Abgase von Motorfahrzeugen: Entwicklung der Schadstoffemissionen des privaten Strassenverkehrs von 1950 bis 2000

Autor(en): **Infanger, Kurt**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **105 (1987)**

Heft 18

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-76577

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Abgase von Motorfahrzeugen

Entwicklung der Schadstoffemissionen des privaten Strassenverkehrs von 1950 bis 2000

Von Kurt Infanger, Bern

Das Bundesamt für Umweltschutz hat anfangs Jahr eine Studie veröffentlicht, in der aufgezeigt wird, wie sich die Abgase des privaten Personen- und Güterverkehrs von 1950 bis 1984 verändert haben und wie sie sich bis zum Jahr 2000 voraussichtlich weiter entwickeln dürften. Dieser umfassende Bericht stellt ein wesentliches Instrument der Luftreinhalteplanung dar. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen waren nicht nur eine der Grundlagen für das Luftreinhalte-Konzept des Bundesrates, sondern werden künftig für die Kantone und Gemeinden auch ein Arbeitsinstrument für den Vollzug des Umweltschutzgesetzes und insbesondere der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) bilden.

Im nachfolgenden Beitrag sollen im wesentlichen die durchgeführten Untersuchungen und die Resultate der umfangreichen Emissionsberechnungen zusammengefasst werden. Die verwendeten Grundlagen – einerseits die Emissionsfaktoren und andererseits die Fahrleistungen der einzelnen Fahrzeugkategorien – werden später im «Schweizer Ingenieur und Architekt» in zwei weiteren Aufsätzen vorgestellt.

Einleitung

Seit Beginn der 50er Jahre hat die Luftverschmutzung in der Schweiz laufend zugenommen. Dies führte zu schwerwiegenden Belastungen der Umwelt. Unsere Gewässer, der Boden, die Pflanzen, Kulturgüter, Materialien und nicht zuletzt auch wir Menschen sind bedroht. Die Luftverschmutzung hat Ausmasse angenommen, die für die Gesundheit des Menschen und für die Umwelt nicht mehr unbedenklich sind.

Der Strassenverkehr ist – neben den Haushalten und der Industrie – zu einer bedeutenden Quelle der Luftverschmutzung geworden. Dies ist die Folge des enormen Wachstums des Motorfahrzeugverkehrs in den letzten 30 Jahren. Nicht nur die Fahrzeugbestände, auch die individuelle Mobilität und damit die mit dem Auto zurückgelegten Wege haben um ein Vielfaches zugenommen. Die Konsequenz daraus sind unter anderem Abgase.

Bis anhin lagen bloss vereinfachende, globale Abschätzungen über die Entwicklung dieser Schadstoffemissionen vor. Eine detaillierte Ermittlung der Emissionsentwicklung erfordert umfangreiche Grundlagenerhebungen und aufwendige Modellberechnungen. Diese Arbeiten sind auf Bundesebene vor mehreren Jahren aufgenommen worden. Die vorliegende Studie ist das Ergebnis dieser Untersuchungen. Sie wurde durch das Bundesamt für Umweltschutz und den Stab für Gesamtverkehrsfragen unter Mitwirkung des Planungsbüros Abay & Meier, Zürich, durchgeführt.

Vorgehen

Bild 1 zeigt schematisch den Ablauf der gesamten Untersuchung. Grundlage für die Emissionsberechnung bildeten im wesentlichen die folgenden Einflussgrössen:

□ Die jährlichen *Fahrleistungen* der einzelnen Fahrzeugkategorien, aufgeteilt nach verschiedenen Geschwindigkeitsklassen und Strassenkategorien.

□ Die *Emissionsfaktoren*, d.h. der Schadstoffausstoss pro gefahrenen Kilometer, in Abhängigkeit von der Fahrzeugkategorie, dem Baujahr, der Motorenart und der Geschwindigkeit.

Die *Emissionsberechnungen* wurden auf EDV-Anlagen durchgeführt und ergaben für jedes Berechnungsjahr über 350 Resultate. Sie zeigen die gesamtschweizerischen Emissionen des privaten Strassenverkehrs in den Jahren 1950 bis 2000 für die folgenden Schadstoffe:

- Kohlenmonoxid (CO)
- Kohlenwasserstoffe (HC)
- Stickoxide (NO_x)
- Blei (Pb)
- Schwefeldioxid (SO_2)
- Russ.

Die Schadstoffemissionen wurden differenziert ermittelt, und zwar für die einzelnen Fahrzeugkategorien:

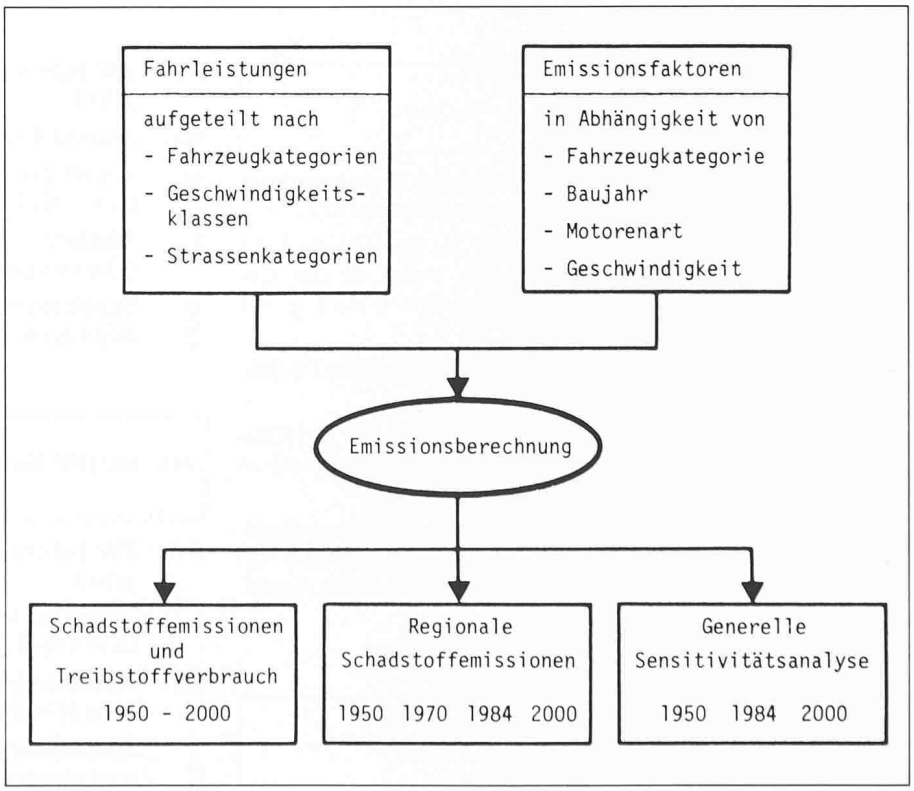
- Personenwagen (PW)
- Lieferwagen (LI)
- Lastwagen (LW)
- private Gesellschaftswagen (Car)
- Motorräder (MR)
- Motorfahrräder (Mofa)

und für die verschiedenen Strassenkategorien

- Autobahnen
- übrige Ausserortsstrassen
- Innerortsstrassen.

Neben den Emissionen sind für die Jahre 1950 bis 2000 auch der Benzin- und der Dieselverbrauch des privaten Strassenverkehrs berechnet worden.

Bild 1. Genereller Ablauf der Untersuchung



Die Schadstoffemissionen des Strassenverkehrs sind - je nach Strassendichte und Verkehrsaufkommen - regional stark unterschiedlich. Deshalb wurden die Resultate ausgewählter Jahre auch auf die 100 sogenannten Raumplanungsregionen der Schweiz sowie auf die 26 Kantone umgerechnet.

Um abzuschätzen, wie zuverlässig die Resultate sind, wurden abschliessend generelle *Sensitivitätsanalysen* durchgeführt. Diese Analysen erfolgten für das Jahr 1984 sowie für die Eckjahre des Beurteilungszeitraums, d.h. für 1950 und 2000.

Emissionsmodell

Im Emissionsmodell werden mit Hilfe der Eingabedaten die jährlichen Schadstoffemissionen der einzelnen Fahrzeugkategorien in diversen Aggregationsstufen berechnet. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass die Zusammensetzung des Fahrzeugparks nach Alter und Motorenart in der ganzen Schweiz gleich ist.

Der Berechnungsgang wird am Beispiel der Stickoxid-Emissionen von Personenwagen kurz erläutert. Die Berechnungen erfolgten gemäss Formel (1). Um die Formel nicht zu überlasten, wird hier - obwohl im Modell berücksichtigt - nicht zwischen Benzin- und Dieselfahrzeugen unterschieden.

Aus der Formel ist ersichtlich, dass die Stickoxid-Emissionen der Personenwagen für jedes Bezugsjahr durch Summierung von zahlreichen Einzelemissionen errechnet werden.

Kaltstart

Mit der vorstehenden Formel werden allerdings nur die Emissionen berechnet, die bei warmem Motor entstehen. Benzinbetriebene Motorfahrzeuge stossen jedoch beim Anlassen des kalten Motors, d.h. wenn das Fahrzeug ein paar Stunden stillstand, zusätzliche Schadstoffmengen aus. Diese Zusatzemissionen durch Kaltstart sind ebenfalls von der Zusammensetzung des Fahrzeugparks nach Alter und Motorenart sowie von der Anzahl Kaltstarts pro Fahrzeugkategorie und Tag abhängig.

Die durch Kaltstart verursachten Zusatzemissionen werden - am Beispiel des Stickoxidausstosses der Personenwagen für das Bezugsjahr J aufgezeigt - gemäss Formel (2) berechnet:

Die gesamten Stickoxid-Emissionen der Personenwagen ergeben sich durch Addition der Emissionen bei warmem Motor und der Zusatzemissionen durch Kaltstart. Für die anderen Fahrzeugkategorien werden die Stickoxid-Emissionen in analoger Weise berechnet.

Die Stickoxid-Emissionen des gesamten Motorfahrzeugverkehrs ergeben sich schliesslich durch Summierung der Emissionen von Personenwagen, Lieferwagen, Lastwagen, Gesellschaftswagen, Motorrädern und Motorfahrrädern. Bei der Berechnung der übrigen Schadstoffemissionen sowie des Treibstoffverbrauchs wird analog vorgegangen.

Verdampfungsverluste

Bei den benzinbetriebenen Motorfahrzeugen entstehen noch zusätzliche Kohlenwasserstoff-Emissionen durch Verdampfung des Treibstoffs aus Tank und Vergaser (sogenannte Verdampfungsverluste). Auch diese sind von der Alterszusammensetzung des Fahrzeugparks und von der Fahrzeugkategorie abhängig. Berechnet werden die Verdampfungsverluste - am Beispiel der Personenwagen für das Bezugsjahr J erläutert - gemäss Formel (3):

Für die übrigen Fahrzeugkategorien werden die Verdampfungsverluste in ähnlicher Weise berechnet und jeweils zu den vorgängig berechneten Kohlenwasserstoff-Emissionen hinzugezählt.

Ergebnisse für das Jahr 1984

Schadstoffemissionen, gegliedert nach Fahrzeugkategorien

Aus den Modellberechnungen ergeben sich - differenziert nach den verschiedenen Fahrzeugkategorien - die in Tabelle 1 angegebenen Schadstoffemissionen im Jahr 1984.

□ Die *Personenwagen* emittieren - bezogen auf den Gesamtausstoss des Strassenverkehrs - 84 Prozent des Kohlenmonoxids, 63 Prozent der Kohlenwasserstoffe, 72 Prozent der Stickoxide und 90 Prozent des Bleis.

□ Die *Lastwagen* sind hingegen mit etwa 65 bis 70 Prozent hauptverantwortlich für die Schwefeldioxid- und die Russ-Emissionen des Strassenver-

$$(1)\quad NO_x(PW_{warm}, J) = \sum_s \sum_g \sum_n f_{sg} \cdot a_n \cdot e_{ng}$$

$NO_x(PW_{warm}, J)$: Stickoxid-Emissionen der Personenwagen mit warmem Motor im Bezugsjahr J

f_{sg}: Fahrleistung der PW im Bezugsjahr J auf der Strassenkategorie s und in der Geschwindigkeitsklasse g (s = 1 bis 3; g = 1 bis 13)

a_n: Anteil der PW, die im Bezugsjahr J n Jahre alt sind (n = 1 bis 13)

e_{ng}: Mittlerer NO_x-Austoss (Gramm pro Kilometer) eines PW des Jahrganges (J-n) in der Geschwindigkeitsklasse g

$\sum_{s,g,n}$ Summierung über sämtliche Strassenkategorien (s), Geschwindigkeitsklassen (g) und Altersklassen (n) der Personenwagen.

$$(2)\quad NO_x\ (PW\text{-}Kaltstart, J) = 365 \cdot B \cdot KS \cdot \sum_n a_n \cdot k_n$$

B: PW-Fahrzeugbestand mit Bezinmotoren im Bezugsjahr J

KS: Anzahl Kaltstarts pro Tag im Bezugsjahr J

a_n: Anteil der PW, die im Bezugsjahr J n Jahre alt sind (n = 1 bis 13)

k_n: Mittlere Zusatz-NO_x-Emissionen pro Kaltstart (Gramm pro Kaltstart) eines PW des Jahrganges (J-n)

$\sum_n$ Summierung über sämtliche Altersklassen der Personenwagen.

$$(3)\quad HC\ (PW\text{-}Verdampfungsverluste, J) = 365 \cdot B \cdot \sum_n a_n \cdot d_n$$

B: PW-Fahrzeugbestand mit Benzinmotoren im Bezugsjahr J

a_n: Anteil der PW, die im Bezugsjahr J n Jahre alt sind (n = 1 bis 13)

d_n: Mittlerer HC-Emissionsfaktor für Verdampfungsverluste (Gramm pro Tag) eines PW des Jahrganges (J-n)

$\sum_n$ Summierung über sämtliche Altersklassen der Personenwagen.

kehrs. Im weitern dürfen die Lastwagen bei den Stickoxiden nicht ausser acht gelassen werden. Rund 22 Prozent der Stickoxide werden von den Lastwagen ausgestossen.

□ Die *Lieferwagen* haben, je nach Schadstoff, einen Anteil an den Strassenverkehrs-Emissionen von 5 bis 12 Prozent.

□ Die Emissionen der *privaten Cars* sind gesamthaft gesehen verhältnismässig klein.

□ Auch die *Motorrad*-Emissionen sind relativ gering. Ihr Anteil am Kohlenmonoxidausstoss des Strassenverkehrs beträgt 3 Prozent, am Kohlenwasserstoffausstoss knapp 8 Prozent.

□ Demgegenüber fallen die *Motorfahrrad* (Mofa)-Emissionen vor allem bei den Kohlenwasserstoffen stark ins Gewicht. Rund 16 Prozent der vom Strassenverkehr herrührenden, zum Teil krebserzeugenden Kohlenwasserstoffe stammen von den Mofas.

Schadstoffemissionen, gegliedert nach Strassenkategorien

Die im Zusammenhang mit dem Motorfahrzeugverkehr besonders bedeutungsvollen Schadstoffe Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickoxide fallen heute auf den einzelnen Strassenkategorien (Autobahnen, übrige Ausserortsstrassen, Innerortsstrassen) anteilsmässig wie folgt an (Bild 2):

□ Das *Kohlenmonoxid* wird mehrheitlich, d.h. zu rund 57 Prozent, bei geringen Geschwindigkeiten auf den Innerortsstrassen ausgestossen. Innerorts wird etwa doppelt so viel Kohlenmonoxid emittiert wie auf den Ausserortsstrassen und dreimal so viel wie auf den Autobahnen.

□ Auch die *Kohlenwasserstoff*-Emissionen des Strassenverkehrs stammen mit 65 Prozent zur Hauptsache vom Innerortsverkehr. Innerorts werden rund dreimal mehr HC-Emissionen produziert als ausserorts und fünfmal mehr als auf den Autobahnen.

□ Umgekehrt liegen die Verhältnisse bei den *Stickoxid*-Emissionen. Die Stickoxide werden überwiegend, d.h. zu rund 77 Prozent, bei höheren Geschwindigkeiten auf Autobahnen und den übrigen Ausserortsstrassen ausgestossen. Etwa ein Viertel der gesamten Stickoxide des Strassenverkehrs fallen innerorts an.

Vergleich der Schadstoffemissionen und Fahrleistungen

Vergleicht man am Beispiel der Personenwagen die Schadstoffemissionen auf den einzelnen Strassenkategorien mit den entsprechenden Fahrleistungsanteilen, so ergibt sich Bild 3.

Fahrzeugkategorie	*Schadstoffemissionen [t]*					
	CO	HC	NO_x	Pb	SO_2	Russ
Personenwagen	370 000	53 700	107 500	450	1300	80
Lastwagen	11 700	7 000	32 700	2	3100	470
Lieferwagen	25 900	4 100	7 500	35	230	80
private Cars	400	300	1 500	-	140	20
Motorräder	12 000	6 500	150	5	10	-
Motorfahrräder	22 000	13 400	150	8	20	-
Total (1984)	442 000	85 000	149 500	500	4800	650

Tabelle 1. Schadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1984, gegliedert nach Fahrzeugkategorien

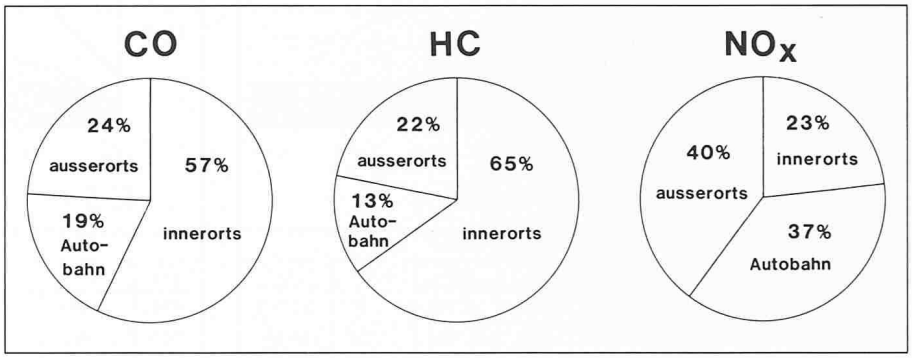
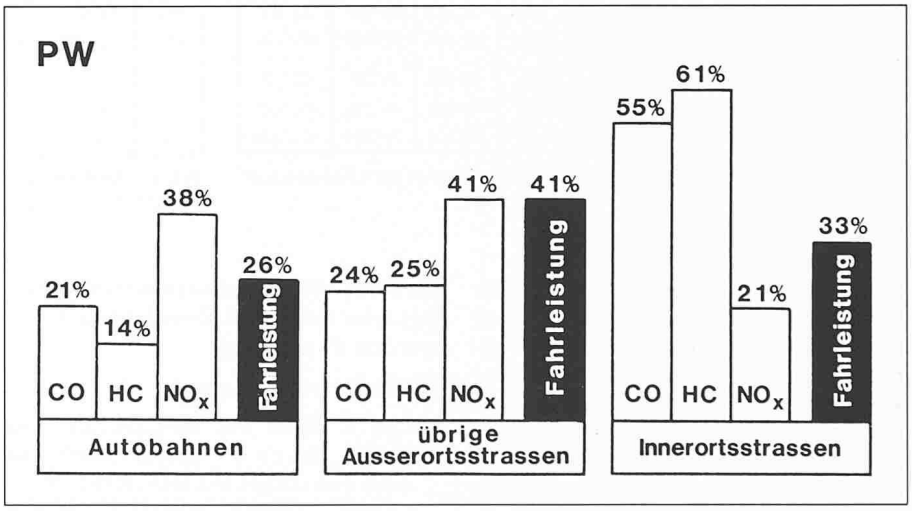


Bild 2. Schadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1984, gegliedert nach Strassenkategorien

Bild 3. Vergleich der Schadstoffemissionen und Fahrleistungen der Personenwagen 1984

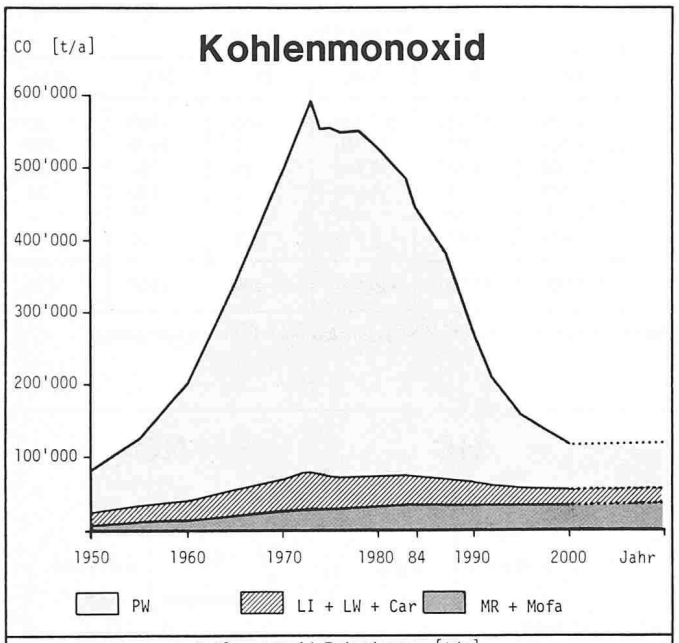


Im Verhältnis zu ihren Fahrleistungsanteilen stossen die Personenwagen auf den Autobahnen und den übrigen Ausserortsstrassen unterdurchschnittlich wenig *Kohlenmonoxid* und *Kohlenwasserstoffe* aus. Weit über ihrem Fahrleistungsanteil sind die CO- und HC-Emissionen hingegen innerorts. Hier widerspiegeln sich die Emissionsfaktoren: Bei geringen Geschwindigkeiten im Innerortsbereich wird pro gefahrenen Kilometer wesentlich mehr CO und HC ausgestossen als bei höheren Geschwindigkeiten, wie sie auf Autobahnen und den übrigen Ausserortsstrassen gefahren werden.

Umgekehrt verhält es sich beim *Stickoxidausstoss*. Dieser ist besonders hoch auf Autobahnen. Bei einem Fahrleistungsanteil von etwa 26 Prozent werden hier rund 38 Prozent der Stickoxide emittiert. Auf den übrigen Ausserortsstrassen ist der Stickoxidausstoss proportional zu den Fahrleistungen. Relativ wenig Stickoxide werden demgegenüber bei tiefen Geschwindigkeiten ausgestossen. Obwohl rund 33 Prozent der PW-Gesamtfahrleistungen im Innerortsbereich erbracht werden, werden bloss 21 Prozent der gesamten Stickoxide der Personenwagen auf den Innerortsstrassen emittiert.

Treibstoffverbrauch

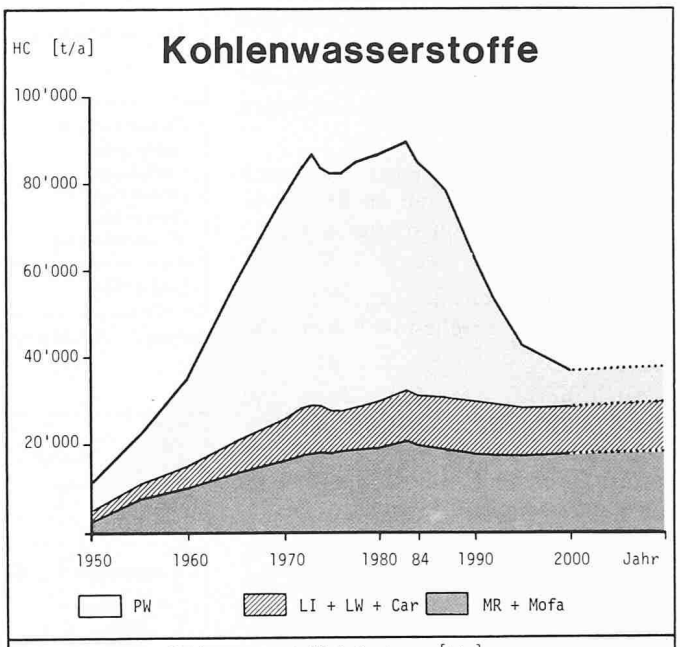
Im Jahre 1984 wurden auf dem schweizerischen Strassennetz rund 2,6 Mio Tonnen Benzin und rund 0,6 Mio Tonnen Dieseltreibstoff verbraucht;



Kohlenmonoxid-Emissionen [t/a]

Jahr	PW	LI	LW	Car	MR	Mofa	Total
1950	57'000	7'500	10'000	100	5'350	50	80'000
1955	91'400	9'200	12'300	150	11'600	350	125'000
1960	162'000	13'100	13'000	200	12'500	1'200	202'000
1965	283'700	22'000	13'300	200	9'000	10'300	338'500
1970	423'000	30'600	13'400	300	7'000	18'200	492'500
1975	480'300	29'600	14'250	250	5'600	23'000	553'000
1980	451'500	29'900	12'000	400	7'700	23'500	525'000
1984	370'000	25'900	11'700	400	12'000	22'000	442'000
1990	207'000	18'100	11'100	600	14'000	19'200	270'000
1995	100'000	10'000	12'000	600	15'200	18'200	156'000
2000	61'000	7'200	12'700	700	16'200	18'200	116'000

Bild 4. Kohlenmonoxid-Emissionen 1950-2000, gegliedert nach Fahrzeugkategorien



Kohlenwasserstoff-Emissionen [t/a]

Jahr	PW	LI	LW	Car	MR	Mofa	Total
1950	6'500	850	1'500	100	2'500	50	11'500
1955	11'000	1'100	2'400	100	7'700	200	22'500
1960	20'000	1'500	3'000	150	9'600	750	35'000
1965	35'000	2'700	4'600	200	7'300	6'200	56'000
1970	51'000	3'700	5'500	200	5'500	11'100	77'000
1975	54'500	3'500	5'900	200	4'000	13'900	82'000
1980	57'000	4'000	6'500	250	5'000	14'250	87'000
1984	53'700	4'100	7'000	300	6'500	13'400	85'000
1990	32'400	3'400	8'000	400	6'300	11'500	62'000
1995	14'500	1'700	8'700	500	6'500	11'100	43'000
2000	8'200	1'000	9'300	500	6'900	11'100	37'000

Bild 5. Kohlenwasserstoff-Emissionen 1950-2000, gegliedert nach Fahrzeugkategorien

dies entspricht rund 3500 Mio Liter Benzin bzw. rund 700 Mio Liter Diesel. Der Treibstoffverbrauch teilt sich gemäss den in Tabelle 2 angegebenen Werten auf die einzelnen Fahrzeugkategorien auf. Rund 90 Prozent des Benzins wird durch die Personenwagen, rund 87 Prozent des Dieseltreibstoffs durch die Lastwagen verbraucht.

Ergebnisse für die Jahre 1950-2000

Vorbemerkung

Nachfolgend wird die Emissionsentwicklung von 1950 bis 2000 der vier wichtigsten Schadstoffe – Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickoxide und Schwefeldioxid – dargestellt. In die Berechnungen 1950 bis 1984 wurden die in diesen Jahren eingeführten Abgasvorschriften einbezogen. Für die Prognosen ab 1984 wurden – neben der zu erwartenden Verkehrsentwicklung – zusätzlich diejenigen zukünftigen Abgasvorschriften berücksichtigt, welche bis Ende 1985 rechtsverbindlich festgelegt oder zumindest konkret eingeleitet wurden. Es sind dies:

□ Für Personenwagen:

- Die 2. Stufe der Abgasverordnung (AGV 86) ab 1. Oktober 1986 für neue Fahrzeuge mit Benzinmotor
- Gleich strenge Abgasvorschriften wie US-83 (Katalysatortechnik) ab 1. Oktober 1987 für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge

□ Für leichte Nutzfahrzeuge:

- Die 2. Stufe der Abgasverordnung (AGV 86) ab 1. Oktober 1986 für neue Fahrzeuge mit Benzinmotor und einem Gesamtgewicht bis 2500 kg
- Gleich strenge Abgasvorschriften wie die heutigen US-Normen für light duty trucks ab 1. Oktober 1988 für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge mit einem Gesamtgewicht bis 3500 kg

□ Die obligatorische jährliche Abgaswartung und Nachkontrolle für benzinbetriebene leichte Motorwagen ab 1986.

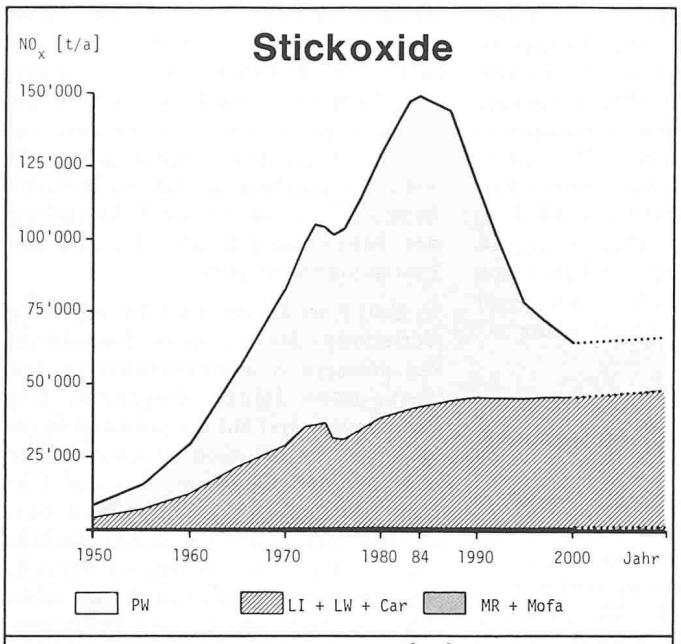
Tabelle 2. Treibstoffverbrauch der einzelnen Fahrzeugkategorien im Jahr 1984

Fahrzeugkategorie	*Benzin* (t)	*Diesel* (t)
Personenwagen	2 380 000	25 000
Lieferwagen	170 600	25 600
Lastwagen	8 200	512 000
private Cars	–	23 400
Motorräder	28 700	–
Motorfahrräder	42 500	–
Total (1984)	2 630 000	586 000

Nicht enthalten in den Prognoserechnungen sind die Lastwagen-, Motorrad- und Mofa-Abgasvorschriften, die der Bundesrat am 22. Oktober 1986 beschlossen hat. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurde die auf drei Jahre (1985-1987) befristete Herabsetzung der Höchstgeschwindigkeiten ausserhalb von Ortschaften und auf Autobahnen (Tempo 80/120).

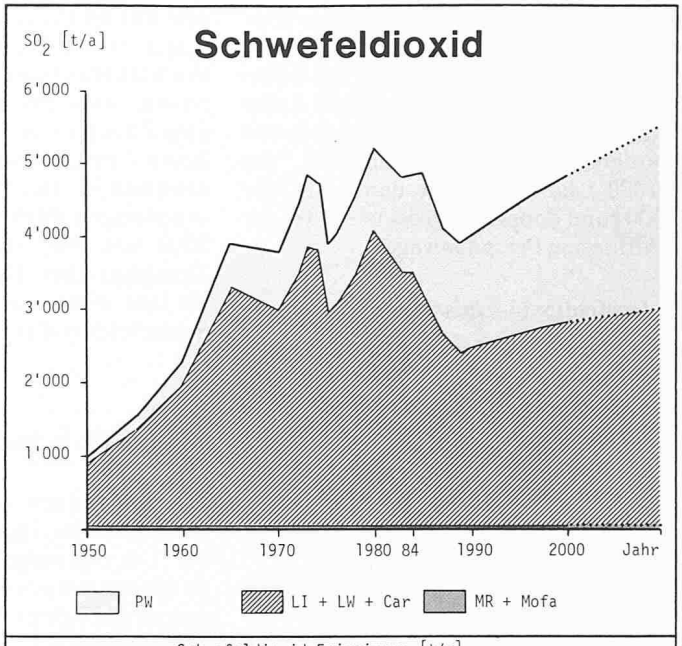
Kohlenmonoxid-Emissionen

Der Kohlenmonoxidausstoss des privaten Strassenverkehrs hat 1984 mit rund



Stickoxid-Emissionen [t/a]							
Jahr	PW	LI	LW	Car	MR	Mofa	Total
1950	4'200	550	2'900	300	50	<1	8'000
1955	8'300	800	5'900	400	100	2	15'500
1960	17'800	1'300	10'200	600	100	7	30'000
1965	34'000	2'500	18'100	800	50	50	55'500
1970	54'000	3'700	24'200	950	50	100	83'000
1975	70'500	4'200	26'200	900	50	150	102'000
1980	91'800	5'900	30'700	1'350	100	150	130'000
1984	107'500	7'500	32'700	1'500	150	150	149'500
1990	72'500	7'200	36'000	1'900	250	150	118'000
1995	33'700	4'600	38'200	2'100	250	150	79'000
2000	19'000	3'400	40'000	2'200	250	150	65'000

Bild 6. Stickoxid-Emissionen 1950-2000, gegliedert nach Fahrzeugekategorien



Schwefeldioxid-Emissionen [t/a]							
Jahr	PW	LI	LW	Car	MR	Mofa	Total
1950	100	20	775	100	5	<1	1'000
1955	150	40	1'200	100	10	<1	1'500
1960	300	50	1'800	120	20	1	2'300
1965	600	100	3'050	130	10	10	3'900
1970	800	120	2'700	150	10	20	3'800
1975	950	120	2'700	100	10	20	3'900
1980	1'100	200	3'700	170	10	20	5'200
1984	1'300	230	3'100	140	10	20	4'800
1990	1'500	250	2'100	110	20	20	4'000
1995	1'800	320	2'200	120	20	20	4'500
2000	2'000	360	2'300	130	20	20	4'800

Bild 7. Schwefeldioxid-Emissionen 1950-2000, gegliedert nach Fahrzeugkategorien

442 000 Tonnen einen Stand erreicht, der mehr als fünfmal höher ist als 1950. Seit 1973 ist infolge der Abgasvorschriften – trotz der Zunahme des Verkehrs – eine Abnahme der CO-Emissionen feststellbar. Im Jahr 2000 dürfte wieder ein Stand erreicht werden, der etwa demjenigen von 1955 entspricht. Danach dürften sich die Kohlenmonoxid-Emissionen – wegen weiter zunehmender Fahrleistungen – wieder leicht erhöhen.

Die Aufteilung des Gesamtausstosses an Kohlenmonoxid auf die einzelnen Fahrzeugkatetorien ist Bild 4 zu entnehmen. Es fällt auf, dass der Personenwagenverkehr am meisten CO emittiert. Betrug der Anteil der PW-Emissionen an den Gesamtemissionen 1950 rund 71 Prozent, so erhöhte sich dieser Anteil 1984 auf rund 84 Prozent. Im Jahr 2000 dürfte noch etwa die Hälfte des CO-Ausstosses von den Personenwagen stammen.

Kohlenwasserstoff-Emissionen

Der Kohlenwasserstoffausstoss des privaten Strassenverkehrs war 1984 gut siebenmal höher als 1950. Das Maximum wurde mit rund 90 000 Tonnen im Jahr 1983 erreicht. Seither nehmen die HC-Emissionen aufgrund der Abgasvorschriften für Personen- und Lieferwagen kontinuierlich ab. Bis im Jahr 2000 dürften die Kohlenwasserstoffe wieder auf den Stand von 1960 absinken. Dann wird die volle Wirksamkeit der US-83-Abgasvorschriften erreicht sein. Danach dürften die Kohlenwasserstoff-Emissionen – bei weiter zunehmenden Fahrleistungen – wieder leicht ansteigen (Bild 5).

Den grössten Anteil am Kohlenwasserstoffausstoss hatte bis anhin der Personenwagenverkehr. Stammten 1950 über 55 Prozent der HC-Emissionen von den PW, so erhöhte sich dieser Anteil mittlerweile auf rund 63 Prozent. Im Jahr 2000 dürften die Personenwagen nur noch rund ein Fünftel zu den HC-Emissionen des privaten Strassenverkehrs beitragen.

Stickoxid-Emissionen

Der Stickoxidausstoss des privaten Strassenverkehrs ist in den letzten 30 Jahren kontinuierlich angestiegen. Nur während der Energiekrise Mitte der 70er Jahre war die Emissionsentwicklung vorübergehend leicht rückläufig. 1984 wurde das Maximum an NO_x-Emissionen bei rund 150 000 Tonnen erreicht. Gegenüber 1950 bedeutet dies eine Zunahme um rund das 19fache (Bild 6).

Zukünftig werden die Stickoxid-Emissionen deutlich abnehmen. Das Wirksamwerden der neuen Abgasvorschriften für leichte Motorwagen (Katalysatortechnik) wird bis zur Jahrtausendwende zu einer Reduktion des gesamten Stickoxidausstosses des Strassenverkehrs um rund 57 Prozent führen. Im Jahr 2000 dürfte wieder ein Stand erreicht sein, der ungefähr demjenigen zwischen 1965 und 1970 entspricht. Nach Erreichen der vollen Wirksamkeit der Abgasvorschriften um das Jahr 2000 dürften die NO_x-Emissionen aber, bei noch zu erwartender Zunahme des Verkehrs, voraussichtlich wiederum ansteigen.

Bei den Personenwagen werden die NO_x-Emissionen dank der Katalysatortechnik von 1984 bis 2000 um rund 82

Prozent abnehmen. Demgegenüber dürften die NO_x-Emissionen der Lastwagen im Vergleich zu heute um weitere 22 Prozent ansteigen, sofern keine wirksamen Abgasvorschriften erlassen werden. Der Stickoxidausstoss der 50 000 Lastwagen wäre damit im Jahr 2000 rund doppelt so gross wie jener der 3 Millionen Personenwagen.

Schwefeldioxid-Emissionen

Die Schwefeldioxid-Emissionen des Verkehrs haben von 1950 bis 1984 um rund das Fünffache auf etwa 4800 Tonnen zugenommen und im Jahr 1980 das Maximum von 5200 Tonnen erreicht. Die Senkung des Schwefelgehaltes im Dieseltreibstoff auf 0,2% wird in den nächsten Jahren zu einer Verminderung des SO_2-Ausstosses des Strassenverkehrs führen. Nach 1990 dürfte sich der abnehmende Trend allerdings wieder umkehren; dies als Folge der sich abzeichnenden Zunahme des Dieselfahrzeugbestandes und der Fahrleistungen (Bild 7).

Der SO_2-Ausstoss des Strassenverkehrs stammt heute zur Hauptsache von den Dieselfahrzeugen. Die Lastwagen hatten 1984 einen Anteil am Gesamtausstoss von rund 65 Prozent. Die Personenwagen - bei denen es sich überwiegend um Benzinfahrzeuge handelt - hatten 1984, bedingt durch ihre hohen Fahrleistungen, doch immerhin einen Anteil von 27 Prozent.

Bis ins Jahr 2000 wird sich dieses Verhältnis zu Lasten der Personenwagen verschieben; dann dürften die Lastwagen mit 48 Prozent und die Personenwagen mit 42 Prozent am SO_2-Ausstoss des Verkehrs beteiligt sein. Dies kommt davon, dass bei den Personenwagen eine Zunahme der Dieselfahrzeuge von heute 1 Prozent auf etwa 5 Prozent zu erwarten ist. Der SO_2-Ausstoss der Personenwagen dürfte somit von 1984 bis 2000 um über die Hälfte ansteigen. Demgegenüber dürften die Lastwagen im Jahr 2000 rund ein Viertel weniger Schwefeldioxid emittieren als heute.

Regionale Schadstoffemissionen

Die Emissionen des Strassenverkehrs weisen starke regionale Unterschiede auf. Um dies aufzeigen zu können, wurde die regionale Verteilung der Emissionen in den Jahren 1950, 1970, 1984 und 2000 berechnet. Die Schweiz wurde dazu in die 100 sogenannten Raumplanungsregionen gegliedert, weil für sämtliche Regionen die entsprechenden Verkehrsdaten verfügbar sind.

Es ist klar, dass eine regionale Berechnung nur globaler Art sein kann. Entsprechend summarisch waren deshalb auch die getroffenen Annahmen. Mangels anderer Unterlagen musste mit der Hypothese gearbeitet werden, dass sich das Verkehrsaufkommen in der Schweiz seit 1950 in den verschiedenen Regionen proportional etwa gleich entwickelt hat. Speziell berücksichtigt wurde hingegen die Tatsache, dass das Autobahnnetz regional unterschiedlich ausgebaut wurde. Nicht berücksichtigt werden konnte der Umstand, dass durch den Bau von speziell attraktiven Strassen (z.B. Gotthardstrassentunnel) eine Verkehrsverbindung stark an Bedeutung gewinnen kann, so dass auf dieser Strecke eine überproportionale Verkehrszunahme stattfindet. Dadurch kann sich auch die regionale Verteilung der Fahrleistungen und dadurch der Emissionen verändern.

In Bild 8 ist als Beispiel die regionale Verteilung der Stickoxid-Emissionen des privaten Strassenverkehrs in den betrachteten Jahren dargestellt. Die Emissionen sind auf die jeweilige Bruttofläche der Region (Gesamtfläche ohne Wälder, Gewässer, Öd- und Unland) bezogen. Es gilt zu beachten, dass es sich jeweils um die durchschnittlichen Emissionen pro Region handelt. Innerhalb der Regionen kann allerdings, je nach lokalen Gegebenheiten, die Emissionsverteilung sehr unterschiedlich sein. Die Abbildungen vermitteln lediglich einen Überblick im gesamtschweizerischen Rahmen.

Die Emissionsverteilung widerspiegelt unverkennbar das schweizerische Strassennetz und die Siedlungsschwerpunkte. Im Mittelland und entlang der grossen Verkehrsachsen (z.B. San Bernardino-Route) ist der Schadstoffausstoss deutlich höher als in Gebirgsregionen mit relativ geringem Motorfahrzeugverkehr. Die höchsten Verkehrsemissionen sind in den städtischen Agglomerationen - wo über 60 Prozent der Bevölkerung leben - zu verzeichnen. Dies erkennt man an der dunklen Färbung dieser städtischen Agglomerationen. Weiter sieht man auch die zeitliche Veränderung der Emissionen im Zeitraum von 1950 bis 2000. Das Jahr 1950 war eindeutig am schwächsten belastet. Der Stand von 1950 wird auch im Jahr 2000 nicht wieder erreicht. Die Stickoxid-Karte des Jahres 2000 entspricht weitgehend derjenigen von 1970.

Für das Jahr 1984 wurden die Emissionen des privaten Strassenverkehrs auch kantonsweise ermittelt. In der Tabelle 3 sind die entsprechenden Resultate zusammengestellt.

Tabelle 3. Schadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1984 in den einzelnen Kantonen (gerundete Werte)

Kanton	Schadstoffemissionen 1984 [t]					
	CO	HC	NO_x	Pb	SO_2	Russ
Zürich	96 150	17 900	25 800	100	935	135
Bern	62 900	12 600	24 100	75	735	100
Luzern	18 400	3 750	6 200	20	195	25
Uri	2 200	450	900	3	30	5
Schwyz	9 400	1 750	3 650	10	110	15
Obwalden	1 450	300	500	2	15	2
Nidwalden	1 650	300	700	2	20	3
Glarus	2 350	450	1 050	3	30	5
Zug	5 250	1 100	2 000	6	60	8
Fribourg	11 300	2 500	5 300	15	150	20
Solothurn	16 800	3 250	6 050	20	185	25
Basel-Stadt	10 800	1 850	1 350	10	70	10
Basel-Landschaft	15 000	2 800	4 950	15	160	20
Schaffhausen	2 150	400	650	2	25	3
Appenzell AR	2 400	450	550	2	20	3
Appenzell AI	500	100	150	1	5	1
St. Gallen	26 650	4 900	9 250	30	300	40
Graubünden	11 050	2 200	5 250	15	155	20
Aargau	39 300	7 800	15 000	50	460	60
Thurgau	10 850	2 200	4 900	15	145	20
Ticino	16 050	2 850	4 600	20	155	20
Vaud	36 900	6 800	14 000	40	430	55
Valais	13 450	2 700	4 750	15	135	15
Neuchâtel	8 100	1 600	2 850	10	85	10
Genève	17 600	3 200	3 500	15	150	25
Jura	3 350	800	1 500	4	40	5
Total	442 000	85 000	149 500	500	4 800	650

Sensitivitätsanalyse

Das Emissionsmodell berechnet aus einer grossen Zahl von Eingabedaten die Schadstoffemissionen des Strassenverkehrs. Diese Eingabegrössen können naturgemäss mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sein. Die Genauigkeit des Endresultats ist also von der Genauigkeit der einzelnen Bestimmungsgrössen abhängig.

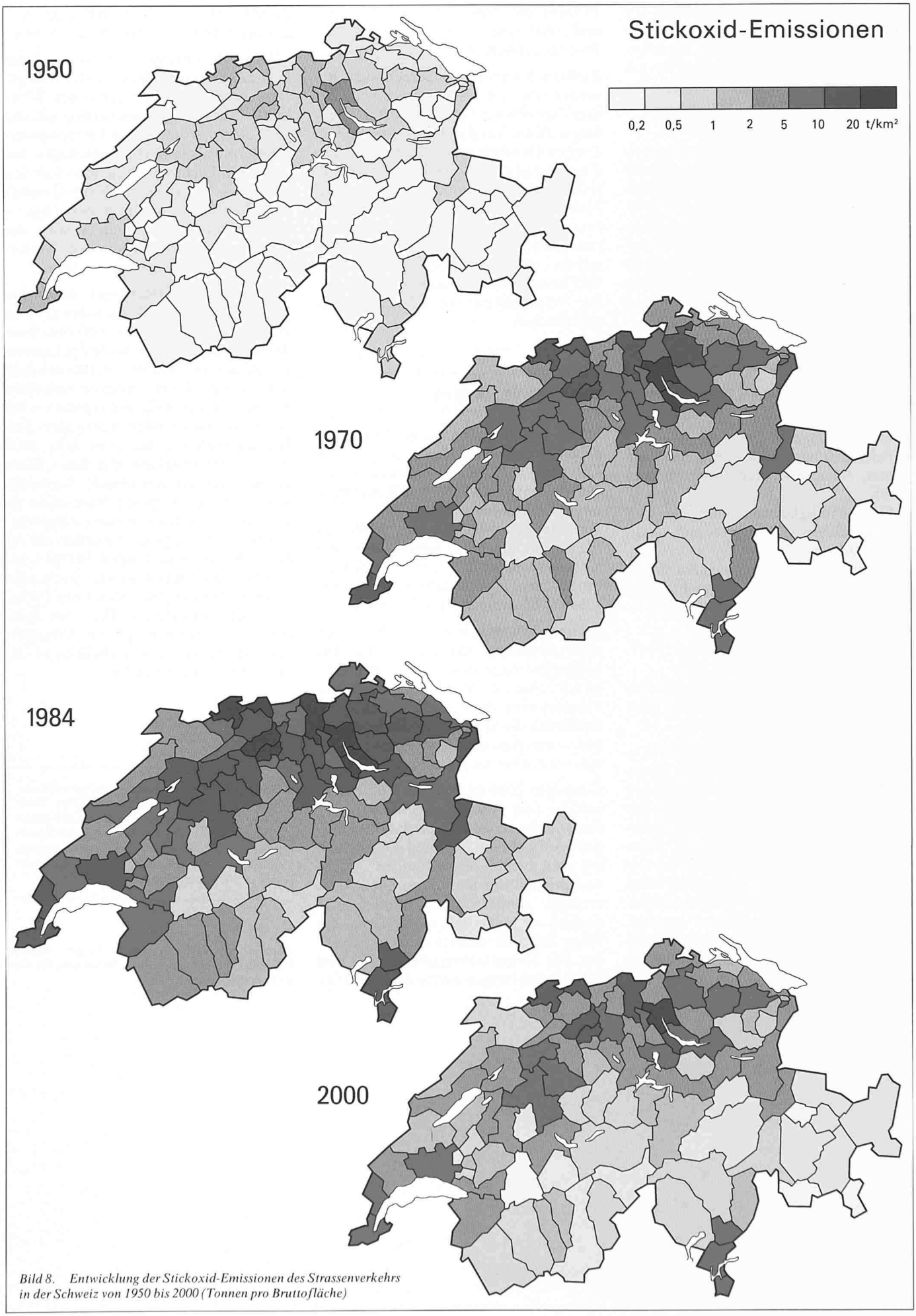


Bild 8. Entwicklung der Stickoxid-Emissionen des Strassenverkehrs in der Schweiz von 1950 bis 2000 (Tonnen pro Bruttofläche)

Um abzuschätzen, wie zuverlässig die Resultate sind, wurden sogenannte generelle Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Diese Analysen wurden für das Jahr 1984 sowie für die Eckjahre des Beurteilungszeitraums (1950 und 2000) vorgenommen.

Im Hinblick auf den umfangreichen Rechnungsaufwand wurden die Sensitivitätsanalysen auf die drei wichtigsten Emittenten des Strassenverkehrs (Personenwagen, Lastwagen und Motorfahrräder) beschränkt. Diese Fahrzeugkategorien sind zusammen für rund 80 bis 90 Prozent der Gesamtemissionen des privaten Strassenverkehrs verantwortlich.

Für die Sensitivitätsanalysen wurden die folgenden Eingabedaten variiert:

□ bei den Personenwagen und Lastwagen:

- Fahrleistungen
- Fahrleistungsanteile auf Autobahnen, Ausserorts- und Innerortsstrassen
- Geschwindigkeitsverteilungen auf Autobahnen, Ausserorts- und Innerortsstrassen
- Nach der Fahrzeugparkzusammensetzung gewichtete, geschwindigkeitsabhängige Emissionsfaktoren

□ bei den Motorfahrrädern:

- Fahrleistungen
- Nach der Fahrzeugparkzusammensetzung gewichtete Emissionsfaktoren.

Für jedes der drei Analysenjahre - 1950, 1984 und 2000 - wurden insgesamt je 18 250 Emissionsberechnungen mit verschiedenen Kombinationen der Eingabedaten durchgeführt. Die Ergebnisse der drei berücksichtigten Fahrzeugkategorien lassen sich auf die Gesamtemissionen des Strassenverkehrs übertragen. Aus den Sensitivitätsberechnungen kann gefolgert werden, dass die ermittelten Gesamtemissionen für das Jahr 1984 eine Unsicherheit in der Grössenordnung von etwa ± 10 Prozent, diejenigen für die Jahre 1950 und 2000 eine solche von rund ± 20 Prozent aufweisen.

Zusätzlich wurden die berechneten Resultate von 1950 bis 2000 auch noch auf ihre Plausibilität hin überprüft. Dies erfolgte durch Vergleich des errechneten Treibstoffverbrauchs mit dem in der Energiestatistik ausgewiesenen Treibstoffabsatz. Die modellmässigen Berechnungen des Benzin- und Dieselverbrauchs des Strassenverkehrs erscheinen plausibel. Daraus kann gefolgert werden, dass die mit dem gleichen Modell berechneten Schadstoffemissionen der Wirklichkeit ebenfalls recht gut entsprechen.

Schlussfolgerungen

□ Die Luftverschmutzung durch den privaten Strassenverkehr ist je nach Luftschadstoff heute um das 5- bis 19fache höher als 1950. Die Kohlenmonoxid-Emissionen haben 1973, die Schwefeldioxid-Emissionen 1980 ihr Maximum erreicht, währenddem die Kohlenwasserstoff- und Stickoxid-Emissionen in den Jahren 1983 bzw. 1984 ihr Maximum erreicht haben.

□ Die vom Bundesrat beschlossenen schweizerischen Abgasvorschriften für Motorfahrzeuge bewirken eine Trendwende, obschon der Verkehr weiter zunehmen wird. Bis zur Jahrtausendwende werden die Strassenverkehrsemissionen - mit Ausnahme des Schwefeldioxids - um über die Hälfte zurückgehen.

□ Im Jahr 2000 dürften die Kohlenmonoxid- und die Kohlenwasserstoff-Emissionen tiefer sein als 1960. Hingegen wird bei den Stickoxid-Emissionen mit den bisher beschlossenen Abgasvorschriften der Stand von 1960 nicht erreicht, sondern noch immer rund doppelt so hoch liegen wie 1960. Als Folge der sich abzeichnenden Zunahme des Dieselfahrzeugbestandes und der Fahrleistungen dürfte der Schwefeldioxidausstoss im Jahr 2000 sogar wieder den Stand von 1984 erreicht haben.

□ Den technischen Umweltschutzmassnahmen sind deutlich Grenzen gesetzt: Nach Erreichen der vollen Wirksamkeit der Abgasvorschriften um das Jahr 2000 herum ist das Emissionsverminderungspotential ausgeschöpft. Bei weiterhin leicht zunehmenden Fahrleistungen - wie es der Stab für Gesamtverkehrsfragen prognostiziert hat - dürfte danach ein neuer Anstieg der Schadstoffemissionen aus dem Motorfahrzeugverkehr zu erwarten sein.

□ Diese Schlussfolgerungen gelten bezüglich der Stickoxide auch dann, wenn man die am 22. Oktober 1986 vom Bundesrat beschlossene 1. Stufe der Lastwagen-Abgasvorschriften mitberücksichtigt. Trotz dieser Abgasvorschriften werden die Lastwagenemissionen - bei einer zu erwartenden Lastwagen-Verkehrszunahme - bis zum Jahr 2000 noch weiter ansteigen; d.h. die 1. Stufe vermag das zu erwartende Verkehrswachstum der nächsten Jahre nicht zu kompensieren. Ohne weitere Abgasvorschriften für Lastwagen würden die im Jahr 2000 zu erwartenden 50 000 Lastwagen rund doppelt so viel Stickoxide produzieren wie alle 3 Millionen Personenwagen zusammen. Die vom Bundesrat vorgesehene weitere Verschärfung der Lastwagenvorschriften ist daher unbedingt notwendig.

Der rund 270seitige Bericht «Schadstoffemissionen des privaten Strassenverkehrs 1950-2000» liegt in deutscher und französischer Sprache vor. Er kann als Heft Nr. 55 der Schriftenreihe Umweltschutz beim Dokumentationsdienst des Bundesamtes für Umweltschutz, 3003 Bern, bezogen werden.

Adresse des Verfassers: *K. Infanger*, dipl.Ing. ETH/SVI, Verkehrsingenieur, Bundesamt für Umweltschutz, 3003 Bern.