

# Das Problem der Schadstoffe beim starker Einsatz von Dieselmotoren unter Tage

Heinz Dreyer

*Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld, Postfach 220,  
D-3392, Clausthal-Zellerfeld*

---

## ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von den in den Abgasen von Dieselmotoren auftretenden Schadstoffen wie  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , KW und Ruß wird aufgezeigt, warum überwiegend Wirbel- oder Vorkammermotoren unter Tage eingesetzt werden.

Der Wert von Abgaskatalysatoren und Waschvorlagen ist nach bisherigen Erfahrungen zumindestens zweifelhaft. Eine entsprechend im Motor geführte Verbrennung zur Geringhaltung der Schadstoffmengen erscheint wirkungsvoller.

Für die Motoren werden Abgaskennlinien und für die Abgase Verwirbelungseinrichtungen verlangt.

Im Betrieb sind die Motoren auf ihre Abgaszusammensetzung und die Wetter auf ihre Schadstoffgehalte zu überwachen. Es wird gezeigt, wie dieses auf verhältnismäßig einfache Art und Weise mit ausreichender Genauigkeit erfolgen kann, wobei die erreichbare Meßgenauigkeit kritisch betrachtet wird.

Wegen vermehrten Einsatzes gleisloser Fahrzeuge, auch mit höherer Motorleistung, kommt der Motorwartung und -überwachung sowie der Wetterüberwachung zunehmend größere Bedeutung zu.

---

## EINFÜHRUNG

Zu Beginn der sechziger Jahre begann ein zunehmender Einsatz gleisloser Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren unter Tage. Der Einsatz dieser Fahrzeuge führte zu einer erheblichen Leistungssteigerung und ermöglichte gleichzeitig eine Erhöhung der Förderung auf den einzelnen Schachtanlagen im Erz- und Salzbergbau.

Von Anfang an war erkennbar, daß der Einsatz gleisloser Fahrzeuge unter Tage größeren Umfang erreichen würde. Bereits zu Beginn der Entwicklung war daher zu klären, ob die Schadstoffe der Abgase so gering gehalten und/oder so verdünnt werden konnten, daß ein gefahrloser Betrieb möglich sein würde.

## ABGASBESTANDTEILE

Betrachten wir zunächst die verschiedenen wesentlichen Abgasbestandteile wie  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , Kohlenwasserstoffe und Ruß (Tabelle 1).

$\text{CO}$  Kohlenmonoxid bildet sich bei unvollkommener Verbrennung und wirkt auf die Atemwege durch Bildung von  $\text{CO}$ -Hämoglobin.

$\text{CO}_2$  Kohlendioxid ist ein Verbrennungsprodukt. Der Gehalt ist im Abgas bei größter Motorleistung und vollkommener Verbrennung am höchsten. Bei höherem Gehalt in der Atemluft, aber ausreichendem Sauerstoffgehalt der Luft, lähmt es das Atemzentrum. Bei zu geringem Sauerstoffgehalt besteht Erstickungsgefahr.

$\text{NO} + \text{NO}_2$  Stickoxid bildet sich bei höherer Verbrennungstemperatur und oxidiert nach Abkühlung bei Temperaturen um  $150^\circ$  zum Teil zu  $\text{NO}_2$ . Es soll eine ähnliche Wirkung wie  $\text{CO}$  haben.  $\text{NO}_2$  bildet salpetrige Säure und führt in stärkerer Konzentration zu Lungenödemen. Da die schädigende Wirkung der Stickoxide erst nach längerer Zeit erkannt werden kann, ist bei Vergiftungserscheinungen sofortige ärztliche Behandlung und in der Regel Krankenhausaufenthalt notwendig.

$\text{SO}_2$  Schwefeldioxid wirkt ebenfalls auf die Atemwege und ist im Abgas entsprechend dem Schwefelgehalt des

TABELLE I  
Schadstoffe in Dieselabgasen

Bezeichnung	Zeichen	MAK-Wert ppm	Lebensge- fahr ppm	Schädliche Wirkungen	Gehalt im Abgas ppm	Erforderliche Verdünnung (x-fach)
Kohlen- monoxid	CO	50	3 000	mangelnder Sauerstoff- austausch	bis 1 200	24
Kohlen- dioxid	CO <sub>2</sub>	5 000	35 000 in 1/2 bis 1 h	Atemlähmung	bis 80 000	16
Stickstoff- monoxid	NO	(USA 25)		etwa wie CO	bis 800	(32)
Stickstoff- dioxid	NO <sub>2</sub>	5	200	Lungenödeme	bis 80	16
Schwefel- dioxid	SO <sub>2</sub>	5	400	Reizung Augen und Atemwege	Nachweis- barkeits- grenze	—
Formal- dehyd	HCHO	1	650	Reizung Augen, Atemwege u. Haut	<25	—
Acrolein	H <sub>3</sub> C <sub>3</sub> HO	0,1			bis 2 (nur bei direkter Einspr.)	20

Kraftstoffes enthalten. Die Menge ist wegen der Beschränkung des Schwefelgehaltes des unter Tage verwendeten Kraftstoffes (unter 0,4%) vernachlässigbar gering.

KW Im Abgas sind auch unverbrannte, anoxidierte Kohlenwasserstoffe enthalten. Sie wirken unterschiedlich. Die kritischsten scheinen Formaldehyd und Akrolein als kettenförmige Kohlenwasserstoffe (aliphaten) und Benzo(a)pyren als ringförmiger Kohlenwasserstoff (aromat) zu sein. Formaldehyd wirkt auf Atemwege und Haut, Akrolein ist in bestimmter Konzentration krebserregend.

Ruß Ruß tritt bei Sauerstoffmangel auf, ist selber inert und im Abgas feinverteilt als Aerosol vorhanden. Nur wegen des angelagerten Benzo(a)pyrens, das als krebserregend angesehen wird—hierüber wird an der Universität Heidelberg gearbeitet—ist der Rußgehalt von gewisser Bedeutung. Die noch offene Frage ist, ob Benzo(a)pyren vom Ruß inertisiert wird oder nicht. Die Mengen sind bei ausreichender Wetterführung wesentlich geringer als über Tage in Großstädten gemessene Werte.

#### VERBRENNUNGSVERFAHREN UND ABGASZUSAMMENSETZUNG

Welche Schadstoffmengen ergeben sich nun bei Einsatz von Verbrennungsmotoren unter Tage? Zur Beurteilung der Schadstoffgehalte in den Grubenwettern erschien ein California- oder Europa-Test mit Mengenbegrenzung wegen der unter Tage anders gelagerten Verhältnisse nicht zweckmäßig.

Unter Tage muß durch die Wetterführung gewährleistet sein, daß keine unzulässigen Gehalte von Schadstoffen auf-

treten, also die zulässigen maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen—die MAK-Werte—nicht überschritten werden. Die Gehalte in den Wettern können von der Menge und der Zusammensetzung der Abgase der Verbrennungsmotoren errechnet und die tatsächlichen Werte durch Messung in den Wettern nachgeprüft werden.

Zu Beginn des Einsatzes gleisloser Dieselfahrzeuge wurde die CO-Emission den weiteren Überlegungen zugrunde gelegt. Nimmt man eine maximale Abgasmenge (Sicherheitszuschlag 20%) von 0,136 m<sup>3</sup>/kWmin an und führt eine Wettermenge von 3,4 m<sup>3</sup>/kWmin zu, so errechnet sich eine mögliche Verdünnung der Abgase durch die Wetter um das 25fache. Bei Ottomotoren ist der CO-Anteil im Abgas sehr hoch, im Bereich von mehreren Prozenten. Bei einer 25fachen Verdünnung würde der CO-Gehalt in den Wettern, wenn nur 1% CO in den Abgasen enthalten wäre, noch mindestens 0,04% oder 400 ppm betragen, also weit über dem zulässigen MAK-Wert von 50 ppm liegen. Eine Verwendung von Otto-Motoren schied also abgesehen von Ausnahmen aus. Es mußten folglich Dieselmotoren eingesetzt werden, deren CO-Gehalt im Abgas wesentlich geringer ist und im Bereich um 500 ppm bei Nennleistung liegt. Bei einer 25fachen Verdünnung errechnet sich ein CO-Gehalt in den Wettern von 20 ppm, also unterhalb des MAK-Wertes.

Bei den Überlegungen über die Art der einzusetzenden Motoren wurde die Meinung vertreten, Dieselmotoren mit indirekter oder Zweistufenverbrennung, also Vor- oder Wirbelkammermotoren, zu verwenden. Nach der Art der Verbrennung wurde von diesen Motoren eine geringere Emission von Schadstoffen und auch bei Motoren mit

längeren Betriebszeiten ein stabileres Verhalten hinsichtlich der Abgaszusammensetzung erwartet, d. h. mit plötzlich ungünstig werdender Abgaszusammensetzung brauchte nicht gerechnet zu werden. Nach den bisherigen Betriebserfahrungen hat sich dies bestätigt.

Es wurde auch überlegt, Abgaskatalysatoren oder Waschvorlagen einzusetzen. Nach meinen Erfahrungen bleiben Abgaskatalysatoren weitgehend wirkungslos, weil ihre Ansprechtemperatur oberhalb der normal erreichbaren Auspufftemperatur liegt. Nach durchgeführten Messungen ist eine Auspufftemperatur von 400° nach Nachlassen der Leistung, also z. B. nach Verlassen einer Wendel, in wenigen Minuten auf Werte um 200° abgeklungen und damit der Katalysator wirkungslos.

Auch von Abgaswaschern verspreche ich mir keine Verbesserung der Verhältnisse. Abgesehen von der begrenzten Wassermenge von z. B. 200 l im Wascher werden diese bei einem 150 kW Motor von etwa 15–20 m<sup>3</sup> Abgas in der Minute durchströmt. Anfangs tritt eine Aufladung an Schadstoffen ein, die später wieder vermehrt abgegeben werden. Möglich erscheint auch eine Aufoxidierung von NO zu NO<sub>2</sub>, was meines Wissens noch nicht untersucht worden ist. Der Rußausstoß wird nicht wesentlich verringert, was am Abgasaustritt des Waschers z. B. an Grubenlokomotiven mit Waschvorlagen, wegen des Schlagwitterschutzes, zu beobachten ist. Nach einer Untersuchung des Batelle-Institutes sind Waschvorlagen zur Verbesserung der Abgaszusammensetzung ungeeignet. Demzufolge wurden generell keine Waschvorlagen verlangt, Abgaskatalysatoren nur in Ausnahmefällen, z. B. bei besonders ungünstiger Abgaszusammensetzung.

### ABGASCHARAKTERISTIK

Zur besseren Beurteilung der Verhältnisse wurde für die Bauartzulassung der Fahrzeuge die Beibringung einer Abgascharakteristik, und zwar die sogenannte Teillastkurve, vorgeschrieben, aus der der CO-, CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Gehalt der Abgase sowie der Kraftstoffverbrauch bei der eingestellten Leistung hervorgehen (Fig. 1). Die Teillastkurve, d. h. die Messung bei Nenndrehzahl und unterschiedlicher Belastung mit Angabe des mittleren effektiven Arbeitsdruckes im Zylinder— $p_{me}$ —ist für die Beurteilung des Abgasverhaltens eines Motors aussagekräftiger als die Drehmomentkurve.

Aufgrund des Verlaufes der CO-Kurve, die bei höherem Mitteldruck plötzlich steil ansteigt, wurde und wird die obere Leistung der Motoren für den Unter-Tage-Einsatz festgelegt und zwar etwa 10% unterhalb der Übertagennennleistung der Motoren. Die Einspritzpumpe muß bei dieser Einstellung plombiert werden. Auch bei Motoren mit höherer Laufleistung war damit die Gewähr gegeben, daß sich die Abgaszusammensetzung nicht unzulässig verändert.

Was sagt nun die Abgascharakteristik zu den einzelnen Abgasbestandteilen aus? Bei neuen Wirbelkammermotoren

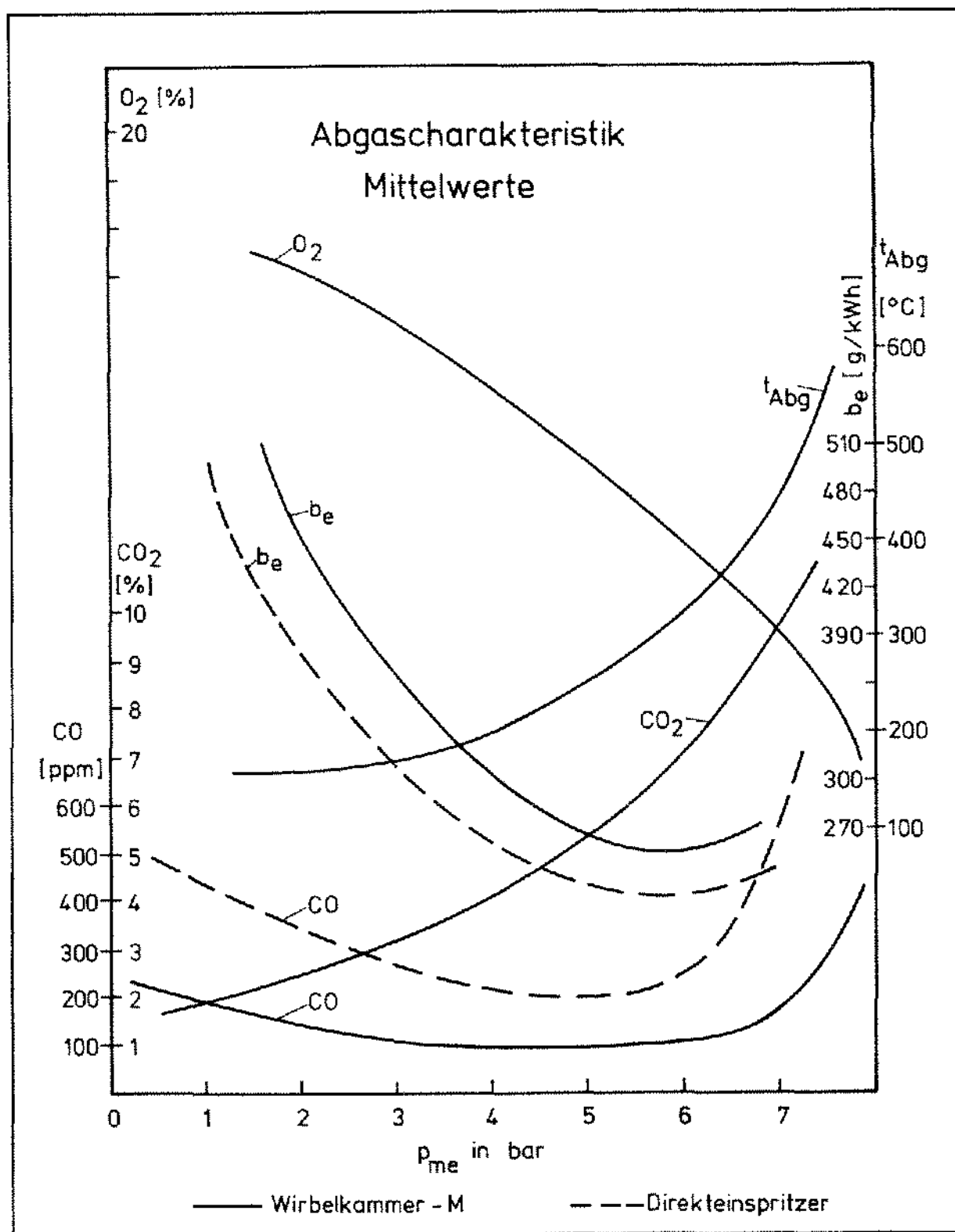
liegen die CO-Werte um 200 ppm, bei Direkteinspritzern beim Doppelten und ungünstigerem Kurvenverlauf. CO<sub>2</sub> ist im Abgas theoretisch bis 10% enthalten, wegen der Leistungsbeschränkung der Untertagemotoren bis etwa 8%.

Bereits zu Beginn des Fahrzeugeinsatzes wurden die NO<sub>x</sub>-Emissionen betrachtet, insbesondere ob sich das NO in den Wettern zu NO<sub>2</sub> aufoxidiert. Bei den vorliegenden Wittertemperaturen und der Verweilzeit in den Wettern bis zum Ausziehschacht wurde seinerzeit mit einer nennenswerten Aufoxidierung von NO zu NO<sub>2</sub> nicht gerechnet, was sich nach bisherigen Meßergebnissen ebenfalls bestätigt hat. Mit aus diesem Grund wurde seinerzeit auf die Ausrüstung der Dieselmotoren mit einer Waschvorlage, von der man damals noch glaubte, daß sie die Stickoxidemission durch Rückhalt im Wasser verringern würde, verzichtet. Der NO<sub>x</sub>-Gehalt liegt unter 750 ppm, bei Direkteinspritzung etwa doppelt so hoch, der NO<sub>2</sub>-Gehalt unter 10% des NO-Gehaltes. Die NO<sub>x</sub>-Emission ist der kritischste Abgasbestandteil mit der größten erforderlichen Verdünnung.

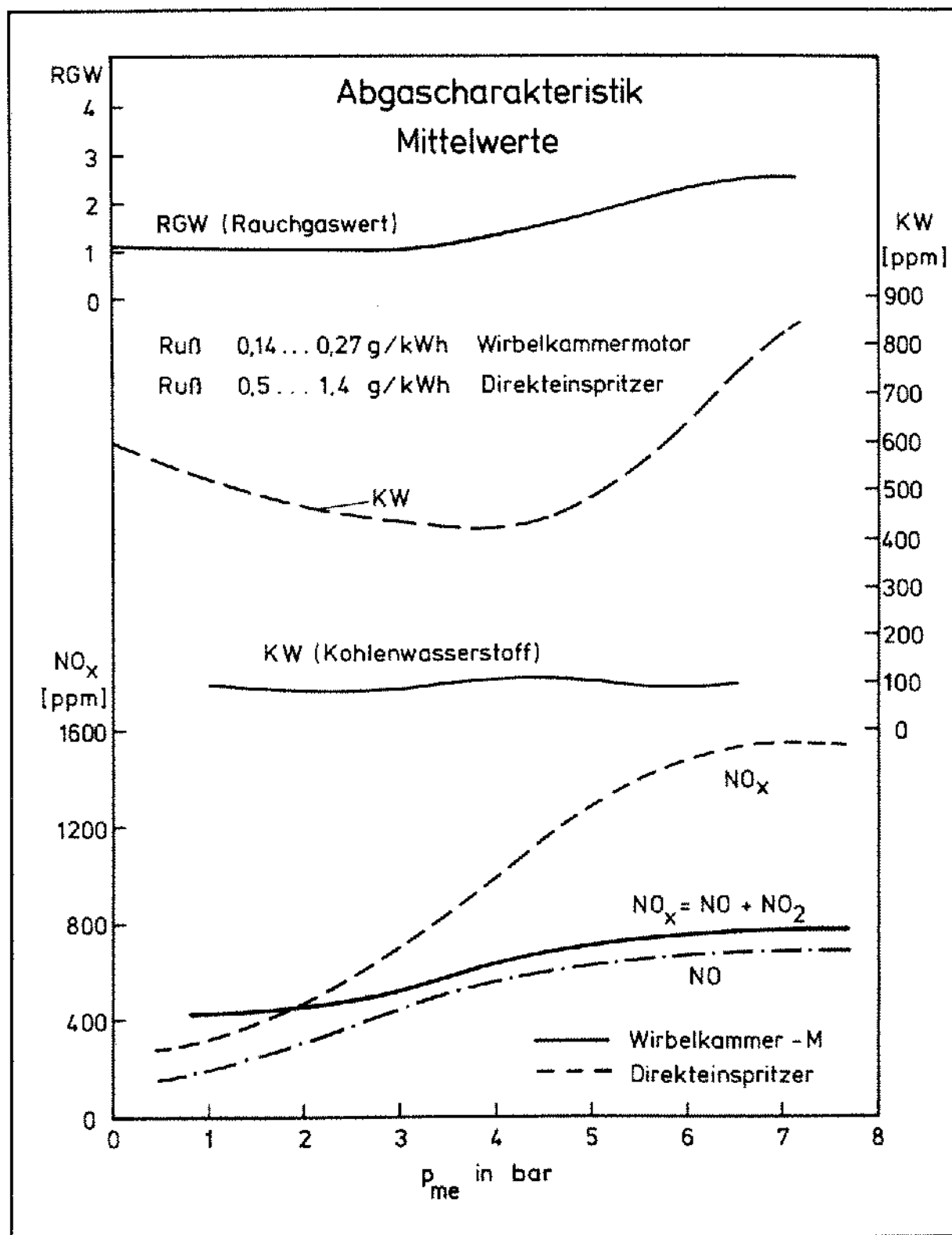
Bei den Kohlenwasserstoffen liegt deren Gesamtkonzentration in den Abgasen um 150 ppm, bei Direkteinspritzern bei etwa dem 4fachen. Besondere Bedeutung hat dabei das Formaldehyd, dessen MAK-Wert bei 1 ppm liegt. Dieser Wert ist gleichzeitig die Geruchsschwelle. Ein anderer Kohlenwasserstoff, das Akrolein, das als krebserregend gilt, ist im Abgas von Wirbelkammermotoren nur an der Nachweisbarkeitsgrenze enthalten. Die Rußemission liegt beim Wirbelkammermotor etwa um die Hälfte niedriger als bei Direkteinspritzern.

Entscheidend für die Abgaszusammensetzung ist also der Verbrennungsvorgang und die Führung desselben (Tabelle 2). Zur Ausnutzung des Kraftstoffes ist eine möglichst vollständige Verbrennung erwünscht, mit entsprechend hohen Verbrennungstemperaturen. Hinsichtlich der Abgasbestandteile steht dem die Stickoxidbildung gegenüber, die bei höherer Verbrennungstemperatur zunimmt. Die einander widersprechenden Forderungen werden bislang am besten von den Dieselmotoren mit indirekter Einspritzung erfüllt. Wegen der gleichmäßigen Verbrennung ist bei diesen der CO-Anteil sehr günstig.

Die bisherigen Baureihen von Motoren mit indirekter Kraftstoffeinspritzung enden mit 12 Zylindern und einer Leistung von etwa 210 kW. Diese Leistung reicht für Großlader und Muldenkipper bei Einsatz in Steigungen nicht aus. Es werden daher neuerdings zur Erhöhung der Motorleistung Wirbelkammermotoren mit Abgasturboladern und Ladeluftkühlung eingesetzt. Nach den bisherigen Abgaskennlinien sind bei diesen Motoren keine ungünstigeren Abgaszusammensetzungen zu erwarten. Allerdings ist eine besondere Regelung zur Verhütung eines erhöhten Rußausstoßes in der Beschleunigungsphase erforderlich, weil der Abgasturbolader nicht so schnell auf Drehzahländerungen reagiert.



Figur 1a. Abgascharakteristik.



Figur 1b. Abgascharakteristik.

TABELLE 2  
Schadstoffe in Abgasen von Dieselmotoren

Verbrennungsstufe		Vollkommen		Unvollkommen			
Reaktionsprodukt des Kraftstoffes	Wasser $H_2O$	Kohlen-dioxid $CO_2$	Schwefel-dioxid $SO_2$	Kohlen-monoxid $CO$	Kohlen-wasser-stoffe $C_n H_m$	Aldehyde	Ruß (Benzo-a-pyren)
Reaktionsprodukt der Verbrennungsluft		Stickstoffdioxid $NO_2$		Stickstoffmonoxid $NO$			

### ABGASMENGE, ABGAS-VERWIRBELUNGSEINRICHTUNG

Von Bedeutung ist aber nicht nur der Schadstoffgehalt in den Abgasen sondern auch die Abgasmenge. Die Abgasmenge errechnet sich abhängig vom Luftüberschuß und stöchiometrischen Verfahren nach Tabelle 3. Außerdem kann sie aus Drehzahl und Hubvolumen errechnet werden, zu dem nach Herstellerangaben ein Zuschlag von 5% zu machen ist. Diese Werte erscheinen den tatsächlichen Verhältnissen angemessen.

Diese Abgasmengen müssen möglichst vollständig mit den Frischwettern vermischt werden. Deshalb wurden bereits zu Beginn des Einsatzes gleisloser Fahrzeuge unter Tage zur besseren Vermischung der Abgase mit den Wettern Verwirbelungseinrichtungen verlangt. Bisher werden überwiegend Abgasdiffusoren eingesetzt, die theoretisch eine Verdünnung von 1:4 bringen. Lochdüsen können eine Verdünnung von 1:10 bringen, jedoch ist hier die Rückwirkung auf den Motor, z.B. bei Verstopfung der Löcher, zu beachten. Unbeschadet sonstiger Nachteile wird der Rußausstoß bei größerem Rückdruck höher, was unerwünscht ist.

Der gleichmäßigen Vermischung der Abgase mit den Wettern kommt große Bedeutung zu, weil sonst leicht die MAK-Werte überschritten werden können (Schlierenbildung) und eine selbsttätige Vermischung zumindest längere Zeit dauert.

Ein gewisser Selbstvermischungseffekt tritt durch die Ausströmgeschwindigkeit im Auspuff auf. Bei z. B. einem 147 kW Motor, einer Abgasmenge zwischen 11 und 16 m<sup>3</sup>/min und bei 100 cm<sup>2</sup> Ausströmfläche treten Geschwindigkeiten von 18,2 bis 26,7 m/s entsprechend 66 bzw. 96 km/h auf.

### ÜBERWACHUNG

Zum Einsatz der Dieselmotoren in Bergwerken gehört eine gute Wartung und eine Überwachung der Motoren auf die Abgaszusammensetzung. Ferner sind die Wetter auf Schadstoffe, insbesondere bei ungünstigen Betriebsbedingungen, wie in langen, sonderbewetterten Strecken und

beim Laden von Haufwerk in kurzen, sonderbewetterten Streckenabzweigen zu überwachen. Durch die Kurzfahrten der Lademaschine und die erhöhten Ladespiele, die die Zeit zum ausreichenden Freispülen des Ortes und der Verdünnung der aus dem Haufwerk freiwerdenden Sprenggase einschränken, ergeben sich ungünstige Verhältnisse.

### MESSUNGEN MIT PRÜFRÖHRCHEN, MESSGENAUIGKEIT

Die betriebliche Überwachung der Abgase der Motoren und der Schadstoffe in den Wettern wird durch Messungen mit Prüfröhrchen durchgeführt. Vergleichsmessungen, bei denen mit bis zu 4 gleichen Prüfröhrchen gleichzeitig gemessen wurde, haben keine wesentlichen Unterschiede der Meßwerte ergeben.

Bei der Auspuffmessung wird zur Niedrighaltung der Temperatur ein Verlängerungsschlauch mit den Prüfröhrchen an der Gasspülpumpe angeschlossen (Fig. 2). Auch hierbei ergeben sich keine Unterschiede der Meßwerte, wenn der Schlauch vor Einsetzen des Prüfröhrchens ausreichend von den Abgasen durchströmt wurde. Bei  $NO_x$  kann damit gerechnet werden, daß die für das Prüfröhrchen zulässige Temperatur von z. B. 40° (bei einem Hersteller) nicht überschritten wird. Vom gleichen Hersteller wird angegeben, daß bei 50° ein Viertel des Meßwertes in Abzug zu bringen ist. Die jeweils eingesetzten Prüfröhrchen gehen aus der Tabelle 4 hervor.

Über die Meßgenauigkeit der Prüfröhrchen hat ein Hersteller Serienmessungen durchgeführt. Bei Einhaltung der Grenzbedingungen, z. B. Lagertemperatur unter 30°, kein längerer Einfluß von Sonnenlicht usw., liegen 70% der Meßwerte im Bereich von  $\pm 10\%$ , bezogen auf die tatsächliche Konzentration. Extremwerte lagen vereinzelt bei  $\pm 23\%$ . Diese Meßgenauigkeit ist für die Untertageverhältnisse ausreichend. Wenn 25% Abweichung angenommen werden, ergeben sich bei 2 ppm  $NO_2$  Abweichungen von unter 1 ppm, bei 10 ppm  $CO_2$  unter 3 ppm und bei 1500 ppm  $CO_2$  solche unter 400 ppm, diese aber nur bei maximal 4% der Messungen. Dies bedeutet, daß bereits mit einer Wiederholungsmessung etwaige größere Meßfehler erkannt werden können.

TABELLE 3

Berechnung der Abgasmenge Stöchiometrisch

## 1. Berechnungsgrundlagen:

## a. Zusammensetzung des Dieseldraftstoffes

Kohlenstoffanteil  $c = 0,865$  Wasserstoffanteil  $h = 0,13$  Schwefelanteil  $s = 0,005$ b. Brennstoffverbrauch  $b = \frac{0,27}{60} = \frac{1}{220} \text{ kg/kW min}$ 

## 2. Zur Verbrennung von 1 kg Kraftstoff erforderliche Luftmenge:

$$L_{\text{theor}} = \left( \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} \right) \cdot \frac{22,41}{0,21} [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

$$= \left( \frac{0,865}{12} + \frac{0,13}{4} + \frac{0,005}{32} \right) \cdot \frac{22,41}{0,21} = 11,2 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Je kW ist erforderlich

$$L = 11,2 \cdot b = \frac{11,2}{220} = 0,05 \text{ Nm}^3/\text{kW min}$$

## 3. Verbrennungserzeugnisse bei vollkommener Verbrennung je kg Kraftstoff Bei einem Luftüberschuß

	1,4	1,6	1,8
	Nm <sup>3</sup> /kg	Nm <sup>3</sup> /kg	Nm <sup>3</sup> /kg
CO <sub>2</sub> 1,867 · c = 1,867 · 0,865 =	1,615	1,615	1,615
H <sub>2</sub> O 11,2 · h = 11,2 · 0,13 =	1,455	1,455	1,455
SO <sub>2</sub> 0,7 · s = 0,7 · 0,005 =	0,0035	0,0035	0,0035
O <sub>2</sub> 0,21 · (-1) · L <sub>min</sub> =	0,942	1,411	1,8815
N <sub>2</sub> 0,79 · λ · L <sub>min</sub> =	12,38	14,157	15,926
Gesamtgasmenge	16,3955	18,6415	20,8810
	16,4	18,64	20,9 Nm <sup>3</sup> /kg

## 4. Abgasmenge je kW min

## a. stöchiometrisch

$$\text{Für } \lambda = 1,4 \quad Q_{\text{Abgas}} = 16,4 \cdot b = \frac{16,4}{220} \approx 0,075 \text{ Nm}^3/\text{kW min}$$

$$\text{Für } \lambda = 1,6 \quad Q_{\text{Abgas}} = 18,64 \cdot b = \frac{18,64}{220} \approx 0,084 \text{ Nm}^3/\text{kW min}$$

$$\text{Für } \lambda = 1,8 \quad Q_{\text{Abgas}} = 20,9 \cdot b = \frac{20,9}{220} \approx 0,095 \text{ Nm}^3/\text{kW min}$$

## b. Berechnung nach Drehzahl und Hubvolumen

$$Q_{\text{Abgas}} = \frac{n \cdot V_{\text{Hub}}}{p \cdot 2} = 0,11 \text{ Nm}^3/\text{kW min}$$

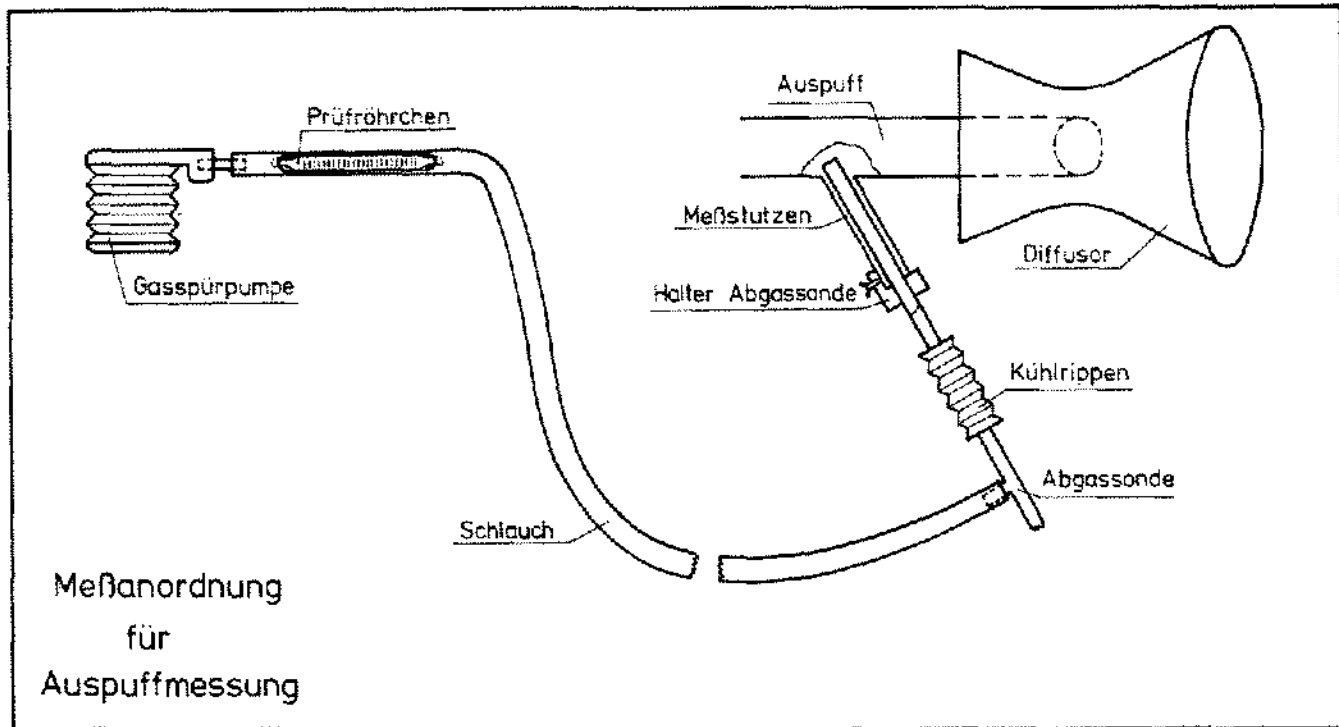
Wer ganz sicher gehen will, z. B. wenn Meßergebnisse an den MAK-Wert-Grenzen liegen, möge getrost drei Messungen durchführen. Mit diesen oben geschilderten einfachen Messungen können also sowohl die Motorabgase auf ihre Zusammensetzung als auch die Wetter auf ihren Gehalt an Schadstoffen mit ausreichender Genauigkeit und verhältnismäßig einfachen Mitteln überwacht werden.

## ÜBERWACHUNG DER MOTOREN

Zur Überwachung der Einstellung der Motoren, von der die Abgaszusammensetzung abhängig ist, wurde vorgeschrieben, daß der CO-Gehalt der Abgase monatlich (oder nach Betriebsstunden) werksseitig und einmal jährlich von einem Sachverständigen (TÜV) zu messen ist. Die CO-

Messung erfolgt werksseitig mit Gasspürpumpe und Prüfröhrchen und die jährliche Untersuchung durch Probenahme und Analyse im Labor. Die Proben werden bei Leerlauf und bei möglichst großer Last, z. B. Heben und Senken der beladenen Schaufel, Befahren von Steigungen mit mindestens 10% Steigung, genommen bzw. gemessen. Bei Motoren mit 2 Auspuffstutzen, z. B. V-Motoren, soll in beiden Stutzen gemessen werden.

Als zulässig im Betrieb gilt ein Wert von 0,12% entsprechend 1200 ppm CO. Selbst hierbei ist eine Überschreitung des MAK-Wertes von 50 ppm bei der auf Nennleistung bezogenen vorgeschriebenen Wettermenge von 3,4 m<sup>3</sup>/kWmin, also 25 facher Verdünnung, nicht zu erwarten (1200:25 = 48 ppm).



Figur 2. Messanordnung Auspuffmessung.

TABELLE 4

Prüfröhrchen für die Messung von Schadstoffen in Dieselabgasen und in Wettern

Schadstoff	Röhrchentyp	Temperaturbereich °C	Hubzahl	Meßbereich ppm	Farbumschlag
CO	0,5 c	-10 bis + 90	2 10	100-700 5-150	braungrün
CO	10 a 10 b	-10 bis + 90	1 10	100-3 000 10-300	braungrün
CO <sub>2</sub>	0,1%	-10 bis + 40	5	1 000-10 000	violett
CO <sub>2</sub>	1%	0 bis + 50	1	10 000-200 000	violett
CO + CO <sub>2</sub>	Analysenrohr	-10 bis + 70	2	CO 200-2 500 CO <sub>2</sub> 20 000-120 000	braun violett
NO <sub>x</sub>	0,5 a	0 bis + 40	5	1-10	grau
NO <sub>x</sub>	2 a	0 bis + 40	5 10	5-100 2- 50	dunkel- blaugrau
NO <sub>x</sub>	100 b 100 c	0 bis + 50	5	100-1000	braun/ rotbraun
NO <sub>2</sub>	0,5 c	0 bis + 40	5	1- 10	graublau
NO <sub>2</sub>	2 c	0 bis + 40	5 10	5-100 2- 50	dunkel- blaugrau
SO <sub>2</sub>	1/a	0 bis + 50	10	1- 20	weiß
HCHO	0,002	0 bis + 40	5	2- 42	rosa



Zur besseren Beurteilung des Abgasverhaltens des Motors hat sich die CO-Messung im Leerlauf bei höherer Drehzahl und zusätzlich die Rußmessung, bei der die Schwärzung eines Filterpapiers bestimmt wird, eingeführt. Bei ordnungsgemäßigem Zustand der Motoren kann die Schwärzungszahl unter 2 gehalten werden. Insbesondere die Rußmessung gibt frühzeitig Anhaltspunkte, wenn die Einstellung des Motors verbessert werden muß. Am besten wäre für die Rußmessung eine Messung unter Last über den Drehzahlbereich, die ein kontinuierliches Rußmeßgerät für die Meßdauer und eine Lastvorrichtung für den Motor erfordert. Wegen der Wandlernaufheizung ist die Meßzeit begrenzt.

Zur Leistungsbestimmung der Motoren kann gleichzeitig CO<sub>2</sub> gemessen werden. Aus der Abgascharakteristik ergibt sich dann der Leistungspunkt, wenn die Drehzahl gleichzeitig bestimmt wurde. Der mittlere effektive Arbeitsdruck im Zylinder kann dann leicht nach der Formel

$$p_{me} = \frac{1200 P}{V_h n} \text{ bar}$$

ermittelt werden ( $P$  = Leistung in kW,  $V_h$  = Hubvolumen, in Litern,  $n$  = Drehzahl/min).

Bei der jährlichen Überwachung der Dieselmotoren durch Sachverständige haben sich insbesondere bei Motoren kleiner Leistung (2 und 3 Zylinder) Überschreitungen des CO-Wertes von 1200 ppm (0,12%) ergeben und die Motoren mußten neu eingestellt werden. Insgesamt gesehen ist diese Überschreitung nicht bedenklich, weil es sich um verhältnismäßig geringe Abgasmengen (bei einem 20 kW Motor etwa 2 m<sup>3</sup> Abgas/min) handelt und die Wettermenge nach den größeren Fahrzeugen bemessen wird, mit Leistungen über 100 bis 240 kW. Bei einer angenommenen Auslegung für ein 65 kW Fahrzeug und ein Befahrungsfahrzeug von 20 kW stehen mindestens 300 m<sup>3</sup> Wetter/min zur Verfügung, das Verhältnis Abgas zu Wettermenge ist dann mindestens 1:150. Auch in diesem Fall wird daher bei Nennleistung des Ladefahrzeuges keine unzulässige Schadstoffkonzentration in den Wettern auftreten können.

Für die Überwachung der Motorabgase hat sich bisher die Messung von CO und von Ruß als ausreichend erwiesen (Tabelle 5). Formaldehyd, Akrolein und Schwefeldioxid

TABELLE 5  
Ergebnisse von Auspuff- und Wettermessungen

Datum der Messung	CO ppm		CO <sub>2</sub> ppm		NO <sub>x</sub> ppm		NO <sub>2</sub> ppm	
	Auspuff	Wetter	Auspuff	Wetter	Auspuff	Wetter	Auspuff	Wetter
Mai 1967	220 (Leerlauf) 180 (Hubarb.)	10	50 000 (Leerlauf) 40 000 (Hubarb.)	2 000 800	200 (Leerlauf)	10 2		3 0,5
August 1967	160	10	80 000	2 000 4 000 1 000	600	12		1
September 1967	150		50 000	400				
Februar 1968	300		65 000	2 000 1 500 1 000	380			
Februar 1972	200	<10	60 000	1 000		20	60	1
Juli 1972	200	5		2 500				0,8
Mittelwerte 1972				bis 2 000				1,5
bei								
Stichproben 1972	450	5		bis 2 000		bis 12		1
September 1974		5		1 000		3		0,3
November 1974		5		2 000				
Mittelwerte 1975				bis 1 500				bis 2,5
Höchstwerte 1975				3 500				4,5
Stichprob. 1976				bis 2 500				bis 2,5
				max. 3 000				0,5
Stichprob. 1977	200			max. 2 000	400			0,5

brauchen nicht regelmäßig überwacht zu werden, weil der MAK-Wert von Formaldehyd mit 1 ppm an der Geruchsschwelle liegt, und die Gehalte von Akrolein und  $\text{SO}_2$  an der Nachweisbarkeitsgrenze liegen.

Eine Stickoxidsmessung ist problematisch und auch nicht erforderlich, wie noch ausgeführt wird. Eine Verschlechterung der Verbrennung läßt sich am leichtesten und sichersten durch Messung des CO- und Rußgehaltes in den Abgasen feststellen, weil das CO-Prüfröhrchen hohe zulässige Meßtemperatur ( $90^\circ$ ) hat. Die eingesetzten Meßmethoden sind auch für die erforderliche Genauigkeit ausreichend.

### ÜBERWACHUNG DER WETTER

Zur Wetterüberwachung wurden Meßprogramme entwickelt. Sie werden laufend überprüft. Nach diesen Meßprogrammen werden von den Werken und der Aufsichtsbehörde die Wetter überwacht. Als die ersten Meßreihen mit Gasspürpumpe und Prüfröhrchen durchgeführt wurden, hat sich schnell herausgestellt, daß der mengenmäßig größte Abgasbestandteil mit 2–8% das  $\text{CO}_2$  ist. Dieses läßt sich also auch in den Wettern immer in zur Messung genügender Konzentration nachweisen. Darüber hinaus ist der Farbumschlag des Prüfröhrchens nach violett bei ungünstigen Lichtverhältnissen, wie sie unter Tage vorliegen können, gut erkennbar. Es tritt keine Entfärbung, wie z.B. bei Stickoxidprüfröhrchen, auf. Die zulässige Meßtemperatur liegt bei  $50^\circ$  und ist für die Unter-Tage-Verhältnisse mit Wittertemperaturen von zum Teil über  $40^\circ$ , wie im Salzbergbau, noch geeignet.

Die  $\text{CO}_2$ -Meßwerte liegen außer in großen Wetterströmen in der flachen Lagerung um 1000 ppm und in der steilen Lagerung um 1500 ppm. Zur Überprüfung der Wetterbelastung mit Motorabgasen ist diese Messung völlig ausreichend, zumal gleichzeitige Messungen anderer Abgasbestandteile etwa gleiche Verhältnisse zueinander erbrachten und Abgasmenge zu Wettermenge nach den Messungen etwa korrelieren.

Dies trifft jedoch nicht für Stickoxide zu, die bei der Sprengarbeit, die in der Regel im Schichtwechsel durchgeführt wird, und beim Laden von Haufwerk frei werden. Hier ist ein unzulässiger Gehalt an  $\text{NO}_2$  am gefährlichsten. Daher wird neben  $\text{CO}_2$  zusätzlich  $\text{NO}_2$  gemessen. Die Meßwerte im Betriebsteil mit Dieselmotor liegen um 2 ppm  $\text{NO}_2$ .

Wenn Werte über 3000 ppm  $\text{CO}_2$  und 3 ppm  $\text{NO}_2$  festgestellt werden, sollen zunächst zusätzlich CO und NO gemessen werden. Ergeben sich Meßwerte oberhalb der MAK-Werte, so muß der Betrieb gestundet werden, bis die Konzentration abgeklungen sind. Ggf. muß das die höhere Konzentration verursachende Fahrzeug zur Motorüberholung.

Durchgeführte CO-Messungen haben im Salzbergbau in der flachen Lagerung Werte um 10 ppm und in der steilen Lagerung deutlich unter 10 ppm CO ergeben.

Wie notwendig die Wetterüberwachung ist, geht aus Tabelle 6 hervor. Wie ersichtlich, steigt die insgesamt in den Bergwerken eingesetzte Motornennleistung ständig an, wobei die je kW zur Verfügung stehende Wettermenge entsprechend abnimmt und bereits Werte von  $1,94 \text{ m}^3/\text{kWmin}$

TABELLE 6

Entwicklung der in Dieselfahrzeugen installierten Leistung, der Wettermengen und des Verhältnisses von Wettermengen zu Motornennleistung

Werk	Motornennleistung			Gesamtwettermenge			Verhältnis		
	gesamt						Wettermengen zu		
	1974	1975	1976	1974	1975	1976	1974	1975	1976
					$\text{m}^3/\text{min}$				
1	1 653	1 124	510	4 800	4 700	4 800	2,90	4,18	9,41
2	482	328	474	4 300	3 400	3 400	8,92	10,37	7,17
3	759	635	816	5 500	5 800	5 800	7,25	9,13	7,11
4	1 492	1 545	1 581	10 400	10 400	10 400	6,97	6,73	6,58
5	860	866	883	1 430	3 400	3 400	1,66	3,93	3,85
6	5 142	5 148	5 515	18 800	18 750	19 800	3,66	3,64	3,59
7	805	751	1 197	5 548	4 000	4 000	6,89	5,33	3,34
8	1 613	1 464	1 618	7 000	5 400	5 400	4,34	3,69	3,34
9	980	1 003	1 001	3 300	3 300	3 300	3,37	3,29	3,30
10	730	736	922	3 000	3 000	3 000	4,11	4,08	3,25
11	4 146	4 266	4 785	16 000	13 500	13 500	3,86	3,16	2,82
12	4 286	4 081	5 135	14 000	14 000	13 585	3,27	3,43	2,65
13	1 014	1 194	1 314	3 037	3 250	3 250	3,00	2,72	2,47
14	3 602	5 046	5 039	10 580	11 680	11 400	2,94	2,31	2,26
15	5 348	6 383	6 362	11 500	13 500	13 500	2,15	2,11	2,12
16	3 703	5 252	5 215	9 800	10 260	10 110	2,65	1,95	1,94
Insgesamt	36 615	39 822	42 367	128 995	128 340	128 645	3,52	3,22	3,04

erreicht hat, demgegenüber sind 3,4 m<sup>3</sup>/kWmin vorgeschrieben. Auch wenn berücksichtigt wird, daß nicht alle Fahrzeuge gleichzeitig eingesetzt sind, Bohrfahrzeuge nur beim Fahren dieselgetrieben und beim Bohren elektrisch angetrieben sind, die Motoren nicht voll ausgelastet sind—bei den größten unter Tage eingesetzten Motorleistungen, nämlich bei den Lademaschinen liegt die Auslastung nach neueren Untersuchungen um 40%—kommt der Überwachung der Wetter zunehmend größere Bedeutung zu. Die größte Motorleistung tritt nach früheren Untersuchungen beim Befahren von sogenannten Wendeln auf, die als Schrägstrecken die Sohlen zur Freizügigkeit des Fahrzeugverkehrs verbinden.

#### LITERATUR

- Brosinsky, H. Die Konzentration der Abgase aus Verbrennungskraftmaschinen in geschlossenen Räumen. *Motortechnik Zeitschrift* 23-7: 1-4.
- Eitel, M. Abgase von Dieselmotoren. *VDI-Dienst* Nr. 53: 65-68.
- Förster, H.J. Der Fahrzeugantrieb der Zukunft—Revolution oder Evolution. *Erdöl-Erdgas-Zeitschrift* 87: 282-301.
- Garthe, H. Die besondere Eignung der Deutz-Dieselmotoren für den Untertagebetrieb. *Kali und Steinsalz* 7: 101-108.
- Gerbert, H. Verbrennungsrechnungen für flüssige Brennstoffe. *VDI-Bildungswerk BW* 158: 1-7.
- Henschler, D. Wirkungen nitroser Gase auf den Menschen. *Luftverunreinigung* 1962 S. 18-23.
- Lindecke, B. und E. Michalke. Die Abgasgehalte in den Wettern. *Kali und Steinsalz* 7: 90-101.
- Malschaert, F.P. Belgische Versuche zur Messung der Rauchdichte der Abgase von Fahrzeugdieselmotoren. *Automobiltechnische Zeitschrift* 65: 63-70.
- Rheinisch-Westfälischer Technischer Überwachungsverein e. V., Diverse Abgaskennlinien 1964-1977.
- Riedel, H. Probleme der Reinigung von Dieselmotor—Auspuffgasen. *Automobiltechnische Zeitschrift* 65: 70-73.