

## Die Zusammensetzung der Auspuffgase bei Benzinmotoren

M. Brunner

### *Zusammenfassung*

Die wichtigsten toxischen Auspuffgasbestandteile bei mit gebleiten Benzin betriebenen Motoren sind das Kohlenoxyd, Stickoxyde und als Aerosole vorliegende Bleiverbindungen, bei 2-T-Motoren noch Ölrauch. Demgegenüber sind die übrigen Auspuff-, Blow-by- und Verdampfungsanteile – wenn auch unerwünscht – in den auftretenden Prozentsätzen als weniger gefährlich zu bezeichnen. Der Ausstoß, insbesondere von CO und andern unverbrannten Anteilen, sowie Stickoxyden ist weitgehend von der Gemischzusammensetzung resp. Vergasereinstellung abhängig, die wiederum eng den Betriebsbedingungen des Motors angepaßt werden muß. Die verschiedenen Faktoren werden eingehend besprochen, welche die Auspuffgaszusammensetzung beeinflussen, und auf die nicht geringen Schwierigkeiten hingewiesen, die sich besonders bei den kleineren europäischen Fahrzeugen einer namhaften Verminderung des Ausstoßes schädlicher Verbindungen in den Weg stellen. Immerhin vermöchte eine obligatorische periodische Überprüfung der Auspuffgas- resp. Gemischzusammensetzung diesbezüglich bereits zu einer fühlbaren Verbesserung beizutragen, ebenso auch geeignete Maßnahmen, die schon bei der Konstruktion des Motors zu berücksichtigen sind.

### *Résumé*

Les principaux composants nocifs que contiennent les gaz d'échappement des moteurs alimentés à l'essence éthylée sont: l'oxyde de carbone, certains oxydes d'azote et certains composés plombiques, ces derniers sous forme d'aérosols, et en outre – dans le cas des moteurs à 2 temps – la fumée d'huile. Aux concentrations qui se présentent, les autres effluents de l'échappement, les gaz soufflés à travers le carter (blow-by) et les vapeurs d'essence, quoique tous indésirables, sont moins dangereux. Les émissions, surtout celles de CO et d'autres composés non brûlés, mais aussi celles d'oxydes d'azote, dépendent beaucoup de la composition du mélange carburé, soit du réglage du carburateur, lequel doit être strictement adapté aux conditions de service. Les différents facteurs qui exercent une influence sur la composition du mélange carburé sont exposés en détail, ainsi que les difficultés que l'on rencontre, surtout dans le cas de petites voitures européennes, lorsqu'on veut abaisser l'émission de combinaisons toxiques. Un contrôle périodique obligatoire de la composition du mélange carburé et des gaz d'échappement pourrait cependant contribuer à réaliser une notable amélioration à ce point de vue. Il en est de même de certaines mesures dont il y a lieu de tenir compte déjà dans la construction des moteurs.

### I. Einleitung

Mit Recht wird sich die Bevölkerung in Dörfern und Städten mehr und mehr bewußt, daß sie Anrecht hat auf eine saubere Luftatmosphäre. In den mit

zunehmender Intensität geführten Diskussionen wird unter anderem verständlicherweise auch auf den durch die Motorfahrzeuge bewirkten Anteil der Luftverschmutzung hingewiesen, der besonders während der Verkehrsspitzen in bestimmten Stadt- oder Dorfteilen bisweilen sehr nahe an die zulässigen und zumutbaren Grenzen herankommt. Zur Verbesserung dieses Zustandes muß das Übel in erster Linie an der Wurzel, beim Motorfahrzeug selbst, angepackt werden. Aber auch Servicebetriebe, Kontrollorgane, Verkehrsfachleute sowie schließlich der Fahrzeuglenker selbst haben ihren Beitrag zu leisten.

Es besteht kein Zweifel, daß weitaus der größte Anteil der durch Motorfahrzeuge mit Benzin- und Dieselmotoren bewirkten gefährlicheren Luftverschmutzung von den mit *Benzin* betriebenen Fahrzeugen, hauptsächlich den Personen- und Lieferwagen, herrührt. Dies lehrt schon ein Blick auf die Verbrauchszahlen an Benzin und Dieseltreibstoff, die sich 1964 etwa wie 3 : 1 verhielten. Wird jedoch, wie für die Beurteilung der schädlichen Wirkung der Auspuffgase unbedingt nötig, deren Gehalt an eigentlich toxischen Komponenten in Rechnung gesetzt, dann wird das Verhältnis zuungunsten der Benzinfahrzeuge noch um ein Vielfaches prägnanter.

Verglichen mit den Fahrzeug-Dieselmotoren ist bei den Benzinmotoren die Sachlage bezüglich Luftverschmutzung durch die Auspuffgase erheblich komplexer, dies schon aus Gründen der anderen Gemischbildung und Gemischzusammensetzung. Beim Benzinmotor ist es, abgesehen von den bis anhin oft etwas vernachlässigten *Stickoxyden* ( $NO$  und  $NO_2$ ), das giftige *Kohlenoxyd*  $CO$ , das, schon seiner geringen warnenden Wirkung wegen, als die weitaus gefährlichste Auspuffgas-Komponente zu betrachten ist. Demgegenüber sind das nur in sehr geringen Mengen im Auspuff vorhandene *Schwefeldioxyd* ( $SO_2$ ), die bleihaltigen Umsetzungsprodukte der dem Benzin als Klopfbremse zugesetzten *Bleialkyle*, wie Bleitetraäthyl,  $Pb(C_2H_5)_4$  und Bleitetramethyl  $Pb(CH_3)_4$ , in den auftretenden Konzentrationen als relativ wenig toxisch zu bezeichnen, ebenso die un- oder nur teilweise verbrannten Produkte (wie zum Beispiel Aldehyde) sowie die im Motor zu Olefinen gekrackten *Kohlenwasserstoffe*. Über das krebs-erzeugende 3,4-Benzpyren, das bei Benzinen mit hohem Aromatengehalt in erhöhten, absolut aber in nur äußerst geringen Mengen ausgestoßen wird, liegen noch zu wenig sichere und zum Teil sogar widersprüchliche Untersuchungen vor.

Neben diesen mengenmäßig weitaus in den größten Mengen aus dem Auspuffsystem ausgestoßenen Gasen und Dämpfen sind noch die selbst bei gut eingelaufenen Motoren vom Verbrennungsraum ins Kurbelgehäuse und von da ins Freie entweichenden Gase und Dämpfe (sog. Blow-by) zu erwähnen, die aus einem Gemisch von Auspuffgas, Benzindampf und Luft bestehen, schließlich die durch bloße Verdunstung von Benzin aus dem Tank und dem Vergaser-Schwimmergehäuse entweichenden, hauptsächlich aus niederen Kohlenwasserstoffen bestehenden Benzin-Anteile (vgl. Abb. 1). Eine Gesamtübersicht

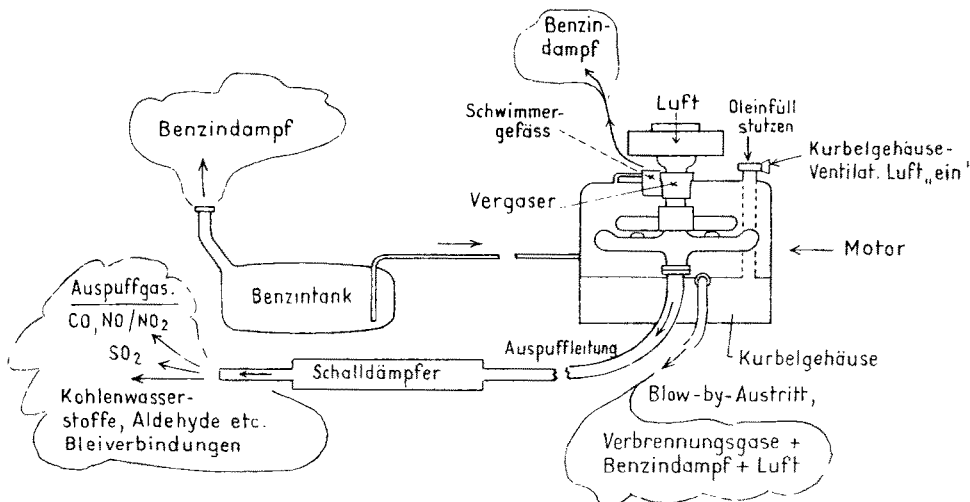


Abb. 1 Quellen der Luftverschmutzung am 4-T-Benzinmotor

über die wichtigsten von benzinbetriebenen Motorfahrzeugen erzeugten luftverunreinigenden Verbindungen vermittelt Tabelle 1. eine Übersicht über deren Toxizität Tabelle 2. Bezüglich der gesamthaft als Formaldehyd ausge-

Tabelle 1 Von benzinbetriebenen Motorfahrzeugen erzeugte luftverunreinigende Verbindungen

A. *Auspuffgas*

1. *Gesundheitsschädigende Bestandteile:*

Ganz oder teilweise verbrannte Gase und Dämpfe, wie zum Beispiel Kohlenoxyd (CO); Stickoxyde wie NO, NO<sub>2</sub>; Schwefeldioxyd SO<sub>2</sub>; Chlor- und Bromwasserstoff (HCl und HBr) sowie Schwefel- und Salpetersäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> und HNO<sub>3</sub>), alle 4 Säuren nur in Spuren.

Bleiverbindungen wie PbO, PbCl<sub>2</sub>, PbBr<sub>2</sub>, PbClBr, PbSO<sub>4</sub>; Additionsverbindungen mit PbO, Pb<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> und zahlreiche andere.

Kohlenwasserstoffe, gesättigte und ungesättigte (zum Teil auch im Motor gekrackte Produkte), Motorenöl-Nebel, besonders aus Abgasen von 2-T-Motoren, zum Teil Additives enthaltend.

3,4-Benzopyren C<sub>20</sub>H<sub>12</sub> (0 bis Spuren).

Aldehyde und andere sauerstoffhaltige organische Verbindungen.

2. *Unschädliche Bestandteile:*

Wasserdampf H<sub>2</sub>O, Kohlendioxyd CO<sub>2</sub>, Wasserstoff H<sub>2</sub>, Stickstoff N<sub>2</sub>; bei λ über 1 (Luftüberschuß) noch freier Sauerstoff O<sub>2</sub>.

B. *Gase und Dämpfe, aus dem Kurbelgehäuse entweichend:*

1. Vom Verbrennungsraum ins Kurbelgehäuse durchblasende Anteile (blow-by), bestehend aus Auspuffgas (wie unter A) und Benzindampf ± etwas Luft, nachher durch die Carterentlüftung in die Luft entweichend (falls nicht in den Vergaser rückgeführt).

2. Motorenölnebel (zum Teil zerstäubtes, zum Teil verdampftes Motorenöl samt Additives, ebenfalls ins Freie entweichend).

C. *Benzindampf*, entweichend aus der Entlüftungs-Öffnung des Benzintanks und des Vergasers, aus Undichtheiten des Benzinsystems.

D. *Verschiedene Verunreinigungen*, indirekt durch das Motorfahrzeug erzeugt, wie Straßenstaub und Pneu-Abrieb.

Tabelle 2 Toxizität der verschiedenen Auspuffgas- und Blow-by-Komponenten. Werte in ppm = cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

	MAK <sup>1</sup>	Lebens- gefährlich	Tod in 1-½ h
1. Kohlenoxyd, CO	100 (50)	1500-2000	3000
2. Kohlenwasserstoffe gesättigte, paraffinische, aromatische und acetylenartige	300-500 25-100 -	10 000 5000 Narkose über	20-30 000 <sup>2</sup> 10 000 10 000
3. Aldehyde (als Formaldehyd, H <sub>2</sub> C=O ausgedrückt)	10	2000	>5-6000
4. Stickoxyde, NO, NO <sub>2</sub>	5	200	250-500
5. Schwefeldioxyd, SO <sub>2</sub>	5 (10)	200	400-600
6. Bleiverbindungen	0,15 mg/m <sup>3</sup>	-	-
7. Weitere Verbindungen zum Vergleich			
a) Kohlendioxyd, CO <sub>2</sub> (in der norm. Luft zu 300 ppm enthalten)	5000	60 000-80 000	um 100 000
b) Ozon, O <sub>3</sub>	0,1	10	1000 (?)
c) Phosgen, COCl <sub>2</sub>	1	10-15	25
d) Bleitetraäthyl, rein Pb (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub>	0,1	-	-

<sup>1</sup> Maximale Arbeitsplatz-Konzentration.  
<sup>2</sup> untere Explosionsgrenze bereits bei 12 000-13 000 ppm.

drückten Aldehyde ist zu beachten, daß in Tat und Wahrheit eine größere Zahl verschiedener Aldehyde vorliegt, deren Toxizitäten zum Teil unbekannt sind.

Bei den Erörterungen der verschiedenen Maßnahmen zur Verminderung des Ausstoßes gesundheitsschädlicher Verbindungen, vor allem des CO, wird oft die naheliegende Frage gestellt, warum nicht ganz einfach die Zusammensetzung des dem Motor zugeführten Benzin-Luft-Gemisches («Ladegemisch») so benzinarm gemacht werden könnte [entsprechend einer Luftzahl  $\lambda = 1,0$  (stöchiometrisches Gemisch) oder besser etwas über 1, d. h. Luftüberschuß], daß im Auspuffgas praktisch keine unverbrannten Anteile, insbesondere kein CO mehr erscheinen würden. Auch wird der Verwunderung Ausdruck gegeben, warum bei der heute so hochentwickelten Motoren-Industrie, die uns derart leistungsfähige Motoren beschert, wie sie früher nur den Rennwagen zugeordnet waren, nicht in der Lage sei, den Ausstoß gesundheitsschädlicher Gase und Dämpfe wirksamer als bis anhin herabzusetzen, insbesondere auch den Prozentsatz unverbrannter und noch einen erklecklichen Heizwert repräsentierender Anteile zu vermindern und damit indirekt den thermischen Wirkungsgrad des Motors zu verbessern. Man fragt sich aber auch, ob es nicht möglich wäre, auch von seiten der Zusammensetzung des Benzins im Sinne verminderter schädlicher Emissionen zu wirken.

## II. Die Verbrennung des Benzins im Automobilmotor

### a) Das Autobenzin

Autobenzin besteht, abgesehen von absichtlich zugesetzten, bestimmte Eigenschaften verbessernden Zusätzen, zu etwa 98–99% aus einem Gemisch der verschiedensten *Kohlenwasserstoffe* mit einem Siedebereich von etwa 30 bis 200°C. Dieselben lassen sich auf Grund ihrer chemischen Struktur unterteilen in paraffinische, gesättigte, dann olefinische oder ungesättigte (nicht in allen Benzenen vorhanden), ferner naphthenische (gesättigte zyklische) und aromatische (ungesättigte zyklische) Kohlenwasserstoffe. Ferner liegen in sehr geringen Anteilen auch natürliche, stabile, organische Schwefelverbindungen vor, wobei der totale Schwefelgehalt 0,1 Gew.% nur selten übersteigt, meist sogar unter 0,05% liegt.

Dem Grundbenzin mit den genannten Eigenschaften sind zur Erzielung bestimmter günstiger Wirkungen in kleinen Mengen noch verschiedene Zusätze (Additives) einverleibt, unter denen im Hinblick auf die Luftverschmutzung hauptsächlich die als Anti-Klopfmittel eingesetzten Bleialkyle wie Bleitetraäthyl (Btä, TEL) und Bleitetramethyl (Btm, TML) genannt seien. Die andern Additives spielen rein verbrennungstechnisch und auch toxikologisch eine nur untergeordnete Rolle.

### b) Motorische Zusammenhänge, Luftzahl, Gemischverteilung und Auspuffgaszusammensetzung

Für die vollständige motorische Verbrennung von zum Beispiel 1 kg Benzin-Kohlenwasserstoffen ist theoretisch eine bestimmte minimale und hinreichende Luft- bzw. Sauerstoffmenge nötig, die vom Gewichtsverhältnis vom Kohlenstoff C zum Wasserstoff H im betreffenden Kohlenwasserstoffgemisch abhängig ist. Für das heutige normale Autobenzin (C = etwa 85,0, H = 14,95 und S = 0,05 Gew.%) liegt diese Luftmenge zwischen 14,7–14,8 kg pro 1 kg Benzin, wobei Superbenzine mit hohem Aromatengehalt eher zum niedrigeren, paraffinisch-naphthenische eher zum höhern Wert tendieren. Gewöhnlich rechnet man mit einem Luftbedarf beim theoretisch richtigen («stöchiometrischen») Gemisch ( $\lambda = 1,0$ ) von 14,8 kg Luft/1 kg Benzin. Durch die im vollständig aufgemischten Autobenzin noch vorhandenen Additives, ebenso auch durch den natürlichen geringen Schwefelgehalt des Basisbenzins, wird der Luftbedarf praktisch nicht beeinflusst.

Theoretisch, das heißt nach der aufgestellten Verbrennungsgleichung, sollte ein Gemisch der Luftzahl  $\lambda = 1,0$  eine vollständige Verbrennung ergeben; das heißt, im Auspuffgas sollten ausschließlich die unschädlichen Gase Stickstoff, Wasserdampf und Kohlendioxyd  $\text{CO}_2$ , jedoch keine unverbrannten, vor

allem aber keine eigentlich giftigen Gase wie CO vorliegen. Man würde auch vermuten, daß ein solches scheinbar ideal zusammengesetztes Gemisch beim Verbrennen im Motor bei geringstem spezifischem Benzinverbrauch ( $g/PSh$ ) auch maximale Motorleistungswerte ergeben würde, da weder unwirtschaftlicher Brennstoffüberschuß ( $\lambda > 1$ ) noch ein die Leistung durch Verdünnungswirkung vermindender Luftüberschuß ( $\lambda > 1$ ) vorhanden ist. In der Motorpraxis zeigt sich jedoch, daß der Verbrennungsmechanismus nicht so einfach ist. Vielmehr ergibt sich, daß selbst ein völlig homogenes Benzindampf-Luft-Gemisch («Ladegemisch»), ja zum Beispiel auch ein leicht völlig homogen herstellbares Propan- oder Butangas-Luftgemisch, wider Erwarten weder seine maximale Leistung noch seinen günstigsten niedersten spezifischen Treibstoffverbrauch beim theoretischen Gemisch, bei  $\lambda = 1.0$  erreicht (Abb. 2). Der Grund für dieses unerwartete Verhalten liegt in einer der normalen Verbrennungsreaktion überlagerten Sekundär-Reaktion, der sogenannten Wassergas-Reaktion, die unter anderem auch bewirkt, daß die maximale Flammgeschwindigkeit und die Flammentemperatur nicht bei  $\lambda = 1.0$ , sondern bei  $\lambda = 0.85$  bis  $0.9$ , also bei  $10-15\%$  Treibstoffüberschuß erreicht werden. Demgemäß liegt auch die maximale Druckentfaltung im Zylinder und damit auch die maximale Motorleistung im brennstoffreicheren Gebiet. Diese unvermeidliche Tatsache hat nun ihre für die Zusammensetzung des Auspuffgases sehr bedeutsamen Konsequenzen. Das bekannte [1] in Abb. 3 vollständiger dargestellte Diagramm<sup>1</sup>, das den Zusammenhang zwischen der Gemischzusammensetzung, im vorliegenden Falle der Vergaser- bzw. Einspritzeinstellung und der Auspuffgaszusammensetzung wiedergibt, zeigt, daß theoretisch bei  $\lambda = 1$  der Gehalt an  $CO_2$ , wie es auch sein müßte, seinen Maximalwert erreicht und daß kein freier Sauerstoff mehr vorliegt. Mit zunehmendem Benzinüberschuß und unter  $1$  sinkendem  $\lambda$  treten jedoch im Auspuffgas in zunehmendem Maße unverbrannte Anteile, wie das gefürchtete Kohlenmonoxyd CO, auf, daneben harmloser freier Wasserstoff  $H_2$  (dessen Gehalt stets etwas weniger als die Hälfte des CO beträgt). Durch eine genaue Gasanalyse des Abgases kann also unmittelbar ersehen werden, welche Luftzahl bei der Verbrennung durchschnittlich vorlag. Wurde im Motor ein Gemisch verbrannt, das eine Luftzahl von über  $1$  aufweist, so findet sich im Abgas freier Sauerstoff  $O_2$  vor.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, daß man im Abgas somit lediglich den Gehalt an  $CO_2$  oder CO und  $O_2$  zu bestimmen braucht, um unmittelbar auf die bei der Verbrennung vorliegende Gemischzusammensetzung ( $\lambda$ ) zu schließen. (Selbstverständlich muß dabei die Gasprobenahme sachgemäß erfolgen, indem ein unbeabsichtigtes Eindringen von Luft bei der Auswertung zu Komplikationen führen würde.)

Die dargelegten Beziehungen gelten nun allerdings nur für stationäre

<sup>1</sup> Dasselbe gilt für ein C/H-Verhältnis von  $85/15$  Gew.-% entsprechend den meisten Normal-Autobenzinen.

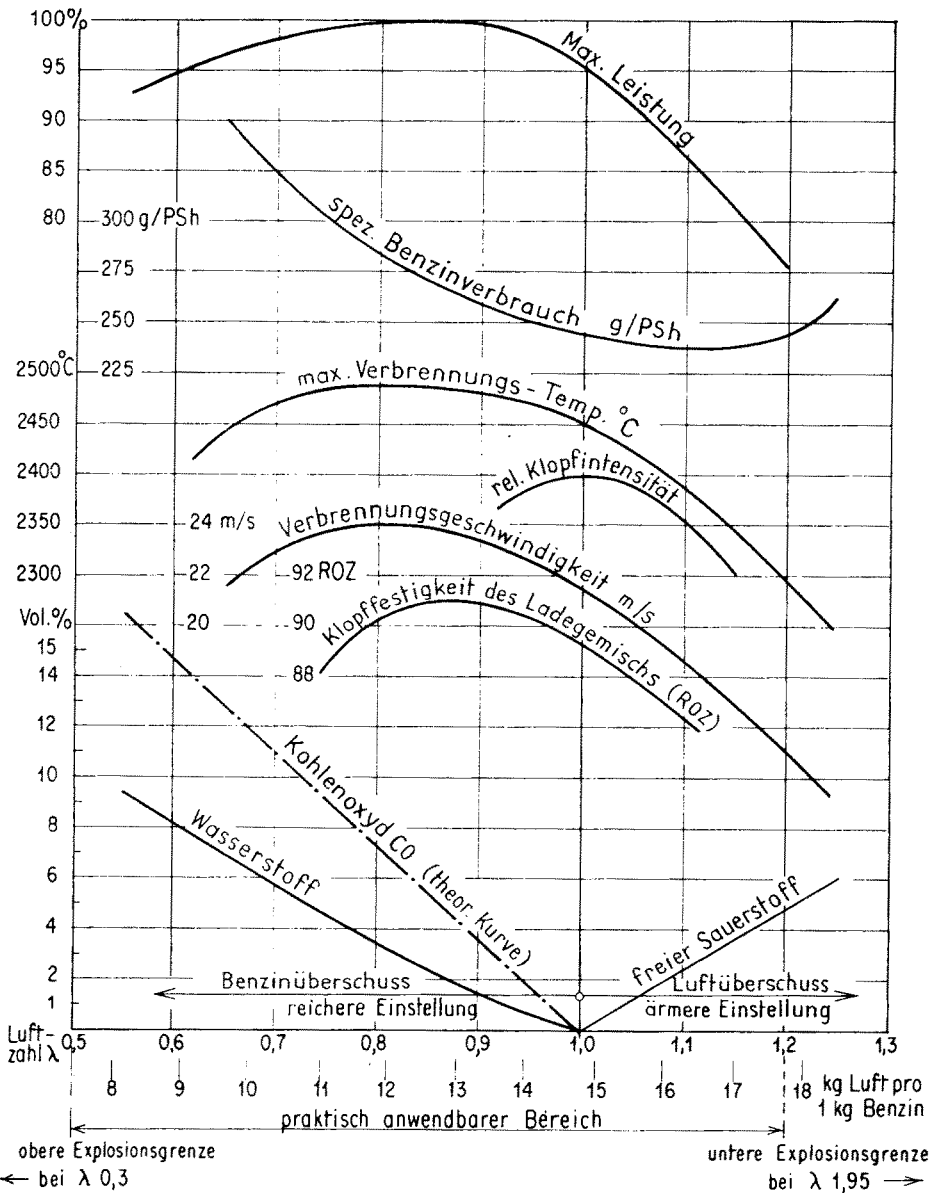


Abb. 2 Übersicht über die verschiedenen mit der Zusammensetzung des Benzin-Luft-Gemischs bzw. der Luftzahl  $\lambda$  zusammenhängenden Beziehungen (4-T-Motor)

Zustände und nur für den idealen Fall, daß die verschiedenen Motorzylinder untereinander und die einzelnen Zylinder selbst ein *völlig homogenes*, überall dieselbe Luftzahl aufweisendes Benzin-Luft-Gemisch zur Verbrennung erhalten.

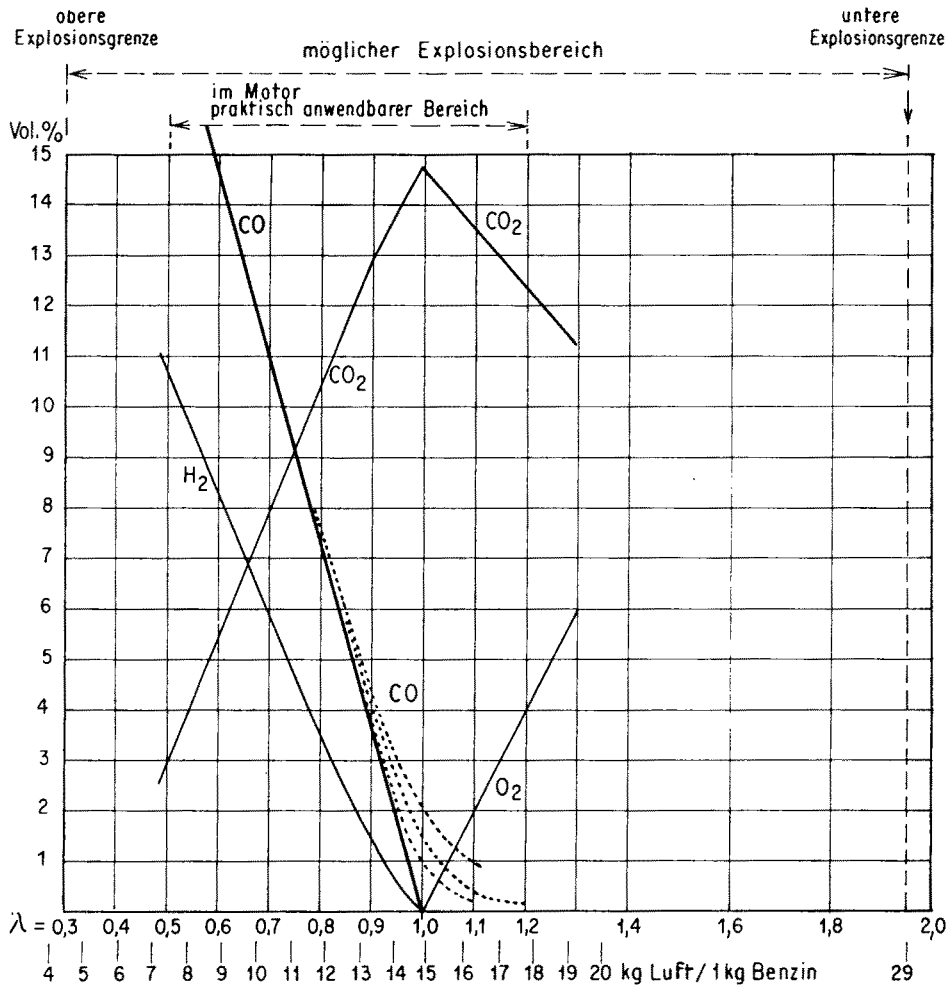


Abb. 3 Beziehung zwischen Abgaszusammensetzung (4-T-Motor) und Gemischzusammensetzung im praktisch anwendbaren Bereich

Ein solches Gemisch ist leider trotz aller heutigen Fortschritte im Vergaserbau praktisch kaum oder überhaupt nicht zu erreichen (eher noch bei Anwendung gasförmiger Treibstoffe wie Propan, Butan, LPG usw.) besonders nicht bei strömungstechnisch ungünstiger oder zu langer Gemischansaugleitung (auch das kommt 1965 noch vor) oder bereits ungleichmäßiger Gemischbildung im Vergaser selbst. Aus dem vom Vergaser nur teilweise vergastem, zum Teil jedoch lediglich zerstäubtem Gemisch scheiden sich in zu langer oder zu winkliger Gemischansaugleitung vorzugsweise die höhersiedenden Benzinanteile in Tröpfchenform ab, und zwar in den einzelnen Saugrohren in verschiedenem Ausmaß. In die verschiedenen Zylinder

gelangen deshalb einmal Gemische von unter Umständen sehr unterschiedlicher Luftzahl, von  $\lambda = 0,75$  bis  $0,95$  reichend. Damit der am schlechtesten belieferte Zylinder (Luftzahl über 1) nicht allzu viel an Leistung einbüßt, müssen wohl oder übel alle Zylinder mit einem etwas reicheren Gemisch versorgt werden [2]. Damit wird aber der durch diese Maßnahme mit dem reichsten Gemisch belieferte Zylinder allzu reich, so daß er nicht nur in seiner Leistung etwas abfallen kann, sondern noch bezüglich spezifischem Benzinverbrauch und Gehalt des Auspuffgases an toxischen Bestandteilen sehr ungünstig wird. Entsprechend werden dadurch auch die mittlere Abgaszusammensetzung und der Benzinverbrauch ungünstig beeinflusst. Doch nicht nur das: Selbst bei idealer Gemischverteilung in die einzelnen Zylinder ist noch mit der Möglichkeit zu rechnen, daß schon der Vergaser selbst kein vollkommen homogenes Gemisch liefert.

Das Vorliegen nicht ganz homogener Gemische äußert sich nun im Auspuffgas-Diagramm, wie Abb. 3 zeigt (punktierte Kurven), in der Weise, daß selbst bei  $\lambda = 1$ , wo die Verbrennung eine vollständige sein sollte, sich im Auspuffgas nicht zu vernachlässigende Mengen an CO und andern unverbrannten Gasen vorfinden. Dabei sind die Abweichungen von der bei  $\lambda = 1$  genau durch den O-Punkt gehenden idealen CO-Kurve um so größer, je ungünstiger der Vergaser und die Gemischansaugleitung bezüglich homogener Durchmischung und Ladegemischverteilung konstruiert sind. Solche Abweichungen von der theoretischen Kurve sind schon lange bekannt, waren aber erst durch die mit modernen Mitteln durchgeführten delikaten Messungen des Verbrennungsablaufs an verschiedenen Punkten des Verbrennungsraums selbst richtig zu deuten [3]. Erst bei großem Luftüberschuß ( $\lambda = 1,1-1,2$ ), der leider bereits zu einem erheblichen Absinken der Maximalleistung führt, geht der Anteil an unverbrannten Anteilen, insbesondere an CO, praktisch auf 0 zurück. Ein Blick auf das allgemeine Diagramm (Abb. 2) enthüllt noch weitere verbrennungstechnisch sehr wichtige Zusammenhänge: Im Gebiete der Höchstleistung ist bei mäßigem Benzinüberschuß (10–15%), entsprechend  $\lambda = 0,85-0,9$ , die Neigung zum Klopfen, und übrigens auch zum Überhitzen der Auslaßventile, günstigerweise wesentlich geringer als im Gebiet mäßigen Luftüberschusses. Indessen zeigt in letzterem der spezifische Benzinverbrauch (der auch im Verbrauch bei konstanter mäßiger Fahrgeschwindigkeit [50–80 km/h] zum Ausdruck kommt) sein Minimum. Da der Betriebszustand der Höchstleistung für den normalen Fahrer im Verhältnis zur gesamten Betriebsdauer relativ nur kurz ist, kann der durch die Überfettung verursachte, entsprechend erhöhte spezifische Benzinverbrauch gut in Kauf genommen werden. Andererseits wird man bei den Fahrgeschwindigkeiten, wie sie in den Städten und im häufigsten Überlandbereich vorgeschrieben werden, also bei mehr oder weniger hoher Teillast, ein ärmeres Gemisch mit  $\lambda = 0,9$  bis 1, ja sogar 1,1 anstreben, weil bei diesen Betriebszuständen die dabei zu erzielende Benzinverbrauchsverminderung besonders stark ins

Gewicht fällt. Günstigerweise ist aber bei derart magerem Gemisch bei Teillast die thermische Belastung des Verbrennungsraums, insbesondere der Auslaßventile, wieder derart nieder, daß sich daraus keine Nachteile ergeben. (Es sei in diesem Zusammenhang daran erinnert, daß zum Beispiel bei Teillast, entsprechend 50–70 km/h im direkten Gang in der Ebene, der Benzindurchsatz durch den Verbrennungsraum und mithin auch die darin erzeugte Wärmemenge mindestens 2- bis sogar 3mal geringer ist als bei Vollgas in einem niedrigeren Gang auf einer Bergstraße! [4].

Einer ungleichmäßigen Ladegemischverteilung kann, allerdings nur mit erheblichem Kostenaufwand, einmal in der Weise begegnet werden, daß zum Beispiel für einen 4-Zylinder-Motor 2 Vergaser, für einen 6-Zylinder 2–3 Vergaser oder entsprechende Doppelvergaser vorgesehen werden. Dadurch wird außer einer gleichmäßigeren Gemischverteilung und höherem volumetrischem Wirkungsgrad, sich in höherer Maximalleistung äußernd, auch die Anwendung eines durchwegs etwas benzinärmeren wirtschaftlicheren und trotzdem mindestens so leistungsfähigen Ladegemisches möglich. Ein solcher Motor emittiert weniger CO und andere unverbrannte Anteile.

Die beste, wenn auch nicht gerade die billigste Lösung ist die *Benzineinspritzung*, die nicht nur eine sehr gleichmäßige Benzinzuteilung in die einzelnen Zylinder gewährleistet, sondern auch bei den instationären Betriebszuständen (Gasgeben und Gaswegnehmen) eine enge Anpassung der Ladegemisch-Zusammensetzung an den betreffenden Betriebszustand des Motors ermöglicht, damit aber auch eine Verminderung des Ausstoßes von CO und Kohlenwasserstoffen. Verglichen mit modernsten, hochentwickelten Vergaserkonstruktionen und günstiger Formgebung der Saugrohre sind jedoch die Vorteile der Benzineinspritzung, wenigstens bezüglich günstiger Auspuffgaszusammensetzung, nicht mehr so augenfällig [5].

Beim starken *Beschleunigen* ist aus verschiedenen Gründen eine starke Überfettung des Ladegemisches notwendig. Einmal wird hier höchste Motorleistung verlangt, andererseits ist beim plötzlichen Gasgeben und Öffnen der Drosselklappe eine homogene Gemischbildung besonders bei niedrigen Drehzahlen nur schwierig zu erreichen; auch tritt eine starke Kondensation von Benzintröpfchen in der Saugleitung ein. Dieses Kondensat ist vorerst, im Momente des Beschleunigens, für die Motorleistung verloren, so daß der Motor zufolge zu starker Magerung eine erheblich verminderte Motorleistung abgeben würde. Diesem Nachteil wird durch eine momentane erhebliche Benzin-Anreicherung des Ladegemisches, bewerkstelligt durch die Beschleunigerpumpe, begegnet. Natürlich führt dies zu einem höhern Gehalt und Ausstoß an CO und andern unverbrannten Abgasen, doch wird dieser Nachteil, weil nur bei sehr brüskem Beschleunigen und nur kurzzeitig auftretend, gerne in Kauf genommen.

In Abb. 4 ist, leicht idealisiert und vereinfacht, ein (nur für stationäre

Betriebszustände gültiges) *CO-Diagramm* dargestellt, das die Verhältnisse bei einem mit einem Vergaser vorzüglicher, sparsamer Charakteristik ausgerüsteten 1,5-L-Viertaktmotor wiedergibt (vgl. auch [6] und [3]).

Im *Leerlauf* ist, wie üblich, ein ziemlich reiches Ladegemisch einer Luftzahl  $\lambda$  um etwa 0,75 vorgesehen, das etwa 8% CO ergibt. Dasselbe könnte bei einem Motor mit noch besserer Gemischverteilung noch ärmer gemacht und der CO-Gehalt auf etwa 4–6 Vol.% vermindert werden. Beim wichtigen *Teillast*-Betriebszustand von 50–60 km/h im direkten Gang in der Ebene liegt ein Gemisch vor, das mit einem CO-Gehalt von 0,7–1,3% im Auspuff gemäß Abb. 3 einem  $\lambda$  um 1,0 entspricht.

Bei höherer Fahrgeschwindigkeit, bis gegen 100 km/h, liegt  $\lambda$  ebenfalls noch in günstigem, auch einen niederen Benzinverbrauch ergebendem Rahmen. Erst gegen die maximale Geschwindigkeit hin wird, wie es auch zweckmäßig ist, die Einstellung wieder fetter.

Bei *sehr hoher Belastung* am Berg, zum Beispiel bei 50–60 km/h in einem kleineren Gang, wird ebenfalls zweckmäßigerweise die Gemischzusammen-

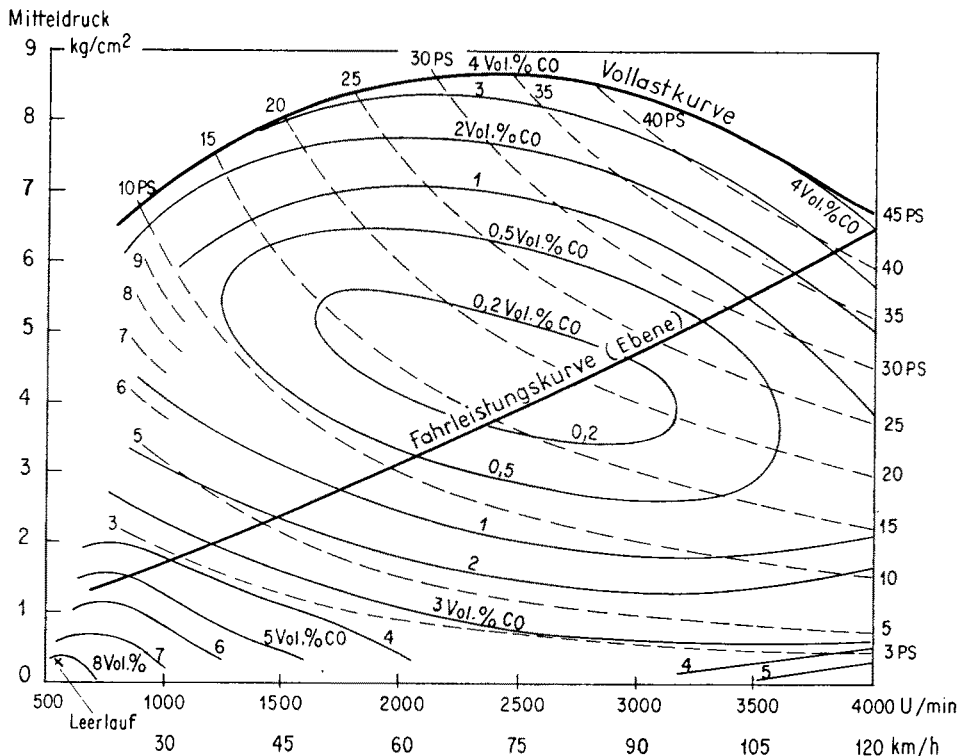


Abb. 4 Kohlenoxydgehalte der Abgase eines 1,5-L-4-T-Benzinmotors bei verschiedenen Werten von Mitteldruck, Leistung und Drehzahl/Min. bzw. Fahrgeschwindigkeit

setzung wieder benzinreicher gemacht (10–15% Benzinüberschuß,  $\lambda =$  etwa 0,85), um eventuelles Klopfen und Überhitzung der Auslaßventile zu vermeiden. Aus dem Diagramm ist ferner zu entnehmen, daß die Zone niedrigsten CO-Gehalts auch noch in das Gebiet der höheren Belastungen und Fahrgeschwindigkeiten hineinreicht, so daß auch beim Befahren schwächerer Steigungen und Ausfallstraßen noch sehr günstige Verhältnisse vorliegen.

Wenn, wie im vorliegenden Fall, das Diagramm auf einen 1,5-L-Motor bezogen wird, ergeben sich die gestrichelt eingezeichneten Kurven für die Motor-PS-Zahlen (berechnet nach:

$$\text{Motorleistung in PS} = \text{Mitteldruck} \cdot \text{Totalhubvolumen} \cdot \frac{\text{Drehzahl/min.}}{900}.$$

In Abb. 5 sind, gleichsam zusammenfassend, die verschiedenen Beziehungen, durch welche der Ausstoß an CO und andern un- oder halbverbrannten Benzinanteilen bedingt wird, schematisch zusammengestellt.

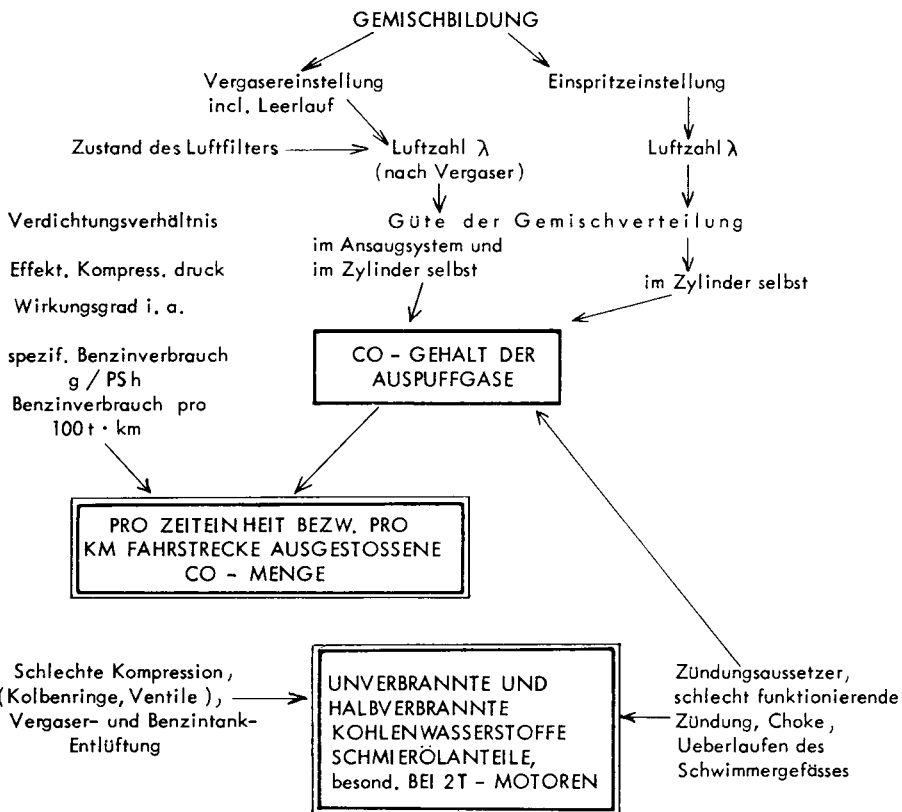


Abb. 5 Luftverschmutzung durch Benzinmotoren (Kohlenoxyd CO und un- oder halbverbrannte Kohlenwasserstoffe)

### III. Die speziellen Verhältnisse bei den verschiedenen wichtigsten Betriebszuständen des Motors

#### 1. Leerlauf

Angestrebt wird eine bei kaltem wie auch bei sehr heißem Motor regelmäßige Leerlauf-Drehzahl. Dieselbe soll, schon aus Gründen geringstmöglichen Benzinverbrauchs, dann auch wegen der Beeinträchtigung der Bremswirkung beim Decelerieren, nicht zu hoch sein. Nun ist aber bei der geringen Luftgeschwindigkeit im Lufttrichter entsprechend 500–600 Umdrehungen/Min. eine homogene Gemischbildung und -verteilung ganz besonders schwierig. Dazu kommt noch die erhöhte Neigung der nicht besonders fein zerstäubten Benzintröpfchen zur Kondensation in der Saugleitung, so daß, in erster Linie bei noch kaltem Motor, vom Vergaser relativ sehr reiche Gemische geliefert werden müssen. Dieselben ergeben natürlich entsprechend viel CO.

Zweifelloos könnte man bei richtig betriebswarmem Motor in vielen Fällen mit benzinärmeren Gemischen auskommen, entsprechend  $\lambda = 0,85-0,9$ , die zu CO-Gehalten von nur 2–4 Vol. % führen; indessen führt eine solche Einstellung wieder zu unregelmäßigem Lauf oder gar Aussetzen des noch nicht genügend betriebswarmen Motors. Leider sind Leerlauf-Luft und -Benzin allzuleicht von Unberufenen zu verstellen, so daß Kontrollen ergeben haben, daß vielfach eine viel zu reiche, zu hohe Gehalte an CO ergebende Einstellung vorliegt, entsprechend  $\lambda = 0,6$  bis  $0,8$ , entsprechend 7–14% CO im Auspuff. Dies ist nicht zuletzt dem Umstand zuzuschreiben, daß eine knappe oder zu arme Einstellung und zu niedere Drehzahl bei noch nicht betriebswarmem Motor besonders im Großstadtverkehr zu sehr ärgerlichem Abstellen des Leerlaufs führt, daß jedoch bei der nachherigen Korrektur selbst erhebliche Überfettungen an der Höhe der Leerlaufdrehzahl kaum bemerkt werden.

Eine möglichst sparsame Leerlaufeinstellung ist jedoch unbedingt anzustreben zur Einschränkung der CO-Produktion bei «Rot» zeigenden Verkehrslichtern an Straßenknotenpunkten, an Straßenzollämtern usw., wo die bei «Rot» wartenden Fußgänger sowie auch die Verkehrspolizisten und Zollorgane an den Straßenzollämtern den Leerlaufqualm einzuatmen haben, manchmal noch verstärkt durch ungeduldiges, nervöses Spielen mit dem Gaspedal (läuft der Motor überhaupt noch?). Eine möglichst wenig CO ergebende Leerlaufeinstellung ist aber auch wichtig für Großgaragen und Servicebetriebe, schon im Hinblick auf die Bemessung der Ventilation. Da der CO-Ausstoß neben der Leerlaufgemisch-Zusammensetzung noch von der Leerlauf-Drehzahl/Min. abhängig ist, ist letztere tunlichst nieder zu halten, dies schon im Interesse niederen Benzinverbrauchs und besserer Bremswirkung beim Gaswegnehmen. Eine zu reiche Leerlaufeinstellung übt, übrigens in viel höherem Maße als erwartet, auch noch bei leichter Teillast, bei langsam fahrendem

Fahrzeug einen beträchtlichen CO-erhöhenden Einfluß aus, bei Betriebsbedingungen also, wie sie gerade im Stadtverkehr häufig auftreten [3].

Die Auto-Servicebetriebe haben es auch hier in der Hand, bei Kontrollen und Revisionen ihren Beitrag zur Verminderung der Luftverschmutzung zu leisten, und, wenn auch vom Kunden nicht direkt verlangt, wenn nötig die LeerlaufEinstellung zu korrigieren.

In Abb. 6 sind die ungefähren Beziehungen dargestellt, die bestehen zwischen dem *Leerlauf-Benzinverbrauch* in L/h und der bei verschiedener Luftzahl (bzw. Leerlaufgemisch-Einstellung bzw. CO-Gehalt des Auspuffgases) ausgestoßenen CO-Menge.

Eine erhebliche Luftverschmutzung durch CO und andere unverbrannte Gase kann auch durch zu lange Betätigung des Hand-Choke auftreten, besonders

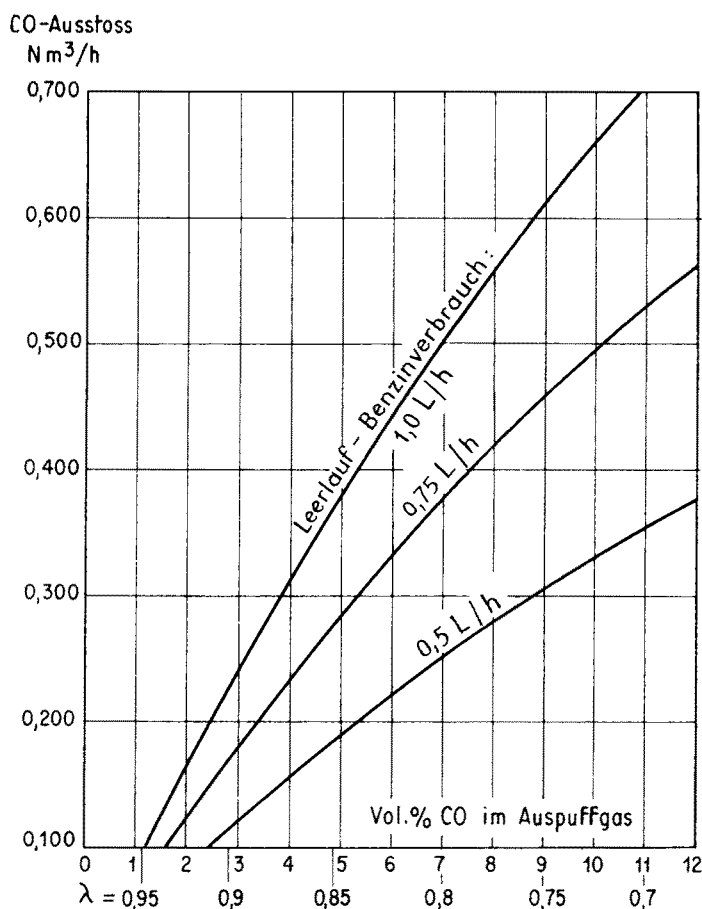


Abb. 6 Beziehungen zwischen CO-Ausstoß im Leerlauf von Vergaser-Benzinmotoren, bei verschiedenem CO-Gehalt (resp. LeerlaufEinstellung) und verschiedenem Leerlauf-Benzinverbrauch pro h

wenn noch vergessen wird, denselben wieder ganz auszuschalten. Moderne Vergaser sind deshalb oft mit einer Automatik versehen, die nach genügender Aufwärmung des Motors die Gemischanreicherung und Leerlaufdrehzahl wieder auf den geeigneten Wert reduziert.

## *2. Beschleunigen und Gaswegnehmen*

Abgesehen von der CO-Produktion im Leerlauf, wird die für die bei Verkehrslichtern für die Fußgänger und auch für die dort wartenden Autofahrer selbst bestehende unerfreuliche Situation beim nachherigen rasanten Anfahren und Beschleunigen noch erheblich verstärkt. Durch die Betätigung der Beschleunigerpumpe werden während weniger Sekunden relativ beträchtliche Benzinmengen in den Lufttrichter des Vergasers eingespritzt. Dadurch werden zufolge der momentanen starken Überfettung entsprechend große CO-Mengen und andere unverbrannte Anteile ausgestoßen. Schon aus diesen Gründen vermöchte eine flüssigere Verkehrsabwicklung und damit eine gleichmäßigere Fahrweise in hohem Maße zur Verminderung der Belästigung der Straßenbenutzer und Anwohner beizutragen.

## *3. Gleichmäßige Fahrt bei 40–60 km/h (Ebene, direkter Gang)*

Auf eine bestimmte Fahrstrecke im Stadttinnern bezogen, erweist sich bezüglich Luftverschmutzung dieser Betriebszustand als weitaus der günstigste, ebenso auch noch ein Fahren mit 60–80 km/h auf den Ausfallstraßen. Wie aus dem für viele Personenwagen typischen CO-Kennlinienfeld Abb. 4 ersichtlich ist, liegt die ärmste, niedrigste CO-Gehalte im Auspuff ergebende Vergasereinstellung bei  $\lambda = 0,9$  bis  $1,1$ , bei der auch der Benzinverbrauch in L pro 100 km Fahrstrecke (oder auch auf L/100 Tonnen · km bezogen) minimal ist. Demgemäß nimmt auch die CO-Produktion, bezogen zum Beispiel auf 1 km Fahrstrecke, ihr Minimum an. In weiterer Auswertung von Abb. 4 sind in Abb. 8 mit Hilfe der Beziehung CO-Gehalt des Auspuffgases ( $\lambda \geq 1$ ) zum entsprechenden CO-Ausstoß in Nm<sup>3</sup> pro 1 L verbranntes Benzin [7] auf Grund eines für einen Pw mit 1,5-L-Motor üblichen Verbrauchsdiagrammes die bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten (im direkten Gang in der Ebene) pro 1 km Fahrstrecke ausgestoßenen CO-Mengen in (Normal)-Litern berechnet. Man erkennt daraus mit unmißverständlicher Deutlichkeit, daß höhere Fahrgeschwindigkeiten (60 bis gegen 100 km/h) keineswegs gleichbedeutend sind mit entsprechend hoher CO-Produktion pro km Fahrstrecke, ganz im Gegenteil.

Besonders benzinarme Gemiseinstellungen mit  $\lambda = 1$  bis  $1,05$  zeigen in diesem wichtigen Betriebsbereich hochpferdige Amerikaner Motoren mit hoher

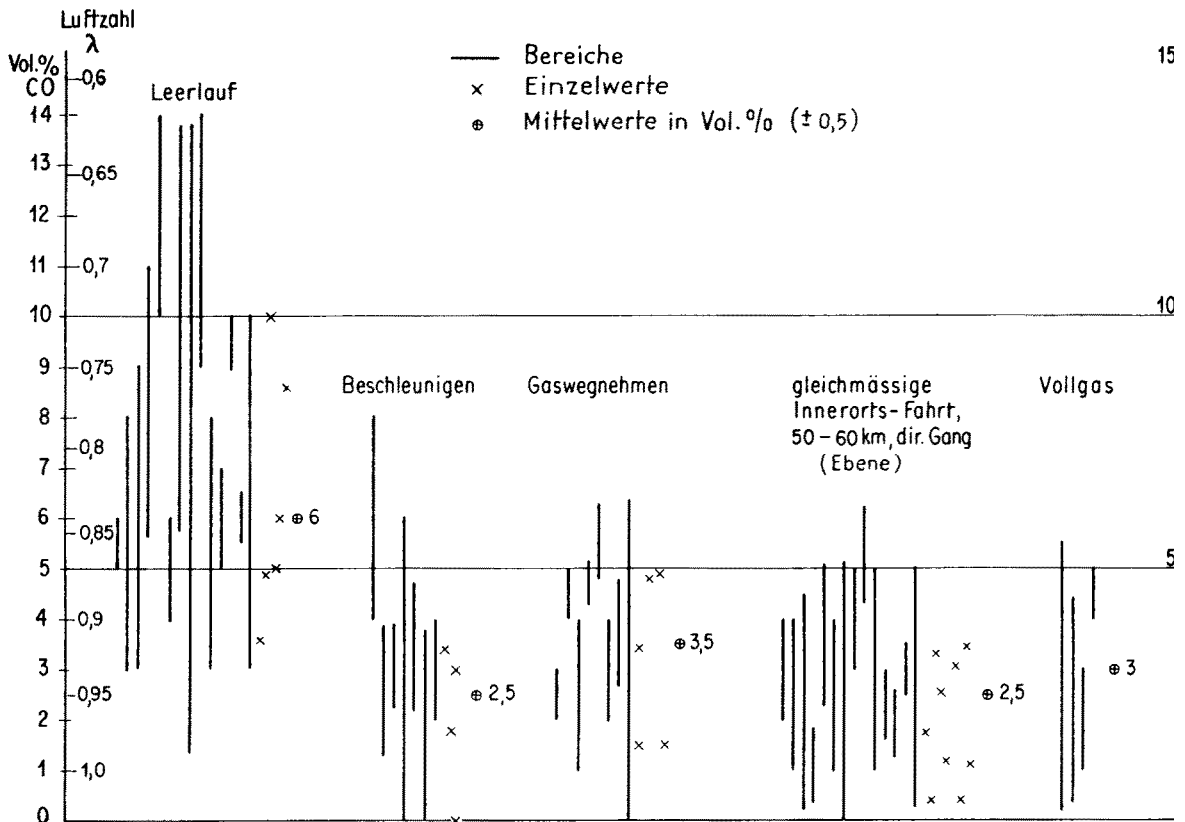


Abb. 7 Kohlenmonoxydgehalt der Auspuffgase von 4-T-Benzinmotoren bei verschiedenen Betriebszuständen

Leistungsreserve, deren CO-Produktion trotz des im Vergleich zu Europäer-Motoren etwas höheren Benzinverbrauchs, sich durchaus in günstigen Grenzen hält<sup>1</sup>. Solche Betriebsverhältnisse sollten mit allen gängigen Mitteln gefördert werden. Dankbar muß hier aber anerkannt werden, daß auch die Motorenkonstrukteure indirekt gute Arbeit geleistet haben, indem sie mit der Verbesserung der Motoren, zum Beispiel bereits mit der Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses (das die Abgaszusammensetzung nicht beeinflusst) von 5:1 im Jahre 1930 auf 8-10:1 heute, sowohl den spezifischen Benzinverbrauch als auch den Benzinverbrauch pro 100 t · km um etwa 50% senken konnten, damit aber auch den Ausstoß toxischer Verbindungen. Auch der homogenen Gemisch-

<sup>1</sup> Allerdings wird im Stadtbetrieb dieser Vorteil wieder dadurch beträchtlich vermindert, daß beim Beschleunigen schwerer Amerikaner-Autos beträchtliche und bei weitem nicht ganz «verdaubare» Benzinmengen eingespritzt werden, die einen entsprechenden Ausstoß unverbrannter Abgase ergeben.

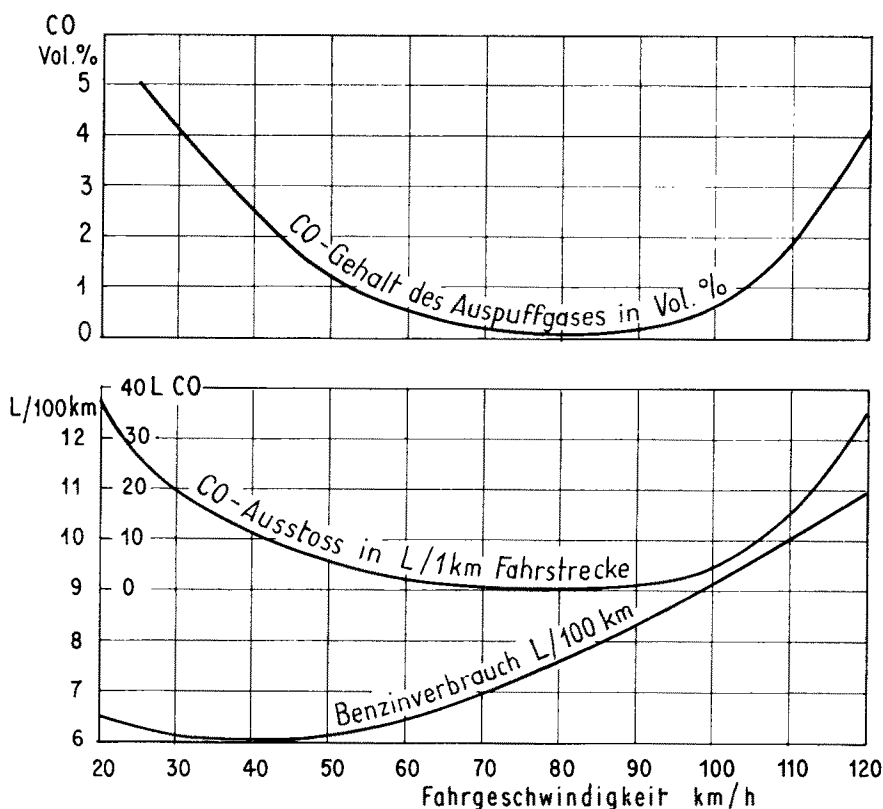


Abb. 8 Beziehungen zwischen (stationärer) Fahrgeschwindigkeit und CO-Gehalt des Auspuffgases, Benzinverbrauch in L/100 km Fahrstrecke und CO-Ausstoß

bildung und der Realisierung ärmerer, weniger CO-erzeugender Benzin-Luft-Gemische wird heute die nötige Beachtung geschenkt<sup>1</sup>.

#### IV. Relative Mengen an ausgestoßenem Kohlenoxyd und nitrosen Gasen während verschiedener Betriebszustände im Stadtverkehr

Von verschiedenen Quellen liegen Angaben darüber vor, welches ungefähr die relative Zeitdauer ist, während welcher im Stadtverkehr der Motor bzw. das Fahrzeug

<sup>1</sup> Bei vollbesetzten ausgesprochenen Kleinwagen liegen bezüglich des CO-Ausstoßes die Verhältnisse etwas weniger günstig, indem eine Fahrgeschwindigkeit von z. B. 60 km/h einen höheren Motor-Leistungsanteil (bezogen auf die Maximalleistung bei der betreffenden Drehzahl/Min.) erfordert als bei einem solchen höherer Leistungsreserve. Entsprechend ist auch die thermische Belastung des Verbrennungsraums, insbesondere der Auslaßventile, eine höhere, so daß etwas reichere Benzin-Luft-Gemische, die im Auspuff einen höheren CO-Anteil ergeben, zweckmäßig sind. In Anbetracht des niedrigeren Benzinverbrauchs solcher Kleinwagen wird, auf das Fahrzeug als solches (und nicht auf 100 t·km) bezogen, der gesamte CO-Ausstoß trotzdem wieder relativ nieder.

- a) im Leerlauf dreht
- b) beschleunigt
- c) verzögert (Gaswegnehmen)
- d) mit 40–60 km/h im direkten (oder eventuell dem nächst kleineren Gang) bei relativ niedriger Laststufe betrieben wird.

Tabelle 3 gibt zusammenfassend Aufschluß über die bei den verschiedenen Betriebszuständen resultierenden Auspuffgaszusammensetzungen. Anhand einer sehr umfangreichen Literatur wurden die für die heutigen europäischen Verhältnisse als repräsentativ angesehenen Werte aufgeführt (die allerdings zum Teil erheblichen Schwankungen unterworfen sein können, besonders die Werte für Stickoxyde und Aldehyde).

Tabelle 3 Gehalt der Auspuffgase von 4-T-Benzinmotoren an toxischen Bestandteilen bei verschiedenen Betriebsbedingungen (ungefähr heutige Mittelwerte)

Gase und andere Stoffe	Leerlauf	Betriebszustand			
		Beschleunigen	Gaswegnehmen	Teillast	Vollgas
1. Kohlenoxyd, Vol. % do. in cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> = ppm	6 60 000	2,5 25 000	3,5 35 000	2,5 25 000	3 30 000
2. Kohlenwasserstoffe	500–1000	100–500	200–400	200–600	–
Acetylen-KW ppm	700–800	20–170	600–1100	65–180	–
3. Aldehyde ppm	10–100	30	200–300	30–260	–
4. Stickoxyde ppm	20–30	1000–3000	10–50	500–2000 u. mehr	400–5000
5. Schwefeldioxyd ppm 6. Bleiverbindungen	bei einem S-Gehalt des Benzins von 0,05 Gew. % max. <sup>1</sup> 30 ppm bei einem max. Gehalt des Benzins an Bleialkylen entspr. 0,63 g Pb/L und einem Ausstoß von etwa $\frac{3}{4}$ des Gesamtbleis ergibt sich ein Bleigehalt des Auspuffgases von max. 60 mg/m <sup>3</sup> . Effektiv dürften jedoch im m <sup>3</sup> durchschnittlich weniger als 45 mg Pb enthalten sein.				
7. 3.4. Benzpyren	in der Größenordnung von 0,001–0,01 mg/m <sup>3</sup>				

<sup>1</sup> Maximal deshalb, weil ein Teil des S nach der Verbrennung auch in Form von PbSO<sub>4</sub> und Reaktionsprodukten mit den Motorenöl-Additiven vorliegt.

Einigermaßen bekannt sind auch die relativen Auspuffgasmengen, bezogen auf die gleiche Zeitdauer, die bei den genannten 4 Betriebszuständen emittiert werden.

Unter Anwendung der prozentualen Gehalte des Auspuffgases an CO und Stickoxyden bei diesen Betriebszuständen lassen sich einmal die während derselben emittierten CO- und Stickoxydmengen berechnen, ebenso die totalen Mengen an denselben während des ganzen viergliedrigen Betriebszyklus. Diese Berechnungen, basierend auf den früher erwähnten mittleren CO- und NO/NO<sub>2</sub>-Gehalten (Tab. 3), sind gesamthaft in Abb. 9 graphisch dargestellt.

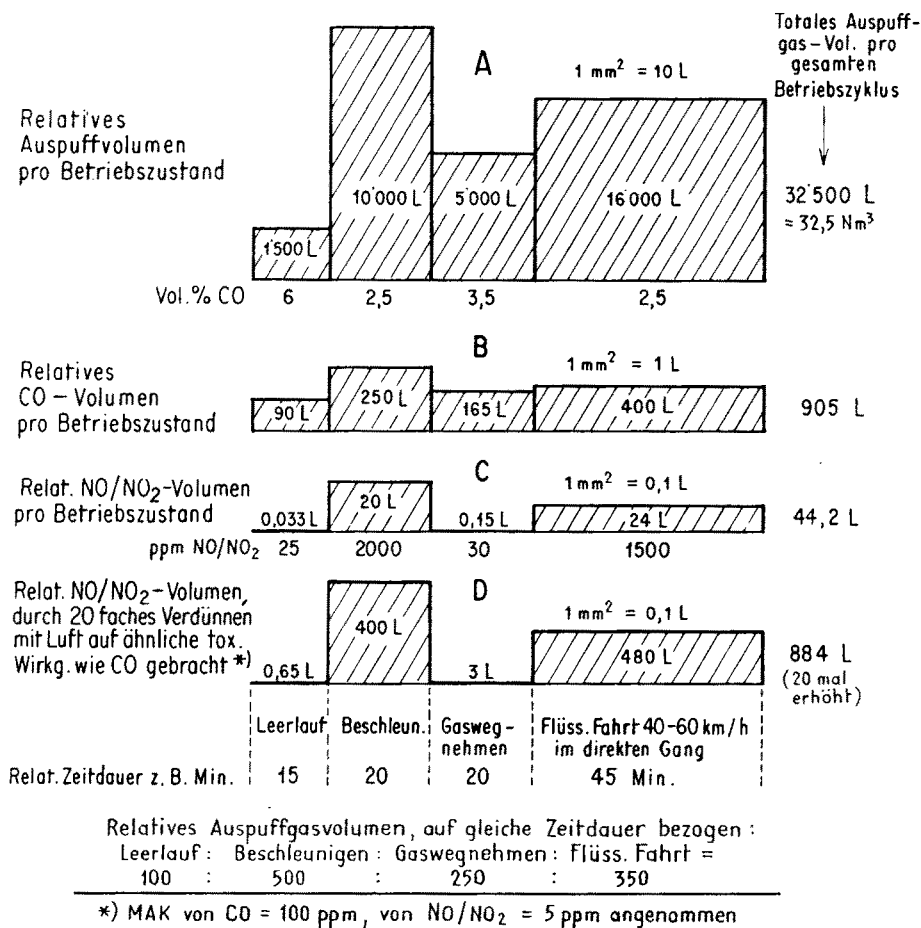


Abb. 9 Ungefähre Größenordnung der in verschiedenen Betriebszuständen ausgestoßenen Mengen an Auspuffgas und wichtigsten toxischen Komponenten CO und NO/NO<sub>2</sub>; Benzinverbrauch für den gesamten Zyklus etwa 4,1 L

Aus dem Vergleich der Säulendarstellung für das CO-Volumen (während des ganzen Betriebszyklus total 905 L) mit demjenigen für das Stickoxydvolumen (total 44,2 L) erkennt man, daß zwar total etwa 20 mal weniger nitrose Gase ausgestoßen werden als CO. Da aber der MAK-Wert für die nitrosen Gase mit 5 ppm 20 mal niedriger liegt als derjenige von CO mit 100 ppm, das heißt die nitrosen Gase 20 mal giftiger sind als CO, liegt die toxische Wirkung der während des ganzen Zyklus ausgestoßenen nitrosen Gase annähernd in der gleichen Größenordnung wie diejenige des CO. (Wenn die nitrosen Gase zum Beispiel 20 mal mit Luft verdünnt werden, um sie auf denselben Giftigkeitsgrad wie das CO zu bringen.) Diese Berechnungen sind allerdings nur sehr approximativ,

indem sowohl die Angaben für den CO- als ganz besonders für den Stickoxyd-gehalt während der verschiedenen 4 Betriebsbedingungen außerordentlich stark schwanken und für eine wirklich zuverlässige Mittelwertbildung wohl zu wenig Einzelmessungen vorliegen. Messungen des Stickoxyd-gehaltes in verschiedenen Städten haben glücklicherweise ergeben, daß die Stickoxydkonzentrationen im Verhältnis zu den CO-Konzentrationen eher niedriger liegen, als man nach Abb. 9 erwarten würde.

Eine umfangreiche Literatur, aus der unter [9] nur einige wenige wichtige Arbeiten aufgeführt seien, orientiert über die mannigfachen Zusammenhänge zwischen ausgestoßenen toxischen Bestandteilen und den Betriebsbedingungen der Fahrzeuge.

## V. Bleiverbindungen

Ein ganz besonderes Kapitel bildet der Ausstoß von verschiedenen *Bleiverbindungen*, bestehend aus festen, mehr oder weniger fein verteilten chemischen Umwandlungsprodukten der im gebleiten Normal- und Superbenzin zur Erhöhung der Klopfestigkeit zugesetzten Bleialkyle wie Bleitetraäthyl und -methyl (Btä und Btm).

Man könnte vermuten, daß diese Verbindungen schon während der Kompressions-, sicher aber während der Verbrennungsphase des Motors zu Bleioxyd (PbO)-Aerosolen zersetzt und als solche ausgepufft, dabei die Alkylgruppen  $-C_2H_5$  und  $CH_3$  zu  $CO_2$ , CO und  $H_2O$  oxydiert würden, oder dann das Bleioxyd zufolge der beabsichtigten Wirkung der den Bleialkylen stets beigemischten Aethylenhalogenide<sup>1</sup> in die flüchtigeren Bleihalogenide wie  $PbCl_2$  und  $PbBr_2$  umgewandelt würde. Da jedoch die Benzine von Natur aus mehr oder weniger hohe Anteile an S-Verbindungen (meist etwa 0,01–0,1 Gew.%) enthalten, die bei der Verbrennung  $SO_2$  bilden, so werden unter anderem über die Sulfiten auch Bleisulfate gebildet. Diese anorganischen Produkte werden jedoch nicht als solche, sondern als mehr oder weniger stabile *Additionsverbindungen* ausgepufft (vgl. auch Tabelle 1, in der nur die wichtigsten der vielen, meist röntgenographisch identifizierten Bleiverbindungen aufgeführt sind):

$PbClBr$  (bei höherer Temperatur);  $PbOPbClBrH_2O$ ,  $2PbClBr \dots NH_4Cl$ ,  $PbClBr \dots 2NH_4Cl$  (bei tieferer Temperatur);  $PbO \cdot PbSO$  und  $Pb_3(PO_4)_2$  (bei höherer Temperatur); ferner auch  $PbCl_2$ ,  $PbBr_2$ ,  $PbSO_4$  und andere.

Falls, wie in einigen handelsüblichen Super-Benzinen, zum Vermeiden von Zündstörungen und Glühzündungen (Rumpeln und Weiterlaufen des Motors) noch kleine Mengen von organischen Phosphaten (Triäthylphosphat, Kresyl-

<sup>1</sup> Diese Zusätze sollen die Bleiverbindungen statt in das schwerflüchtige und zur Bildung von unerwünschten Belägen im Brennraum Anlaß gebende Bleioxyd in die weit flüchtigeren Bleihalogenide verwandeln, die eher mit dem Auspuff aus dem Motor ins Freie befördert werden.

diphenylphosphat und andere) vorliegen, so tritt im Auspuff überdies noch etwas Blei-Orthophosphat  $Pb_3(PO_4)_2$  auf.

Über die Menge der mit dem Auspuff ausgestoßenen erwähnten Bleiverbindungen selbst sowie über den Grad ihrer toxischen Wirkung sind bereits vor Jahrzehnten bei der Einführung dieser Klopfbremsen und auch heute noch die verschiedensten Ansichten geäußert worden. So wurde zum Beispiel angenommen, daß die dem Motor mit dem Benzin pro Zeiteinheit zugeführten Bleialkyle nach dem Verbrennungstakt als fein zerstäubte Bleiverbindungen, zum Beispiel  $PbO$ ,  $PbCl_2$  und  $PbBr_2$ , restlos in die Luft ausgestoßen und dadurch die Gesundheit der Straßenbenutzer und Anwohner aufs schwerste gefährden würden. So könnte man zum Beispiel ausrechnen, daß in der Schweiz im Jahre 1964 etwa 1,3 Millionen Tonnen (= 1,78 Milliarden L) Fahrzeugbenzin verbraucht wurden, so daß beim maximal zulässigen Bleigehalt von 0,63 g Pb/L Benzin (entsprechend 0,60 ml Btä/L) eine Bleimenge von 1100 Tonnen mit dem Auspuff ins Freie befördert würde. Eine solche Berechnung ist jedoch aus verschiedenen Gründen zu beanstanden, zum mindesten aber auf vernünftige Proportionen zu reduzieren:

1. Zuerst müßte einmal ermittelt werden, wie hoch der *durchschnittliche Bleigehalt* der in der Schweiz verwendeten Fahrzeugbenzine ist.

2. Dann muß die Frage beantwortet werden, ob wirklich *alles Blei*, das dem Motor mit dem Bleibenzin zugeführt wird, auch das Auspuffrohr verläßt (Aufstellen einer Bleibilanz).

3. Sodann muß festgestellt werden, in welcher *Korngröße* die das Auspuffrohr verlassenden Bleiverbindungen vorliegen, da dadurch ihr Verhalten in der Luft maßgeblich beeinflusst wird (rasches Zu-Boden-Sinken, mehr oder weniger langes Schweben).

4. Schließlich muß untersucht werden, welches die *chemische Zusammensetzung* und die toxische Wirkung dieser Verbindungen ist.

Tatsache ist folgendes:

1. Der durchschnittliche Bleigehalt der schweizerischen Autobenzine (Normal- und Superbenzine zusammen) liegt nach den Dutzenden von Analysen der EMPA zwischen 0,45 und 0,50 g/L Benzin. Wenn, wie anzunehmen ist, der Verbrauch an Autobenzinen ungefähr den entsprechenden Importen pro 1964 gleichgesetzt wird (1,3 Millionen Tonnen), so sind in dieser Benzinmenge 800–890 Tonnen Blei (gebunden im Btä und Btm) enthalten.

2. und 3. Nach mit großen Mitteln durchgeführten amerikanischen Untersuchungen [10] sind die Verhältnisse bezüglich des Bleiausstoßes sehr komplex. Insbesondere besteht eine starke Abhängigkeit von den bereits vom vorherigen Fahrbetrieb im Verbrennungs- und Auspuffsystem abgelagerten Belägen von Bleiverbindungen sowie den nachherigen Betriebsbedingungen.

Wenn die dem Motor mit dem Bleibenzin pro Zeiteinheit zugeführten Bleiverbindungen, auf reines Pb berechnet, als 100% eingesetzt werden, so ver-

bleiben durchschnittlich etwa 25% im Motor und Auspuffsystem, davon 2% im Verbrennungsraum, 5% im Auspuffsystem, 8% im Ölschlamm und im Öl, 10% im Ölfilter (das heißt zusammen 18% im Ölsystem). Die übrigen 75% verlassen das Auspuffrohr. Von denselben weisen bei konstanter Fahrgeschwindigkeit rund  $\frac{3}{4}$  eine Korngröße unter  $5 \mu$  (0,005 mm),  $\frac{1}{4}$  eine solche über  $5 \mu$  auf. Der Prozentsatz des gesamten ausgestoßenen Bleis und seine Kornverteilung sind jedoch sehr stark von den Betriebsbedingungen abhängig. So kann bei sehr starkem längerem Beschleunigen unter Umständen das 10- und mehrfache des dem Motor zugeführten Bleis ausgepufft werden, allerdings weitaus zum größten Teil in sehr grobkörniger ( $\sim 0,1$  bis  $0,5$  mm und mehr), sich sofort zu Boden setzender und deshalb für den Straßenbenutzer ungefährlicher Form. Hier handelt es sich vorwiegend um zum Teil mit Rost vergesellschaftete Bleiverbindungen, die sich vorher im Verbrennungsraum und vor allem im Auspuffsystem angesammelt haben und nun bei den hohen Abgastemperaturen und -geschwindigkeiten gelockert und hinausgeblasen werden.

Bei einem folgenden Betriebszustand mit annähernd konstanter Fahrgeschwindigkeit kann unter Umständen wieder nur  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{2}$  des dem Motor zugeführten Bleis ausgepufft werden, indem sich im Motor und Auspuffsystem die Bleibeläge langsam wieder zu einem Gleichgewichtszustand aufbauen und vorerst nicht in die Atmosphäre gelangen. Zwischen diesen beiden Extremen des Bleiausstoßes gibt es, auch bezüglich der Kornverteilung, zahlreiche Zwischenzustände. Für den Straßenbenutzer sind nur die feinsten ausgestoßenen Teilchen mit einer Korngröße unter etwa  $5 \mu$  gefährlich (Abb. 10). Im Gleichgewichtszustand, das heißt bei bereits erfolgter konstant bleibender

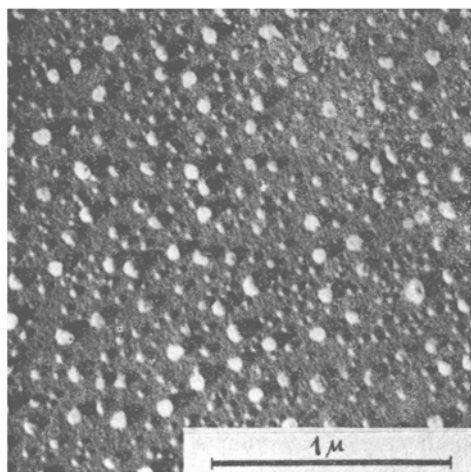


Abb. 10 Elektronenmikroskopische Aufnahme der feinstkörnigen Bleiverbindungen im Auspuffgas eines mit Bleibenzin betriebenen Motors. Vergrößerung 40 000; kleinste sichtbar gemachte Teilchen etwa  $0,01 \mu = \frac{1}{100000}$  mm

Belagsbildung im Verbrennungsraum und Auspuffsystem (und keinem Abblättern alter Beläge), können vom ausgestoßenen Blei etwa 50–75% in feiner Form (unter  $5 \mu$ ) ausgestoßen werden, der Rest auf 100% in gröberer Form. Beim abwechselnden Gasgeben und Gaswegnehmen und Fahren mit konstanter Geschwindigkeit werden die Verhältnisse natürlich sehr verworren und versuchstechnisch auch schlecht reproduzierbar, auf alle Fälle von Motor zu Motor und seiner Vorgeschichte verschieden und auch vom Temperament des Fahrers abhängig.

Zusammenfassend darf gesagt werden, daß bei einer Stadtfahrt nur ein kleiner Teil des dem Motor zugeführten Bleis, vielleicht  $\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{2}$ , in einer Korngröße ausgepufft wird, die zufolge längeren Schwebens in der Luft die Atmungsorgane der Straßenbenützer und Anwohner erreichen kann. Beim geringsten Luftzug werden solche feine Teilchen wie ein Gas rasch überall hin verteilt und auf ungefährliche Konzentrationen gebracht. (Vgl. auch [11].) Die gewichtsmäßig eher größere Menge der gröberen ausgestoßenen Bleiverbindungen, hauptsächlich von abgelösten Belägen aus dem Verbrennungsraum und Auspuffsystem herrührend, sinkt rasch zu Boden und wird von dort durch den Regen und die Straßenreinigung in die Kanalisation geschwemmt.

Das restliche Viertel des im Motor und Auspuffsystem verbliebenen Bleis setzt sich zusammen aus den Anteilen, die ins Motorenöl gelangen und dort den grauen sogenannten Bleischlamm bilden, und den Anteilen, welche die Beläge im Motor und im Auspuffsystem aufbauen (Abb. 11).

Es ist deshalb absurd zu behaupten, daß von der schweizerischen Bevölkerung zufolge des gebliten Benzins zum Beispiel im Jahre 1964  $\frac{3}{4} \cdot 1100 =$  etwa 800 Tonnen Blei in Form der genannten Bleiverbindungen eingeatmet werden müßten. Ganz abgesehen davon wird ja weitaus der größte Teil der jährlichen Fahrstrecke außerorts, wo die Bevölkerungsdichte geringer ist, zudem bei höheren Fahrgeschwindigkeiten und dementsprechend höherem Benzinverbrauch und Bleiausstoß absolviert.

Ebenso, ja noch mehr zu denken gibt, auf lange Sicht betrachtet, die jeden Verantwortungsbewußten schwer belastende Tatsache, daß in der ganzen Welt jährlich Hunderttausende von Tonnen wertvollen Bleis in niemals wieder ausbeutbarer Form in alle Winde zerstreut werden und für alle Zeiten für die Menschheit verloren sind.

Bezeichnend für die Beurteilung der toxischen Gefährlichkeit der ausgestoßenen Bleimengen ist übrigens, daß, ohne Zweifel auf Grund der bisherigen jahrzehntelangen Erfahrungen und in Dutzende von Millionen Franken gehenden praktischen Versuchen mit gebliten Autobenzinen, in den USA das Hauptgewicht heute auf die Verminderung des Ausstoßes von CO, Aldehyden, ungesättigten und gesättigten Kohlenwasserstoffen, von nitrosen Gasen und SO<sub>2</sub> gelegt wird, ferner auf die Verminderung der Verdunstungsmöglichkeiten des Benzins. Hiemit soll keineswegs gesagt sein, daß es nicht sehr wünschbar wäre,

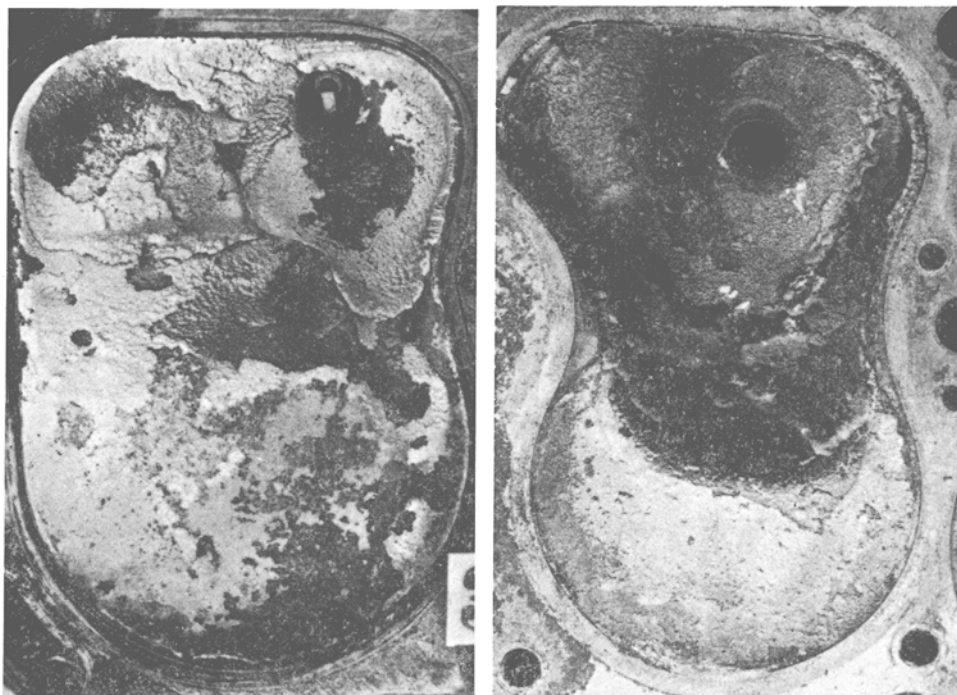


Abb. 11 Zwei Zylinderköpfe mit 1–3 mm dicken Belägen von Bleiverbindungen

mit der Zeit den Bleigehalt der Benzine sukzessive zu vermindern, auch wenn dadurch das Benzin eventuell um einige Rappen teurer würde. Vorschläge zur Beschleunigung einer solchen Entwicklung, die Gesetzeskraft erhalten soll, liegen bereits seit 1959 in Kalifornien vor. Dort wurde vom Los Angeles Board of Supervisors angeregt, den Bleitetraäthylgehalt des Benzins vom USA-Maximum von 3,0 ml/US Gal. (= 0,79 ml/L) jeden Monat um 10% zu senken, um schließlich zu einem bleifreien Benzin zu gelangen [12]. Offenbar ist aber dieser Vorschlag bis heute noch nicht rechtskräftig geworden. Immerhin ist interessant festzustellen, daß es bereits vor sechs Jahren in USA Benzinfirmen (wie zum Beispiel Amoco und Sun) gab, die in der Lage waren, an ihren Tank-säulen hochoktaniges bleifreies Benzin zu verkaufen. Die Mehrkosten für ein allgemein erhältliches bleifreies Benzin werden heute auf 2 Cents/US Gall. = 2,3 Rp./L geschätzt [13]. Zur Verminderung des Bleigehaltes der Benzine könnten auch die Motorenkonstrukteure wirksam beitragen, indem sie eher die Klopfestigkeit des Verbrennungsraumes erhöhen, als einfach das Verdichtungs-verhältnis immer und immer wieder hinaufzuschrauben und dadurch die Benzin-hersteller zwingen, auf möglichst billigem Wege – eben durch Anwendung von Bleialkylen – die Klopfestigkeit des Benzins weiter und weiter zu steigern.

## Abgasverhältnisse bei 2-T-Motoren

Im Verhältnis zu den Fahrzeugen mit 4-T-Motoren sind diejenigen mit 2-T-Motoren nur in sehr untergeordneten Prozentsätzen vertreten (etwa 4%). Wenn noch berücksichtigt wird, daß es sich bei den 2-Takttern in weit überwiegendem Maße um schwächere und bei Mopeds und Rollern um schwächste Motoren handelt, deren Benzinverbrauch entsprechend gering ist, dann müssen auch die ausgestoßenen Auspuffmengen, verglichen mit den von den übrigen Fahrzeugen mit 4-T-Motoren entwickelten, nur relativ gering sein. Nichtsdestoweniger kann die Belästigung der Fußgänger durch den Auspuffrauch eines einzigen Fahrzeugs mit 2-T-Motor oft größer sein als durch Dutzende von gleichzeitig zirkulierenden Fahrzeugen mit 4-T-Motoren. Hiemit soll nicht gesagt sein, daß auch die toxische Wirkung des erwähnten 2-Taktters entsprechend hoch sei.

Im allgemeinen gilt für die Auspuffgaszusammensetzung bei 2-T-Motoren, die ebenfalls mit gebleiten Benzinen hoher Klopfestigkeit betrieben werden, das bereits für die 4-T-Motoren ausgeführte. Insbesondere bestehen ähnliche Zusammenhänge zwischen Betriebsbedingungen, Auspuffgasmenge und -zusammensetzung. Zusätzlich zu den dort bereits eingehend behandelten toxischen Auspuffgasbestandteilen kommt jedoch die manchmal direkt als skandalös zu bezeichnende Öltrauchentwicklung, hervorgerufen durch den bei 2-T-Motoren zur Gemisch-Schmierung erforderlichen Schmierölzusatz.

Die Rauchentwicklung ist besonders bei älteren, schlecht unterhaltenen 2-T-Motoren oft enorm, ferner dann, wenn dem Benzin zuviel 2-T-Öl beigemischt wird oder das Öl im Benzin nicht homogen verteilt wurde, so daß sich unten im Benzintank ein viel zu ölreiches Benzin befindet.

Die Ölbeimischung liegt bei fortschrittlich konzipierten Motoren mit automatischer Ölbeimischung aus getrenntem Öltank bei 1 Vol.%. Die Automatik gewährleistet eine gleichmäßige und minimale Beimischung und trägt in hohem Maße zur Verminderung der Belästigung durch Auspuffrauch bei. Bei andern Motoren, auch Motorvelos und Rollern, beträgt sie meist gegen 4 Vol.%, für das Einlaufen neuer Motoren sogar 6% und mehr.

Moderne 2-T-Motorenöle bestehen zu mindestens 99% aus mit Lösungsmitteln raffinierten, gemischtbasischen bis paraffinischen SAE-30- bis SAE-50-Mineralölen, meist noch mit einem Gehalt von 10–20% Bright-Stock. Zur Verhinderung von Glühzündungen, des Kolbenringverklebens, der Belagsbildung im Verbrennungsraum und an den Auspuffschlitzen, ferner auch etwa zur Verbesserung der Schmierfähigkeit und der rostschtzenden Eigenschaften, werden dem 2-T-Öl heute geeignete Additives, meist auf Kalziumsulfonatbasis, gelegentlich auch aschefreie auf Basis organischer Stickstoffverbindungen, einverleibt.

Abgesehen vom wohl eher unangenehmen als eigentlich gesundheitsschäd-

lichen Ölrauch werden bei einer Ölbeimischung zum Benzin von zum Beispiel 4 Vol.% und einem Gehalt des Additives an Kalzium (als Kalziumsulfonat) von zum Beispiel 2,5 Gew.%, einer Beimischung des Additives zum Öl von 2,5 Vol.%, pro 1 L verbranntes Benzin etwa 31 mg Ca (als Ca-Verbindungen zum Teil unbekannter Zusammensetzung) ausgestoßen, bei nur 1-prozentiger Beimischung von 2-T-Öl zum Benzin nur etwa 8 mg. Zur gleichen Zeit werden jedoch pro L gebleitem Autobenzin (bei 0,5 ml Btä/L) und einem Ausstoß von  $\frac{3}{4}$  des Gesamt-Bleis 525 mg Blei, also das 65-fache, ausgestoßen. Der Anteil der mit dem Auspuff von 2-T-Motoren ausgestoßenen Ca-Verbindungen kann deshalb, schon in Anbetracht ihrer zweifellos nur geringen Toxizität, ohne weiteres vernachlässigt werden. Dasselbe ist natürlich auch der Fall bei den aschefreien Additives, die den 2-Takt-Ölen anstelle von metallorganischen etwa zugemischt werden.

Obschon eigentlich nicht zum vorliegenden Thema der Zusammensetzung der Auspuffgase bei Benzinmotoren gehörig, seien zum Abschluß in Tabelle 4 noch die verschiedenen Möglichkeiten zur Verringerung der Luftverschmutzung durch benzinbetriebene Motorfahrzeuge zusammengestellt.

Tabelle 4 Mittel und Wege zur Verringerung der Luftverschmutzung durch benzinbetriebene Motorfahrzeuge

A. *Motorkonstruktion*

1. Kleinstmöglicher spezifischer Benzinverbrauch des Motors und Verbrauch pro 100 t/km (hoher thermodynamischer und mechanischer Wirkungsgrad, geringer Roll- und Luftwiderstand des Fahrzeugs).
2. Zweckmäßige Vergasercharakteristik, insbesondere auch korrekte Leerlauf-Einstellung. Automatischer Startvergaser, der Choke automatisch ausschaltet. Günstige Gemischverteilung. Register- und Mehrfachvergaser erlauben auch im Leerlauf höhere Luftzahlen und kleinere Benzin-Einspritzmengen der Beschleunigerpumpe.
3. Benzineinspritzung statt Vergasung (Wirkung wie unter A2).
4. Geschichtete Ladung (Luftzahl kann durchschnittlich bei gleicher Leistung etwas erhöht werden, wodurch bei niedrigerem CO-Gehalt und Benzinverbrauch ein niedrigerer CO-Ausstoß resultiert).
5. Automatische Sperrung der Benzinzufuhr zu den Vergasertüsen beim Gaswegnehmen.
6. Hochtemperaturbeständige Auslaßventilstähle (halten den durch magere Ladegemische sich bei hoher Last ergebenden erhöhten Abgastemperaturen besser stand).
7. Bei 2-T-Benzinmotor kleinstmögliche Öl-Beimischung.
8. Kurbelgehäuseentlüftung in den Vergaser.
9. Auspuffentgifter, nichtkatalytische Nachverbrenner sowie katalytische Verbrenner und Umwandler toxischer Auspuffgas-Komponenten.

B. *Getriebe*. Synchronisierte Gänge machen Zwischengasgeben überflüssig.

C. *Wartung des Motors und des Benzin systems im allgemeinen*.

Bei Service-Arbeiten gewissenhafte Kontrolle von Luftfilter, Vergaser (besonders Leerlaufeinstellung, Schwimmmadel usw.), Zündsystem, Kompressionsdruck, Lecke im Benzin system.

D. *Benzin*

Mäßige Flüchtigkeit, mäßiger Benzolgehalt (Verdampfungsverluste). Kein oder möglichst niedriger Gehalt an Bleialkylen, chlorhaltigen (unnötigen) Wunder-Zusatzmitteln.

#### E. Fahrweise

Flüssige, überlegte, vorausschauende Fahrweise. tunlichst in möglichst hohem Gang. Vermeiden brusken Beschleunigens, Gaswegnehmens und Spielens mit dem Gaspedal beim Anhalten vor Verkehrslichtern trägt erheblich zur Verminderung der Luftverschmutzung bei.

#### F. Verschiedenes

Anwendung von Motorenölen mit wirksamen verschleißvermindernden Additives. Dadurch weniger Zylinder- und Kolbenverschleiß und weniger Blow-by ins Kurbelgehäuse und in die Atmosphäre.

#### Literaturverzeichnis

- [1] *Kemmetmüller R., Richter L.*: MTZ 4, 47 (1942); ferner *Döriges E. A.* ATZ 59, 114 (1957).  
*Wachal A. L.*, Automobile Engineer, S. 295 (1955).
- [2] *Fisher Ch. H.*: Carburation, Vol. 1, Chapman & Hall Ltd., London 1951, S. 194ff.
- [3] *Eberan-Eberhorst R.*: Über Probleme des modernen Fahrzeugmotors. Vortrag SGSM, 24. Juni 1965. Luzern.
- [4] *Jante A.*: Über Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, VEB-Verlag Technik, Berlin 1956, S. 387, 395, 407, 422.
- [5] *Knapp H.*: Beeinflussung der Kraftfahrzeugabgase durch Benzineinspritzung. MTZ 26, 353 (1965).
- [6] *Löhner K.*: ATZ 62, 95 (1960).
- [7] *Brunner M.*: Über die Kohlenmonoxydbildung bei benzinbetriebenen Fahrzeugen. Schweizer Archiv 24, 177 (1958).
- [8] Die Lüftung der Autotunnel. Mitteilung 10 aus dem Institut für Straßenbau an der ETH (1961).
- [9] *Eilers H.*: Air Pollution caused by Engines in Road Traffic. Vortrag 14. Januar 1958, Utrecht.  
*Larson G. P. e. a.*: J.A.P.C.A. 5, 84, 103 (1955).  
Los Angeles Traffic Pattern Survey, SAE Paper 171 (1957).  
*Faith W. L.*: Am. Chem. Soc. 4, A-31 (1959) Divis. Petrol. Chemistry.  
*Freilino R. S.*: Gulf Research Report 578 (28. April 1960).  
CRC Project Nr. CM-4-58 (1957/58).  
*Lemaigre P.*: Conférence Européenne sur la Pollution de l'Air, 24 juin-1er juillet 1964. La Pollution de l'Air par les Véhicules automobiles, 17 novembre 1964.  
*Fittou A.*: Fisita 1960 und Royal Soc. Health J. 76, 664 (1956).
- [10] *Hirschler D. A.*: Ind. Eng. Chem. 49, 1131 (1957).
- [11] *Preis H.*: Die Verunreinigung von Luft und Staub durch Blei aus dem Autobenzin MTZ 59, 304 (1957).
- [12] Oil & Gas J. 57, 83 (1959).
- [13] Oil & Gas J. 63, 58 (1965).

Adresse des Autors: Prof. Dr. M. Brunner, EMPA, 8600 Dübendorf, Schweiz.