

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 91 (1973)  
**Heft:** 36: SIA-Heft, Nr. 8/1973: Lebensraum und Technik

**Artikel:** Luftverschmutzung durch Verbrennungsmotoren  
**Autor:** Corbat, Jean-Pierre  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-71975>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 20.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Von J. P. Corbat, Lausanne<sup>1)</sup>

## 1. Einleitung

### 1.1 Das Problem des Bevölkerungswachstums

Das unaufhaltsame Bevölkerungswachstum, nicht zuletzt als Folge der Industrialisierung und der wissenschaftlichen Forschung, sowie der immer höhere Lebensstandard in den meisten Ländern, gefolgt von einer dauernd ansteigenden Nachfrage nach Gütern aller Art, liessen den Weltenergiebedarf seit der Jahrhundertwende in exponentieller Weise ansteigen (Bild 1).

### 1.2 Die Verbrennung als weitaus grösster Energiespender und Luftverschmutzer

Der weitaus grösste Teil des Welt-Energiebedarfs wird durch Verbrennung gedeckt (1970: 94%). Wasser- und Atomkraft spielen dabei eine nur untergeordnete Rolle (Bild 2).

Bei jeder Verbrennung spielen sich bekanntlich chemische Reaktionen ab; der Sauerstoff wird verbraucht, und es entstehen Abgase, die unter gewissen Bedingungen schädliche Bestandteile enthalten. Übersteigt die dadurch bedingte Luftverschmutzung örtlich und zeitlich das zulässige Mass, so stellt sie für Mensch, Tier und Pflanze eine erhebliche Bedrohung dar. Dass diese Grenze für verschiedene wirtschaftliche Ballungszentren mit besonderen klimatischen Voraussetzungen erreicht bzw. überschritten sind, zeigte 1952 erstmals A. J. Haagen-Smit [1], der die Smogbildung von Los Angeles auf Abgase zurückführte, die Stickoxide und Kohlenwasserstoffe enthalten.

Dass ein exponentielles Anwachsen einer Umweltveränderung auf unserem endlichen Planeten letzten Endes zu einer Katastrophe führen muss, wurde weltweit erkannt, doch müssen wir uns im klaren sein, dass zur Verhinderung einer

<sup>1)</sup> Erweiterte deutsche Fassung eines Vortrages, der an der ETH Lausanne im Rahmen des Nachstudienzyklus «Les bases scientifiques de la protection de l'air» am 11. Dezember 1972 gehalten wurde.

solchen Lage Kräfte von derselben Grössenordnung wirken müssen wie diejenigen, die im Begriffe sind, die Prozesse der Natur zu beeinflussen. Es mag ein geringer Trost sein, dass die fossilen Brennstoffvorräte nach verschiedenen Schätzungen erst gegen Ende des nächsten Jahrhunderts bei weiter ansteigender Ausbeutung zu Ende gehen werden. Es bleibt lediglich zu hoffen, dass bis zu diesem Zeitpunkt ein vollwertiger Ersatz in Form einer sauberen Energie gefunden wird. Das Abbrennen sämtlicher in Jahrsmilliarden gebildeten fossilen Brennstoffreserven der Erde innerhalb von zwei Jahrhunderten kann nicht ohne Spuren zu hinterlassen vor sich gehen.

### 1.3 Der Verbrennungsmotor, eine der wichtigsten Erfindungen der Menschheit

Man kann sich die Entwicklung auf unserem Planeten ohne den Einsatz von Verbrennungsmotoren, die erlauben, thermische Energie in mechanische Arbeit umzuwandeln, kaum vorstellen. Es wundert denn auch nicht, wenn der weitaus grösste Teil der Schadstoffe von eben dieser Maschine, die für Transporte zu Land, zu Wasser und in der Luft eingesetzt wird, herrühren. Die Anteile der einzelnen Verschmutzer fallen je nach Region verschieden aus. Für die USA ergab sich im Jahre 1966 die in Bild 3 gezeigte Verteilung (nach Ergebnissen des National Research Council, in Massen-%). Diese Statistik sagt jedoch nicht viel aus, weisen doch die einzelnen Abgase unterschiedliche Giftigkeit auf. Dafür wurde aber bis heute noch kein Kriterium für eine Gesamtbewertung gefunden. Bringt man von den einzelnen Emissionen den der Umwelt zumutbaren Anteil (worüber sich streiten lässt) in Abzug und berücksichtigt die relative Giftigkeit, verbessert sich die Statistik zugunsten des Verbrennungsmotors (Bild 4).

Es ist klar, dass man sich von vornherein des Verbrennungsmotors als einer der wichtigsten Schadstoffquellen annehm. Die Luftverschmutzung ist vielleicht das grösste Problem, dem die Motorenhersteller, vorab die Hersteller der

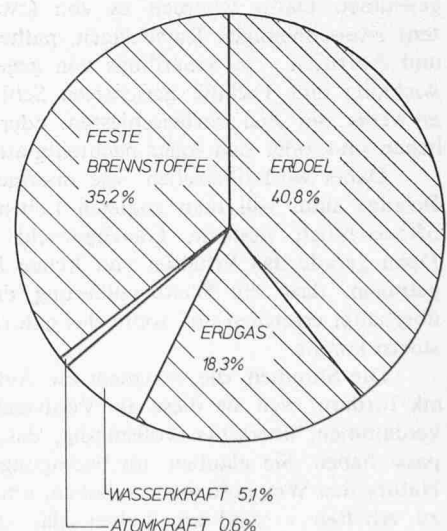
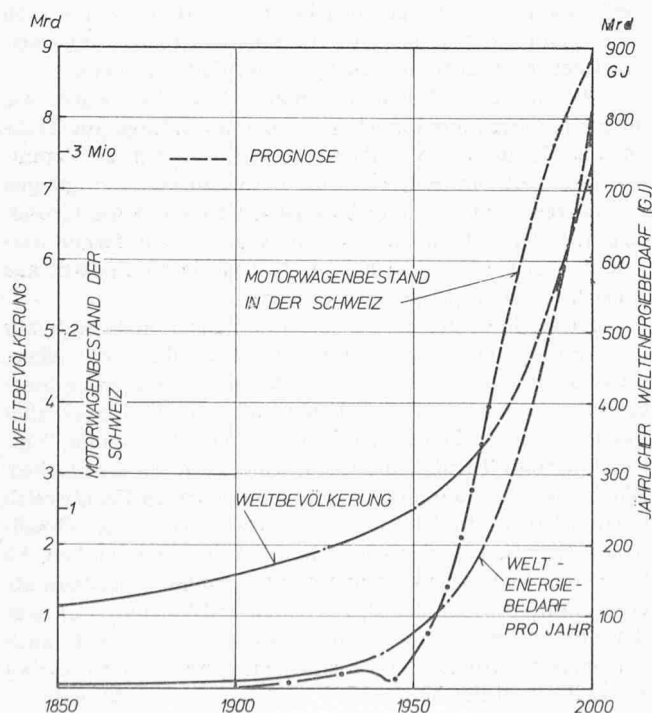


Bild 2. Prozentuale Anteile der Rohenergien zur Deckung des Weltenergiebedarfs im Jahre 1970

Bild 1 (links). Zunahme der Weltbevölkerung, des jährlichen Weltenergieverbrauchs und des Motorwagenbestandes der Schweiz in den Jahren 1850 bis 2000

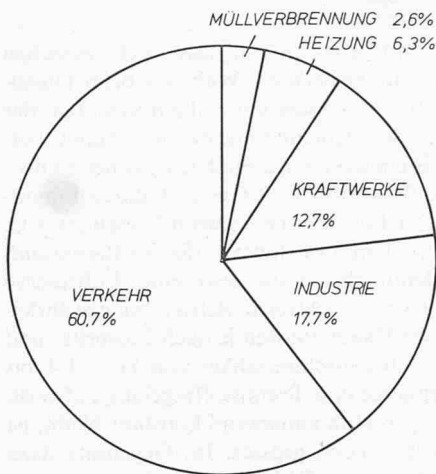


Bild 3. Emissions-Anteile der einzelnen Luftverschmutzer in Massen % in den USA im Jahre 1966

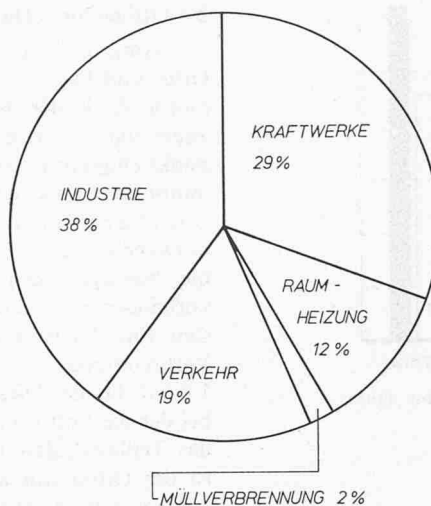


Bild 4. Anteile der einzelnen Luftverschmutzer, bezogen auf die Schädlichkeitsgrenze, in den USA im Jahre 1966

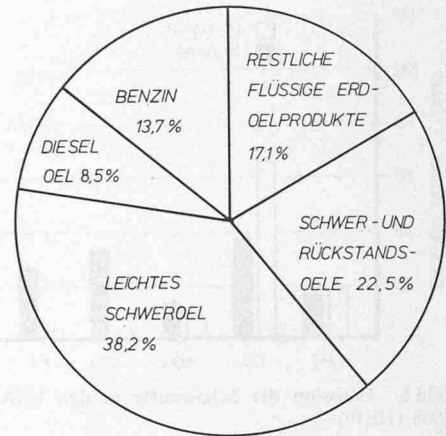


Bild 5. Verteilung der flüssigen Erdölprodukte in Deutschland im Jahre 1969

Ottomotoren, gegenüberstehen. Das ständige Anwachsen des privaten Verkehrs (Bild 1) liess das Automobil zu einem Umweltfeind ersten Ranges werden.

Der vorliegende Bericht soll einen Überblick über die Abgasprobleme der Verbrennungsmotoren geben und zeigen, welche technischen Verbesserungsmöglichkeiten bestehen. Da die ganze Problematik vielschichtig und kompliziert ist und die Abgastechnik sich in ständiger Entwicklung befindet, erhebt dieser Beitrag keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

## 2. Die Grundlagen der Verbrennung

### 2.1 Die Brennstoffe

Die für Verbrennungsmotoren verwendeten Brennstoffe sind je nach Herkunft des Erdöls und Verwendungszweck von sehr unterschiedlicher Zusammensetzung. Sie sind ein vielfältiges Gemisch von Kohlenwasserstoffen (HC); so besteht das Benzin aus rund 400 verschiedenen HC-Verbindungen, während es für einen leichten Dieselmotoren noch ungefähr deren 200 sind. Weitere, z.T. unbrennbare Bestandteile sind ebenfalls vorhanden. Schwefel findet man hauptsächlich in den Brennstoffen für Dieselmotoren. Bleiverbindungen (z.B. Blei-Tetraäthyl) dienen als Zusatz, der die Klopfestigkeit des Benzins erhöht. An gasförmigen Brennstoffen, die für Verbrennungsmotoren Verwendung finden, sind zu erwähnen: Methan ( $\text{CH}_4$ ), vermischt mit Äthan ( $\text{H}_2\text{H}_6$ ), Propan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) und Butan ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ). Andere Gasarten werden für den Betrieb von Motoren nur selten gebraucht.

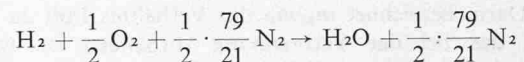
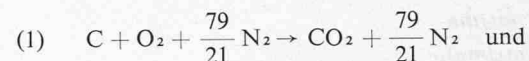
Tabelle 1 gibt eine Übersicht über Zusammensetzung und Eigenschaften der wichtigsten flüssigen Motoren Brennstoffe.

Teilt man den Mineralölverbrauch auf die einzelnen Brennstoffarten auf, so stellt man fest, dass das Schweröl den

weitaus grössten Teil ausmacht. Davon gelangt jedoch nur der kleinere Teil in grösseren Dieselmotoren zur Verbrennung, während die Hauptsache in Kraftwerken und in der Industrie umgesetzt wird. Der Anteil des verbrauchten Benzins ist erheblich, was zusammen mit dem besonders schlechten Abgasverhalten der Ottomotoren für diese Kategorie einen hohen Emissionsanteil ergibt. Dieselöl wird hauptsächlich von den kleineren Dieselmotoren verbraucht. Eine für die Bundesrepublik Deutschland gültige Zusammenstellung gibt Bild 5.

### 2.2 Kohlendioxid und Wasserdampf als Produkte der idealen Verbrennung

Ist genügend Luft (bestehend in erster Annäherung aus 21%  $\text{O}_2$  und 79%  $\text{N}_2$ ) vorhanden, so laufen bei der Verbrennung eines reinen Kohlenwasserstoffs die folgenden exothermen Reaktionen ab:



Es entstehen dabei Abgase, die Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) enthalten. Da Wasser in grossen Mengen auf der Erde vorhanden und Leben ohne es nicht möglich ist, wird der bei der Verbrennung entstehende Wasserdampf nicht als Verschmutzung aufgefasst. Auch das Kohlendioxid gilt nicht als Luftverschmutzer. Da jedoch nicht alles  $\text{CO}_2$  durch die Photosynthese der Pflanzen wieder abgebaut werden kann, nimmt die  $\text{CO}_2$ -Konzentration unserer Atmosphäre dauernd zu.

Tabelle 1. Eigenschaften der flüssigen Brennstoffe

BRENNSTOFF	ZUSAMMENSETZUNG %						DICHTe kg/m <sup>3</sup>	VISKOSITÄT		HEIZWERT MJ/kg
	C	H <sub>2</sub>	S	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	ASCHe		SR I bei 100°F	cSt bei 20°C	
BENZIN <sup>1)</sup>	85,7- 84,2	14,3- 15,8	0	0	0	0	750	3	0,75	46,5-43,5
DIESEL-ÖEL	85,6	13,4	0,6	0,1	0,3	0	830	36	4,3	42,6
SCHWEROEL (leicht)	85,4	11,8	1,8	0,3	0,7	0,01	930	450	112	41,2
SCHWEROEL	83,8	11,3	3,6	0,4	0,9	0,03	950	1000	250	39,8
RÜCKSTANDSOEL	85,1	10,9	2,4	0,5	1,0	0,06	960	10000	2300	39,8

<sup>1)</sup> + 0,6 gPb/LITER

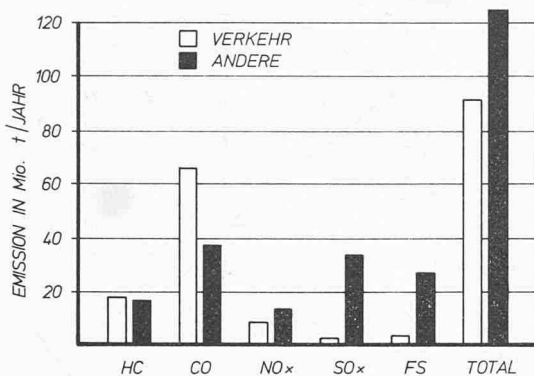


Bild 6. Emission der Schadstoffe in den USA im Jahre 1968 (HEW)

### 2.3 Die Schadstoffe der wirklichen Verbrennung

Die wirklichen Bedingungen für die Verbrennung weichen stark von den idealen Verhältnissen ab, wie sie oben beschrieben wurden, und zwar aufgrund der folgenden Tatsachen:

- Die optimalen Bedingungen für die Verbrennung werden kaum je erreicht. Die Verbrennung erfolgt nur teilweise, woraus Kohlenmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und Russ (C) entstehen
- Der Stickstoff der Luft kann ebenfalls chemische Reaktionen mit dem Sauerstoff eingehen, woraus Stickoxide (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>2</sub> usw.) entstehen
- Der Brennstoff besteht nicht nur aus Kohlenwasserstoffen, sondern enthält weitere Komponenten (Schwefel, Stickstoff, Unverbrennbares usw.). Auch Zusätze werden ihm beigegeben, deren Bestandteile sich wieder im Abgas vorfinden. Es entstehen Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Asche, Bleioxide usw.

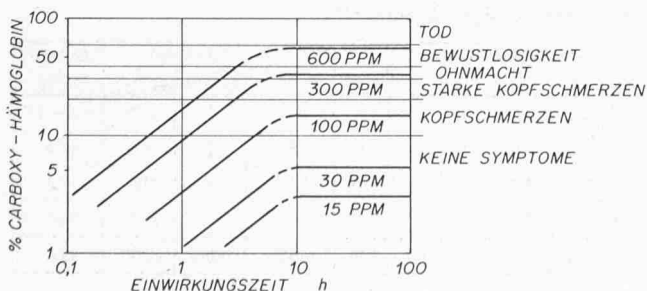
Für die USA ergaben sich im Jahre 1968 die in Bild 6 gezeigten Emissionsanteile für die einzelnen Schadstoffkomponenten [2].

Die Haupteinflussgrösse auf die Verbrennung und damit auf die Schadstoffemission ist die Luftüberschusszahl  $\lambda_v$ , die folgendermassen definiert ist

$$(2) \quad \lambda_v = \frac{\dot{m}_L / \dot{m}_B}{(\dot{m}_L / \dot{m}_B)_{st}}$$

Darin bezeichnet  $\dot{m}_L / \dot{m}_B$  das Verhältnis Luft zu Brennstoff, das bei der Verbrennung vorhanden ist, während  $(\dot{m}_L / \dot{m}_B)_{st}$  dasselbe Verhältnis bei stöchiometrischen Bedingungen darstellt, bei denen gerade soviel Luft vorhanden ist, als zur theoretischen Verbrennung des Brennstoffs nötig wäre. Für normalerweise verwendete flüssige Brennstoffe beträgt das stöchiometrische Verhältnis Luft zu Brennstoff 14 bis 15 kg Luft/kg Brennstoff. Für ein reiches Gemisch, d.h. für eine Verbrennung mit Luftmangel, wird die Luftüberschusszahl kleiner als eins, während für Luftüberschuss (mageres Gemisch)  $\lambda_v$  grösser als eins wird.

Bild 7. Giftigkeit des Kohlenmonoxids



### 2.4 Ottomotor – Dieselmotor

Aufgrund der Luftüberschusszahl lässt sich zwischen Otto- und Dieselmotor unterscheiden. Während beim Dieselmotor dank den hohen Kompressionsendtemperaturen der angesaugten Luft eine Selbstentzündung des im oberen Totpunkt eingespritzten Brennstoffes stattfindet, wird beim Ottomotor das angesaugte Brennstoff-Luft-Gemisch durch Fremdzündung entzündet. Der Luftüberschuss beim Dieselmotor ist notwendig, da die Verteilung des Brennstoffes im Brennraum nie homogen sein kann. Es muss also eine Luftreserve vorhanden sein, um einen rauchfreien Betrieb zu gewährleisten. Für Vollast weisen Dieselmotoren je nach Einspritz- und Verbrennungssystem Luftüberschusszahlen von  $\lambda_v = 1,4$  bis 1,8 auf. Da der Dieselmotor eine Brennstoffregelung aufweist, bei der die Luftmenge pro Hub annähernd konstant bleibt, ist das Teillast-Luftverhältnis noch grösser. Im Gegensatz dazu ist der Ottomotor auf ein zündfähiges Gemisch angewiesen, welches nur im stöchiometrischen Bereich gewährleistet ist. Ein kleiner Brennstoffüberschuss (reiches Gemisch) bzw. ein gewisser Luftüberschuss (mageres Gemisch) ist zulässig, je nachdem, ob man den Motor für optimale Leistung oder für geringsten spezifischen Verbrauch einstellt. Die Leistungsregelung des Ottomotors geschieht durch Regelung der Luft- und der Brennstoffmenge (Drosselklappe und Vergaser). Dieser wesentliche Unterschied zwischen Diesel- und Ottomotor ist der Grund dafür, dass Ottomotoren höhere spezifische Leistungen aufweisen (Leistung pro Hubraumeinheit), der Dieselmotor aber bezüglich Wirtschaftlichkeit und Schadstoffemission im Vorteil ist.

## 3. Die Auswirkungen der einzelnen Abgaskomponenten auf Mensch und Umwelt [3]

### 3.1 Kohlendioxid CO<sub>2</sub>

Das Kohlendioxid gilt nicht als Schadstoff, man nimmt jedoch an, dass die dauernde Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre das Klima beeinflusst.

### Kohlenmonoxid CO

Die Aufgabe des Hämoglobins im Blut besteht darin, den Sauerstoff von der Lunge in die verschiedenen Teile des Körpers zu transportieren und das dort gebildete Kohlendioxid wieder zur Lunge zurückzubringen. Die etwa 200mal höhere Affinität des Hämoglobins zu CO als zu O<sub>2</sub> führt dazu, dass schon bei verhältnismässig geringer Konzentration von CO in der Luft das Blut nach kurzer Zeit mit CO so gesättigt wird, dass der Erstickungstod eintritt.

Setzt sich ein Mensch einer CO enthaltenden Atmosphäre aus, so steigt vorerst der Anteil Carboxyhämoglobin (d.h. der CO tragende Anteil des Hämoglobins) über einige Stunden an, um schliesslich entsprechend der Höhe des CO-Gehalts bei einem Gleichgewichtszustand anzulangen (Bild 7 [2]).

Die giftige Wirkung des CO hängt somit von der Zeit der Einwirkung wie auch von der Höhe der Konzentration ab.

Die maximalen Arbeitskonzentrationen (MAK) für CO sind in Deutschland im Mittel 8 ppm über 24 h, 16 ppm über 8 h; in den USA 9 ppm über 8 h bzw. 35 ppm über 1 h.

### Kohlenwasserstoffe HC

Unter diesen Begriff fällt die ganze Vielfalt der unverbrannten oder teilweise verbrannten Kohlenwasserstoffe wie polycyclische Kohlenwasserstoffe, Phenole, Aldehyde, Benzpyren, Karbonsäuren usw. Sie beteiligen sich an der Smogbildung. Teilweise unschädlich, sind sie vor allem verantwortlich für den Abgasgeruch (Aldehyde). Einige Kohlenwasserstoffe sind krebserzeugend, vor allem das Benzpyren. Es konnten in



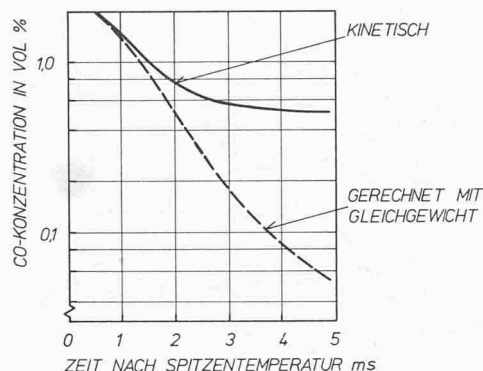
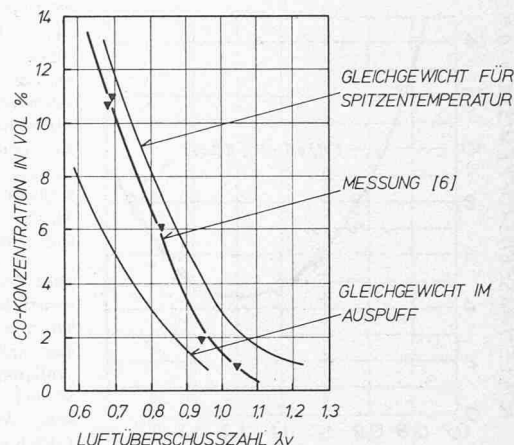


Bild 8 (links). Verlauf der CO-Konzentration in Vol % in Abhängigkeit von der Zeit nach Erreichen der Spitztemperatur in ms

Bild 9 (rechts). CO-Konzentration in Vol % in den Abgasen des Ottomotors in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl



den USA und in Deutschland Schäden an Pflanzen und Kulturen festgestellt werden, die auf das Äthylen, das für Mensch und Tier so gut wie ungiftig ist, zurückzuführen sind.

#### Stickoxide $\text{NO}_x$

Gleich wie für Kohlenmonoxid weist das Hämoglobin auch für Stickoxide eine erhöhte Affinität auf. Seine schädliche Wirkung ist jedoch vor allem darin zu suchen, dass sie mit der Feuchtigkeit zusammen stark verdünnte Salpetersäure ( $\text{H}_2\text{NO}_3$ ) bilden, welche die Augen reizen und auf lange Dauer zum Lungenödem führen kann. Zusammen mit den unverbrannten Kohlenwasserstoffen sind die Stickoxide schuld an der Smogbildung [1].

Die maximal zulässige Arbeitsplatzkonzentration (MAK) für Stickoxide ist umstritten, es finden sich Mittelwerte von 1 bis 25 ppm über 8 Stunden.

#### Schwefeldioxid $\text{SO}_2$

Das Schwefeldioxid bildet zusammen mit der Feuchtigkeit (Luftfeuchtigkeit, Schleim usw.) schweflige Säure ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ), welche die Schleimhäute der Atemwege reizt, sie zu vermehrter Schleimproduktion anregt und die Aktivität der Flimmerzellen beeinträchtigt, die für die Selbstreinigung der Lunge verantwortlich sind. Im weiteren löst Schwefeldioxid eine Verengung der Luftwege und damit eine erschwerte Atmung sowie Hustenreflex aus. Die maximal zulässige Arbeitskonzentration ist 5 ppm über 8 h. Ein Teil des Schwefeldioxides verbindet sich mit anderen in der Luft enthaltenen Verunreinigungen und bildet Sulfate.

#### Feststoff-Teilchen

Der weitaus grösste Teil der Feststoff-Emission sind gewöhnliche Kohlentelchen (Russ) und Sulfate. Diese Teilchen sind allein schon aus Gründen der atmosphärischen Trübung und Oberflächenverschmutzung, die sie erzeugen, unerwünscht. Sie dienen auch als Kondensationskeime und tragen dann als Aerosol zur atmosphärischen Trübung bei. Der Grossteil dieser Teilchen setzt sich innert gewisser Zeit wieder auf die Erde ab. Eingeatmet, gelangen Russpartikel tief in die Lunge und haben Asthma, chronische Bronchitis und Emphysem zur Folge.

Blei ist als eine giftige Komponente bekannt. Es hat den Anschein, dass die Bleikonzentration unserer Umwelt ansteigt. Ein grosser Teil dieses Anstiegs ist auf die Emission von Produkten des Blei-Alkyl-Zerfalls zurückzuführen, die aus dem Gebrauch von Blei im Motorbenzin entstehen. Es erlaubt, auf billige Weise das Benzin kloppfest und damit für den Gebrauch in modernen, wirtschaftlich arbeitenden Motoren geeignet zu machen sowie seine immer gleichbleibende Qualität zu sichern. Als Nebeneffekt verhütet es das Einschlagen der Auspuffventile. Die schädliche Wirkung des von

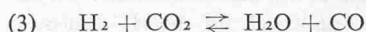
Mensch und Tier aufgenommenen Bleis ist umstritten [4], so dass dessen Gebrauch angegriffen wird. Das Ausmass und die Tragweite des Problems der Bleizumischung ist noch nicht abzusehen.

#### 4. Zur Bildung der einzelnen Schadstoffkomponenten

Bei Motoren können an verschiedenen Stellen Schadstoffe entstehen. Neben der motorischen Verbrennung sind noch zu nennen: die Verdampfung von Brennstoff aus dem Brennstoffsystem (HC) und das Entweichen von Leckgasen aus der Ölsumpf-Entlüftung ( $\text{CO}$ , HC,  $\text{NO}_x$ ). Diese beiden zusätzlichen Schadstoffquellen können jedoch durch sorgfältige Konstruktion fast völlig vermieden werden (leckfreies Brennstoffsystem, Rückführen der Ölsumpfgase), so dass wir uns nur mit den in der Verbrennung entstehenden Schadstoffen befassen müssen.

##### 4.1 Kohlenmonoxid

Das Auftreten von Kohlenmonoxid während der Verbrennung ist normalerweise das Ergebnis eines gesamthaften oder auch nur örtlichen Sauerstoffmangels in der Zylinderladung. Theoretisch lässt sich die Konzentration aufgrund der Wassergas-Gleichgewichtsbedingung berechnen:



Bei höchsten Verbrennungstemperaturen (2000 bis 2500 K bei Vollast des Motors) werden selbst bei Brennstoffmangel noch bedeutende Mengen  $\text{CO}$  gebildet. Da jedoch die Verbrennungsgase vor Verlassen des Motors auf Auspufftemperatur abgekühlt werden (etwa 700 bis 900 K), verschiebt sich das Gleichgewicht und begünstigt die Oxydation von  $\text{CO}$  zu  $\text{CO}_2$ . Damit finden wir bei richtigem oder zu magerem Gemisch trotzdem nur wenig Kohlenmonoxid im Auspuff vor. Diese Verschiebung erfolgt jedoch nicht so, wie es die Gleichgewichtsrechnung vorschreibt, sondern infolge der kurzen Verweilzeit nur in vermindertem Masse. Bild 8 [5] zeigt den Reaktionsverlauf in Funktion der Zeit für die Expansion im Ottomotor.

Bei Brennstoffüberschuss bilden sich hingegen ganz bedeutende Mengen von Kohlenmonoxid, was auch einen erheblichen Verlust an Energie darstellt.

Der gesamte Einfluss des Luftverhältnisses auf die  $\text{CO}$ -Emission ist auf Bild 9 dargestellt. Messungen [6] zeigten, dass aus den oben erwähnten Gründen die wirklichen Konzentrationswerte zwischen den Gleichgewichtsbedingungen bei Spitztemperatur des Zyklus und bei Auspufftemperatur liegen müssen.

Alle Wärmekraftmaschinen, die mit grossem Luftüberschuss betrieben werden, insbesondere Dieselmotor, Gasturbine und Maschinen mit äusserer Verbrennung, sind also

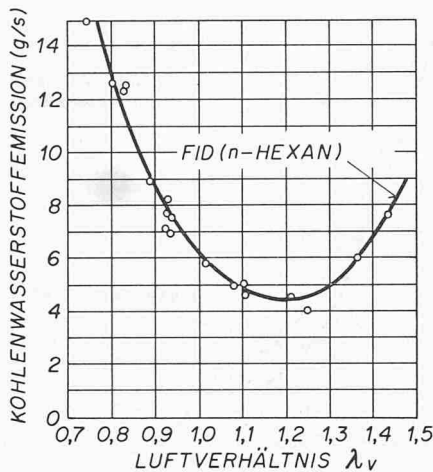
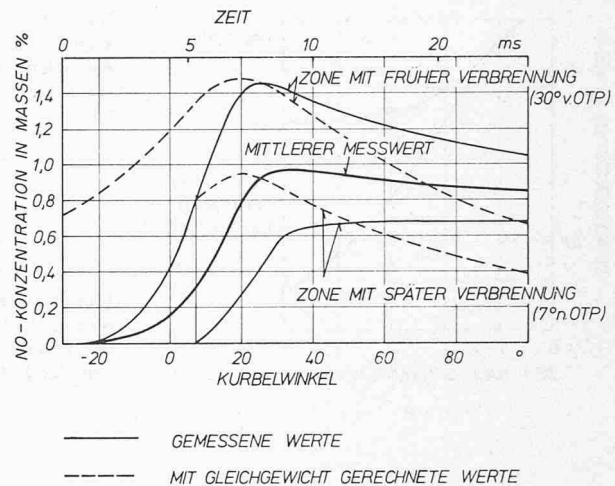


Bild 10 (links). HC-Gehalt der Abgase (Massenstrom) eines Ottomotors bei konstanter Last und Drehzahl in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl  $\lambda_v$ . Die Werte für den HC-Gehalt wurden mittels eines FID-Flammenionisationsdetektors (Bilder 16 und 17) gemessen und sind auf *n*-Hexan bezogen

Bild 11 (rechts). NO-Konzentration in Massen % eines Ottomotors bei früher und bei später Verbrennung in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel; ausgezogen: gemessene Werte; gestrichelt: mit Gleichgewicht gerechnete Werte



günstig bezüglich CO-Emission, während Ottomotoren mit ihrem nahezu stöchiometrischen Gemisch zwangsweise Kohlenmonoxid ausstossen.

#### 4.2 Kohlenwasserstoffe

Vor allem in Wandnähe des Brennraumes kann der Brennstoff aus den beiden folgenden Gründen nicht vollständig verbrannt werden (flame quenching).

- Die Flamme erlischt durch die starke Wärmeabfuhr in Wandnähe, d. h. durch starke Abkühlung des Brennstoff-Luft-Gemisches.

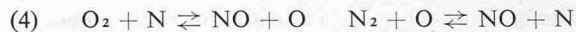
- Durch inhomogene Verteilung des Brennstoff-Luft-Gemisches oder durch mangelhafte Einleitung der Reaktion kann die Flamme ebenfalls erlöschen.

Eingehende Untersuchungen am *Ottomotor* [7] zeigten, dass im stöchiometrischen Betrieb die Quentschonen am dünnsten sind. Eine teilweise Verbrennung der noch verbleibenden Kohlenwasserstoffe im anschliessenden Expansionshub vermindert die HC-Konzentration im Auspuff vor allem im Luftüberschussbereich. Die minimalen Emissionswerte liegen im Bereich erhöhten Luftüberschusses und fallen zu meist mit dem wirtschaftlichsten Betrieb des Motors zusammen. Eine HC-Emission bedeutet wie die CO-Emission immer einen Energieverlust. Damit ergibt sich für die HC-Emission am Ottomotor ein Verlauf in Abhängigkeit des Luftverhältnisses nach Bild 10 [8].

Beim *Dieselmotor*, der nur im Luftüberschussgebiet betrieben wird, können bei Teillast ungenügende Zerstäubung (Benetzung der Zylinderwände, grosse Tropfen), mangelhafte Luftbewegung und niedrige Temperaturen gemeinsam auftreten, wodurch mit zunehmendem Luftüberschuss die HC-Emission zunimmt.

#### 4.3 Stickoxide

Die Bildung von Stickoxiden ist eine Folge der Dissoziation des Sauerstoffs und des Stickstoffs bei hohen Temperaturen (über 1500 K). Dabei spielen sich die folgenden Reaktionen ab:



Deren Gleichgewichtszustand stellt sich je nach Verbrennungstemperatur und Luftverhältnis (Sauerstoffkonzentration) ein. Die Gleichungen (4) sind unter dem Namen Zeldowich-Gleichungen [9] bekannt und sind praktisch allein massgebend für die Stickoxidbildung im Verbrennungsmotor [10] (rund 95 % der gesamten  $\text{NO}_x$ -Emission ist NO, der Rest  $\text{NO}_2$  und andere).

Neuere Untersuchungen zeigen, dass die Zeit, die während der Verbrennung im Motor zur Erreichung des chemischen Gleichgewichtszustandes der NO-Bildung zur Verfügung steht, zu kurz ist. Auch sollten sich nach den chemischen Gleichgewichtsbedingungen (4) die Stickoxide bei den wieder niedriger werdenden Temperaturen während der Expansion der Verbrennungsgase wieder zu  $\text{N}_2$  und  $\text{O}_2$  zersetzen. Da diese Zersetzung verglichen zur NO-Bildungsreaktion noch langsamer abläuft, bleiben die einmal gebildeten Stickoxide eingefroren und sind auch nach der Expansion noch vorhanden (Mittelwertkurve in Bild 11). Im Auspuff treten daher in der Regel höhere NO-Konzentrationen auf, als es im Gleichgewichtszustand bei der Auspufftemperatur entsprechen würde.

Das Fortschreiten der Flammfront im Zylinder bewirkt, dass das noch vorhandene Gemisch (Bild 12) weiter komprimiert und das neu entstehende Stickoxid unter anderen Temperaturbedingungen gebildet wird.

Dadurch, dass praktisch jedes Teilchen im Zylinder anderen NO-Bildungsbedingungen unterworfen ist und das Fortschreiten der Flammfront besonders bei der stark zerklüfteten Verbrennung im Dieselmotor kaum genügend erforscht werden kann, ist eine Vorausberechnung der Stickoxidbildung nur mit komplizierten Modellen und der Hilfe des Computers möglich [10, 11, 12, 13].

Trotz der unterschiedlichen Gemischbildung finden wir für den Dieselmotor wie für den Ottomotor etwa dieselben Abhängigkeiten, wie sie sich aus der oben dargelegten Theorie ergeben:

- Die NO-Bildung wird in hohem Masse vom Hochtemperaturanteil des Kreisprozesses bestimmt. Alle Massnahmen, die zu hohen Spitzentemperaturen führen, wie Vorzündung, schnelle Verbrennung, hohe Kompression, hohe Aufladung, heisser Motor, bewirken hohe NO-Emission.
- Je höher die Sauerstoffkonzentration, desto leichter geht die NO-Bildung vonstatten.

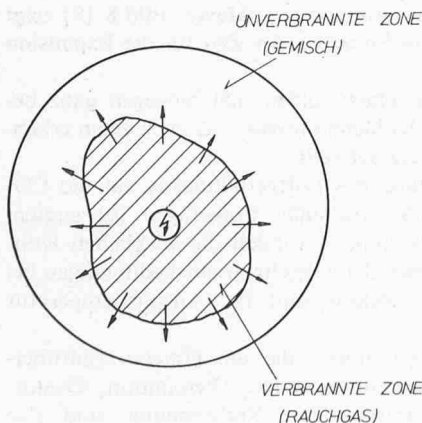
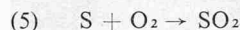


Bild 12. Fortschreiten der Flammenfront

Aus der Temperaturspitze und der Sauerstoffkonzentration lässt sich der Einfluss des Luftverhältnisses  $\lambda_v$  abschätzen. Für kleine Luftverhältnisse erhalten wir hohe Verbrennungstemperaturen, jedoch wird mit zunehmendem Mangel an Sauerstoff die NO-Bildung verringert. Andererseits vermindert ein Luftüberschuss die Spitzentemperaturen, so dass selbst bei Sauerstoffüberfluss die Oxydationsreaktion nur vermindert abläuft. Entsprechend diesen Tatsachen ist die maximale Emission der Stickoxide im Bereich des stöchiometrischen Gemisches zu erwarten, was durch verschiedene Messungen (Bild 13) bestätigt wurde [5, 14, 15].

#### 4.4 Schwefeldioxid

Durch die Verbrennung des im Brennstoff enthaltenen Schwefels entsteht das Schwefeldioxid



Dieser Schadstoff kann durch Verwendung von schwefelfreiem Brennstoff vermieden werden.

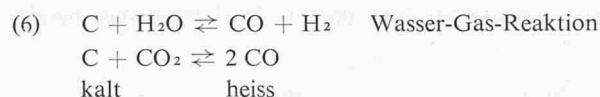
#### 4.5 Feststoffteilchen

Abgesehen von der Russbildung kann der Emission von Feststoffteilchen durch Verwendung entsprechender Brenn- und Schmierstoffe Einhalt geboten werden. So lassen sich Bleioxidverbindungen im Abgas der Ottomotoren vermeiden, wenn auf den Betrieb mit ungebleitem Benzin übergegangen wird. Auch metallische Partikel von den Additiven im Schmieröl (Kalzium, Barium, Zink) können durch andere Ölwahl weitgehend vermieden werden.

Auf die *Russbildung*, die vor allem beim Dieselmotor auftritt, sei nachfolgend näher eingegangen. Der Rauch im Auspuff kann im Prinzip in drei verschiedenen Formen beobachtet werden:

- Schwarzer Rauch, der infolge unvollständiger Verbrennung Kohlenstoffteilchen enthält
- Weisses Rauch, der aus unverbranntem Brennstoffnebel besteht. Er ist nicht zu verwechseln mit dem Wasserdampf, der beim Start in der kalten Auspuffanlage zu Nebel kondensiert (die Farbe ist eine Folge der Tropfengrösse)
- Blauer Rauch, der von verbranntem Schmieröl herrührt.

Über die verschiedenen Reaktionen, die zur Russbildung führen, gibt es mehrere Vermutungen, von denen aber keine diesen komplizierten chemischen Vorgang genau zu beschreiben imstande ist. Russ tritt vor allem auf, wenn flüssiger Brennstoff in die Flamme gelangt oder die Flamme auf eine kalte Stelle trifft (Flammen-Kühlung) [16]. Hierbei spielen sich die folgenden Reaktionen ab:



Ebenso können Krackprozesse den Rauch auslösen. Die neueste Theorie über den Mechanismus der Russbildung beruht auf Dehydrierungs- und Polymerisationsvorgängen [17].

### 5. Messung der Schadstoffe

Bei der Messung der Schadstoffe geht es darum, deren Konzentration im Abgas festzustellen. Da die Emission der Schadstoffe wesentlich von den Betriebsbedingungen des Motors (Leerlauf-Vollast, kalter Motor — warmer Motor) abhängt, muss zur Charakterisierung des allgemeinen Abgasverhaltens eines Motors und zum Vergleich des Ergebnisses mit anderen Motoren neben einer gleichwertigen *Messmethode* auch ein *genau gleiches Messprogramm* eingehalten werden. In diesem Kapitel sollen die prinzipiellen Messmethoden besprochen werden, während von den Messprogrammen, die aufgrund technischer und statistischer Überlegungen festgesetzt

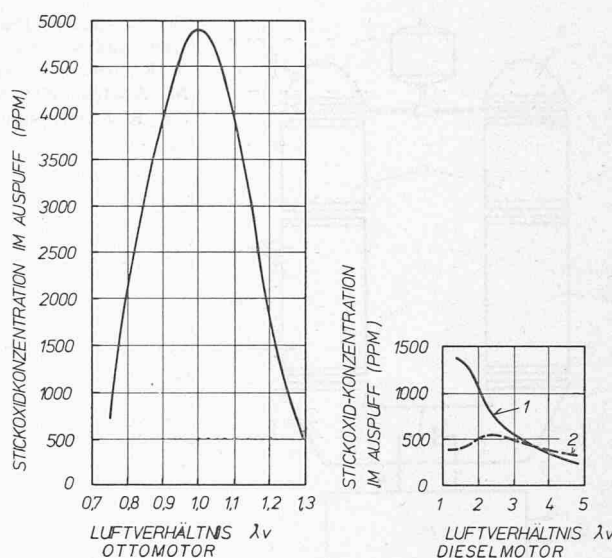


Bild 13. Im Auspuff des Motors gemessene Stickoxidkonzentration in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl  $\lambda_v$ ; links beim Ottomotor, rechts beim Dieselmotor  
1 direkte Einspritzung, 2 Vorkammernmotor

wurden und in Gesetzen Eingang gefunden haben, später die Rede sein wird.

Bei der Gasanalyse können die unterschiedlichsten chemischen und physikalischen Prinzipien angewendet werden:

- Absorption (Orsat-Apparat)
- Spektroskopische Analyse (NDIR, NDUV)
- Messung der elektrischen Leitfähigkeit (FID)
- Chemilumineszenz-Reaktion
- Gaschromatographie
- Massenspektroskopie
- Filtrierung (Bosch, Bacharach, Saurer)
- Photometrie.

Einige dieser Prinzipien eignen sich für alle Gaskomponenten, während andere nur für eine einzelne benutzt werden können. Nachfolgend sollen die wichtigsten Messgeräte beschrieben werden, die der Analyse von Motorabgasen dienen.

#### 5.1 Spektroskopische Analysatoren [18]

Die Arbeitsweise dieser Geräte beruht auf der Messung des Absorptionsvermögens der Infrarot- oder Ultraviolettstrahlung des Gases, welches proportional zur Konzentration der Komponenten in der Probe ist.

Im *dispersiven Analysator* wird nur ein enger, spezifisch auf das zu prüfende Gas abgestimmter Frequenzbereich des Spektrums genutzt. Solche Apparate sind unhandlich und werden für Analysen der Abgase nicht verwendet.

Der *nicht-dispersive Infrarot-Analysator* (NDIR, Bilder 14 und 15) besitzt zwei Infrarotquellen, die optisch von einem Zerkacker simultan unterbrochen werden. Von diesen Quellen gesendete Strahlen dringen in parallelen Bahnen zuerst durch Filter, um Quereinflüsse von anderen Gasen als das zu analysierende auszuschalten, worauf der eine durch eine Referenzzelle und der andere durch die Zelle, die das Proben-gas enthält, auf die andere Seite zum Detektor gelangt.

Die Referenzzelle enthält das Gas ohne die zu analysierende Komponente, während das Proben-gas durch die andere Zelle strömt. Der Detektor ist ein von einer metallischen Membrane geteilter metallischer Behälter, der ein beliebiges Gas enthält. Die beiden IR-Strahlen treffen getrennt auf die beiden Halbräume des Detektors auf und erzeugen je nach Absorption in der Probezelle unterschiedliche Erwärmungen in diesen Räumen. Diesen entsprechen ungleiche Ausdehnungen der darin enthaltenen Gase, wodurch eine Deformation



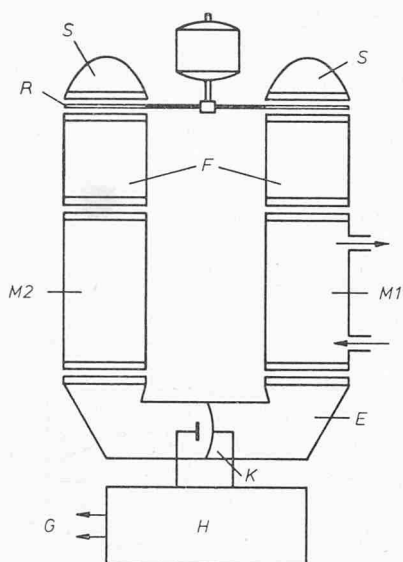


Bild 14 (links). Prinzipschema des nicht-dispersiven Infrarot-Analysators (NDIR)  
S IR-Quellen, R optischer Zerkleinerer, F Filter, M<sub>1</sub> Analysenzelle, M<sub>2</sub> Referenzzelle, E Detektor, K Kondensator, H Verstärker, G Output

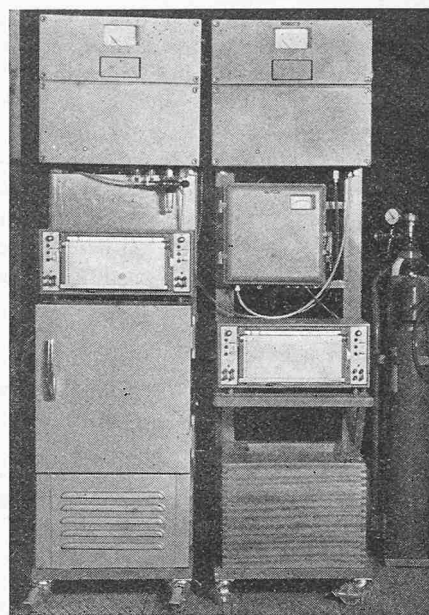


Bild 15 (rechts). NDIR-Analysatoren von H und B

der Membrane auftritt, die eine Kapazitätsänderung am Kondensator hervorruft. Dieses Gerät wird hauptsächlich für die Bestimmung von CO und CO<sub>2</sub> verwendet, da diese beiden Gase starke Infrarot-Absorption aufweisen. Es kann aber auch für die NO-Messung eingesetzt werden. Die Messungen erfolgen mit grosser Genauigkeit (Fehler < 5%) und gehen hinunter bis zu einigen ppm.

Auf der gleichen Arbeitsweise beruht der *nicht-dispersive Ultraviolett-Analysator* (NDUV), der für die Bestimmung von NO<sub>x</sub> herangezogen wird.

## 5.2 Flammen-Ionisationsdetektor (FID, Bilder 16 und 17) [18]

Eine Wasserstoff-Luft-Flamme hat vernachlässigbar kleine Mengen Ionen. Wird aber eine Spur einer organischen Verbindung, z.B. Kohlenwasserstoffe, zugeführt, so werden grosse Mengen von Ionen produziert. Wenn eine polarisierte Spannung zwischen der Brenndüse und einem zur Flamme senkrecht stehenden Kollektor angelegt wird (Bild 16), so erzeugen die durchziehenden Ionen einen zur Ionenzahl proportionalen Strom, der wiederum proportional zur CH-Menge ist. Dieser schwache Strom wird dann mit Hilfe eines hochempfindlichen Ampèremeters gemessen.

Die Anzeige am FID für einen Kohlenwasserstoff bekannter Zusammensetzung ist im allgemeinen proportional

zu der Zahl der in einem gegebenen Zeitintervall die Flamme passierenden Kohlenstoffatome. Bei konstanter Probenzufuhrgeschwindigkeit liefert der FID daher z.B. für Hexan (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>) doppelt so grosse Werte wie für Propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>). Die von Motoren emittierten Kohlenwasserstoffe sind von sehr komplizierter Zusammensetzung, so dass deren Messung auf einen Standard-Kohlenwasserstoff (zumeist Normal-Hexan) bezogen werden muss, mit dem auch das Gerät geeicht wird. Da auch die Proben-Zufuhrgeschwindigkeit direkt in die Messung eingeht, sorgt eine Dosiervorrichtung für immer gleichen Massenstrom in der Gaszufuhr.

FID-Geräte können ausschliesslich zur Gesamtmessung der unverbrannten und teilweise verbrannten Kohlenwasserstoffe verwendet werden; CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>O und N<sub>2</sub> haben auf die Messung keinen Einfluss. Das Gerät erlaubt, schnelle, kontinuierliche Messungen von Abgasen mit unter 1 ppm liegendem HC-Gehalt durchzuführen. Die Abgasprobe muss vor allem für Dieselabgase auf einer Temperatur zwischen 150 und 200 °C gehalten werden, damit einerseits keine Nachverbrennung und andererseits keine Kondensation schwersiedender Kohlenwasserstoffe eintritt.

## 5.3 Chemilumineszenz-Geräte [18]

Diese Geräte (Bilder 18 und 19) erlauben die kontinuierliche Messung von NO, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub>. Die Arbeitsweise beruht

Bild 16. Prinzipschema des Flammen-Ionisationsdetektors (FID)

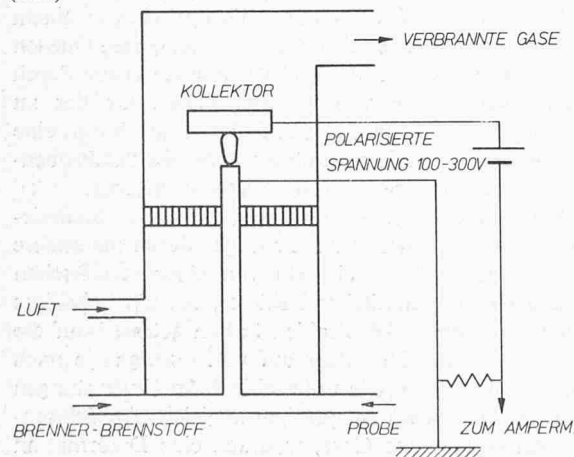


Bild 17. FID-Ionisationsdetektor von IPM

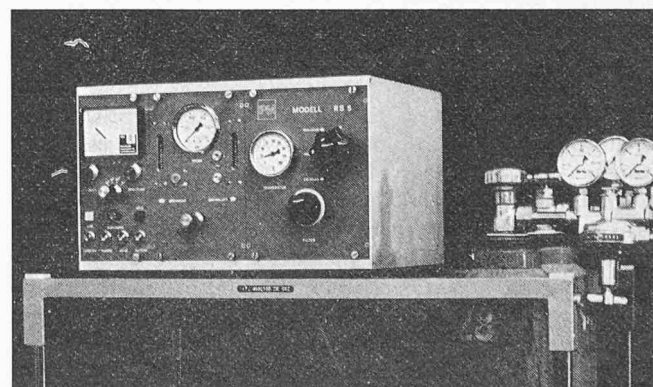


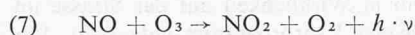


Tabelle 2. Zusammenstellung der zulässigen Emissionswerte und Messmethoden für die USA, Europa und die Schweiz

Land	Jahr	Gewicht	HC	Methode	CO	Methode	NO <sub>x</sub>	Methode	Fahrzyklus
USA-Benzin	1971	< 2700 kg	2.2	NDIR	23.0	NDIR	–		California-Zyklus kontinuierliche Messung
g/Meile	1972	< 2700 kg	3.4	FID	39.0	NDIR	3.0	Chemilumineszenz	U.S. Federal-Cyklus U.S. Federal Verdünnungsmethode
	1973	< 2700 kg	3.4	FID	39.0	NDIR	3.0	Chemilumineszenz	U.S. Federal-Cyklus U.S. Federal Verdünnungsmethode
	1974	< 2700 kg	3.4	FID	39.0	NDIR	3.0	Chemilumineszenz	U.S. Federal-Cyklus U.S. Federal Verdünnungsmethode
	1975	< 2700 kg	0.41	FID	3.4	NDIR	0.4	Chemilumineszenz	U.S. Federal-Cyklus U.S. Federal Verdünnungsmethode
	1976	< 2700 kg	0.41	FID	3.4	NDIR	0.4	Chemilumineszenz	U.S. Federal-Cyklus U.S. Federal Verdünnungsmethode
USA-Diesel g/PSH	ab 1973	> 2700 kg	3.0	FID	7.5	NDIR	12.5	NDIR	US-Federal Diesel-Zyklus kontinuierliche Messung
Europa (EWG) <sup>1)</sup> g/Prüfung	ab 1971	< 750 kg	8.0	NDIR	100	NDIR	–		ECE-Fahrzyklus Total-Gasanalyse
	ab 1971	1250 bis 1470 kg	10.1	NDIR	152	NDIR	–		ECE-Fahrzyklus Total-Gasanalyse
	ab 1971	> 2150 kg	12.8	NDIR	220	NDIR	–		ECE-Fahrzyklus Total-Gasanalyse
Schweiz	ab 1972				< 4.5%				im Leerlauf

<sup>1)</sup> 9 Gewichtsklassen

auf der Chemilumineszenz-Strahlung im Rot- und Infrarotgebiet, die sich aus der Reaktion zwischen NO und O<sub>3</sub> ergibt.



Durch die Messung der so entstandenen Lichtemission kann die Konzentration von NO bis hinunter auf 0,2 ppm mindestens 5% Genauigkeit gemessen werden.

#### 5.4 Gas-Chromatographie

Diese Methode erlaubt die Identifizierung und die quantitative Messung jeder Komponente des Gasgemisches. Sie ist für kontinuierliche Messungen nicht geeignet, da für die quantitative Bestimmung und Identifizierung aller Komponenten längere Zeit gebraucht wird. Solche Geräte, wie auch das nachfolgend beschriebene, werden mehrheitlich in Laboratorien verwendet [19].

#### 5.5 Massenspektrometer

Das Gerät arbeitet wie folgt: Für die kontinuierliche Messung wird das zu untersuchende Gas durch ein Kapillarrohr einem evakuierten Gerät zugeführt. Die ionisierten Moleküle werden anschliessend durch ein elektromagnetisches Feld beschleunigt, wodurch nur bestimmte Ionen den Massen-

kollektor erreichen. Die Signale aus diesem Kollektor geben eine Information über die Konzentration dieser Komponente [19].

#### 5.6 Rauchmessung

Neben den einfachen Methoden nach Bacharach, Bosch und Saurer, bei denen eine bestimmte Abgasmenge durch ein Filterpapier gesogen wird und anschliessend dessen Schwärzung mit einer Photozelle gemessen oder mit einer Skala von Grautönen (sog. Bacharachskala) verglichen wird, gibt es auch neue Systeme, die zum Teil eine kontinuierliche Messung erlauben. Das Hartridge-B-P-Smoke-meter, das UTAC-Schlumberger-Solartron sowie das AGIP-MSA-Rauchmeter messen mit einer Photozelle im Durchlicht-Verfahren die Schwärzung des Abgasstroms, während das Bosch-Tyndall-Meter, den Tyndall-Effekt ausnutzend, das von den Partikeln senkrecht zur Beleuchtungsrichtung reflektierte Licht misst.

Die Rauchmessung, obwohl als erste Abgasanalyse eingesetzt, ist sehr umstritten [20]. Wasserdampf und Ölnebel sowie der Ort der Probeentnahme haben einen erheblichen Einfluss auf die Messungen, deren Auswertung bei den einzelnen Methoden ebenfalls unterschiedlich vorgenommen wird und Vergleiche sowie das Aufstellen eines gesetzlichen Grenzwertes erschweren.

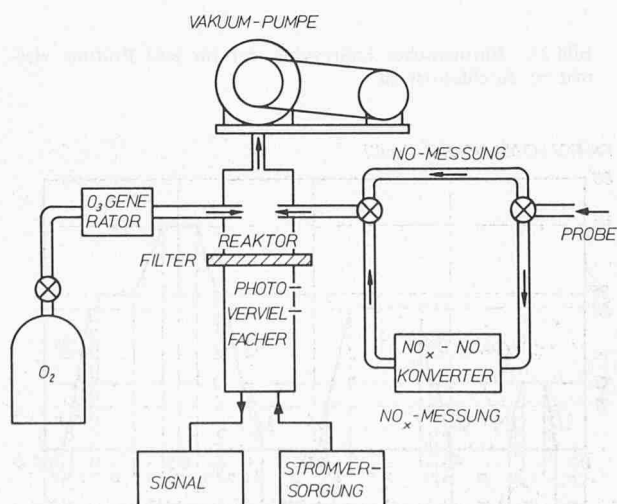
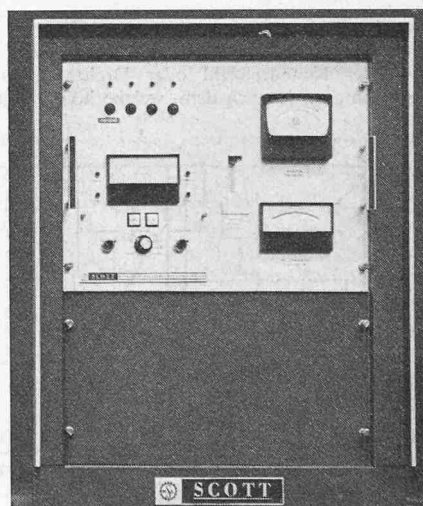


Bild 18 (links). Prinzipschema des Chemilumineszenz-Analysators

Bild 19 (rechts). NO-NO<sub>x</sub>-Analysator von Scott

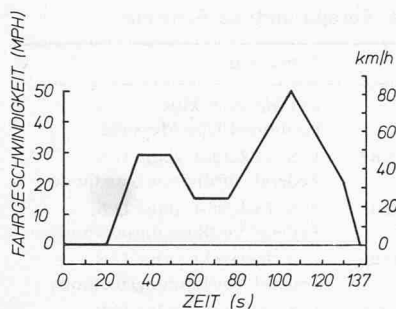


Bild 20 (links). Siebenmal zu wiederholendes Fahrprogramm des California-Zyklus

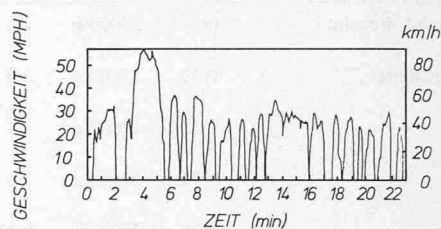


Bild 21 (rechts). US-Federal-Fahrzyklus

## 6. Gesetzliche Vorschriften

In den USA, wo das Abgasproblem zuerst aufgetreten ist, wurden auch die drastischsten Massnahmen getroffen. Die diesbezüglich aufgestellten Gesetze beschränken nicht nur die Werte der *maximal zulässigen Schadstoffemission* für neue Diesel- und Benzinfahrzeuge, sondern legen auch gleichzeitig das beim Abgastest zu erfüllende *Programm* fest, schreiben die Messmethode und die Art der Abgasaufbereitung vor. Das Problem wurde in Europa erst später erkannt, und aufgrund der hier vorhandenen komplizierten politischen Lage gehen die Gesetzgebungen in einigen Ländern heute erst soweit, dass ein maximaler CO-Gehalt im Abgas bei Leerlauf nicht überschritten werden darf. Für stationäre und Schiffsmotoren bestehen noch keine diesbezüglichen Gesetze.

### 6.1 Zulässige Emissionsgrenzwerte

Die Zusammenstellung in Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die zurzeit und inskünftig in den USA (einschliesslich Kanada), Europa (EWG) und der Schweiz für *Automobile* geltenden Normen bezüglich Abgaszusammensetzung, Messmethoden und den für die Prüfung zu verwendenden Fahrzyklus [21].

Während die heute gültigen Normen mit einigem Aufwand erreicht werden können, so scheinen die Abgasrestriktionen des Jahres 1975 in den USA etwas hoch gegriffen, und die Experten zweifeln, ob dieser Stand bis dann überhaupt je erreicht werden kann.

Zur Frage des maximal zulässigen *Bleigehalts im Benzin* konnte noch keine Einigung erzielt werden, da die Umstellung auf bleiarms Benzin vor allem von den Erdölgesellschaften erhebliche Umstellungen in ihren Produktionsanlagen erfordert. Für den Betrieb von katalytischen Abgasreinigungsanlagen wird bleiarms Benzin benötigt, was natürlich die Raffinerien veranlasste, Brennstoffe mit geringerem Bleigehalt auf den Markt zu bringen. Bis 1975 ist zumindest in den USA mit einer Beschränkung des Bleis im Brennstoff auf

0,13 g/Liter (heute 0,8 g/Liter, in der Schweiz 0,6 g/Liter) zu rechnen [4, 22]. Durch Anreicherung des wenig klopfesten Brennstoffes mit Aromaten ist es möglich, annähernd die Eigenschaften von gebleitem Benzin zu erreichen. Bedenklich ist, dass die Unschädlichkeit des vermehrten Ausstosses von Aromaten auch noch nicht bewiesen werden konnte. Inzwischen wurde bekannt, dass auch die Schweiz, der Praxis einiger Nachbarstaaten folgend, ab 1974 den Bleigehalt für Motorenbenzine auf 0,4 g/Liter begrenzt hat.

### 6.2 Fahrzyklen und Prüfmethode

Bei der Formulierung der Fahrzyklen wurde vor allem darauf geachtet, dass das ganze Emissionsverhalten des Fahrzeugs erfasst wird und dass das auf einem Prüfstand gefahrene Testprogramm auch dem in Wirklichkeit auf der Strasse im Mittel pro Fahrt abgelegten Fahrprogramm entspricht. Ein erstes Programm, das sogenannte *California-Programm* (Bild 20), das in Kalifornien entwickelt und schliesslich in der hier beschriebenen Form für die ganzen USA übernommen wurde, versuchte, sich den wirklichen Verhältnissen dadurch anzunähern, dass ein aus sieben verschiedenen Fahrzuständen bestehender Zyklus (137 s) in Intervallen siebenmal wiederholt wird, beginnend mit kaltem Motor (Gesamtzeit 959 s).

Der Fahrzeugwiderstand wird dabei auf dem Prüfstand kontinuierlich simuliert. Weitere Angaben, insbesondere über die laufende Messung der mittels Computer ausgewerteten Emissionsanteile, sind im entsprechenden Gesetz verankert [23].

Ein den wirklichen Verhältnissen weit eher entsprechender Fahrzyklus ist in den USA seit 1972 in Kraft. Während des Tests wird ein sich nicht wiederholender Zyklus (Bild 21) gefahren, dessen Struktur einer durchschnittlichen Fahrt von einem Vorort nach Los Angeles entspricht (1371 s).

Während dieses ab 1972 in den USA für die Abnahme neuer Wagen bis 2700 kg (6000 lb) verbindlichen *US-Federal-Fahrzyklus* wird ein Teil der Abgase mit Luft verdünnt, so

Bild 22. US-Federal-Dieselzyklus. 1 Leerlauf; 2 Entweder 60 % der Nenndrehzahl oder Drehzahl des maximalen Drehmoments, je nach dem, welche höher liegt

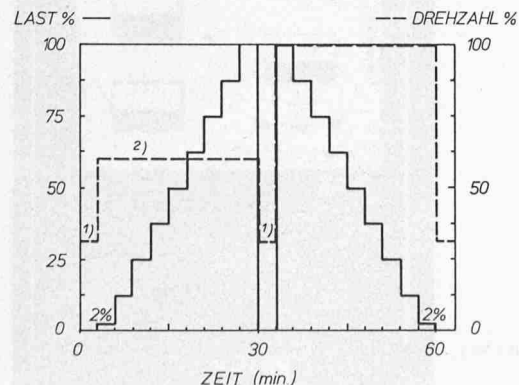
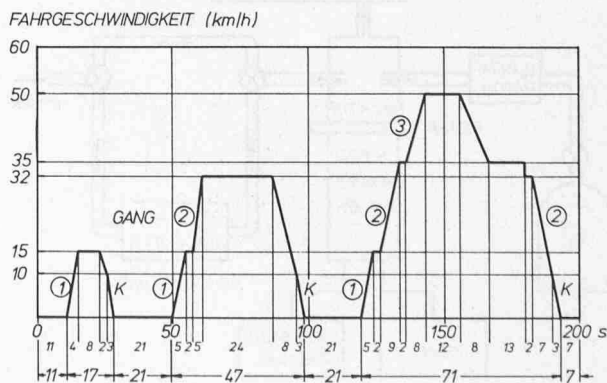


Bild 23. Europäischer Fahrzyklus, der für eine Prüfung viermal zu durchfahren ist



dass ein konstanter Massestrom in einen Plastiksack strömt, dessen Inhalt am Schluss analysiert wird (Constant Volume Sampling CVS) [24].

Die Testmethode für Bezfahrzeuge, die schwerer sind als 2700 kg und die bis jetzt einzig in den USA einer Prüfung unterzogen werden, weicht von den beiden vorgenannten Methoden wesentlich ab; wir wollen jedoch wegen des bescheidenen Anteils dieser Fahrzeuge in Europa nicht näher darauf eingehen (siehe dazu [25]).

Nachdem ab 1972 die Lastwagen-Dieselmotoren in Kalifornien bereits gewisse Normen erfüllen müssen, sollen ab 1973 auf dem ganzen Gebiet der USA [25] entsprechende Richtlinien erlassen werden. Der dabei gefahrene US-Federal-Dieselzyklus wurde aus dem California-Dieselzyklus des Jahres 1972 [21] abgeleitet (Bild 22).

Die europäische Prüfung der Benzfahrzeuge besteht im vormaligen Durchfahren des *europäischen Fahrzyklus* (Bild 23, Gesamtdauer 13 min), der von der Economic Commission for Europe (ECE) aufgestellt wurde und dem alten California-Zyklus stark gleicht. Bei diesem Test, der ebenfalls mit einem Kaltstart beginnt, werden die gesamten Abgase in einem Plastiksack eingefangen, um anschliessend den Gehalt an Schadstoffkomponenten in g/Prüfung angeben zu können [26]. Die tolerierten Schadstoffanteile sind dabei in Funktion des Wagengewichts festgesetzt (Tabelle 2).

Japan (Japantest) und Schweden haben eigene, über die Messung des CO-Gehalts hinausgehende Test- und Abgasvorschriften.

Die mit den einzelnen Testmethoden gefundenen Emissionswerte können nicht direkt miteinander verglichen werden. Da es auch unmöglich ist, eine theoretische Umrechnungsbeziehung zu formulieren, können nur Motorversuche Aufschluss geben.

## 7. Massnahmen zur Verminderung der Schadstoffemission

Zur Bekämpfung der schädlichen Motorenabgase stehen die folgenden Möglichkeiten zur Verfügung:

- Massnahmen, die den Betrieb einschränken
- Motorische Massnahmen, welche die Emissionen verringern
- Betriebsstoffe, die reinere Abgase ergeben.

Betrachten wir die Statistiken in Bild 1 für die Weltbevölkerung und die zugelassenen Automobile am Beispiel der Schweiz (die Entwicklung in anderen zivilisierten Ländern verläuft genau gleich), so muss man zum Schluss kommen, dass nur die *Kombination aller drei der oben beschriebenen Massnahmen* eine langfristige Lösung verspricht. Eine Verminderung der Abgasemissionen als Folge technischer Verbesserung der Motoren würde ja sonst bei einer in exponentieller Weise sich weiterentwickelnden Bevölkerung und entsprechend anwachsendem Automobilbestand in kurzer Zeit wieder zunichte gemacht.

Neben technischen Problemen sind es daher ebenso sehr *urbanisationspolitische* wie auch *soziale Probleme*, die einer Lösung bedürfen. Langsam scheint die Bevölkerung zur Einsicht zu kommen, dass eine Förderung des *öffentlichen Verkehrs* mit seinen wirtschaftlicheren, weniger Emissionen erzeugenden Verkehrsmitteln von viel grösserer Dringlichkeit ist als der weitere Ausbau des privaten Verkehrs. Je mehr und je bessere Strassen wir bauen, desto grösser ist der Anreiz, private Verkehrsmittel zu verwenden, womit auch diese neuen Strassen innert kürzester Zeit wieder zu eng sein werden. Eine wesentliche Verbesserung der Luftqualität in Ballungszentren ist nur möglich bei Fernhaltung des privaten Durchgangsverkehrs und gleichzeitiger Verminderung auch des privaten Stadtverkehrs durch leistungsfähige öffentliche Verkehrsmittel und ausgewogene Infrastruktur der Siedlungen. Hier ist aber

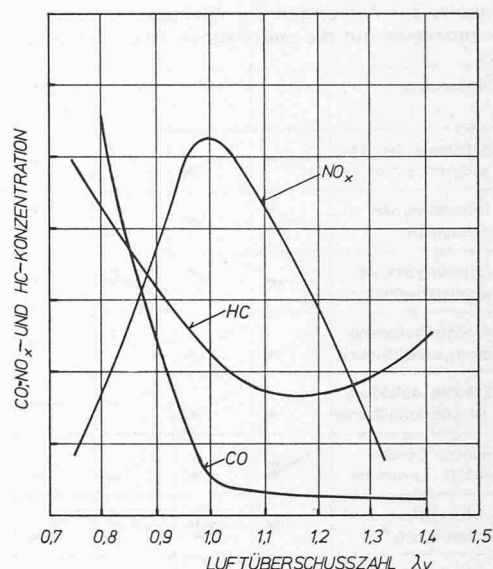


Bild 24. Schadstoffemission eines Benzinmotors in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl

nicht der Platz, auf diese Seiten des Problems einzugehen, sondern vielmehr die technischen Möglichkeiten besser kennenzulernen.

### 7.1 Gute Gemischbildung

Erinnern wir uns der Gesetzmässigkeiten der Schadstoffbildung (Kapitel 4), so kann der charakteristische Einfluss des Brennstoff-Luft-Verhältnisses auf die einzelnen Komponenten gemäss Bild 24 zusammengefasst werden.

Aus diesem Diagramm geht hervor, dass das charakteristische Verhalten des Benzinmotors zwei ausgeprägte Stellen aufweist, bei denen die Schadstoffemission in ihrer Summe minimal wird; während die reiche Optimaleinstellung (optimal in bezug auf Schadstoffemission) bei erhöhtem Brennstoffverbrauch nahezu die höchste spezifische Leistung des Motors ergibt, so ergibt die magere Optimaleinstellung wohl einen niedrigen Brennstoffverbrauch, jedoch kann die volle Leistung des Motors nicht mehr ausgenutzt werden. Zudem besteht die Gefahr, dass der Motor unter extremen Bedingungen nicht mehr ruhig läuft. Einen weiteren Grund, warum die reiche Einstellung bevorzugt wird, erkennen wir bei der Besprechung der Abgas-Nachbehandlung.

Beim Dieselmotor, bei dem die Rauchemission als weitere Schadstoffkomponente hinzukommt, verschiebt sich das optimale Brennstoff-Luft-Verhältnis noch weiter in den Luftüberschussbereich hinein. Als Folge der Brennstoffregelung im Dieselmotor wird dieser Motor je nach Last mit ganz unterschiedlichem Luftverhältnis betrieben.

Wenigstens beim Benzinmotor kann man versuchen, durch entsprechend saubere Regelung des Brennstoff-Luft-Verhältnisses die Abgasqualität zu verbessern, wobei man jedoch wegen des konträren Verhaltens der einzelnen Schadstoffkomponenten an Grenzen gebunden ist. Wie dabei die Gemischaufbereitung erfolgt (Vergaser oder Benzineinspritzung) ist weniger von Bedeutung, vielmehr ist gute Verdampfung des Brennstoffes und die Homogenität des Gemisches wie auch dessen gleichmässige Verteilung auf die einzelnen Zylinder, vor allem für die HC-Emission, von ausschlaggebender Bedeutung.

Kritisch sind nach wie vor der Leerlauf sowie die instationären Fahrzustände, vor allem der Schubbetrieb und der Betrieb bei kaltem Motor, beides bekanntlich Zustände, die auch von den Testzyklen verlangt werden.



Tabelle 3. Wirkungen der wichtigsten Einflussgrößen des Motorprozesses auf die spezifischen Abgasemissionen

Massnahmen	CO	HC	NO <sub>x</sub>	Rauch (Diesel)	Wirkungsgrad	Spez. Leistung
Erhöhung der Ansaugtemperatur	→	→	→	→	→	→
Drosselung der Ansaugluft	→	→	→	→	→	→
Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses	→	→	→	→	→	→
Erhöhte Aufladung (ohne Ladeluftkühlung)	→	→	→	→	→	→
Erhöhte Aufladung (mit Ladeluftkühlung)	→	→	→	→	→	→
Spätes Zünden, spätes Einspritzen	→	→	→	→	→	→
Luftwirbel, schnelle Verbrennung*	→	→	→	→	→	→
Luftüberschusszahl gegen 1	→	→	→	→	→	→
Verhältnis Oberfläche zu Volumen gross	→	→	→	→	→	→
Hohe Last	→	→	→	→	→	→
Hohe Drehzahl	→	→	→	→	→	→

\* Brennbeginn für besten Wirkungsgrad

## 7.2 Ausgewählte Motorprozesse

Der Motorprozess, d.h. die im Zylinder sich abspielenden Vorgänge, werden von sehr vielen Faktoren beeinflusst, so durch die Ansaugbedingungen, das Verdichtungsverhältnis, den Einspritzbeginn oder den Zündzeitpunkt vor dem oberen Totpunkt, das Verbrennungssystem (mit oder ohne Wirbel, Vorkammer) und die Einspritzcharakteristik, das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen sowie den Last- und Drehzahlzustand. In Tabelle 3 sind die Wirkungen dieser Parameter auf die Abgasemissionen tendenzmässig wiedergegeben. Man stellt dabei fest, dass alle Massnahmen, die hohe Verbrennungstemperaturen ergeben, d.h. hohen Wirkungsgrad oder hohe spezifische Leistung anstreben (Aufladung, hohes Verdichtungsverhältnis, Luftüberschusszahl gegen 1), von erhöhter Stickoxidemission gefolgt sind. Während eine Einflussnahme auf die CO-Emission ausser durch Aufladung praktisch unmöglich ist, beeinflussen doch alle Parameter, die gute Brennstoff-Luft-Vermischung und dünne Quentschichten ergeben (hohe Ausgangstemperatur, Aufladung, Luftwirbel, Vorkammervverbrennung), die Kohlenwasserstoffemission im positiven Sinne.

Durch andere, noch weiter gehende Eingriffe in den Prozess kann das Abgasverhalten in weit grösserem Masse beeinflusst werden. Hierbei sind vor allem zu nennen: Rückführung der Abgase, Ladungsschichtung, Wassereinspritzung und das Beimengen von Zusatzbrennstoffen zur Ansaugluft beim Dieselmotor (sog. Fumigation).

Bei der *Abgasrückführung* [28, 29] (Exhaust Gas Recirculation, EGR) wird ein Teil der Abgase der angesaugten Ladung beigemischt. Die dadurch dem Motor zugeführten, weitgehend inerten Gase (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) müssen bei der Verbrennung ebenfalls erwärmt werden und verringern damit die maximalen Temperaturen erheblich. Sie bewirken, neben der Verminderung der Sauerstoffkonzentration, massgeblich den Ausstoss an Stickoxiden. Um aussetzerfreien bzw. rauchfreien Betrieb zu gewährleisten, muss das Gemisch angerei-

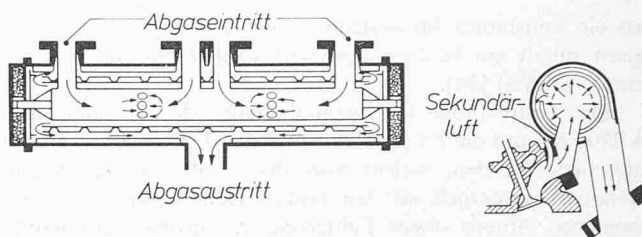


Bild 25. Aufbau eines thermischen Reaktors nach Cantwell [34]

chert werden, was natürlich wiederum den CO- und HC-Ausstoss vergrössert und den Brennstoffverbrauch erhöht. Ferner gilt es, zu verhindern, dass der Motor durch die Abgasrückführung zuviel an Leistung einbüsst. Es ist daher notwendig, dass solche Abgasrückführungsanlagen und ihre Steuerung sorgfältig auf den Motor abgestimmt werden. Grosse Überschneidung der Ventile kann ebenfalls im Sinne einer Abgasrückführung wirken [30].

Mit *Ladungsschichtung* wurde schon versucht, beim Ottomotor ähnliche Wirkungsgrade zu erzielen wie beim Dieselmotor; das Prinzip wurde für Vielstoffmotoren (Hybridmotoren) angewendet, und in neuester Zeit scheint es zur Erzielung eines guten Abgasverhaltens einige Vorteile zu vereinigen [31]. Grundsätzlich wird dabei nur um die Zündkerze ein brennbares Gemisch aufgebaut, während der Rest des Zylinders mit reiner Luft gefüllt ist. Dadurch wird es möglich, den Ottomotor ohne Drosselung auch bei Teillast zu betreiben. Wegen des vorhandenen grossen Luftüberschusses wird die CO-Emission stark vermindert, während Kohlenwasserstoffemissionen wenig beeinflusst werden. Die Stickoxidemission kann verringert werden, wenn das um die Kerze aufgebaute Gemisch reich ist. Problematisch bleibt nach wie vor der Aufbau der Schichtung, die ja über einen weiten Drehzahlbereich gesichert sein soll. Eine elegante Lösung dafür wurde kurz vor Drucklegung dieses Aufsatzes bekannt. Die Firma Honda verwendet in ihrem kürzlich vorgestellten CVCC-Motor (Compound Vortex Controlled Combustion, siehe «MTZ» 34 (1973) Nr. 4, S. 130, ein drittes, ebenfalls von der Nockenwelle gesteuertes Ventil zum Einlassen des angereicherten Gemisches in eine Primärbrennkammer, während der übrige Brennraum mit einem sehr mageren Gemisch durch das traditionelle Einlassventil gefüllt wird.

Es ist schon längst bekannt, dass die hohe Luftfeuchtigkeit die Flammentemperatur verringert und die Flammengeschwindigkeit beschleunigt. Wird der angesaugten Ladung Wasser beigemischt [32], so gelingt es, die NO<sub>x</sub>-Emission zu verringern. Bei ebensoviel eingespritztem Wasser wie Brennstoff vermindert sich diese Emission um rund 50%. Auch auf die CO-Emission ist dieser Einfluss günstig, während der Ausstoss an unverbrannten Kohlenstoffen zunimmt. *Direkte Wassereinspritzung* beim Dieselmotor verbessert das Rauchverhalten, während NO<sub>x</sub>- und CH-Emissionen zunehmen.

Unter *Fumigation* versteht man die Beimengung von zusätzlichem Brennstoff wie Methan oder Propan zur Ansaugluft des Dieselmotors, wobei die Emissionen leicht beeinflusst werden können, jedoch nicht in jedem Fall in der besseren Richtung.

## 7.3 Reinigung der Abgase

Die Behandlung der Abgase hat zum Ziel, die Schadstoffe (HC, CO, NO<sub>x</sub>) in die unschädlichen Abgaskomponenten (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) umzuwandeln. Dies könnte etwa nach den folgenden Reaktionsgleichungen geschehen:

- (8)  $2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$  (Oxydation)
- (9)  $\text{C}_x\text{H}_y + (x + y/2) \text{O}_2 \rightarrow x \cdot \text{CO}_2 + y/2 \text{H}_2\text{O}$  (Oxydation)
- (10) oder  $2 \text{NO} + 2 \text{CO} \rightarrow \text{N}_2 + 2 \text{CO}_2$  (Reduktion)



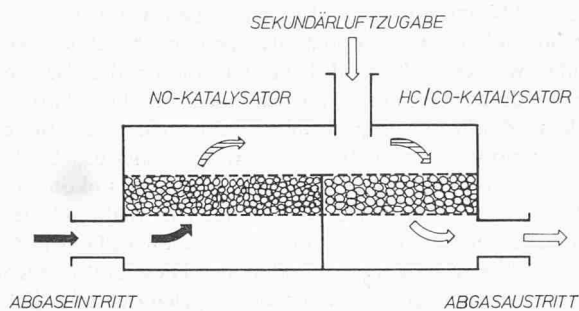
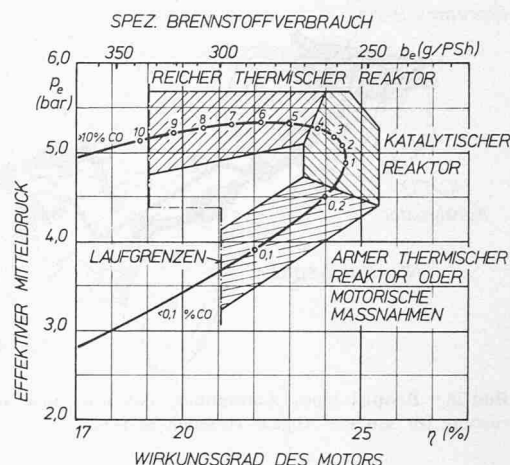


Bild 26. Aufbau eines katalytischen Doppelbettreaktors [33]

Bild 27 (rechts). Anwendungsbereiche der verschiedenen Abgasreinigungsmöglichkeiten



Voraussetzung für den Ablauf dieser Reaktionen in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit ist jedoch ein genügend hohes Temperaturniveau oder (und) das Vorhandensein eines Katalysators. Man spricht daher von thermischer oder katalytischer Nachverbrennung der Abgase [33]. Je nachdem, wie der vorgeschaltete Motor eingestellt ist, unterscheidet man zwischen arm und reich betriebenen Reaktoren.

In den *thermischen Reaktoren* (Bild 25, [34]) lassen sich nur die oxydierbaren Abgaskomponenten (HC, CO, Gleichungen 8 und 9) abbauen; die Stickoxidbildung muss also bereits durch motorseitige Massnahmen (Gemischeinstellung, tiefe Spitzentemperaturen) beeinflusst worden sein. Die Vor- und Nachteile des armen und reichen Betriebs dieser Nachverbrennungsanlage sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Da die Betriebstemperaturen der thermischen Reaktoren sehr hoch gehalten werden müssen (700 bis 1000 °C), können nur zunderfreie und warmfeste Werkstoffe eingesetzt werden. Um hohe Abstrahlungsverluste zu vermeiden, hat man diese Nachverbrennungsanlagen mit wirksamer Isolation versehen. Die tiefen Abgastemperaturen der Dieselmotoren erlauben den Betrieb von thermischen Reaktoren nicht.

Das bessere Betriebsverhalten und die Anspruchslosigkeit, verbunden mit einer besseren Wirkung, scheinen der reich betriebenen Anlage bei ungefähr gleichem Anschaffungspreis trotz ihrer geringeren Wirtschaftlichkeit eine Vormachtstellung einzuräumen. Es ist jedoch zu beachten, dass bei einem solchen Betrieb insgesamt gewaltige Energiemengen sinnlos in Wärme umgesetzt werden, was in Anbetracht der begrenzten Erdölvorräte einem Raubbau gleichkommt und zudem auch

die Abwärme (thermal pollution) erheblich vergrössert. Aber es werden auch mehr Abgase produziert, so dass wenigstens ein Teil der verbesserten Wirkung bereits dadurch wieder aufgehoben wird. Man kann nur hoffen, dass es wenigstens in Europa gelingt, durch weitsichtige und nicht zu hektische Gesetzgebung Platz zu lassen für vernünftige technische Lösungen, die im Lichte einer Gesamtbewertung der ökologischen Lage nicht andere, in der Zukunft sich abzeichnende Probleme verfrüht heraufbeschwören. Solche Überlegungen gelten auch für die katalytischen Reaktoren sowie für alle anderen Massnahmen, die eine Abgasreinigung zum Ziel haben und dabei die Wirtschaftlichkeit der Motoren erheblich verschlechtern.

Im *katalytischen Reaktor* kann sowohl eine Oxydation gemäss den Gleichungen (8) und (9) als auch eine chemische Reduktion der Schadstoffe gemäss der Gleichung (10) durchgeführt werden. Als Oxydationskatalysator kann er die gleiche Aufgabe erfüllen wie der thermische Reaktor; bei seinem Einsatz als Reduktionskatalysator vermag er auch die Stickoxide abzubauen.

Wird einem Reduktionskatalysator ein Oxydationskatalysator nachgeschaltet, so erhält man den *katalytischen Doppelbettreaktor* (Bild 26), mit dem es gelingt, alle Schadstoffe abzubauen. Da bei der Reduktion auch Ammoniak entstehen kann,

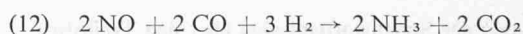
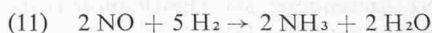


Tabelle 4. Zusammenstellung der Vor- und Nachteile von arm und reich betriebenen thermischen Abgasreaktoren.

Betriebsart	reicher Betrieb	armer Betrieb
Luftüberschusszahl	0,8–0,9	1,1–1,2
Funktionsweise	motorgetriebene Lufterblasung	findet Sauerstoff selbst (grosses Reaktorvolumen)
Betriebstemperaturen:	min. 700 bis 800 °C, max. 1000 °C	Erhöhte Auspufftemperatur des Motors selbst
sie werden aufrechterhalten durch	Nachbrennung der hohen Anteile an H <sub>2</sub> (1–3 %), HC, CO (3–6 %) Spätzündung	
Betriebsverhalten	kürzere Aufwärmzeit brennt gut (weites λ <sub>v</sub> -Toleranzband)	Spätzündung längere Aufwärmzeit Gefahr des Auslöschens (enges λ <sub>v</sub> -Toleranzband)
Regelung	Übertemperaturschutz (Ausfall Zündkerze)	keine
Wartung	keine	Enges Toleranzband erfordert vermehrte Überwachung der Motoreinstellung
Wirtschaftlichkeit	hoher Brennstoffverbrauch (10–30 % höher)	keine Beeinflussung des Brennstoffverbrauchs
Kombination mit Abgasrückführung	möglich	unmöglich
Wirkung	Nahezu vollständige Oxydation von HC, CO, NO <sub>x</sub> im Abgas gering	Oxydation der HC z.T. ungenügend NO <sub>x</sub> im Abgas etwas höher

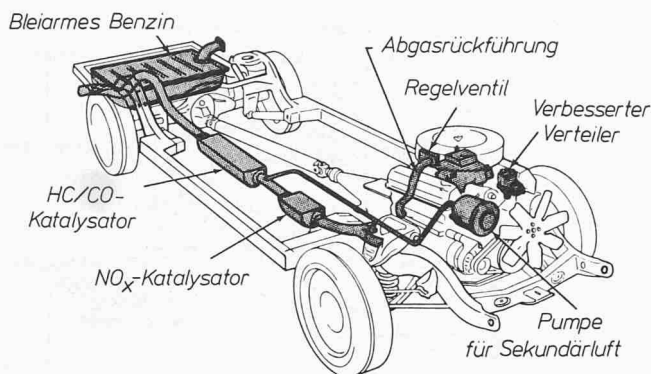
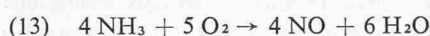


Bild 28. Beispiel eines Automobils, das mit einer wirksamen Aus-rüstung für saubere Abgase versehen ist [41]

ist es möglich, dass dieser bei der anschliessenden Oxydation wieder zu Stickoxid verbrennt



Diese sekundäre Stickoxidbildung hängt im wesentlichen von der freien Menge Wasserstoff, von Katalysortyp und der Temperatur ab.

Als Katalysatoren kommen bis heute wegen ihrer hohen Aktivität vor allem teure Edelmetalle in Frage, die in sehr dünner Schicht auf den Katalysator (meist poröser keramischer Monolith) aufgetragen sind. Die früher als Träger verwendeten Granulate, die grosse Oberflächen bieten, sind den Erschütterungen nicht gewachsen und reiben sich schnell ab. Leider verlieren Edelmetall-Katalysatoren durch Einwirkung des Bleis ihre Wirkung, so dass für längere Wirksamkeit bleifreier Betrieb vorausgesetzt werden muss.

Im Gegensatz zu den thermischen Reaktoren kann der katalytische Reaktor im wirtschaftlichen Bereich des Motors arbeiten, wenn von seinem bei Vollast erhöhten Auspuffgegendruck abgesehen wird (Bild 27). Der thermische Reaktor hat einerseits im reichen Bereich eine schlechte Wirtschaftlichkeit (hohen Brennstoffverbrauch) zur Folge, andererseits ergibt sich im armen Betrieb zudem eine Absenkung der spezifischen Leistung (Mitteldruck), wie sie auch durch motorische Massnahmen erfolgt.

Die katalytische Aufbereitung der Abgase findet heute bereits in der Schweiz Anwendung auf Dieselmotoren, die Autobusse im Stadtverkehr antreiben [35].

#### 7.4 Beeinflussung der Schadstoffemission über den Treibstoff

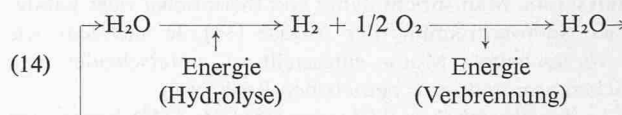
Nur über den Treibstoff lassen sich, wie bereits bemerkt wurde, die Schwefeldioxid- und Bleiemission einschränken. Die Einflussnahme auf die anderen Schadstoffe durch Abwandlung der Eigenschaften eines Brennstoffes innerhalb der technisch möglichen Grenzen ist so wenig wirksam, dass schon Versuche auf verschiedenen Motoren keine eindeutigen Schlüsse mehr zulassen.

Mit gewissen metallhaltigen oder organischen Additiven gelingt es, die Russentwicklung vor allem der dieselmotorischen Verbrennung einzudämmen [36, 37]. Es ist auch möglich, durch als Detergentien wirkende Brennstoffadditive die Motorenteile, vor allem den Vergaser, sauber zu halten und so, indirekt, die Emission zu beeinflussen [38]; eine ähnliche Funktion also, wie Additive im Schmieröl zum Abbau der Ölkohle und des Lackes am Kolben bezwecken.

Durch den Ersatz des normalerweise verwendeten Treibstoffes durch verflüssigte Kohlenwasserstoffe wie Propan und Butan kann die Schadstoffemission ganz wesentlich eingeschränkt werden. Diese schon bei mässigen Drücken und bei Zimmertemperatur leicht zu verflüssigenden Gase – bekannt

unter der Abkürzung LPG (Liquefied Petroleum Gas) – können sowohl in Ottomotoren als auch in Dieselmotoren verarbeitet werden. Während beim Ottomotor das Benzin vollständig durch LPG ersetzt wird, muss der Dieselmotor nach dem Zweistoffprinzip arbeiten, d.h. eine bestimmte Menge Dieselöl wird noch benötigt, um einerseits das LPG-Luftgemisch zu zünden und andererseits auch eine unkontrollierte Verbrennung des LPG zu vermeiden. Während der nachträgliche Umbau von Benzinfahrzeugen auf LPG-Betrieb auf einfache Weise möglich ist, bedarf der Dieselmotor doch einer recht aufwendigen zusätzlichen Regeleinrichtung [39, 40].

Dem Einsatz des Wasserstoffs als geradezu idealem Treibstoff stellen sich wegen seiner erhöhten Explosivität und den Schwierigkeiten, die bei seiner Handhabung entstehen, grosse Hindernisse entgegen. Abgesehen von den bei jeder Hochtemperatur-Verbrennung entstehenden Stickoxiden wäre ein absolut schadstofffreier Betrieb möglich. Spätestens vom Zeitpunkt an, in dem die fossilen Brennstoffvorräte erschöpft sind, muss der Wasserstoff auf dem Wege der Hydrolyse gewonnen werden, womit auch ein im ökologischen Sinne wertvoller Kreislauf geschlossen wird.



Man kann sich gut vorstellen, dass die zur Aufspaltung des Wassers notwendige Energie in diesem Falle durch nukleare Energie gedeckt wird. Damit wäre auch der Weiterbestand der Flugtechnik gesichert, denn diese ist nach heutigen Begriffen nur auf thermischem Wege denkbar, und dazu bedarf es eines energiereichen, hochkonzentrierten Treibstoffs.

## 8. Die Verbrennungsmotoren der Zukunft

### 8.1 Herkömmlicher Ottomotor

Der herkömmliche Ottomotor wird weiterhin als Antrieb für Personenwagen das Feld beherrschen. Allerdings müssen eine Reihe von Massnahmen dafür sorgen, dass seine Schadstoffemission weitgehend vermindert wird (Bild 28).

Der Motor weist eine gegenüber früheren Modellen verfeinerte Gemischaufbereitungsanlage (Vergaser oder Einspritzung), ein verbessertes Zündsystem, gesteuerte Abgasrückführung (einschliesslich Ölsumpfabgase) und Abgasreinigungsanlagen (katalytisch und thermisch) auf. Der Betrieb wird mit ungebleitem oder wenig gebleitem Brennstoff erfolgen, was eine Herabsetzung des Verdichtungsverhältnisses erfordert. Die spezifische Leistung des Motors vermindert sich dadurch, und auch der Wirkungsgrad sinkt ab. Zu den erhöhten Anschaffungskosten werden also auch zunehmende Betriebskosten kommen.

### 8.2 Wankelmotor

An den Wankelmotor werden zurzeit grosse Hoffnungen geknüpft, mit ihm Abgasprobleme auf einfache Weise zu lösen. Der völlig andere Verbrennungsablauf macht ihn unabhängig vom Klopfproblem, und die fehlenden Ventile ermöglichen einen befriedigenden bleifreien Betrieb. Das gegenüber dem herkömmlichen Motor grössere Oberflächen/Volumen-Verhältnis erhöht einerseits die HC-Emission, was zusammen mit der hohen Auspufftemperatur des Wankelmotors günstige Bedingungen für die Nachverbrennung ergibt, und andererseits wird auch bereits die Erfüllung der hohen Anforderungen bezüglich NO<sub>x</sub>-Grenzwerte ermöglicht [42]. Einen letzten Vorteil sieht man in der kompakten Bauweise, die bei der Konstruktion des Fahrzeugs mehr Freiheit gewährt. Es ist möglich, dass sich der Wankelmotor innerhalb der Kategorie der Benzinmotoren seinen Marktanteil zu sichern vermag.

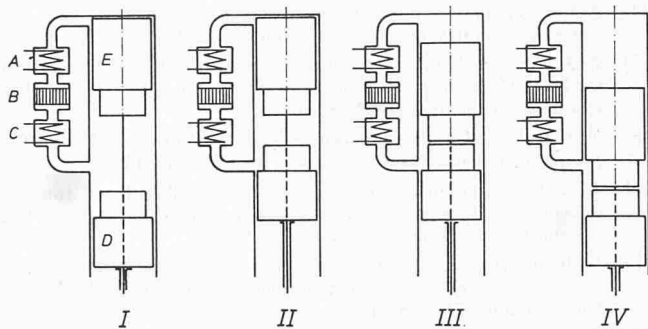


Bild 29. Prinzipschema des Philips-Stirling-Motors

### 8.3 Dieselmotor

Beim Dieselmotor ist es ohne allzu grosse Schwierigkeiten möglich, bei hohem Wirkungsgrad die amerikanischen Abgasnormen für 1975/76 zu erfüllen. Diesem Vorzug stehen die bekannten Nachteile des höheren Gewichts, der geringeren spezifischen Leistung und des rauheren Laufs gegenüber. Er dürfte noch während langer Zeit den Hauptanteil der Antriebe für alle möglichen Nutzfahrzeuge, Schiffe und Notstromanlagen stellen. Die Forschung wird sich bemühen, das Rauchverhalten zu verbessern, den Abgasgeruch zu vermeiden und die Stickoxide, vor allem bei aufgeladenen Motoren, zu verringern. Damit blickt der Dieselmotor einer gesicherten Zukunft entgegen.

### 8.4 Gasturbine

Oberflächlich beurteilt, scheint die Gasturbine im Hinblick auf Schadstoffemission ganz erhebliche Vorteile aufzuweisen, arbeitet sie doch mit kontinuierlicher Verbrennung und niedrigen Spitzentemperaturen von höchstens 1000 °C. Obschon für die Verbrennung in der Gasturbine mehr Zeit und mehr Luft zur Verfügung stehen und ein Eingriff in die Verbrennung leichter möglich ist, bereitet die Stickoxidbildung erhebliche Schwierigkeiten. Die hohe Luftvorwärmung vor Eintritt in die Brennkammer führt zu hohen Temperaturen innerhalb der Primärzone der Flamme, wo optimale NO-Bildungsbedingungen herrschen [43]. Man arbeitet heute an verschiedenen Stellen an der Entwicklung von Brennkammern, die mit Luftmangel in der Primärzone arbeiten und alsdann die Flamme in der Sekundärzone abschrecken. Eine Nachbehandlung der Abgase kommt wegen der grossen Gasmengen kaum in Betracht. Der Wirkungsgrad der einfachen Gasturbine ist geringer als derjenige des Dieselmotors; auch ist sie weit schlechter für instationären Betrieb geeignet. Ihr verhältnismässig hoher Preis rechtfertigt sich nur dann, wenn hohe spezifische Leistung erhebliche Vorteile bietet oder gar unerlässlich ist und der schlechte Wirkungsgrad weniger ins Gewicht fällt.

### 8.5 Der Philips-Stirling-Motor

Das Stirling-Prinzip wurde bereits im vorigen Jahrhundert erfunden, doch hatte es Philips nur in der Kältetechnik angewendet. Dieser Firma gelang es schliesslich auch, einen Motor, der nach diesem Prinzip betrieben wurde, vorerst für militärische Zwecke zu bauen. Bild 29 zeigt das Arbeitsprinzip [44].

Im Zustand I befindet sich das Arbeitsmedium expandiert im kalten Raum. Im Zustand II ist der Verdrängerkolben im oberen Totpunkt stehengeblieben, während der Arbeitskolben das kalte Gas verdichtet hat. Jetzt bleibt der Arbeitskolben stehen (Zustand III), während der Verdränger das Gas durch den Kühler zurück, über den Regenerator und den Erhitzer in

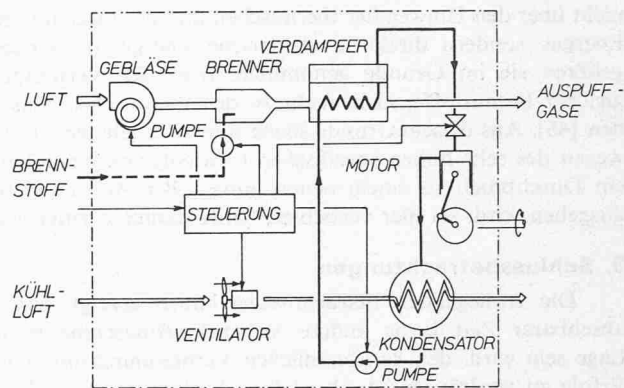


Bild 30. Prinzipschema des Dampfmotors [45]

den warmen Arbeitsraum verdrängt. Das jetzt heisse Gas entspannt sich und drückt den Arbeits- und Verdrängerkolben in den unteren Totpunkt (Zustand IV). Anschliessend schiebt der Verdrängerkolben das entspannte Gas wieder durch den Erhitzer, den Regenerator und den Kühler in den kalten Raum zurück, womit wieder ein neuer Zyklus beginnen kann.

Der Regenerator ist dabei ein ganz wesentlicher Bauteil, ohne den dieser Arbeitsprozess nicht möglich wäre. Wie bei allen Wärmekraftmaschinen mit äusserer Verbrennung muss die gesamte anfallende Abwärme über Kühler an die Umgebungsluft abgeführt werden, während dies bei herkömmlichen Motoren zu einem wesentlichen Teil über das Abgas geschieht. Damit sind erheblich grössere Wärmetauscher nötig als bei den heutigen Verbrennungsmotoren. Die Totvolumina von Erhitzer, Regenerator und Kühler erlauben auch keine hohen Verdichtungsverhältnisse, worunter natürlich auch der Wirkungsgrad leidet. Dank sehr hohen Betriebsdrücken ist es jedoch möglich, die spezifische Leistung trotzdem verhältnismässig hoch zu halten.

Im Stirling-Motor können dank der äusseren Verbrennung mit Luftüberschuss alle möglichen Arten von Brennstoffen umgesetzt werden; diese beeinflussen daher auch sein Emissionsverhalten. Die benötigten hohen Erhitzertemperaturen führen dazu, dass wie bei der Gasturbine einzig die Stickoxide noch Probleme stellen. Die Zukunftsaussichten dieser Maschine lassen sich noch nicht konkret abschätzen. Dem weiteren Vorteil des sehr ruhigen Laufes stehen erhöhter konstruktiver Aufwand und damit verbunden auch ein bedeutend höherer Preis entgegen. Man spricht von 200 bis 300% gegenüber dem herkömmlichen Motor. Man ist noch weit davon entfernt, diese Maschine in grossen Serien einzusetzen.

### 8.6 Dampfmotoren

Wieder etwas stiller ist es um die Dampfmotoren geworden. Diese Maschinen mit ebenfalls geschlossenem Kreislauf und äusserer Verbrennung arbeiten nach dem Rankine-Prozess (Bild 30). Das früher bei den Dampfmaschinen verwendete Wasser wurde durch organische Fluorverbindungen ersetzt, die weder korrosiv wirken noch gefrieren können. Der auch hier vorhandene grosse Bedarf an Kühlfläche, besonders des Kondensators, bringt erhebliche Schwierigkeiten beim Einbau solcher Anlagen in Fahrzeuge. Der Wegfall eines Getriebes kann hierbei das erhöhte Platzbedürfnis nur teilweise ausgleichen. Bezüglich der Emission von Schadstoffen stossen wir auf die gleichen Verhältnisse wie beim Stirling-Motor und der Gasturbine.

### 8.7 Brennstoffzellen

Unsere Betrachtung über die Verbrennungsmaschinen wäre unvollständig, wenn nicht wenigstens auf die Brennstoffzellen hingewiesen würde. Da sie jedoch die chemische Energie



nicht über den Umweg der thermischen und der mechanischen Energie, sondern direkt in elektrische Energie umwandeln, gehören sie im Grunde genommen, trotz der Verwendung gleicher Brennstoffe, nicht mehr zu den thermischen Maschinen [46]. Aus diesem Grunde sowie weil anzunehmen ist, dass wegen des sehr hohen spezifischen Gewichts von ihnen kaum ein Durchbruch zu einem neuen universellen Antriebssystem ausgehen wird, sei hier verzichtet, näher darauf einzugehen.

## 9. Schlussbetrachtungen

Die vorliegenden Betrachtungen haben gezeigt, dass in absehbarer Zeit keine andere Wärmekraftmaschine in der Lage sein wird, den herkömmlichen Verbrennungsmotor mit Erfolg zu verdrängen. Auch ist kein System bekannt, das in weiterer Zukunft für die schadstofffreie und dennoch wirtschaftliche Umsetzung von Brennstoff eine wirkliche Chance hätte. Die Bemühungen der Technik werden daher weiter dahin gehen müssen, das Schadstoffverhalten des bekannten Verbrennungsmotors zu verbessern, wobei die getroffenen Massnahmen den Wirkungsgrad jedoch nicht zu stark vermindern dürfen. Bei einem gegebenen Leistungsbedarf sollte die minimale absolute Schadstoffmenge angestrebt und es sollten auch die Vorräte an fossilen Brennstoffen nicht unnütz abgebaut werden.

Die zum Teil strengen Abgasnormen haben vor allem die Automobilmotorenhersteller angespornt, ihre Produkte zu verbessern, was auch bereits zu beachtlichen Verminderungen der erzeugten Schadstoffe geführt hat; man spricht von einer Verminderung auf etwa 20%. Noch weitergehende Massnahmen müssen bereits sehr teuer erkaufte werden und werfen zum Teil andere ökologische Probleme auf. Zu Recht werden deshalb auch von nicht dem Lager der Motorenbauer angehörenden Fachleuten noch weitergehende Restriktionen abgelehnt, mindestens so lange, bis nicht eindeutig nachgewiesen werden kann, dass nur auf diese Weise Schaden verhindert werden kann. Gerade hier scheint jedoch eine wesentliche Lücke in der Erforschung der Grundlage für Umweltnormen zu bestehen. Die Zukunft, die uns je länger je mehr mit den Grenzen der Natur konfrontieren wird, bedarf einer genauen Kenntnis der Reaktionen, die durch das gegenüber früher veränderte Verhältnis Mensch-Umwelt entstehen.

Es ist klar, dass alle technischen Verbesserungen am Automobilmotor nichts nützen, wenn auch dem Wachstum des privaten Verkehrs als einer der grössten Schadstoffquellen nicht Einhalt geboten wird. Wenn dies im Moment nur durch unpopuläre Massnahmen möglich ist, so scheint doch, infolge der immer prekärer werdenden Verkehrslage, der steigenden Anschaffungs- und Betriebskosten des privaten Fahrzeugs und der Erstellung leistungsfähiger öffentlicher Verkehrsmittel, auf lange Frist eine Sättigung einzutreten. Sofern gleichzeitig auch den anderen Luftverschmutzern in ähnlicher Weise zu Leibe gerückt wird, dürfte die Qualität der Luft für längere Zeit sichergestellt sein.

Der Verfasser möchte abschliessend Dr. N. Dedeoglu, Dr. M. Eberle und G. Aue in der Firma Gebr. Sulzer AG danken für ihre Mithilfe beim Zusammensuchen der Unterlagen zu diesem Bericht sowie für die wertvollen Ratschläge und Hinweise während unserer gemeinsamen Diskussionen.

Adresse des Verfassers: Jean-Pierre Corbat, dipl. Ing. ETH, SIA, Institut de Thermodynamique, EPFL, 33, av. de Cour, 1007 Lausanne.

## Literaturverzeichnis

- [1] A.J. Haagen-Smit: Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog. «Ind. Eng. Chem.» 44 (1952), 1342.
- [2] P.S. Myers et al.: The ABCs of Engine Exhaust Emissions, SAE, Paper 710481, 1971.
- [3] H.W. Schlipköter und R. Dolgner: Gesundheitsgefährdung durch Verunreinigung der Luft. «Atomwirtschaft», Juni 1972.
- [4] P.S. Barry und G.F. Harrison: Motor Gasoline, Lead and Air Pollution. «Petroleum Review», Oktober 1972, S. 311–318.
- [5] H.K. Newhall: Kinetics of Engine Generated Nitrogen Oxides and Carbon Monoxide. Twelfth Symposium on Combustion, The Combustion Institute (1969), S. 603.
- [6] T.A. Huls et al.: Spark Ignition Engine Operation and Design for Minimum Exhaust Emission. SAE, Paper 660405, 1967.
- [7] W.A. Daniel: Flame Quenching at the Walls of an Internal Combustion Engine. Sixth Symposium on Combustion, The Combustion Institute (1957), S. 886.
- [8] M.W. Jackson et al.: The Influence of Air-Fuel Ratio, Spark Timing and Combustion Chamber Deposits on Exhaust Hydrocarbon Emission, SAE Paper 486-A.
- [9] Y.B. Zeldovich: The Oxydation of Nitrogen in Combustion Explosions. «Acta phys.-chim.» URSS 1946 21, S. 577.
- [10] W.E. Bernhardt: Kinetics of Nitric Oxide Formation in Internal-Combustion Engines. Air Pollution Control in Transport Engines. Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C 149.
- [11] E.S. Starkmann: Spatial and Temporal History of Nitrogen Oxides in the Spark-Ignition Combustion Chamber. Air Pollution Control in Transport Engines. Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C 138.
- [12] I.M. Khan: Prediction of Soot and Nitric Oxide Concentrations in Diesel Engine Exhaust. Air Pollution Control in Transport Engines. Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C 142.
- [13] M.K. Eberle: Simulation der thermodynamischen Prozesse in Benzinmotoren unter besonderer Berücksichtigung der Stickoxidemissionen. Vortrag ETH-Kolloquium für Technische Wissenschaften, Zürich 1972, unveröffentlicht.
- [14] R.C. Bascon et al.: Design Factors that affect Diesel Emissions, SAE Paper 710484, 1971.
- [15] R. Pischinger: Forschungsarbeiten über Abgasentgiftung bei Dieselmotoren. «ATZ» 74 (1972) 3.
- [16] L. Gross-Gronowski: Diesel Smoke, Flame Cooling as the Main Cause. «Automobile Engineer» 54 (1965) 13, S. 531.
- [17] J.C. Street and A. Thomas: Carbon Formation in Premixed Flames. «Fuel» 34 (1955), S. 4.
- [18] R. Boog: Some Instrumentation and Techniques for Measuring Engine Emission. SAE Paper 710482, 1971.
- [19] W. Blum und G. Rinne: Identifizierung von Kohlenwasserstoffen in Abgasen von Automobilmotoren mit Hilfe einer Kombination Gaschromatograph-Massenspektrometer. «MTZ» 33 (1972) 10.
- [20] A. Scomamiglio: Considerazioni sulla valutazione opacimetrica della «famosità» allo scarico dei motori Diesel. Congresso della Associazione Termotecnica Italiana, L'Aquila, 1971.
- [21] J.P. Soltau, R.J. Larbey: The Sampling and Measurement of Exhaust Emissions from Motor Vehicles. Air Pollution Control in Transport Engines, Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C 143.
- [22] T.O. Wagner: Motor Gasoline and Automotive Air Pollution, SAE Paper 710485, 1971.
- [23] Federal Register 1968, 33 (4. Juni), 108.
- [24] Federal Register 1970, 35 (10. November), 219.
- [25] Federal Register 1971, 36 (5. Oktober), 193.
- [26] Intereurope, E/ECE/324; E/ECE/Trans/505; Regulation No. 15.
- [27] H.P. Lenz: Vergleich zwischen Vergaser- und Einspritz-Ottomotoren, Vortrag am Seminar «Gemischbildung, Verbrennung und Abgasprobleme bei Fahrzeugmotoren» an der Technischen Akademie Wuppertal, 28 und 29. Oktober 1971.
- [28] H.K. Newhall: Control of Nitrogen Oxides by Exhaust Recirculation, A preliminary Theoretical Study, SAE Paper 670495, 1967.
- [29] E. Mühlberg: Abgasrückführung bei Verbrennungskraftmaschinen, insbesondere bei Dieselmotoren. «MTZ» 32 (1971) 5, Seiten 166–172, und 9, Seiten 327–336.
- [30] C. Henault: The Influence of Valve Overlap on Oxides of Nitrogen Exhaust Emissions. Air Pollution Control in Transport Engines, Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C 148.
- [31] J.E. Witzky: Stratification and air pollution. Air Pollution Control in Transport Engines, Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C 136.
- [32] E. Valdmann und D.E. Wulfhurst: The Effects of Emulsified Fuels and Water Induction on Diesel Combustion, SAE Paper 700736, 1970.
- [33] K. Obländer und J. Abthoff: Entwicklungsstand der thermischen und katalytischen Nachverbrennung bei Ottomotoren. «MTZ» 33 (1972) Nr. 5, S. 206–213.



- [34] E.N. Cautwell et al.: A Progress Report on the Development of Exhaust Manifold Reactors. SAE Paper 690139, 1969.
- [35] L. Keusch: Dieselaufbau und Umweltschutz. «Automobilrevue» Nr. 46 und 47, 4. und 11. Nov. 1971.
- [36] C.O. Miller: Diesel Smoke Suppression by Fuel Additive Treatment. SAE Paper 670093, 1967.
- [37] G. Sprenger et al.: Über die Wirkung russhemmender Kraftstoffzusätze bei der Verbrennung im Dieselmotor. «MTZ» 31 (1970) Nr. 3, S. 102-108.
- [38] J.W. Dable und T.J. Sheahan: The Contribution of Additives to the Elimination of Air Pollution. Air Pollution Control in Transport Engines. Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C 128.
- [39] M. Minerbi und M. Brunner: Betrieb von Benzinfahrzeugen mit Flüssiggas. «Automobil-Revue» Nr. 45, 26. Oktober 1972.
- [40] D. Lyon et al.: Controlling Exhaust Emission from a Diesel Engine by LPG Dual Fuelling, Air Pollution Control in Transport Engines. Inst. of Mech. Eng., Symposium 1971, Paper C 126.
- [41] A Cooperative Research Program for Automotive Emission Control. SP 361, IIEC, Society of Automotive Engineers, 1971.
- [42] T. Muroki: Das Abgasverhalten der Kreiskolbenmotoren und Massnahmen gegen die Luftverunreinigung. «MTZ» 33 (1972) Nr. 6.
- [43] W. Cornelius und R. Wade: The Formation and Control of Nitric Oxide in a Regenerative Turbine Burner. SAE Paper 700708, 1970.
- [44] R.J. Meijer: Der Philips-Stirlingmotor. «MTZ» 29 (1968), Nr. 7.
- [45] P.T. Vickers et al.: The Design Features of the GM SE-101. A Vapor-Cycle Powerplant. SAE-Paper 700163, 1970.
- [46] H.G. Plust et al.: Elektrische Energie aus elektrochemischen Brennstoffelementen. Brown-Boveri-Mitt. Bd. 49 (1962), Nr. 1/2, S. 3-33.

## Überdeckung von Autostrassen

Von E. Kessler, Zürich

DK 625.712.35

In den letzten Jahren ist eine Opposition gegen den Bau von Autobahnen und Autostrassen entstanden, welche die Verwirklichung dieser Verkehrsbauten immer stärker verzögert (Weinland-Autobahn, Expressstrassen-Y). Ausgehend von grundsätzlichen Umweltüberlegungen wird bereits die extreme Forderung erhoben, ab 1975 keine neuen Strassen mehr zu erstellen (diese Forderung wird in einem englischen Bericht «A Blueprint for Survival» aufgestellt). Das radikale Postulat ist nicht erstaunlich, nachdem die Öffentlichkeit offenbar zur Überzeugung gekommen ist, dass es nur ein Entweder-Oder gibt, d.h. entweder werden Strassen gebaut und alle die bekannten nachteiligen Nebenwirkungen in Kauf genommen, oder es wird eben auf den Neu- und Ausbau von Strassen verzichtet.

Ein Kompromiss anstelle eines vollständigen Verzichtes müsste darin bestehen, Verkehrsbauten mit weniger Umweltbeeinträchtigungen zu erstellen. Dass ein derartiger Kompromiss technisch möglich ist, müsste allerdings bewiesen werden, solange dazu überhaupt noch die Möglichkeit besteht, d.h. solange der Bau von Verkehrsanlagen nicht zum Erliegen kommt.

Damit Umweltbeeinträchtigungen beim Bau von Strassen vermieden werden können, müssen diese zuerst in ihrer Gesamtheit erkannt werden:

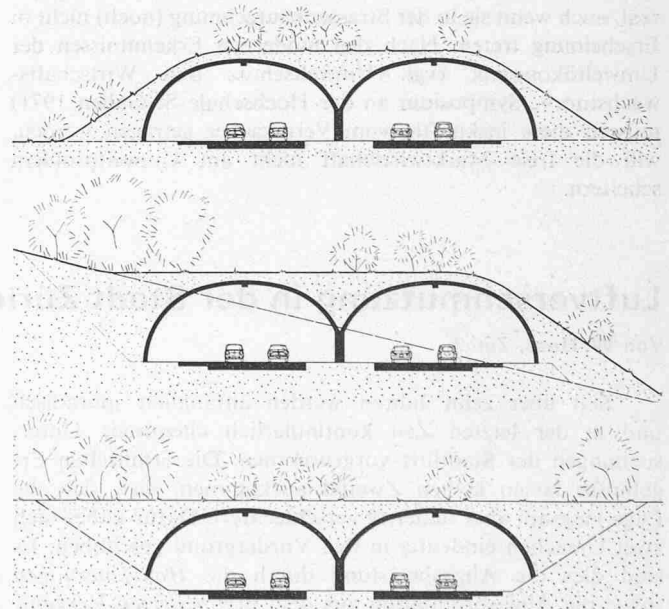
- Zerschneidung von Wohn- und Erholungsgebieten
- Lärmimmissionen (Motoren- und Pneuärm)
- Direkter und indirekter Verschleiss von potentiell Siedlungs- und Erholungsland
- Luftverschmutzung durch Abgase.

Die meisten Nachteile können vermieden werden, wenn die Verkehrsbauwerke unterirdisch erstellt werden. Solange die Entgiftung der Fahrzeugabgase, etwa nach amerikanischem Vorbild, nicht verwirklicht ist, ergeben sich bei unterirdischen Verkehrsbauten hohe Lüftungskosten. Diese fallen insbesondere bei langen Alpenstrassentunneln stark ins Gewicht, wo Lüftungskanäle und -schächte erstellt werden müssen. Im Mittelland sind unterirdische Strassenführungen aus den folgenden Gründen billiger möglich als im Gebirge:

- Die Strasse kann in vielen Fällen in offener Baugrube erstellt werden. Vorfabrikation der Überdeckungskonstruktion ist ohne weiteres möglich.
- Durch kurze offene Strecken in Abständen von 0,5 bis 1 km kann auf eine künstliche Lüftung verzichtet werden. Mit zunehmender Abgas-Reinigung der Fahrzeuge können derartige Öffnungen nachträglich meist wieder geschlossen werden. Die Verhinderung von Lärmimmissionen ist bei diesen kurzen Zwischenstrecken unvergleichlich viel wirksamer

möglich als bei vollständig oberirdischen Strassen, insbesondere da diese offenen Strecken in der Regel im Einschnitt liegen werden.

Die Kosten für eine im Tagbau erstellte Überdeckung einer zweispurigen Fahrbahn (eine Autobahnhälfte) betragen einschl. Erdüberschüttung rund 6 Mio Fr./km, für eine vier-spurige Autobahn somit 12 Mio Fr./km (darin dürften auch die kapitalisierten Betriebskosten für Beleuchtung, Reinigung usw. enthalten sein). Um zu beurteilen, ob diese Kosten hoch oder niedrig, realistisch oder utopisch sind, können sie mit den Landkosten für das eigentliche Strassentrassee sowie für die Entwertung der angrenzenden Parzellen verglichen werden.



Überdeckte vierspurige Autobahn in drei verschiedenen Lagen bezüglich des ursprünglichen Geländes. Die Trassierung kann im Längsprofil so gewählt werden, dass sich auf möglichst kurze Strecken ein Massenausgleich ergibt, ähnlich wie bei nicht überdeckten Strassen. Dadurch würde ein eintöniger Damm gemäss der ersten Abbildung vermieden. Auch bei der nachträglichen Überdeckung bestehender Strassen würde dieser Effekt im allgemeinen kaum auftreten, da in der lebhaften Topographie des schweizerischen Mittellandes Einschnitte, Hanglagen, Niveaulagen und Dämme recht häufig abwechseln. Selbst Strassen auf Dämmen lassen sich entsprechend durch eine leichte Dammverbreiterung überdecken. Durch eine variable Gestaltung der Überschüttung sowie durch geeignete Bepflanzung lassen sich auch Überschüttungsdämme gut in die Landschaft eingliedern. Zur Trennung verschiedener Bauzonen oder Quartiere könnten derartige bepflanzte Dämme sogar erwünscht sein.