgeführten Messungen [20].
1 ppb = 1 part per hundred million bzw. 0,01 ppm;
EKL = Eidg. Kommission für Lufthygiene.

0,07 ppm und im Sommer 0,02—0,03 ppm. Die Jahresmittel lagen somit über dem US-Primärstandard von 0,03 ppm [15]; im Winter 1970/71 und 1971/72 wurde auch der US-Tagesgrenzwert von 0,14 ppm überschritten. Mehrmals überschritten wurde auch der vom VDI (Verein Deutscher Ingenieure) festgelegte MIK-Wert (Maximale Immissions-Konzentration) für 24 Stunden von 0,11 ppm [21]. Nicht erreicht wurden hingegen die im Jahre 1965 von der ELK (Eidg. Lufthygienekommission) festgelegten höchsten Halbstundenwerte [3]; diese Grenzwerte sind aufgrund der neuen epidemiologischen Untersuchungen als zu hoch zu beurteilen.

Ein Grund für die zeitweise hohen SO₂-Konzentrationen in der Stadt Zürich sind die bereits bei den Schwebstaubmessungen erwähnten ziemlich häufigen Inversionslagen. Gesamthaft niedrigere Werte wurden in Lausanne gemessen [11]: die *Abbildung 3* zeigt die Monatsmittelwerte der Jahre 1971—1973; die gravimetrisch ermittelten SO₂-Konzentrationen entsprechen ungefähr 0,02—0,03 ppm in den Wintermonaten und ca. 0,01 ppm in den Sommermonaten. Die Unterschiede gegenüber Zürich dürften vor allem mit den austauschenden Wetterlagen zusammenhängen, die in Zürich wegen der «ungünstigen» topographischen Lage häufiger vorkommen als in Lausanne.

Messungen im Raum Basel ergaben in den Wintermonaten 1973/74 folgende durchschnittliche Konzentrationen [17]: an drei Messstellen in der Stadt Basel 0,030—0,035 ppm, Muttlenz 0,033 ppm, Pratteln 0,022 ppm und Wallbach 0,016 ppm. Auch bei diesen Messreihen wurde der Einfluss der Wetterlagen sehr deutlich; bei windschwachen Perioden wurden in der Stadt Basel Stundenmittelwerte bis zu 0,2 ppm gemessen, und auch an den anderen Messstellen traten erhöhte Konzentrationen bei schwachen Winden auf. Hier müssen noch weitere Messungen zeigen, wie sich die Emissionen in der Stadt Basel und in den anliegenden Industriegebieten auf die regionale Verteilung der SO₂-Belastungen auswirken.

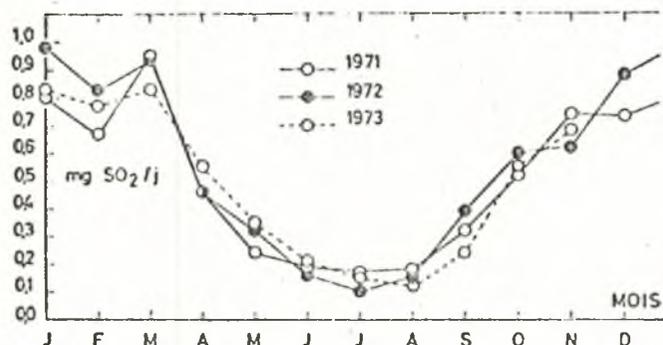


Abbildung 3 Schwefeldioxid-Konzentrationen in der Stadt Lausanne. Monatsmittelwerte von Messungen mit einer gravimetrischen Methode [11]. 0,8 mg SO₂/Tag entsprechen ungefähr 0,03 ppm SO₂.

Zu Vergleichszwecken sei wiederum auf einige Messungen in deutschen Städten hingewiesen [4]: in München wurden im Winter 1971/72 als höchste Tagesmittelwerte 0,076 ppm SO₂ gemessen; in Berlin waren es 0,236, in Frankfurt 0,218 und in Düsseldorf 0,112 ppm. Die in der Stadt Zürich während der Wintermonate gemessenen SO₂-Konzentrationen liegen somit in der gleichen Grössenordnung wie in verschiedenen deutschen Städten.

c) Kohlenmonoxid

Der Kohlenmonoxid-Gehalt ist vor allem von der Verkehrsfrequenz sowie von der Art der Bebauung längs einer Strasse abhängig. Im Winter liegen die Werte in der Regel etwas höher als im Sommer; bei diesen Unterschieden dürften u. a. auch die jeweils verschiedenen meteorologischen Verhältnisse einen Einfluss haben.

Die *Abbildung 4* zeigt sehr deutlich den Zusammenhang zwischen den CO-Konzentrationen und der Anzahl Fahrzeuge [11]. Zahlreiche Messungen im Nahbereich von Strassen, wie sie seit einigen Jahren in den meisten Städten durchgeführt werden, ergaben ein ähnliches Bild. In der *Tabelle 3* sind maximale Kurzzeitwerte (30 Minuten) und Tagesmittelwerte von Messungen in der Stadt Zürich zusammengestellt [9]. Diese Werte zeigen den Einfluss der Bebauung in der näheren Umgebung: in sogenannten Strassenschluchten (Rämistrasse/Zeltweg und Lager-/Langstrasse) lagen die CO-Konzentrationen gesamthaft deutlich höher als an den «offenen» Plätzen und Strassenkreuzungen (Albis-/Mutschellenstrasse, Bellevue, Central). CO-Konzentrationen, die in ausländischen Städten bei vergleichbaren Verkehrsfrequenzen und Bebauungen gemessen werden, liegen ebenfalls in der Grössenordnung der in Zürich gemessenen Werte. Wie aus der

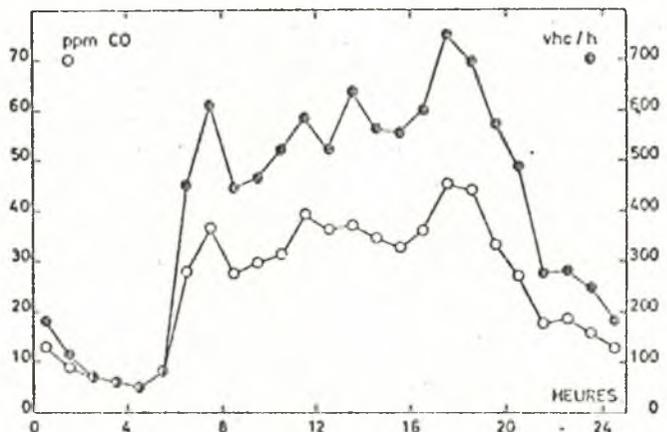


Abbildung 4 Kohlenmonoxid-Konzentration im Strassentunnel von Chauderon bei Lausanne [11]. Stundenmittelwerte im Verlauf eines Tages für das CO (ppm) und für die Anzahl Fahrzeuge pro Stunde (vhc/h).

Tabelle 3
Kohlenmonoxid-Konzentrationen in der Stadt Zürich. — Messungen durch das Gesundheitsinspektorat der Stadt Zürich, 1971/1972 [9]

Messort	Maximale 30 min- Mittelwerte	Maximale 8 h- Mittelwerte	24-Mittelwert Durch- schnitt	Extrem- werte
	ppm	ppm	ppm	ppm
Bellevue/Rämistrasse	33	17	13	10/17
Rämistrasse/Zeltweg	55	35	18	14/25
Albis-/Mutschellenstrasse	21	14	9	8/25
Leng-/Lagerstrasse	56	36	22	16/26
Central - Weinbergstrasse	34	17	13	11/14
Grenzwerte:				
- MIK (BRD)	45	-	9	
- Air Quality Standards (USA)	35 (1 h)	9	-	

Tabelle 3 hervorgeht, liegen diese Werte — insbesondere die 8-Stunden- und 24-Stunden-Mittelwerte — über den US- und VDI-Grenzwerten. Natürlich ist dabei zu berücksichtigen, dass diese Messungen in den Fussgängerbereichen an den Strassen erfolgten; bereits in 10—20 m Entfernung nehmen die Konzentrationen rasch ab. Dennoch muss man festhalten, dass für die Anwohner stark frequentierter Strassen die CO-Belastungen über den im Ausland geltenden Grenzwerten liegen; dies ist vor allem auch für die Arbeitsplätze längs solcher Strassen zu beachten.

Den Einfluss der Bebauung zeigen auch Messungen verschiedener Abgaskomponenten, die vor und nach der Eröffnung von Umfahrungsstrassen durchgeführt wurden [2]. Wie aus der Tabelle 4 ersichtlich ist, wurden vor der Eröffnung der Umfahrungsstrasse in Strassenschluchten (Baden, Thun, Bremgarten) höhere Konzentrationen gemessen als bei aufgelockerter Be-

bauung (Winterthur-Stadt, Amsteg, Neuenhof). Sehr deutlich waren die Reduktionen von CO und CH₂O in Baden, Thun und Bremgarten nach der Verkehrsumlagerung.

d) Stickoxide, Oxidantien und Aldehyde

Messungen von Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) wurden bisher nur vereinzelt durchgeführt. Die in der Tabelle 4 für Baden, Thun und Bremgarten aufgeführten Werte sowie die in der Stadt Zürich in den Jahren 1963—1965 an drei Messstellen gemessenen durchschnittlichen Konzentrationen von 0,01—0,02 ppm NO₂ im Sommer und 0,02—0,04 ppm NO₂ im Winter liegen in der Grössenordnung der in ausländischen Städten gemessenen Werte [14, 19]. Neuere Messungen längs einer Autobahn ergaben unmittelbar an der Fahrbahn durchschnittliche Konzentrationen von 0,1 ppm NO und 0,03 ppm NO₂; die Probenahmen bis in Entfernungen von 80 m im offenen Gelände ergaben deutliche Abnahmen für NO, während die NO₂-Werte nur wenig änderten [10].

Von Untersuchungen über Oxidantien und Ozon (O₃), die im sogenannten Smog gebildet werden, liegen noch zu wenig Ergebnisse vor, welche Aussagen über deren Vorkommen in der Schweiz zulassen würden. Aufgrund der bekannten Konzentrationen von NO, NO₂ und Kohlenwasserstoffen ist jedoch damit zu rechnen, dass beim Auftreten der für photochemische Reaktionen notwendigen meteorologischen Bedingungen ein Anstieg der Ozon-Konzentration erfolgt, wie dies zum Beispiel in Frankfurt festgestellt wurde [19]: an einem Sommertag wurden in der Innenstadt bei mittleren Konzentrationen von 0,01 ppm NO und 0,02 bis 0,08 ppm NO₂ gegen Mittag Ozon-Konzentrationen bis 0,15 ppm festgestellt; ein Rückgang auf die üblichen Ozonwerte erfolgte erst gegen Mitternacht.

Formaldehyd (CH₂O) wurde im Rahmen der bereits erwähnten Messreihen in der Stadt Zürich von

Tabelle 4
Einfluss der Verkehrsdichte und der Bebauung auf die Luftverunreinigung im Nahbereich von Strassen [2]
* = Fehlende Messungen durch Schätzungen ergänzt

Bebauung	Messort	Verkehrsumlagerung	Verkehr Fz./min	CO ppm	CH ₂ O ppm	NO ₂	Pb µg/m ³
Strassenschlucht	Baden AG	vor	17	15	0,040	0,032	—
		nach	8	8	0,018	0,016	—
	Thun BE	vor	19*	11	0,037	0,036	4,0
		nach	12*	6	0,018	0,025	4,0
	Bremgarten AG	vor	15	13	0,022	0,031	5,5
		nach	11	8	0,011	0,014	3,0
offen	Winterthur-Stadt	vor	13	<5	0,019	0,015	—
		nach	10	<5	0,023	0,014	—
	Amsteg UR	vor	8	<5	0,017	0,016	0,9
		nach	1	<5	0,012	0,011	0,8
	Neuenhof AG	vor	16*	<5	0,013	0,020	1,1
		nach	10	<5	0,008	0,012	0,7

1963—1965 gemessen [14]; im Sommer lagen die Werte zwischen 0,02 und 0,04 ppm, im Winter zwischen 0,01 und 0,03 ppm. Auch die CH_2O -Werte neuerer Messreihen lagen in der gleichen Grössenordnung (vgl. Tabelle 4).

e) Kohlenwasserstoffe

Zur Beurteilung der Belastung durch die Kohlenwasserstoffe werden die *Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe* bestimmt. In den USA wurden für diese Stoffgruppen Grenzwerte im Hinblick auf deren Bedeutung bei den photochemischen Reaktionen festgelegt. Bestimmungen von Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen wurden in der Schweiz bisher nur wenige durchgeführt: in einem vom Verkehr wenig belasteten Quartier wurden 0,4—0,8 ppm gemessen, an einer stark befahrenen Strasse waren es bis zu 1 ppm [10].

Ebenfalls erst wenige Ergebnisse liegen von Messungen *aromatischer Kohlenwasserstoffe* vor — also von den typischen Benzinbestandteilen. Bei Untersuchungen in den Jahren 1971/72 [8] wurden an verschiedenen Stellen in der Stadt Zürich bis 0,07 ppm Benzol, bis zu 0,12 ppm Toluol und bis zu 0,05 ppm m-Xylol nachgewiesen; auf dem Uetliberg — dem nahe der Stadt gelegenen Erholungsgebiet — wurden noch etwa 10% der City-Werte gemessen. Obwohl die Anzahl der analysierten Proben nicht sehr gross war, ergab deren Zusammensetzung immer das typische Bild von verdampftem Autobenzin.

f) Beziehungen Raumluff-/Aussenluft-verunreinigungen

Bisherige Studien über die Beziehungen zwischen den Aussenluft- und den Raumluff-Konzentrationen dieser Schadstoffe zeigen, dass *die Qualität der Raumluff weitgehend vom Verschmutzungsgrad der Aussenluft abhängig* ist. Massgebende Faktoren für die jeweiligen Anteile der Aussenluftverschmutzungen sind die Art der Lüftung (Fensterlüftung, Klimaanlage), der stündliche Luftwechsel und die Art der Verunreinigung [16].

Bei den *nicht reaktiven* Gasen, wie zum Beispiel Kohlenmonoxid, liegen die Konzentrationen in der Aussen- und Raumluff in der gleichen Grössenordnung. Aus amerikanischen Langzeitstudien geht hervor, dass der Kohlenmonoxid-Gehalt in den Räumen 80—100% der jeweiligen Aussenluft-Konzentrationen erreicht.

Bei den *reaktiven* Gasen, wie zum Beispiel Schwefeldioxid, scheint das Verhältnis Raumluff/Aussenluft mit zunehmendem Gehalt in der Aussenluft abzunehmen; in amerikanischen Studien lagen die Anteile zwischen 40 und 75%. Die niedrigeren Anteile gegenüber Kohlenmonoxid dürften darauf zurückzuführen sein, dass Schwefeldioxid als reaktives Gas durch die Wände und Inneneinrichtungen absorbiert

wird. Somit vermögen auch kurzfristige Spitzen dieses Gases in der Aussenluft die Raumluff-Konzentrationen nicht in dem Mass zu beeinflussen, wie dies beim Kohlenmonoxid der Fall ist.

Die Konzentrationen von *Schwebestaub* in der Raumluff werden ebenfalls durch den Gehalt in der Aussenluft beeinflusst; allgemein werden in den Räumen etwas niedrigere Werte gemessen, besonders bei hohen Aussenluft-Konzentrationen.

g) Einfluss auf die Vegetation

Wie bisherige Untersuchungen an zahlreichen Pflanzen gezeigt haben, sind diese besonders empfindlich gegenüber Fluor, Schwefeldioxid und Äthylen. Je nach Konzentration und Art der toxischen Stoffe wird die Epidermis geschädigt, die Assimilation beeinträchtigt oder die Giftstoffe werden durch die Spaltöffnungen aufgenommen. Die Empfindlichkeit der Pflanzen gegenüber *Fluor* ist hundert- bis tausendmal grösser als gegenüber SO_2 ; bereits wiederholte tägliche Emissionen von weniger als 100 kg Fluorwasserstoff können schwere Schäden an den umliegenden Kulturen verursachen [4].

Ein sehr empfindlicher Indikator gegenüber Luftverunreinigungen sind die *Enzym-Aktivitäten*: Messungen der Peroxidase-Aktivität — einem Indikator für verschlechterte Lebensbedingungen — ergaben in den Sommermonaten bei Blättern junger Eschen, die in der Stadt Zürich exponiert waren, deutlich höhere Werte als bei Blättern an Standorten mit weniger Luftverschmutzung [13]. Ferner konnte auch gezeigt werden, dass der Strassenstaub die Strahlungsabsorption durch Blätter beeinflusst [7]. Als Folge der beobachteten vergrösserten Absorption der Globalstrahlung im nahen Infrarot muss eine Veränderung der Energiebilanz des Blattes und der Blattemperatur angenommen werden.

4. Schlussfolgerungen

Aus all den vorgelegten Messwerten, den Vergleichen mit Messungen im Ausland und Einstufungen zu Grenzwerten können wir folgendes festhalten:

a) In den *Städten und Agglomerationen* sind die Belastungen durch die Luftverschmutzung sehr unterschiedlich. Das Ausmass der Immissionen ist nicht nur von den jeweiligen Anteilen der Hauptemittenten Hausfeuerungen, Industrien und Motorfahrzeuge abhängig, sondern auch von der geographischen Lage und den meteorologischen Verhältnissen. Bei austauscharmen Wetterlagen — wie dies zum Beispiel in Zürich öfters der Fall ist — treten zeitweise Schwebestaub- und Schwefeldioxid-Konzentrationen auf, die über den im Ausland geltenden Grenzwerten liegen.

b) Im Nahbereich von *Strassen* sind die Belastungen von der Frequenz und Fahrweise der Motorfahrzeuge sowie von der Bebauung längs der Strasse ab-

hängig. In engen Strassen sowie an verkehrsreichen Plätzen treten Kohlenmonoxid-, Stickoxid-, Kohlenwasserstoff- und Bleikonzentrationen auf, wie sie auch in ausländischen Grossstädten gemessen werden. Die Kohlenmonoxid-Konzentrationen liegen im Nahbereich der Strassen oft über den Grenzwerten.

c) Zur besseren Beurteilung der Belastung der Bevölkerung sind zukünftig vermehrt Langzeitmessungen erforderlich. Dabei müssen vor allem auch die jeweiligen meteorologischen Daten erfasst werden. In der Schweiz müssen solche Messungen besser koordiniert werden, um die erhobenen Messdaten möglichst gut vergleichen zu können. Vor allem sollte der Verschmutzungsgrad an kritischen Orten – sei es wegen starker Emittenten oder austauscharmer Wetterlagen – besser bekannt sein.

d) Auf folgenden Gebieten sind die Kenntnisse zur Beurteilung der gesundheitlichen Schädigungen und Belästigungen noch lückenhaft:

- Beziehungen zwischen Aussenluft- und Raumluftverunreinigungen,
- Messung und Beurteilung von geruchsbelästigenden Stoffen,
- Gefährdung durch aromatische Kohlenwasserstoffe,
- Zusammensetzung des Schwebstaubes – insbesondere des atembaren Anteiles,
- Reizwirkungen durch Oxidantien und Aldehyde.

Solche Untersuchungen – vor allem die bereits erwähnten Langzeitmessungen – liefern Grundlagen zur Festlegung von Grenzwerten sowie für die Massnahmen, die zur Einschränkung der Emissionen notwendig sind.

Zusammenfassung

Die Luftverunreinigungen in der Schweiz stammen zum grössten Teil von fossilen Treib- und Brennstoffen; davon entfallen ca. 50% auf die Hausfeuerungen, ca. 25% auf den Motorfahrzeugverkehr und ca. 25% auf die Industrie. Die Immissionen in den Städten und Agglomerationen sind nicht nur von der Anzahl und Stärke dieser Emittenten abhängig, sondern auch von der geographischen Lage und den meteorologischen Verhältnissen. Der durchschnittliche Schwefeldioxid-Gehalt in verschiedenen Städten beträgt im Winter 0,03-0,05 ppm und im Sommer 0,01-0,03 ppm. Bei austauscharmen Wetterlagen, wie dies in Zürich öfters der Fall ist, fliegen die Schwebstaub- und Schwefeldioxid-Konzentrationen über den im Ausland geltenden Grenzwerten. Im Bereich stark frequentierter Strassen werden für das Kohlenmonoxid Tagesmittelwerte bis zu 20 ppm und maximale Stundenmittelwerte bis zu 50 ppm gemessen – Konzentrationen, die ebenfalls über den Grenzwerten liegen. Auch für Stickoxide, Kohlenwasserstoffe und Blei werden Konzentrationen gemessen, wie sie in ausländischen Grossstädten vorkommen. Zukünftig müssen in der Schweiz vermehrt koordinierte Langzeitmessungen durchgeführt werden – insbesondere an Orten mit starken Emittenten und ungünstigen meteorologischen Verhältnissen.

Résumé

Pollution de l'air en Suisse – sources et extension

La pollution de l'air en Suisse est due pour la plus grande partie aux carburants et combustibles fossiles; ceux-ci se répartissent sur le chauffage domestique (environ 50%), le trafic moto-

risé (environ 25%) et l'industrie (environ 25%). Les immissions dans les villes et agglomérations dépendent non seulement du nombre et de l'ampleur de ces sources émettrices, mais aussi de la situation géographique et des conditions météorologiques.

La concentration moyenne en anhydride sulfureux de différentes villes comporte en hiver 0,03 à 0,05 ppm et en été 0,01 à 0,03 ppm. Lors de conditions atmosphériques pauvres en échanges des couches d'air, telles qu'elles adviennent souvent à Zurich, les concentrations des poussières en suspension et d'anhydride sulfureux dépassent les limites tolérables fixées à l'étranger. Dans les environs de routes à trafic intense, on a mesuré des taux de monoxyde de carbone atteignant 20 ppm (moyennes journalières) ou 50 ppm (moyennes par heure); ces valeurs dépassent également les limites tolérables. Les mesures des concentrations des oxydes d'azote, des hydrocarbures et du plomb révélèrent des valeurs égales à celles des grandes villes étrangères.

A l'avenir, il sera nécessaire de procéder en Suisse plus souvent à des mesures à long terme et coordonnées – surtout dans les régions possédant de fortes sources émettrices et des conditions météorologiques défavorables.

Summary

Air pollution in Switzerland – sources and extent

The immediate source of air pollution is the fuel consumption that goes on in domestic heating (about 50%), in motor vehicles (about 25%), and in industry (about 25%). Immissions in towns and agglomerations do not only depend on the number and size of these issuing sources but also on the location and meteorological conditions. The average sulphur dioxide content in various towns amounts to 0.03-0.05 ppm in winter and in summer to 0.01-0.03 ppm. In weather conditions with little exchangeability, as is often the case in Zurich, particulate matter and sulphur dioxide concentrations frequently lie above threshold limits applied abroad. In the area of heavy traffic for instance, daily averages of carbon monoxide of up to 20 ppm, and maximum hourly averages of up to 50 ppm are measured – concentrations which lie also considerably above threshold limits. For nitrogen oxides, hydrocarbons and lead too, concentrations such as are measured in large foreign cities occur. In the future, coordinated time measurements will have to be carried out more frequently in Switzerland – especially in places with strong emitting sources and unfavorable meteorological conditions.

Literatur

- [1] Boninsegni C., Deuber A. und Wanner H. U.: Geruchsanalysen bei der Kehrichtkompostierung. *Umwelthygiene* 25, 172-175 (1974).
- [2] Deuber A., Müller Th. und Meier M.: Luftverunreinigung und Verkehr in der Schweiz. *Neue Zürcher Zeitung* Nr. 185, 13.8.1975.
- [3] Eidg. Gesundheitsamt Bern: Bulletin, Beilage 2/1965.
- [4] Eidg. Gesundheitsamt Bern: Bulletin, Beilage 6/1973, Probleme der Lufthygiene.
- [5] Environmental Protection Agency, Washington: Progress in the prevention and control of air pollution in 1974, Report to Congress.
- [6] Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt, Dübendorf: Schwefeldioxid-Emissionskataster 1970, EMPA Bericht Nr. 24 000 (1974).
- [7] Eller B. M. und Brunner U.: Der Einfluss von Strassenstaub auf die Strahlungsabsorption durch Blätter. *Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B*, 23, 137-146 (1975).
- [8] Grob K. und Grob G.: Die Verunreinigung der Zürcher Luft durch organische Stoffe, insbesondere Autobenzin. *Neue Zürcher Zeitung* Nr. 364, 7.8.1972.
- [9] Hess W. und Martin W.: Die Belastung der Zürcher Stadtluft durch Motorfahrzeugabgase. *Gesundheitstechnik* 8, 303-310 (1974) und 9, 11-15 (1975).
- [10] Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETHZ: Luftverunreinigung in der Umgebung von Strassen; Zwischenbericht

- zu einem Nationalfonds-Projekt. Chem. Rundschau 28, Nr. 42, 15.10.1975.
- [11] Jaccard G., Pilet P. E., Chollet R. et Baehler W.: Etude de la pollution atmosphérique de la ville de Lausanne. 5e rapport à l'intention de la Municipalité, 1974.
- [12] Magyar B. und Vonmont H.: Kombinierte Anwendung der Alphaabsorption und der Röntgenfluoreszenz bei der Bestimmung von Blei im atmosphärischen Staub. Im Druck (1976).
- [13] Martin W. und Keller Th.: Über den Einfluss verunreinigter Stadtluft auf die Vegetation. Umwelthygiene 25, 221-227 (1974).
- [14] Müller Th. und Gilgen A.: Luftverunreinigung und Städtebau. Plan 29, 114-118 (1972).
- [15] National primary and secondary ambient air quality standards. The Federal Register 36, 8183-8201 (April 30, 1971).
- [16] Satish J. und Wanner H. U.: Beziehungen zwischen Aussenluft- und Raumluftverunreinigungen. Chem. Rundschau 28, Nr. 22, 28.5.1975.
- [17] Schucpp W.: Illustration zu grenzüberschreitenden Immissionen im Raume Basel. Vortrag anlässlich einer Tagung über Lufthygiene am Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie der ETHZ, am 12. 9. 1975.
- [18] Turrian V. und Gilgen A.: Untersuchung und Beurteilung der durch die Kehrichtverbrennung in die Luft gelangenden chlorhaltigen Verunreinigungen. Literaturstudie, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETHZ (1971).
- [19] Verein für Wasser-, Boden- und Lufthygiene: Immissions-situation durch den Kraftverkehr in der Bundesrepublik Deutschland. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1974.
- [20] Statistisches Amt der Stadt Zürich: Jahrbuch 1974.
- [21] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI-Richtlinien, Maximale Immissions-Werte, VDI 2310. VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1974.
- [22] Waibel M. und Wanner H. U.: Schwebestaubmessungen und Bestimmungen des 3,4-Benzopyrenegehaltes in Zürich. Zbl. Bakt. Hyg., 1. Abt. Orig. B 159, 169-177 (1974).
- [23] Wanner H. U.: Mikrobielle Verunreinigung der Luft durch Belebtschlammbecken. Zbl. Bakt. Hyg., 1. Abt. Orig. B 161, 48-53 (1975).

Adresse des Autors

PD Dr. H. U. Wanner, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, Eidg. Technische Hochschule, Clausiusstrasse 25, CH-8005 Zürich.