

Die Zusammensetzung der Auspuffgase bei Dieselmotoren

H. Hoffmann

Zusammenfassung

Das Rauchen moderner Dieselmotoren kann durch Konstruktion und Entwicklung auf ein Maß beschränkt werden, welches zu keinerlei Beanstandungen zu führen braucht. Für den Betrieb über lange Laufstrecken muß aber als *conditio sine qua non* genannt werden, daß eine ordnungsgemäße Pflege des Motors grundsätzlich durchgeführt werden muß. Der CO-Gehalt spielt beim Dieselmotor praktisch überhaupt keine Rolle, lediglich im Untertagebetrieb. Die Aldehyde wirken sich nur als Geruchsbelästigungen aus und dürften wohl, aber hier möchte ich den Medizinern nicht vorgreifen, mehr oder weniger nur ein Schönheitsfehler sein. Bedenklicher sind sicher die Stickoxyde, die als NO oder als NO₂ auftreten. Eingeatmetes Stickstoffmonoxyd NO hat eine Affinität zum Hämoglobin und bewirkt dadurch einen Sauerstoffmangel im Blut. Stickstoffdioxid NO₂ setzt sich mit Wasser in Salpetersäure um. Das tritt beim Einatmen von NO₂ in die Lunge ein und kann wohl bei entsprechend hoher Konzentration zu Entzündungen im Atmungssystem führen. Die Höhe der Stickoxyd-Konzentration wird offensichtlich durch das Verbrennungsverfahren beeinflusst, wobei nach unseren, wenn auch noch sehr geringen Untersuchungen, der Direkteinspritzmotor schlechter zu sein scheint als der Vorkammermotor. Um das 3,4-Benzopyren ist unserer Kenntnis nach ein bißchen zu viel Geschrei gemacht worden. Nach den Untersuchungen des Battelle-Instituts in Frankfurt ist mit einem nennenswerten Benzopyren-Gehalt zu rechnen, wenn der Motor mit sehr hohen Mitteldrücken betrieben wird; die Erkenntnisse auf diesem Gebiet sind aber noch sehr lückenhaft.

Résumé

Le développement technique permet de réduire la fumée des moteurs diesel modernes à tel point qu'ils ne suscitent pour ainsi dire plus de réclamations.

Pour les grandes distances, cependant, il faut exiger comme «*conditio sine qua non*» un service soigné et régulier du moteur.

La teneur en CO ne joue pratiquement aucun rôle pour le moteur diesel, sauf dans le cas des travaux souterrains. Le seul inconvénient des aldéhydes consiste en leur odeur et il me semble – sans vouloir mettre en cause des avis médicaux – qu'il ne s'agisse là que d'un défaut secondaire. Le NO et le NO₂ sont certainement plus dangereux. Le NO a une grande affinité envers l'hémoglobine et provoque ainsi un manque d'oxygène dans le sang. Le dioxyde d'azote (NO₂) et l'eau forment l'acide azotique. Ceci est le cas lorsque le NO₂ entre dans les poumons; si la concentration en NO₂ est assez élevée, des inflammations peuvent se produire dans le système respiratoire. C'est probablement le système de combustion qui influence la concentration d'oxyde d'azote; nos expériences personnelles, quoique très limitées encore, indiquent que le moteur à injection directe serait plus défavorable que le moteur à chambre de précombustion. A notre connaissance, un peu trop de bruit a été fait autour de la benzopyrène 3,4. D'après les investigations de l'Institut Battelle à Francfort il faut s'attendre à une teneur considérable en benzopyrène lorsque les pressions moyennes du moteur sont très élevées; mais les connaissances dont on dispose dans ce domaine sont loin d'être complètes.

Der folgende kurze Überblick über das, was überhaupt in den Dieselabgasen vorhanden ist, berührt hierbei vor allen Dingen die Frage des Dieselrauchs, des CO-Gehalts, des Gehalts an Stickoxyden und Schwefeldioxyd, an Aldehyden und an dem jetzt nicht mehr so häufig genannten 3,4-Benzpyren. All diese Bestandteile kann man heute mit genügender Genauigkeit messen, wenn auch bei Stickstoffmonoxyd, Aldehyden und Benzpyren noch mit so erheblichem Aufwand, daß eine intensive Entwicklungsarbeit seitens der Industrie zur Verminderung der zuletzt genannten Stoffe praktisch noch nicht durchführbar ist. Trotzdem läßt sich nachweisen, daß eine Abhängigkeit dieser Bestandteile von Last, Drehzahl, Motorzustand usw. besteht.

Aber all diese Ingenieursarbeit ist irgendwie sehr unbefriedigend. Was nützt es uns zum Beispiel, wenn wir wissen, daß der Benzpyrengengehalt bei sehr hohen Mitteldrücken des Motors irgendeine Größe erreicht, wenn wir nicht wissen, welche Auswirkungen dieser Benzpyrengengehalt nun beispielsweise auf den menschlichen oder tierischen oder pflanzlichen Organismus hat.

In diesem Zusammenhang sei mir gestattet, darauf hinzuweisen, daß wohl die gesamte Motorenindustrie ernsthaft daran arbeitet, die Verunreinigung der Luft durch die Abgase der Motoren zu verringern oder zu beseitigen. Ich erinnere allein an die sehr umfangreichen Arbeiten, die in Amerika auf dem Gebiete der Ottomotoren gemacht worden sind und gemacht werden, um den sogenannten Kalifornien-Test zu erfüllen; Versuche mit der Cleaner-Air-package-Methode von Chrysler, Versuche mit Katalysatoren, Versuche mit dem Man-Air-Ox-Verfahren und viele andere Methoden. Wir sind uns der Verantwortung voll bewußt, denn nur in der Hand von Ingenieuren und Chemikern kann es liegen, die mehr oder weniger giftige Zusammensetzung der Abgase zu verbessern. Die Notwendigkeit besteht absolut. Man soll sich aber auch bei den Forderungen, wie überall im Leben, vor Übertreibungen hüten und vor Dramatisierungen. Noch einmal zurückkommend auf das vorher erwähnte 3,4-Benzpyren, erinnerte ich mich an den Ausspruch eines Biologen, der uns seinerzeit sagte: «Wer einmal in seinem Leben hinter einem stark rauchenden Dieselmotor hinterhergefahren ist, ist mit Sicherheit nach spätestens 30 Jahren an Lungenkrebs gestorben». Wenn diese Aussage wirklich stimmen würde, dann könnte meine Generation kaum mehr existieren, denn sehr viele sind vor 30 Jahren einmal hinter einem stark qualmenden Dieselfahrzeug hergefahren.

1. Rauchentwicklung

Zur Rauchmessung gibt es im Prinzip zwei Methoden; die sogenannte Filtermethode, nach welcher das Bosch-Gerät arbeitet und dann das Hart-ridge-Gerät, welches mit dem Prinzip der Durchleuchtung einer Gassäule arbeitet. Bei der Filtermethode wird ein bestimmtes Abgasvolumen durch ein Filterpapier gesaugt und anschließend der Grad der Schwärzung photoelek-

trisch bestimmt. Mit der Durchleuchtung wird direkt die Lichtabsorption im Vergleich zu reiner Luft gemessen. Die Filtermethode ist diskontinuierlich, die Durchleuchtung kontinuierlich. In Deutschland wird vornehmlich mit der Bosch-Methode, also der Filtermethode, gearbeitet.

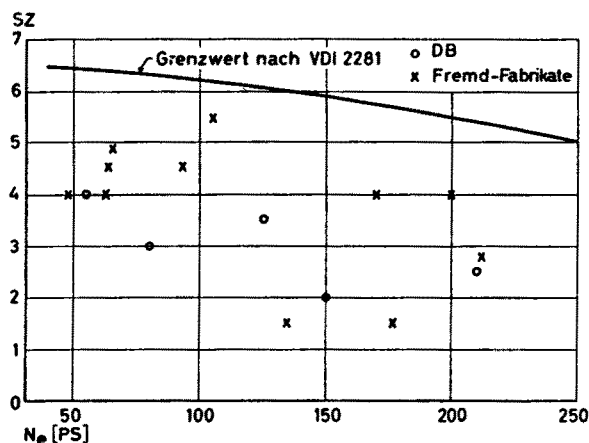


Abb. 1 Vollast-Schwärzungszahlen (SZ) verschiedener Motoren

Der obere Grenzwert der Schwärzungszahl ist abhängig von der Motorleistung (Abb. 1). In Frankreich und Belgien gibt es seit 1964 ebenfalls Grenzwerte, jedoch nach der anderen Meßmethode, nämlich mit dem Hartridge-Gerät, bei welchem die Schwärzungszahl durch Beschleunigung des Motors, das heißt Vollgasgeben im Leerlauf gemessen wird. In Belgien wird die Motorleistung nicht berücksichtigt, in Frankreich etwa umgekehrt wie in Deutschland in der Form, daß Pkw den geringsten, schwere Lkw den höchsten zulässigen Grenzwert haben. Dies rührt daher, daß man in Deutschland als Basis die Belästigung durch ein einzelnes Fahrzeug annahm, während in Frankreich die Gesamtrauchmenge aller in Paris fahrenden Fahrzeuge mit Dieselmotor zugrunde gelegt wurde, wodurch sich für Lkw infolge ihrer geringen Zahl im Stadtgebiet höhere Grenzwerte ergaben als für Pkw.

Wir stehen nach wie vor auf dem Standpunkt, daß es zweckmäßiger ist, das Rauchverhalten eines Dieselmotors im Beharrungszustand bei Vollast zu messen, also wie es mit dem Bosch-Gerät möglich ist, als durch eine Beschleunigungsmessung im Leerlauf, die ja im praktischen Fahrbetrieb überhaupt nicht vorkommt.

Um ein Bild zu bekommen, wie die Schwärzungszahlen verschiedener Dieselmotoren überhaupt liegen, haben wir Rauchkennfelder von unseren eigenen Vorkammer- und Direkteinspritzmotoren aufgestellt, dann aber auch eine ganze Reihe von Fremdmotoren untersucht. So kennen wir das Rauchverhalten, abhängig von Mitteldruck und Drehzahl, auch vom Leyland 350, vom

Cummins V 6- und V 8-Motor, von zwei verschiedenen MAN-Motoren, vom Bedford, vom Perkins 4/203, vom Perkins 4/99, dann vom Peugeot Indenor TND 85, Caterpillar D 333 als Auflademotor und ohne Lader, ferner vom GMC Toroflow, vom Foden und noch von einer ganzen Reihe anderer Motoren. Aus der Vielzahl der Untersuchungen kann man wohl folgern, daß bei gleicher Leistung und gleichem Entwicklungszustand des Motors bei Vollast kein prinzipieller Unterschied im Rauchverhalten besteht zwischen Vorkammermotoren und Direkteinspritzmotoren.

Auf der Abb. 2 werden die Ergebnisse der Vorkammermotoren, auf der Abb. 3 jene der Wirbelkammermotoren und auf der Abb. 4 das Verhalten der Direkteinspritzmotoren gezeigt. Um die Unterschiede dieser Motorengruppen überhaupt in Erscheinung treten zu lassen, wurden lediglich die Schwärzungszahlen bei Vollast und bei $\frac{1}{4}$ -Last eingetragen. Das Feld für die beiden Laststufen ist flächig angelegt, um den Streubereich innerhalb der einzelnen Laststufen besser erscheinen zu lassen.

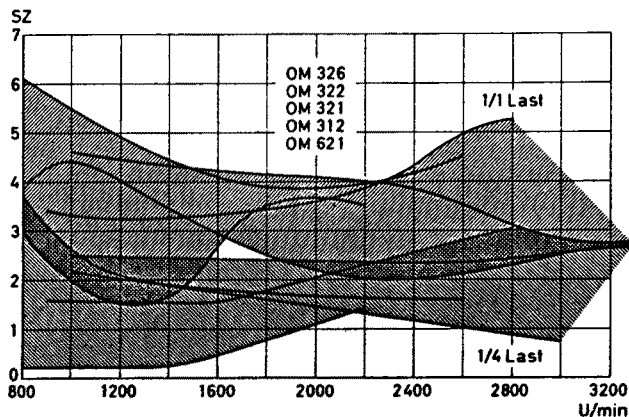


Abb. 2 Rauchverhalten von Vorkammermotoren

Das Feld bei Vollast unterscheidet sich nicht sehr von dem Feld bei $\frac{1}{4}$ -Last. Mit anderen Worten, der *Vorkammermotor* raucht, wenn auch sehr schwach sichtbar, auch noch bei kleinen Lasten. Anders das Verhalten der *Wirbelkammermotoren* (Abb. 3).

Hier setzt sich das Feld bei $\frac{1}{4}$ -Last schon wesentlich deutlicher von dem Feld bei Vollast ab. Diese Erscheinung bei den *Direkteinspritzmotoren* ist noch deutlicher (Abb. 4).

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß kein großer Unterschied im Rauchverhalten zwischen den, ich möchte jetzt sagen Kammermotoren und den Direkteinspritzmotoren besteht, zumindest nicht bei Vollast, daß jedoch im kleinen Teillastgebiet der Direkteinspritzmotor dem Vorkammermotor überlegen ist.

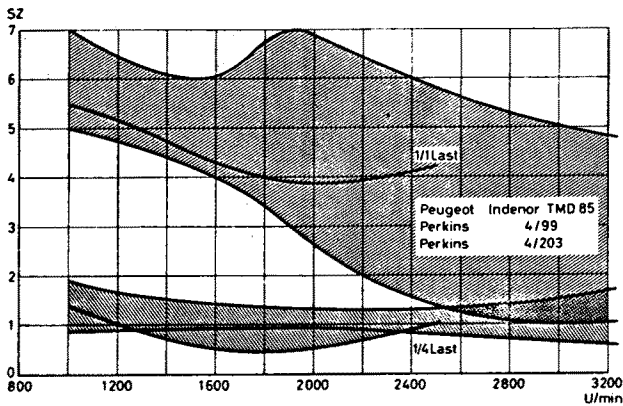


Abb. 3 Rauchverhalten von Wirbelkammermotoren

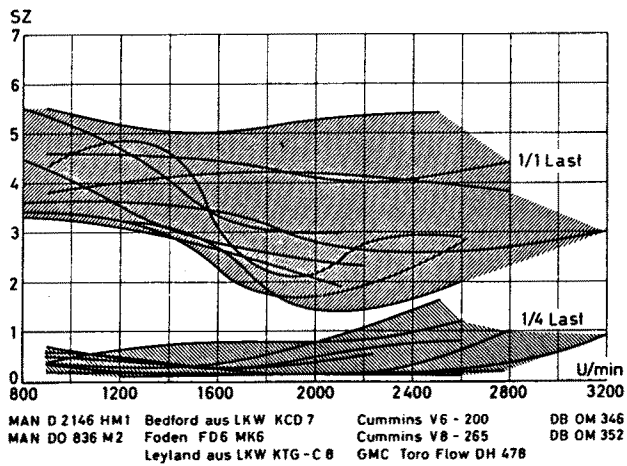


Abb. 4 Rauchverhalten von Direkteinspritzmotoren

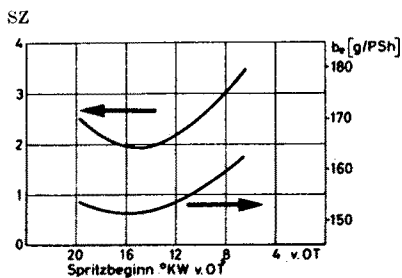
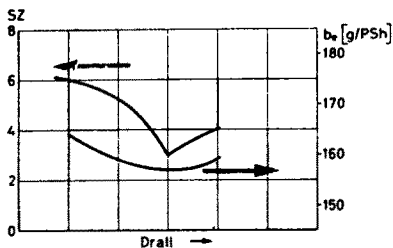


Abb. 5 Einfluß von Drall und Spritzbeginn auf Rauch und Verbrauch

Die Abb. 5 (oberer Teil) gibt einen kleinen Ausschnitt aus der Entwicklungsarbeit, in diesem Falle aus den Versuchen, bei welchen mit verschieden großem *Drall* bei der Entwicklung eines Direkteinspritzmotors gearbeitet wurde. Man erkennt, aufgetragen über den Drall, die Kurve für die Schwärzungszahl, die im Bereich von 6 bis zu einer Schwärzungszahl herunter zu 3 variiert, je nachdem, wie groß der motorische Drall war.

Der untere Teil der Abb. 5 zeigt ein weiteres kleines Beispiel aus der Entwicklungsarbeit. Durch den *Spritzbeginn* kann naturgemäß die Leistung und damit der spezifische Verbrauch stark beeinflusst werden. Mit beeinflusst wird selbstverständlich hierdurch auch die Schwärzungszahl. Bei der hier gefahrenen Drehzahl fällt das Optimum des spezifischen Verbrauchs mit dem Optimum der Schwärzungszahl zusammen. Es kann aber auch durchaus anders sein, wobei man dazu gezwungen wird, irgendeinen Kompromiß zwischen, in diesem Falle, Schwärzungszahl und spez. Verbrauch einzugehen.

Im Laufe der Entwicklung der Direkteinspritzmotoren haben wir auch einen starken Einfluß des *Kolbenmuldendurchmessers* auf die Schwärzungszahl festgestellt, wie aus der Abb. 6 ersichtlich ist.

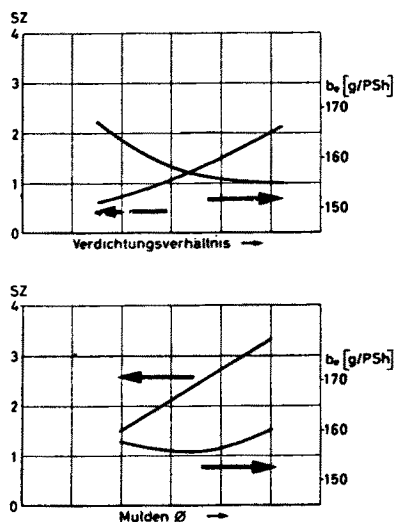


Abb. 6 Einfluß von Verdichtungsverhältnis und Kolbenmulden \varnothing auf Rauch und Verbrauch

Auch das *Verdichtungsverhältnis* spielt selbstverständlich eine sehr wesentliche Rolle.

Damit wurden nur ein paar der sehr vielen Einflußgrößen genannt, um zu zeigen, wie man die Schwärzungszahl bei der Entwicklung eines Motors beeinflussen kann; wobei man sich von vornherein im klaren darüber sein muß, daß irgendwie ein Kompromiß geschlossen werden muß.

Über das *Höhenverhalten* liegen mir keine exakten eigenen Messungen vor. Es ist jedoch zu unterstellen, daß eine Verringerung des Luftgewichtes, zumindest in der in Betracht kommenden Größenordnung, denselben Erfolg hat wie eine Steigerung der Einspritzmenge, das heißt also, der Rauch wird entsprechend zunehmen wie bei Überlast. Heutige fertig entwickelte Dieselmotoren sind jedoch überwiegend soweit von der Rauchgrenze entfernt, daß sie die zulässige Rauchgrenze auch in 1000 oder 2000 m Höhe ü. M. kaum erreichen dürften.

Die Abb. 7 veranschaulicht etwa die Höhenverhältnisse.

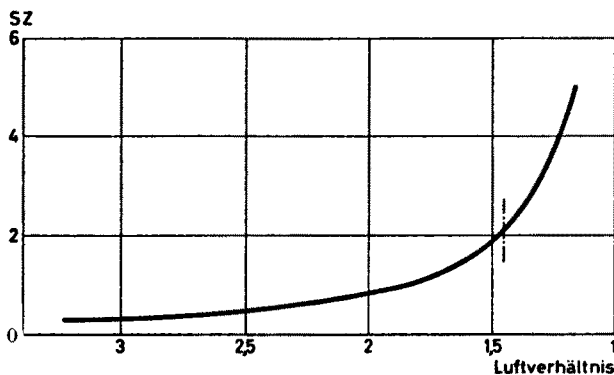


Abb. 7 Rauch in Abhängigkeit vom Luftverhältnis

Bei der *Aufladung* ergibt sich vor allem die Schwierigkeit, bei niedrigen Motordrehzahlen noch genügend Luft zu erhalten, ohne bei hoher Leistung einen zu großen Spitzendruck im Zylinder zu bekommen. Grundsätzlich wird jedoch am Rauchverhalten nichts geändert.

2. CO-Entwicklung

Bei Kohlenmonoxyd kann ganz allgemein gesagt werden, daß die Konzentration im Abgas von Dieselmotoren praktisch nicht über 0,1 bis 0,15 Vol. % geht, in einem großen Teil des Kennfeldes sogar unter 0,05 Vol. % bleibt, so daß der Dieselmotor in dieser Beziehung keinerlei Sorgen bereitet. Lediglich für Untertagebetrieb ist in Deutschland ein max. CO-Gehalt von 0,05 Vol. % zugelassen. Diese Forderung wird aber fast bei vollem max. Mitteldruck erreicht. Ein Zusammenhang zwischen CO und Rauch im Teillastgebiet kann nicht gefunden werden. Abb. 8 zeigt, über dem Mitteldruck aufgetragen, den Kohlenmonoxydgehalt von 3 Direkteinspritzmotoren, von denen der eine Motor ein, ich möchte sagen, klassischer Direkteinspritzmotor mit 4-Loch-Düsen ist; der zweite hat 8-Loch-Düsen und der dritte arbeitet mit 1-Loch-Düsen nach dem Prinzip der Wandverteilung. Die Unterschiede in der Charakteristik sind groß, die Gesamtniveau-Unterschiede jedoch nicht.

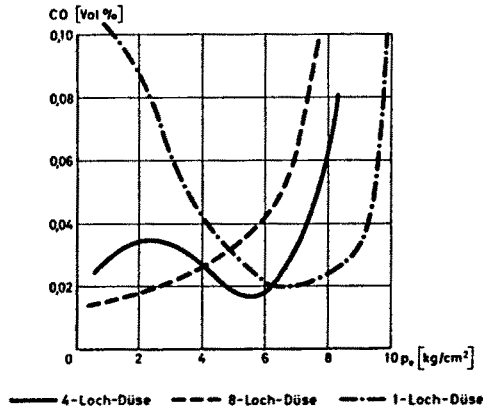


Abb. 8 Teillastkurven verschiedener Direkteinspritzmotoren

Abbildung 9 zeigt die beiden CO-Kennfelder unserer beiden 200 PS-Motoren, (Vorkammer- und Direkteinspritzmotor). Aus dieser Darstellung geht hervor, daß fast bis zum max. Mitteldruck der CO-Gehalt nicht über 0,05 Vol. % ansteigt und daß auf der anderen Seite kein großer Unterschied zwischen dem Vorkammermotor und dem Direkteinspritzmotor vorhanden ist.

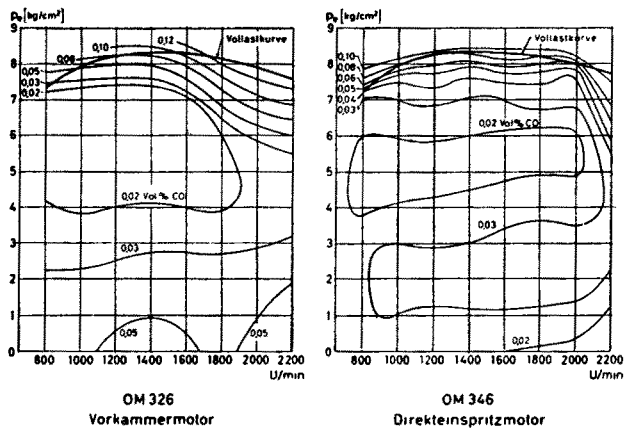


Abb. 9 Vergleich der CO-Kennfelder der Motoren OM 326 und OM 346

Auf den Abbildungen 10 und 11 ist der 200-PS-Direkteinspritzmotor mit unserem Pkw-Vergasermotor 2,2 Liter verglichen. Beim 220 S fällt die völlig andere Größenklasse des CO-Gehalts auf, der bei Vollast an einigen Stellen 4% erreicht, wobei gesagt werden muß, daß es sich hierbei keineswegs um einen schlechten Motor handelt (Abb. 10). Beträgt beim 200-PS-Direkteinspritzmotor im Vollastbereich die CO-Emissionsmenge größenordnungsmäßig 6 Liter/min.

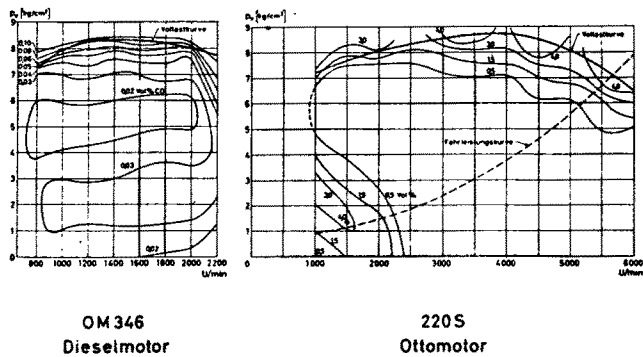


Abb. 10 Vergleich der CO-Kennfelder eines Diesel- und eines Ottomotors

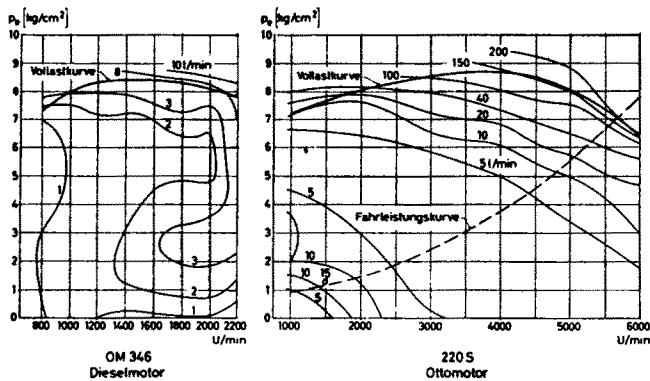


Abb. 11 Vergleich der CO-Kennfelder eines Diesel- und eines Ottomotors

(Abb. 11), so werden beim 220 S, also dem 2,2-Liter-Vergasermotor, bei Vollast und voller Drehzahl 100–150 Liter/min CO emittiert.

3. Bildung von Aldehyden

Als weiterer Abgasebestandteil wären die Aldehyde zu nennen. Diese verursachen neben den Geruchbelästigungen schon in geringer Konzentration eine Reizung der Schleimhäute in Nase, Hals und Augen. Dafür kennzeichnend sind die geringen MAK-Werte, zum Beispiel 5 ppm für Formaldehyd.

Bekanntlich reagiert die menschliche Nase sehr stark auf Geruchsstoffe in sehr geringer Konzentration, so daß man sich zur Feststellung des Zusammenhanges zwischen Geruchs- bzw. Reiz-Intensität und meßbarer Konzentration einer subjektiven Bewertungsmethode mittels Schnüffelkastens bedient. Ein Gasstrom mit bekannter Konzentration der zu bewertenden Komponente wird mit einer großen variablen und meßbaren Menge gefilterter Luft gemischt. Aus einem genügend großen Mischbehälter wird ein kleiner Teilstrom entnommen

und kann vom Tester berechnet werden. Als Bewertungsskala für die Intensität von Geruch- bzw. Reizwirkung sind 4-5 feststellbare Grade anzugeben. So wurde von General Motors im SAE-Paper Nr. 863 zum Beispiel eine Reihe von Ergebnissen veröffentlicht.

Die Abb. 12 zeigt den lastabhängigen Gehalt an Gesamtaldehyden im Auspuff eines 2-Takt-Dieselmotors.

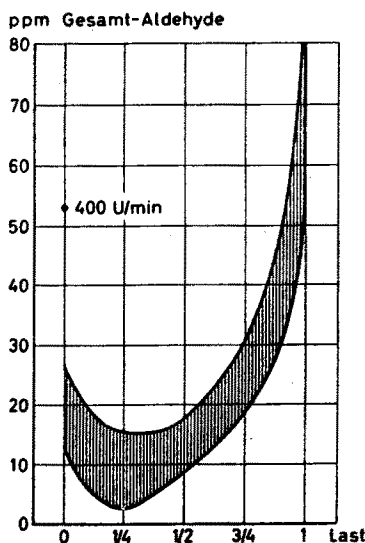


Abb. 12 Aldehydbildung in Abhängigkeit von der Belastung

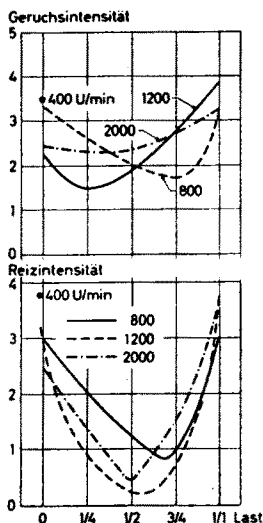


Abb. 13 Geruchs- und Reizintensität in Abhängigkeit von der Belastung

Die Aldehyd-Konzentration wurde nach üblicher Analysenmethode bestimmt. In dem schraffierten Streuband überschneiden sich mehrfach die Linien für konstante Drehzahlen. Die Auspuffgase dieses Motors wurden nun nach der Schnüffelmethode getestet, und zwar sowohl hinsichtlich der Geruchs- als auch der Reizintensität (Abb. 13).

In beiden Fällen wurden Intensitätsspitzen sowohl im Leerlauf als auch bei Vollast festgestellt, während Minimalwerte im mittleren Lastbereich liegen. Bei der Reizintensität ist der Abfall auf die Minimumwerte wesentlich schärfer ausgeprägt, als bei der Geruchsintensität. Ein Drehzahleinfluß läßt sich dagegen nicht feststellen.

4. Die Bildung von Stickoxyden

Bedenklicher als die wegen ihrer geringen Konzentration vorwiegend nur geruchsbelästigenden Aldehyde sind die Stickoxyde, da diese in höherer Konzentration auftreten, und zwar hauptsächlich als NO und NO₂. Der MAK-Wert für NO₂ liegt bei 5 ppm, für NO werden höhere Werte bis 25 ppm genannt.

Das Vorhandensein nitroser Gase stellt vor allem eine Beeinträchtigung des Einsatzes von Dieselmotoren in Untertagebetrieben dar im Zusammenhang mit der notwendigen Bewetterung der Gruben. Diese Fragen sind noch sehr im Fluß, zulässige Grenzwerte für max. Stickoxydgehalte im Auspuffgas liegen noch nicht endgültig fest.

Bekanntlich spielen Stickoxyde bei der Bildung des sogenannten «Los-Angeles-Smog» eine Rolle, so daß in Amerika in großem Umfang Forschungsarbeiten durchgeführt worden sind, um die Zusammenhänge der Bildung von Stickoxyden bei der motorischen Verbrennung kennenzulernen mit dem Ziel, die NO_x-Konzentration auf unbedenkliche Werte zu senken. Es interessieren uns hier nur die Ergebnisse auf dem Dieselmotoren-Sektor.

Von den verschiedenen diskontinuierlich arbeitenden Analysen-Methoden ist die Phenoldisulfonsäure-Methode die bekannteste, nach der auch wir bei unseren eigenen Untersuchungen arbeiten. Danach wird in der Regel der vorhandene NO-Anteil zu NO₂ oxydiert, um so die Gesamt-Stickoxyde kolorimetrisch als NO₂ zu erfassen.

Auf Grund eingehender englischer Untersuchungen kann kurz zusammengefaßt etwa folgendes über die Stickoxydbildung im Motor gesagt werden:

Die NO_x-Bildung erfolgt in zunehmendem Maße mit steigender Temperatur. Als hemmender Einfluß tritt aber eine besonders bei großen Einspritzmengen abnehmende Sauerstoff-Konzentration auf. Bei anhaltender hoher Temperatur gegen Ende der Verbrennung erfolgt eine Rückbildung durch Dissoziation.

Man muß sich aber darüber klar sein, daß für den Ablauf von derartigen reaktionskinetischen Vorgängen immer nur die an dem betreffenden Reaktionsort, das heißt in unmittelbarer Nähe der eingespritzten bzw. entflammten

Kraftstoffteilchen, zeitlich sich rasch ändernden Reaktionsbedingungen wie Temperatur und Gaskonzentration maßgebend sind. Man darf nicht etwa die aus Druckdiagrammen errechenbare Durchschnittstemperatur und die aus Luftmengenmessungen sich ergebenden λ -Werte zugrunde legen!

Interessant ist der Vergleich von Ergebnissen zwischen einem Direkteinspritzmotor und einem Wirbelkammermotor (Abb. 14) (McConnell, Oxides of nitrogen in diesel engine exhaust gas: their formation and control, 1964), jeweils bei konstanter Einspritzmenge und verschiedenen Drehzahlen gefahren, mit veränderlichem Förderbeginn. Im Diagramm wurden die gemessenen NO_x-Werte über dem Zündbeginn dargestellt. Bei beiden Motoren ergaben sich zwar um so höhere Stickoxydwerte, je früher gezündet wurde. Dieser Verlauf ist genau entgegengesetzt dem der Rauchbildung, welche, wie gezeigt, bei

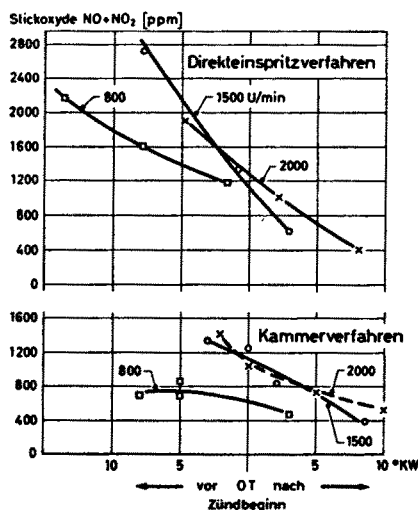


Abb. 14 Einfluß des Zündbeginns auf die Stickoxydbildung

relativ frühem Spritzbeginn, das bedeutet frühem Zündbeginn ein Minimum aufwies. Beim Direkteinspritzmotor liegen die NO-Werte aber doppelt so hoch mit Ausnahme der höchsten Drehzahl 2000 U/min. Offenbar ist die zu Brennbeginn entstehende Stickoxydmenge von überwiegender Einfluß auf die im Auspuff meßbare Konzentration. In der Wirbelkammer könnte die geringere Sauerstoffkonzentration und die erhöhte Wärmeabfuhr in die im Verhältnis zum Brennraumvolumen vergrößerte Wandfläche als Ursache für die günstigen niedrigen ppm-Werte angesehen werden.

Die englischen Untersuchungen erstreckten sich natürlich auch auf einen eventuellen Kraftstoffeinfluß. Der Direkteinspritzmotor lief einmal mit einem sehr zündwilligen Dieselkraftstoff, der CZ 59 hatte, und dann mit einem anderen mit CZ 35, gekennzeichnet durch längeren Zündverzug. Über dem Zündbeginn dargestellt, zeigt die Abb. 15, daß bei gleicher Drehzahl immer der zündunwil-

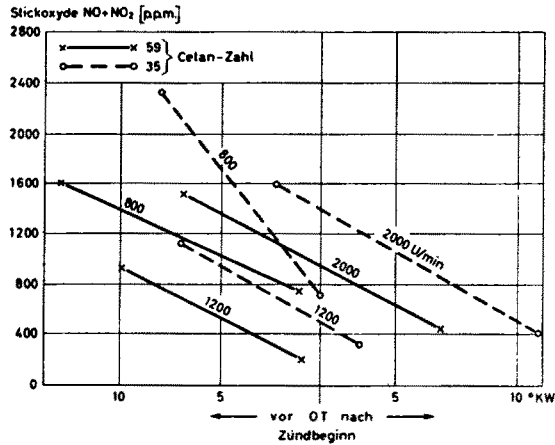


Abb. 15 Einfluß der Zündwilligkeit auf die Stickoxydbildung

ligere Kraftstoff wahrscheinlich deshalb höhere NOx-Werte ergibt, weil nach längerem Zündverzug der Wärmeumsatz in der ersten Phase der Verbrennung höhere Werte erreicht und weil sich deshalb in der Brennzzone in der Nähe der «Zündnester» höhere Temperaturen einstellen. Daraus könnte man einen Zusammenhang zwischen dem Anfangsverlauf des Brenngesetzes und dem Stickoxyd Gehalt ableiten, allerdings müßten andere Einflüsse, die örtliche Temperaturspitzen abbauen könnten, berücksichtigt werden.

Eigene Messungen an 3 verschiedenen Motortypen, 2 Direkteinspritzmotoren und 1 Vorkammermotor, bringen ähnliche Ergebnisse (Abb. 16).

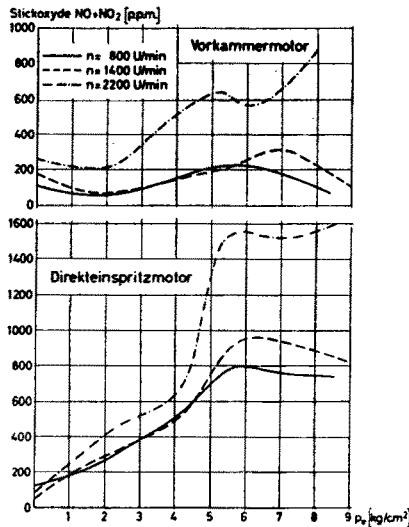


Abb. 16 Stickoxyd-Kennlinien eines Vorkammer- und eines Direkteinspritzmotors

So erreicht der im oberen Bildteil dargestellte Vorkammermotor im niederen Drehzahlbereich, über dem Mitteldruck aufgetragen, NO_x-Werte nur zwischen 50 und 300 ppm. Bei Höchstdrehzahl 2200 U/min liegen sie temperaturbedingt höher und steigen bei Vollast bis 800 ppm. Der als Teillastkurven dargestellte lastabhängige NO_x-Verlauf hat bei p_e von etwa 2 kg/cm² ein Minimum, das wahrscheinlich mit der Brennraumzerklüftung in Zusammenhang gebracht werden kann. Hierbei wird ja der gesamte Kraftstoff in das etwa 35% des Gesamtvolumens betragende Vorkammervolumen eingespritzt. Ausgehend von Leerlauf steht mit zunehmender Kraftstoffmenge für die Teilverbrennung in der Vorkammer immer weniger Verbrennungsluft zur Verfügung, so daß schließlich infolge Sauerstoffmangel das erwähnte Minimum entsteht. Bei weiter gesteigerter Einspritzmenge muß, nachdem die Vorkammerluft verbraucht ist, immer mehr der Luftsauerstoff im Hauptraum zur Oxydation herangezogen werden. Das führt zu weiterer temperaturabhängiger NO_x-Zunahme bis auch dort infolge lokal beginnendem Luftmangel bei etwa $p_e = 6$ kg/cm² wieder ein Abfall eintritt.

Die Charakteristik des Stickoxyd-Verlaufes für den Direkteinspritzmotor liegt klarer vor, dargestellt im unteren Bildteil. Die Maximalwerte liegen erheblich höher als beim Vorkammermotor. Mit zunehmender Last, das heißt zunehmender Temperatur, steigt die Stickoxydkonzentration bis zu dem ähnlich wie beim Vorkammermotor liegenden Maximum.

Lokaler Sauerstoffmangel erzwingt ebenfalls wieder einen gewissen Konzentrationsrückgang bei weiter gesteigerter Last. Höhere NO_x-Werte als 1600 ppm wurden nicht gemessen.

Ein moderner weiterer Direkteinspritz-Dieselmotor (4-Takt) wurde ebenfalls bei uns vermessen; hier ergaben sich die auf der Abb. 17 gezeigten Werte.

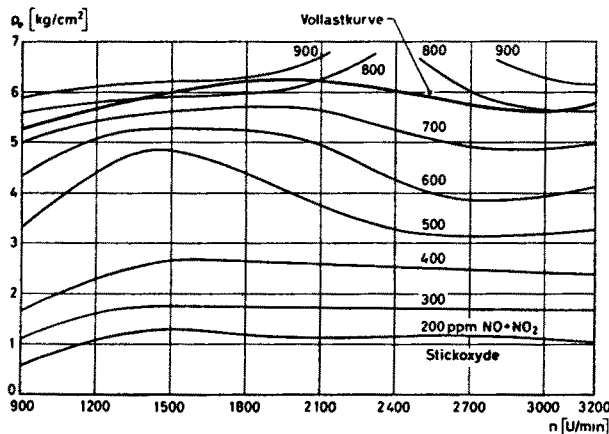


Abb. 17 Stickoxyd-Kennfeld eines Direkteinspritzmotors

5. Die Bildung von Schwefeldioxyd

Zur Luftverunreinigung durch Schwefeldioxyd ist, wie mir scheint, wenig zu sagen. Wegen des geringen Schwefelgehaltes im normalen Dieseldieselkraftstoff spielt die Geruchsbelästigung durch Schwefeldioxyd aus dem Auspuff von Dieselfahrzeugen praktisch keine Rolle. Die Verwirbelung und Verdünnung in der Luft hinter dem Fahrzeug wirkt günstig, eine Tatsache, die zum Beispiel für die aus Schornsteinen langsam aufsteigenden Abgase von Ölfeuerungen nicht zutrifft. Deshalb kann man in Wohngegenden mit überwiegendem Anteil an Ölfeuerungen gegebenenfalls eine leichte Reizwirkung empfinden.

Wenn auch diese Komponente des Dieseldieselabgases für Untertagebetrieb nicht wesentlich stört, so versucht man für derartige Einsatzfälle, den Schwefeldioxyd-Gehalt durch Verwendung von Kraftstoff mit herabgesetztem Schwefelgehalt weiter zu reduzieren.

6. Die Bildung von 3,4-Benzpyren

Wenn auch noch der klare Beweis fehlt, daß 3,4-Benzpyren als mehrkerniger Kohlenwasserstoff, der bei unvollkommener Verbrennung entsteht und im Rauch von Feuerungen, im Zigarettenrauch und in Auspuffgasen von Verbrennungsmotoren festzustellen ist, als Ursache für die Entstehung von Lungenkrebs beim Menschen anzusehen ist, so liegt doch die Wahrscheinlichkeit einer Gesundheitsgefährdung durch diese Substanz vor. In Tierexperimenten sind kancerogene Erscheinungen durch 3,4-Benzpyren erzeugt worden. In der Presse wurde bekanntlich des öfteren in sensationeller Aufmachung darüber berichtet und es fehlt nicht an Bemühungen, derartige Meldungen als Argument für ein Verbot von Dieselmotoren entweder generell oder für den innerstädtischen Verkehr zu benutzen. Aus diesem Grund haben wir vom Battelle-Institut, Frankfurt, eine Reihe von Untersuchungen zur Feststellung von 3,4-Benzpyren im Auspuffgas von Dieselmotoren durchführen lassen. Die Ergebnisse waren deshalb nicht immer eindeutig und reproduzierbar, weil die Zusammenhänge, die bei der Benzpyren-Entstehung während der motorischen Verbrennung eine Rolle spielen, noch längst nicht alle erkannt werden konnten.

Kurz zusammengefaßt ergab sich folgendes:

1. Der vermutete gleichsinnige Verlauf von Ruß- und Benzpyren-Emission bestätigte sich nicht immer.
2. Unterschiede im Brennverfahren und in der Brennraumgestaltung haben wesentlichen Einfluß.
3. Es besteht offenbar auch ein Einfluß seitens der Kraftstoffzusammensetzung; auch Kraftstoffzusätze, wie zum Beispiel Kerobrisol, ändern die Benzpyren-Emission.

Als Erklärung dafür, daß diese Ergebnisse noch mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet sind, muß auf folgende Tatsachen hingewiesen werden:

a) Da die meßbaren Benzpyren-Mengen sehr klein sind – als Einheit verwendet man 10^{-6} g bzw. 10^{-3} mg, bezeichnet als γ –, müssen an die Analysemethoden hinsichtlich Exaktheit außerordentlich hohe Anforderungen gestellt werden. Im Verlauf der über mehrere Jahre sich erstreckenden Untersuchungen konnte zum Beispiel die Nachweisgrenze für 4,3-Benzpyren bezogen auf eine jeweils aus etwa 500 Liter Abgas gewonnene Filtratmenge von $3 \dots 5 \cdot 10^{-6}$ g auf annähernd $0,5 \cdot 10^{-6}$ g und darunter reduziert werden.

b) Die bei der lokal unvollkommenen Verbrennung im Dieselizeylinder sich bildenden Kohlenwasserstoffe – also auch Benzpyren – haften vorwiegend an den Rußpartikeln, von denen sie je nach der strukturbedingten Adsorptivkraft dieser Rußteilchen mehr oder weniger schwer zu trennen sind. Es ist deshalb ungewiß, ob sich die gesamte entstandene Benzpyren-Menge analytisch nachweisen läßt. Man spricht deshalb nur von extrahierbarer Benzpyren-Menge übereinstimmend mit den Ergebnissen von Steiner (P. E. Steiner: Cancer Research 14, 103 (1954)).

Demnach wird auch in toxischer Hinsicht die biologische Aktivität von Benzpyren beeinflussbar sein von der Rußstruktur und von Lösungsvermittlern, zum Beispiel öligen Substanzen.

Nun einige unserer Versuchsergebnisse am Vorkammermotor OM 315 ($V_H = 8,3$ Liter). In der nächsten Abb. 18 ist die festgestellte Benzpyren-Menge aus 500 Liter Abgas über der Motorbelastung für konstante Drehzahlen $n = 2000$ U/min im Vergleich zum Rauchverhalten dargestellt. Hier zeigt sich deutlich, daß bei Teillasten bis zum Vollastpunkt nur verschwindend kleine Benzpyren-Mengen nachweisbar sind und daß dieser Kurvenverlauf durchaus der Rauchkurve entspricht, gemessen mit dem Bosch-Rauchgastester. Daraus ist abzuleiten, daß ein gut gewarteter nichtrauchender Dieselmotor vernachlässigbar kleine Benzpyren-Mengen emittiert. Dieses erfreuliche Ergebnis wird lei-

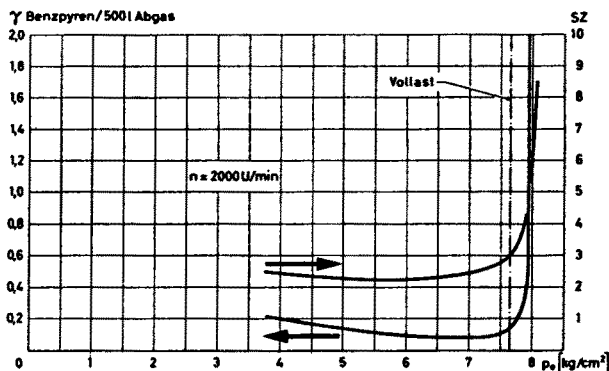


Abb. 18 Rauch- und Benzpyrenbildung beim OM 315, nach Messungen des Battelle-Instituts

der nicht bei anderen, besonders nicht bei niederen Drehzahlen bestätigt. So zeigt das nächste Bild, bei dem die Rauch- und Benzpyren-Kennfelder desselben Vorkammermotors verglichen werden, bei 1200 bis 1500 U/min und etwa $\frac{3}{4}$ Last einen «Buckel» bis $0,5 \gamma$ Benzpyren/500 Liter Abgas.

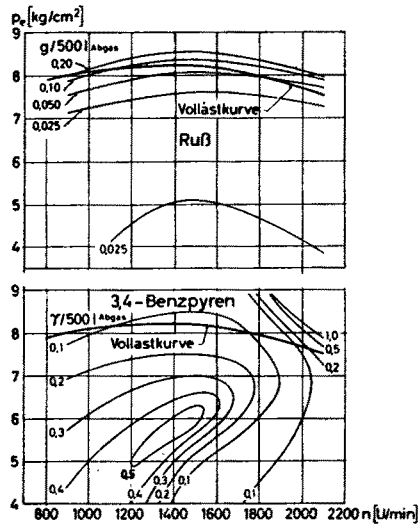


Abb. 19 Rauch- und Benzpyren-Kennfelder des OM 315, nach Messungen des Battelle-Instituts

Zur Erleichterung dieses Vergleiches wurden im Rauchkennfeld die mit dem Bosch-Gerät gemessenen Schwärzungszahlen SZ in g Ruß pro 500 Liter Abgas umgerechnet, also auf die gleiche Bezugsgröße gebracht wie die Benzpyren-Meßwerte (Abb. 19). Es läßt sich keine auffallende Übereinstimmung in der Feldstruktur feststellen mit Ausnahme des hohen Drehzahlbereiches entsprechend der vorangegangenen Abb. 18.

Wenn auch nicht in allen Fällen, so ließen sich doch gewisse Unterschiede in der Benzpyren-Emission feststellen, die offenbar durch das Verbrennungsverfahren bedingt sind. So ergaben sich bei der Untersuchung eines Direkt-einspritzmotors für $n = 2000$ U/min unterhalb $p_e = 7,5 \text{ kg/cm}^2$ fünf- bis zehnmal so hohe Werte, oberhalb $7,5 \text{ kg/cm}^2$ fallen sie ab bis auf $\frac{1}{30}$ der entsprechenden Vorkammerwerte.

Erwähnt sei noch, daß sich zunächst unerklärliche Differenzen zwischen Meßwerten, die zwar bei gleichem Betriebszustand, aber einige Monate später wiederholt wurden, mit abweichender Kraftstoffzusammensetzung begründen ließen. So war auch bei Peroxyd-Zusätzen, darunter auch Kerobrisol, eine Benzpyren-Steigerung feststellbar.

Wie bereits erwähnt, sind allerdings derartige Abhängigkeiten noch nicht klar überschaubar. Dafür wäre eine viel breitere Versuchsgrundlage notwendig.

7. Wartung und Entwicklungsstand als Faktoren der Rauchabgase

Eine der wichtigsten Einflußgrößen auf Verbrennung und Verbrennungsprodukte sind der Stand der Entwicklung des Motors und, wenn der als optimal zu betrachten ist, die Wartung des Motors. Es ist wohl erwiesen, daß die heutigen Motoren aus den verschiedensten Motorenwerken herausgehen in einem Zustand, der bezüglich Rauch, und das ist ja letzten Endes das Hauptargument, welches immer wieder gegen den Dieselmotor hervorgebracht wird, nicht zu beanstanden ist. Durch Einhaltung der von den Motorherstellern herausgegebenen Betriebsvorschriften kann der Dieselmotor auch bei sehr langen Laufstrecken auf einem Zustand gehalten werden, der in jeder Beziehung zu verantworten ist. Die Abb. 20 zeigt den Ausbauzustand eines unserer Direkt einspritzmotoren nach einer Laufstrecke von 258 000 km.

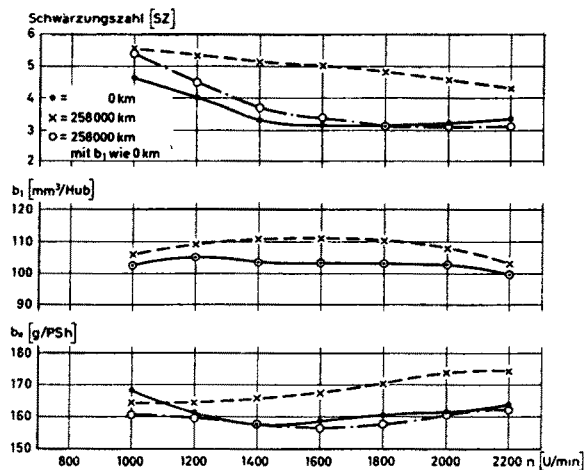


Abb. 20 Rauchverhalten in Abhängigkeit von der Laufstrecke

Der Motor wurde aus der Versuchserprobung herausgezogen, weil der Rauch sich verschlechtert hatte, auf den Prüfstand genommen und untersucht. Hierbei stellten wir fest, daß (aus irgendeinem hier unwesentlichen Grund) die Einspritzmenge sich erhöht hatte, wodurch dann also die Zunahme der Schwärzungszahl erklärlich war. Die Menge wurde wieder zurückgestellt, wie aus dieser Kurvendarstellung ersichtlich ist und nach dieser langen Laufstrecke war der Motor bezüglich Rauch, Leistung, spezifischen Verbrauch usw. praktisch wieder bei seiner ursprünglichen Abnahmekurve.

Der Zustand von Dieselmotoren nach noch längeren Laufstrecken (300 000 km und mehr) berechtigt zu der Behauptung, daß die Einhaltung der Betriebsvorschriften das A und O zur Erhaltung eines guten Motorzustandes ist.

Adresse des Autors: Dipl. Ing. H. Hoffmann, Abteilungsdirektor, Daimler Benz AG, 7 Stuttgart-Untertürkheim.