

6. Untersuchungen an Staubfiltern

Von Dr.-Ing. habil. U. S c h m i d t , Berlin

Die Versuche, welche bei der Versuchsanstalt und Amtlichen Prüfstelle für Kraftfahrzeuge der Technischen Hochschule Berlin im Auftrage des Reichsverkehrsministeriums an ölbenetzten Luftfiltern durchgeführt wurden, haben eingehende Untersuchungen darüber notwendig gemacht, welchen Einfluß die Anzahl der Filterscheiben, die Ölverteilung, die festgehaltene Ölmenge, die Luftgeschwindigkeit usw. auf den Verlauf des Filterwirkungsgrades und des Filterwiderstandes haben. Die benutzte Versuchsapparatur entspricht völlig der im Zwischenbericht Nr. 85 dargestellten und ist in Abb. 1 noch einmal wiedergegeben.

1. Einfluß der Staubart

Bei Vergleichsversuchen mit verschiedenen Staubarten zeigte es sich, daß sowohl der Filterwirkungsgrad als auch der Filterwiderstand einen ganz verschiedenen Verlauf nahmen. Abb. 2 zeigt das Ergebnis des Vergleichs von Straßenstaub und Flugasche. Bei Benutzung von Flugasche ergab sich ein sehr schneller Abfall des Wirkungsgrades und ein sehr rascher Anstieg des Filterwiderstandes, während bei Benutzung von Straßenstaub die Wirkungsweise des Filters erheblich besser war. Die Verteilung der Korngrößen war, wie Abb. 3 zeigt, in beiden Fällen zwar verschieden, jedoch ist das sehr abweichende Verhalten des Filters nicht allein hieraus zu erklären. Die Mikroaufnahmen (Abb. 4a und b) zeigen, daß die Kornstruktur in beiden Fällen wesentliche Abweichungen aufweist. Während die Flugasche zum großen Teil aus hohlen, annähernd kugeligen Körperchen besteht, sind im Straßenstaub Körper sehr verschiedener Oberflächenform vorhanden. Das Ergebnis dieses unterschiedlichen Staubaufbaues ist, daß die Flugasche eine verhältnismäßig geringe Schüttdichte mit großen Hohlräumen zwischen den einzelnen Staubteilen aufweist, während die Schüttdichte des Straßenstaubes erheblich größer ist und infolge der unregelmäßigen Oberflächenstruktur eine enge Packung der Staubteilchen mit nur sehr kleinen Hohlräumen ergibt. Infolgedessen wird durch ein bestimmtes Gewicht Flugasche eine erheblich größere Ölmenge gebunden als durch Straßenstaub. Da der Wirkungsgrad eines Luftfilters in weitem Maße von der zur Verfügung stehenden Ölmenge abhängig ist, muß dementsprechend der Filterwirkungsgrad bei Benutzung von Flugasche in Abhängigkeit von der zugeführten Staubmenge ein schnelleres Absinken als bei Benutzung von Straßenstaub aufweisen. Durch die geringe Schüttdichte der Flugasche tritt ferner ein stärkeres Zusetzen des Filters und damit eine schnellere Erhöhung des Filterwiderstandes in Abhängigkeit von der festgehaltenen Staubmenge als bei Verwendung von Straßenstaub ein.

Wenn auch die Flugasche wegen der Einfachheit der Beschaffung größerer und gleichmäßigerer Mengen (sie entstammt den Elektrofiltern von Großkraftwerken) Vorteile besitzt, so sollte doch bei der Anstellung von Filterversuchen auf den grundsätzlichen Unterschied im Verhalten verschiedener Staubarten entsprechende Rücksicht genommen werden.

2. Einfluß der Scheibenzahl

Die handelsüblichen ölbenetzten Filter bestehen aus einer Reihe von hintereinander angeordneten gelochten Blechen verschiedener Oberflächenstruktur. Wenn durch Versuche der Anfangswirkungsgrad einer Anzahl derartiger Scheiben bestimmt ist, so läßt sich auf rechnerischem Wege der Wirkungsgrad einer beliebigen Scheibenzahl feststellen nach der Formel

$$A_n = 1 - (1 - a)^n,$$

wobei A den Filterwirkungsgrad, n die Scheibenzahl und a den Anfangswirkungsgrad einer Scheibe bedeutet. (Versuche haben ergeben, daß bei deren richtiger Durchführung der Anfangswirkungsgrad der einzelnen hintereinander geschalteten Scheiben einander gleich ist.) Abb. 5 zeigt den Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit von dem Wirkungsgrad einer einzelnen Scheibe für verschiedene Scheibenzahlen.

Ähnlich kann bei Filtern aus Faserstoff, wenn der Wirkungsgrad einer bestimmten Einheitslänge bekannt ist, der Wirkungsgrad einer beliebigen Länge nach der gleichen Formel errechnet werden.

3. Die theoretische Ermittlung des Wirkungsgrades aus der statistischen Ölverteilung

Die Verteilung des Öles auf der Filteroberfläche ist in keinem Falle gleichmäßig. Eine gleichmäßige Ölverteilung würde in Abhängigkeit von der festgehaltenen Staubmenge ein Konstantbleiben des Wirkungsgrades bis zur Sättigung der vorhandenen Ölmenge mit Staub ergeben. Um eine theoretische Untersuchung der Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der zugeführten bzw. festgehaltenen Staubmenge zu ermöglichen, wurde angenommen, daß die statistische Verteilung des Öls auf der Oberfläche von einem bestimmten Höchstwert bis zum Wert 0 herunter so erfolge, daß sämtliche dazwischen liegenden Ölschichtstärken annähernd proportional vertreten sind. Dann muß sich unter der Voraussetzung einer direkten Beziehung zwischen der an einer bestimmten Oberflächenstelle vorhandenen Ölmenge und der dort festzuhaltenden Staubmenge ein Verlauf des Filterwirkungsgrades in Abhängigkeit von der festgehaltenen Staubmenge gemäß der in Abb. 6 rechts oben dargestellten Figur ergeben. Mit Hilfe dieser Annahme ist man im Stande, den momentanen Filterwirkungsgrad, d. h. das Verhältnis der im Augenblick festgehaltenen zur zugeführten Menge rechnerisch zu erfassen. Die Abb. 6 bringt das Ergebnis einer derartigen Untersuchung für 5 Filterscheiben bei Annahme verschiedener Anfangswirkungsgrade der einzelnen Filterscheiben von 10 bis 50 %. Als Abszisse tritt in der Abbildung der Faktor $b \cdot z$ auf, in welchem z die zugeführte Staubmenge und b das Verhältnis von Anfangswirkungsgrad einer Scheibe zu dem Staubgewicht, welches von einer Scheibe überhaupt festgehalten werden kann, darstellt. Die Abbildung zeigt, daß die Kurven für die Anfangswirkungsgrade 40 und 50 % in ihrem Verlauf den früher gemessenen Wirkungsgraden entsprechender Scheibenzahlen gleichen und geben damit einen vorläufigen Beweis dafür, daß die Annahme der statistischen Ölverteilung berechtigt ist. Abb. 7 zeigt das Ergebnis der rechnerischen Ermittlung des Wirkungsgradverlaufs unter Zugrundelegung der gleichen Annahmen für einen konstanten Anfangswirkungsgrad einer Scheibe und verschie-

dene Scheibenzahlen. Die Abbildung läßt erkennen, daß die Verwendung größerer Scheibenzahlen wegen des flachen Verlaufs der Wirkungsgradkurven im Anfangsteil insbesondere bei geringem Anfangswirkungsgrad einer Scheibe zweckmäßig ist.

Durch Erhöhung der Scheibenzahl steigt nicht nur der Gesamtwirkungsgrad, sondern auch die insgesamt festzuhaltende Staubmenge, und zwar proportional der Scheibenzahl. Dieses ist in den Abb. 6 und 7 nicht zu erkennen, da aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht die zugeführten Staubmengen, sondern der Faktor $b \cdot z$ als Abszisse gewählt wurde. Trägt man dagegen den momentanen Wirkungsgrad über der zugeführten Staubmenge direkt auf und verschiebt die Abszisse für die verschiedenen Scheibenzahlen jeweils so, daß die Endpunkte der Kurve des Wirkungsgrades einer Scheibe, aufgetragen über der festgehaltenen Staubmenge, übereinander liegen, so ergeben sich die in Abb. 8 dargestellten Verhältnisse. Man erkennt dann, daß schon von 6 Scheiben an die Wirkungsgradkurven praktisch völlig zur Deckung gelangen und nur in ihrem vorderen besonders wirkungsvollen Teil entsprechend der größeren Staubaufnahmefähigkeit einer größeren Scheibenzahl verlängert werden. Die Vergrößerung der Scheibenzahl bedeutet damit eine erhebliche Vergrößerung der Lebensdauer eines Filters, wobei allerdings die Frage des zunehmenden Filterwiderstandes nicht berücksichtigt ist.

Um festzustellen, wie weit sich die unter den obigen Annahmen errechenbaren Kurven mit den wirklich gemessenen decken, ist in Abb. 9 für einen bestimmten Anfangswirkungsgrad und eine entsprechend der vorhandenen Ölmenge festzuhaltende Staubmenge der momentane Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der zugeführten Staubmenge errechnet und als ausgezogene Kurve in die Abbildung eingetragen worden. Ferner ist in die Abb. als gestrichelte Kurve der gemessene Verlauf des Wirkungsgrades aufgenommen worden. Man erkennt, daß bis herunter zu 30 % der gemessene und gerechnete Filterwirkungsgrad völlig zur Deckung gelangt, während unterhalb dieser Grenze ein plötzliches Abknicken des gemessenen Wirkungsgrades erfolgt, welches durch die soeben angestellten Überlegungen nicht zu erklären ist.

Infolgedessen wurden weitere Versuche mit einer einzelnen Filterscheibe angestellt. Die Oberfläche der Filterscheibe wurde mit einer bestimmten Ölmenge versehen und in Abhängigkeit von der zugeführten Staubmenge das Gewicht des festgehaltenen Staubes festgestellt. Die Luftgeschwindigkeit wurde konstant auf 2,5 m/sec gehalten, die Belastung der Filterfläche betrug bei allen Versuchen zwischen 10 und 20 mg/cm²h. Für die Vergleichsversuche wurde als Filtermaterial Turbogewebe verwandt und hierbei die Ölmenge und die Staubart geändert. Die Abbildungen 10 bis 12 zeigen die Ergebnisse dieser Versuche. Über der Abszisse, welche die zugeführte Staubmenge z bzw. die festgehaltene Staubmenge x darstellt, ist als Ordinate die festgehaltene Staubmenge x bzw. der momentane Wirkungsgrad y aufgetragen. Abb. 10 zeigt die Versuchsergebnisse bei Bestäubung mit Flugasche und einer Ölmenge von 0,1 g. Die Kurve $x = f(z)$ stellt die festgehaltene Staubmenge in Abhängigkeit von der zugeführten dar. Hieraus wurde die Kurve $y = f(z)$, d. h. der momentane Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der zugeführten Staubmenge und die Kurve $y = f(x)$, d. h. der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der festgehaltenen Staubmenge, ermittelt. Man erkennt, daß die Neigung der Kurve $x = f(z)$ sehr

bald praktisch konstant wird, daraus ergibt sich ein gleichbleibender Wirkungsgrad. Die Kurve $y = f(x)$, welche als charakteristische Filterkurve aufzufassen ist, zeigt nach anfänglich starkem und annähernd geradlinigem Abfall von einem Anfangswert $a = 0,725$ ein scharfes Abknicken und erreicht einen praktisch konstanten Endwirkungsgrad von $y = 0,18$. Die Abszisse, bei welcher dies geschieht, entspricht einer festgehaltenen Staubmenge von $z = 0,12$ g. Der Wert für y entspricht einer Daueraufnahmefähigkeit der Filterscheibe von $1,77$ mg/cm²h.

Der so ermittelte Verlauf der Kurve des momentanen Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der festgehaltenen Staubmenge entspricht im Anfangsteil völlig den in den vorhergehenden Darlegungen gemachten, in Abb. 6 und 7 zeichnerisch dargestellten Annahmen über die statistische Ölverteilung und weist nur im unteren Teil plötzlich eine der Abb. 9 entsprechende Abweichung in die Horizontale auf. Der bei 5 Filterscheiben gemessene Verlauf des Wirkungsgrades tritt demnach auch bei Untersuchung einer einzelnen Scheibe auf.

Eine Erklärung hierfür bieten eine Reihe von Versuchen, welche über die Staubaufnahmefähigkeit von Öl vorgenommen wurden und als deren Ergebnis hier berichtet werden soll, daß eine bestimmte Ölmenge ein je nach der Staubart unterschiedliches Staubgewicht festzuhalten im Stande ist, wobei die Filterbelastung keinen Einfluß auf den Wirkungsgrad besitzt, d. h. innerhalb einer gegebenen Grenze ist die Aufnahmegeschwindigkeit des Staubes durch das Öl außerordentlich groß. Von der ermittelten Grenze an sinkt diese Geschwindigkeit jedoch plötzlich ganz erheblich und nimmt einen konstanten Wert an, d. h. von diesem Zeitpunkt an ist eine ölbenetzte Oberfläche nur noch im Stande, in der Zeiteinheit eine begrenzte Staubmenge festzuhalten. Diese Staubmenge ist nicht mehr verhältnismäßig der Filterbelastung. Hierdurch ändert sich der Wirkungsgrad des Filters von diesem Zeitpunkt an im wesentlichen umgekehrt proportional mit der Belastung. Der Umschlag in dem Verhalten des Öles kann erklärt werden, wenn man berücksichtigt, daß der auf die ölbenetzte Fläche auftreffende Staub solange sofort vom Öl benetzt wird, bis die gesamte Ölmenge in den zwischen den Staubteilchen vorhandenen Hohlräumen gebunden ist. Von diesem Zeitpunkt an muß zur Befestigung weiterer Staubteilchen an der Oberfläche weiteres Öl durch Kapillarkwirkung an die Oberfläche gezogen werden. Dieser Vorgang ist jedoch zeitabhängig und von einer gewissen geringen Größe der Bestäubung an unabhängig von der auftreffenden Staubmenge.

Der Verlauf der in Abb. 10 wiedergegebenen Kurven ist ganz ähnlich, wenn man als Versuchsstaub statt Flugasche Straßenstaub verwendet. Die Ergebnisse des entsprechenden Versuchs sind in Abb. 11 dargestellt. Die charakteristische Filterkurve $y = f(x)$ zeigt einen völlig gleichen Verlauf wie in Abb. 10, jedoch tritt der Knick nicht wie vorher bei 0,12 gr festgehaltener Staubmenge, sondern bei 0,38 gr auf, d. h. die gleiche Ölmenge ist in der Lage, eine dreimal so große Menge Straßenstaub wie Flugasche festzuhalten, ein Ergebnis, welches mit den eingangs dieser Arbeit beschriebener Beobachtungen im Einklang ist und diese versuchsmäßig bestätigt. Der Anfangswirkungsgrad ist praktisch der gleiche geblieben, die im Endzustand festzuhaltende Staubmenge beträgt $2,9$ mg/cm²h.

Abb. 12 zeigt das Ergebnis der Filterversuche, wenn bei Benutzung von Straßenstaub die auf die Filteroberfläche aufgebrauchte Ölmenge auf den 3-fachen Betrag erhöht wird. Der Knick in der

charakteristischen Kurve tritt in diesem Falle bei 1,3 gr zugeführter Staubmenge auf, was auch ungefähr dem 3-fachen Betrag des früher bereits ermittelten entspricht. Die im Dauerbetrieb festzuhaltende Staubmenge ist ebenfalls gestiegen, erreicht jedoch selbstverständlich nicht einen dreimal so großen Wert wie früher.

Abb. 13 zeigt die Verhältnisse an einem anderen Filtermaterial bei Beschickung mit Straßenstaub und Benetzung mit 0,1 gr Öl. Der Anfangswirkungsgrad beträgt 65 %, der Knick der charakteristischen Kurve tritt bei 0,3 gr zugeführter Staubmenge auf, die im Dauerbetrieb festzuhaltende Staubmenge beträgt ebenfalls 2,9 mg/cm²h, d. h. abgesehen von dem etwas verschiedenen Anfangswirkungsgrad sind beide Materialien praktisch gleichwertig.

Die Ergebnisse der Einzeluntersuchungen von Filterscheiben geben damit einen Aufschluß über den in Abb. 9 dargestellten Unterschied zwischen der rechnerisch und versuchstechnisch ermittelten Wirkungsgradkurve. Sie zeigen ferner, daß die statistische Verteilung des Öles auf der Filteroberfläche den angenommenen Werten in den meisten Fällen entspricht und daß einer bestimmten von der Filteroberfläche festgehaltenen Ölmenge eine entsprechende Staubhaltefähigkeit des Filters zugeordnet ist. Auf Grund der Kenntnis dieser Kurven für ein bestimmtes Material und eine entsprechende Staubsorte ist man in der Lage, den Verlauf des Filterwirkungsgrades in Abhängigkeit von der zugeführten Staubmenge für beliebig viele Filterscheiben voraus zu berechnen.

4. Die festgehaltene Ölmenge

Im letzten Absatz ist nachgewiesen worden, daß der Verlauf des Filterwirkungsgrades und die festzuhaltende Staubmenge in direktem Zusammenhang mit der auf der Filteroberfläche befindlichen Ölmenge steht. Es ist deshalb für eine Reihe von Filtermaterialien, die willkürlich herausgegriffen wurden und weder eine Auswahl noch eine umfassende Zusammenstellung darstellen sollen, die festgehaltene Ölmenge unter verschiedenen Betriebszuständen ermittelt worden. Es zeigt sich dabei, daß die Ölmenge, welche eine bestimmte Filterfläche festhält, von der Luftgeschwindigkeit, mit welcher das Filter beaufschlagt wird, stark beeinflusst wird. Abb. 14 zeigt die von 3 verschiedenen Filtermaterialien festgehaltenen Ölmengen in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit. Es wurden Scheiben von 18 cm² Oberfläche benutzt, welche vor dem Versuch reichlich mit Öl benetzt und dann einem Luftstrom konstanter Geschwindigkeit ausgesetzt wurden. Der Versuch wurde solange fortgesetzt, bis keine Gewichtsveränderung des Filters mehr festgestellt werden konnte. Man erkennt, daß mit zunehmender Luftgeschwindigkeit die vom Filter festgehaltene Ölmenge abfällt und daß diese Ölmenge weiter erheblich von der Beschaffenheit der Filteroberfläche abhängt.

Da zu erwarten war, daß die Ölmenge, außer von der Luftgeschwindigkeit, von der Zähigkeit des Öles beeinflusst wird, wurde für ein Filtermaterial die Abhängigkeit der festgehaltenen Ölmenge von der Viskosität des Filteröles ermittelt. Es wurden 3 Öle mit einer Viskosität zwischen 56 und 980 cp bei 20° C benutzt. Nach Abb. 15 verläuft die Kurve im oberen Bereich annähernd horizontal und fällt mit sinkender Viskosität stark ab. Bei der Auswahl von Filtermaterialien, welche besonders lange Wirkungsdauer ergeben

sollen, ist also auf eine entsprechende Ölhaltefähigkeit der Filteroberfläche und auf die Verwendung entsprechender Öle zu achten.

5. Der Filterwiderstand

Außer dem Verlauf der Kurve des Filterwirkungsgrades ist der jeweilige Filterwiderstand bei der Untersuchung eines Filters von besonderem Interesse. Es erscheint zweckmäßig, diesen Filterwiderstand nicht in Abhängigkeit von der zugeführten, sondern von der festgehaltenen Staubmenge zu betrachten, da er durch die festgehaltene Staubmenge allein beeinflusst wird. In Abb. 2 ist bereits gezeigt worden, daß der Widerstand eines bestimmten Filters von der benutzten Staubart abhängig ist. Der Filterwiderstand (Filterwiderstandszahl ξ) ist definiert als der Druckverlust in mm WS, der bei einer Luftgeschwindigkeit von 1 m/s hervorgerufen wird. Damit ergibt sich der Druckverlust für eine beliebige Luftgeschwindigkeit zu

$$h = v^2 \cdot \xi,$$

wobei v die Luftgeschwindigkeit m/s und ξ die Widerstandszahl bedeutet.

Wenn die Definition der Widerstandszahl richtig sein soll, so muß die Widerstandszahl von n Filterscheiben gleich der n -fachen Widerstandszahl einer Filterscheibe sein. Versuche in dieser Richtung haben die Brauchbarkeit der definierten und auf versuchsmäßigen Wege ermittelten Widerstandszahl für verschiedene Filtermaterialien ergeben. Abb. 16 zeigt das Ergebnis dieser Versuche für 1 bis 10 Filterscheiben und 2 verschiedene Materialien. Man erkennt, daß sich in Abhängigkeit von der Filterscheibenzahl gerade Linien für die Widerstandszahl des Gesamtfilters ergeben. Die Widerstandszahl bietet damit einen Maßstab für den Vergleich der bei Verwendung verschiedener Filtermaterialien zu erwartenden Anfangswiderstände und für die Ermittlung des auftretenden Druckverlustes in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit und der Scheibenzahl, wobei zu bemerken ist, daß eine Abweichung vom quadratischen Gesetz ($h = \xi \cdot v^2$) zwar vorhanden ist, jedoch in den in Frage kommenden Grenzen der Luftgeschwindigkeit vernachlässigt werden kann.

6. Die Verschmutzung

Außer dem Anfangswert des Druckverlustes ist die Kenntnis der Widerstandszunahme eines Filters mit zunehmender Verschmutzung wichtig. Die Erhöhung des Durchflußwiderstandes mit zunehmender Verschmutzung erfolgt durch Verringerung der Durchtrittsquerschnitte für die Luft. Man kann deshalb versuchen, einen Beiwert für die Verschmutzung aus dieser Verengung der Durchtrittsquerschnitte und der dadurch entstehenden Erhöhung der Luftgeschwindigkeit, welche eine quadratische Erhöhung des Widerstandsbeiwerts zur Folge hat, zu ermitteln. Die Formel für den gesamten Verlauf des Widerstandes wäre dann

$$\xi_{x_n} = \xi_0 \left[\frac{1}{(1 - s x_1)^2} + \frac{1}{(1 - s x_2)^2} + \dots + \frac{1}{(1 - s x_n)^2} \right]$$

In dieser Formel bedeutet ξ_{x_n} den Widerstandsbeiwert einer Filterkombination nach der Gesamtaufnahme von x gr. Staub. n bedeutet die Anzahl der Filterscheiben, ξ_0 den Widerstandsbeiwert einer sauberen Filterscheibe, $x_1, x_2 \dots x_n$ die von den einzelnen Filterscheiben festgehaltenen Staubmengen und s den Verschmutzungsbeiwert. Je größer dieser Wert ist, um so empfindlicher ist das untersuchte Filter gegen Verschmutzung. Abb. 17 zeigt, daß der auf Grund der angenommenen Formel zu ermittelnde Verlauf des Widerstandsbeiwertes sich in den zu erwartenden Grenzen brauchbar mit den durch Versuche ermittelten Werten deckt.

7. Zusammenfassung

Die nähere Untersuchung der Wirkungsweise von ölbenetzten Staubfiltern setzt die Lösung einer ganzen Reihe von Teilaufgaben voraus.

Es wurde gezeigt, daß der Verlauf des Filterwirkungsgrades von der benutzten Staubart in starkem Maße abhängt.

Unter Annahme einer entsprechenden statistischen Verteilung des Öles auf der Filteroberfläche lassen sich die Wirkungsgradkurven im Voraus berechnen und werden in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Kurven gefunden.

Die zweckmäßige Methode zur Kennzeichnung der Wirkung von Filterblechen wird in der Ermittlung des Wirkungsgrades einer Filterscheibe erblickt. Der Verlauf dieser Kurven, welche in Abhängigkeit von der festgehaltenen Staubmenge aufgetragen werden, zeigt einen deutlichen Knick, dessen Lage von der Staubart und der aufbrachten Ölmenge abhängig ist. Die Entstehung dieses Knickes kann durch Sättigungserscheinungen der Ölmenge mit Staub erklärt werden.

Die Ölhaltefähigkeit, welche für die Lebensdauer des Filters maßgeblich ist, hängt von der Oberflächenbeschaffenheit des Filtermaterials, der Luftgeschwindigkeit und der Viskosität des benutzten Öles ab.

Der Druckverlust in einem Filter kann durch einmalige Bestimmung der Widerstandszahl des Filtermaterials für jede Scheibenzahl und jede Luftgeschwindigkeit berechnet werden. Für die Empfindlichkeit eines Filters gegen Zusetzen durch den festgehaltenen Staub kann eine Verschmutzungszahl definiert werden, welche in Kombination mit dem Widerstandsbeiwert den Verlauf der Widerstandskurve des Filters in Abhängigkeit von der festgehaltenen Staubmenge rechnerisch zu ermitteln gestattet.

Aussprache

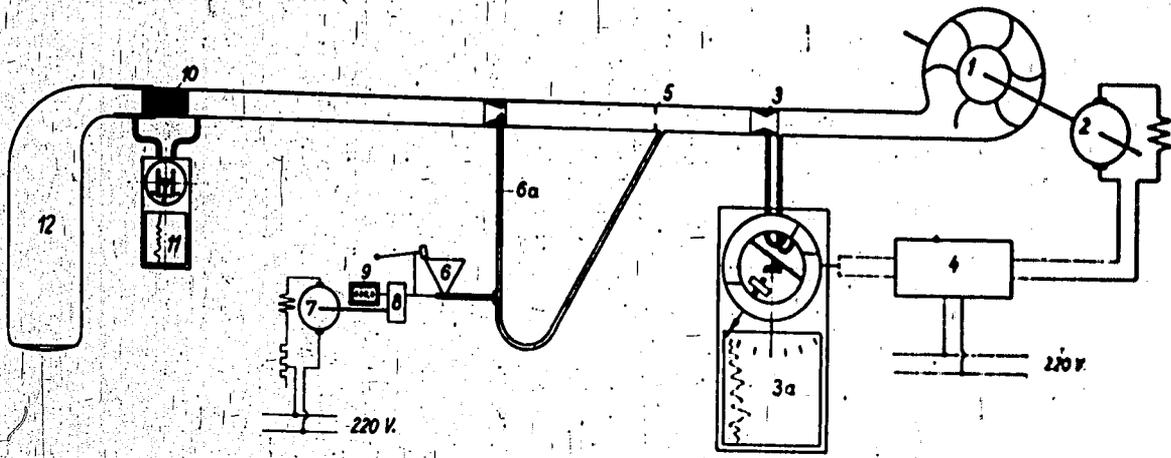
Im Anschluß an den Vortrag von U. Schmidt, Berlin, teilt Richter, Wien, mit, daß Pfeiffer, Wien, ein Luftfilter nach dem Fliehkraftprinzip entwickelt habe, welches schon durch Einbau bei Feuerungsanlagen Eingang in die Praxis gefunden habe. Auch zur Nachreinigung des Gases von Fahrzeuggaserzeugern werde dieser Filter bereits ausgenutzt, und zwar ohne die zusätzliche Benutzung eines Flüssigkeitsfilters.

Zum Zwecke der Staubausscheidung benutzt das Filter das Prinzip der Wirbelsenke. In einen Zylinder wird die stauberfüllte Luft mit einer gewissen Geschwindigkeit tangential eingeführt und zentral abgeleitet. In der Fortsetzung des Zylinders wird der Staub abgeführt. Ein Ende der Wirksamkeit des Filters tritt erst ein, wenn der gesamte Staubbehälter mit ausgeschiedenem Staub angefüllt ist. Die Wirksamkeit des Filters läßt sich durch Verkleinerung des Durchmessers beliebig vergrößern. Die baulichen Abmessungen sind im Laufe der Entwicklungsarbeiten soweit herabgesetzt worden, daß die Unterbringung in einem Fahrzeug möglich ist.

U. Schmidt, Berlin, erwiderte darauf, daß Staubfilter, deren Wirkung auf der Benutzung der Zentrifugalkraft beruht, seines Wissens schon seit langer Zeit bekannt sind. Er selbst habe bereits in den Jahren 1929/30 mit amerikanischen und deutschen Filtern dieser Bauart Versuche gemacht, weitere Versuche seien an der TH Braunschweig von Düll durchgeführt worden. Nach seinen Erfahrungen ist der Wirkungsgrad dieser Filterbauart bei hoher Motordrehzahl und Motorbelastung gut. Mit sinkender Motordrehzahl und Motorbelastung fällt jedoch die Luftgeschwindigkeit im Filter und im quadratischen Verhältnis zur Luftgeschwindigkeit die Reinigungswirkung. Infolgedessen haben derartige Filter bisher bei Benutzung in Kraftfahrzeugen nicht voll befriedigen können. Wenn die Filterquerschnitte für die höchste auftretende Luftgeschwindigkeit bemessen werden, so wird zwangsläufig während eines großen Teiles der Betriebsdauer das Filter infolge der nicht ständig auftretenden Höchstgeschwindigkeit der Luft mit erheblich verschlechtertem Wirkungsgrad arbeiten. Wird umgekehrt das Filter einer mittleren Luftgeschwindigkeit angepaßt, so ist der Druckverlust und damit der Leistungsverlust bei höchster Luftgeschwindigkeit nicht mehr tragbar. Die alleinige Benutzung eines vom Luftstrom angetriebenen Zentrifugalfilters dürfte damit unzweckmäßig erscheinen. Dagegen kann es sich als Vorfilter zur Grobausscheidung der hauptsächlichlichen Staubmengen einen entsprechenden Wirkungskreis erobern. Für die Benutzung des Zentrifugalfilters ohne Nachfilter besteht die Möglichkeit der Erzeugung der Zentrifugalwirkung durch eine äußere Kraftquelle, beispielsweise einen kleinen Elektromotor, dessen Drehzahl unabhängig von der Luftgeschwindigkeit im Ansaugrohr konstant bleibt.

Richter, Wien, teilte daraufhin mit, daß dem Absinken der Schleuderwirkung durch Herabsetzung der Luftgeschwindigkeit bei Drosselbetrieb des Motors durch Unterteilung des Filters in mehrere parallel geschaltete einzelne Zellenfilter begegnet werden kann, die mit Hilfe des Drosselklappengestänges mit steigender Motorbelastung schrittweise parallel zueinander eingeschaltet werden können. Bei der Beurteilung des Absinkens des Wirkungsgrades bei geringerer Motorbelastung sei außerdem zu bedenken, daß hierbei auch kleinere absolute Staubmengen angesaugt würden. Ein großer Vorteil des Zentrifugalfilters besteht in der Brauchbarkeit in allen Lagen.

Auf eine Anfrage von Künzel, Mannheim, teilt U. Schmidt, Berlin, mit, daß ein Einfluß der Beschaffenheit und Herkunft des benutzten Versuchsstaubes auf den Verlauf des Filterwirkungsgrades und die Höhe des Wirkungsgrades zu beobachten ist. Es wird die Aufgabe weiterer Forschungen sein, den Einfluß der Staubart auf den Wirkungsgradverlauf des Filters zu klären.



1. Gebläse 2. Gebläse-Motor 3. u. 3a. Staurand u. schreibende Ringwaage zur Messung der Luftmenge
 4. Regler für Gebläsemotor durch Ringwaage 3a gesteuert 5. Blende 6. Staubaufgabe mit Klopfhammer
 6a. Zuführung von Staub-Luftgemisch 7. u. 8. Motor und Übersetzungsgetriebe für Staubaufgabe 9. Umkehrungs-
 zähler für 6 10. Luftfilterpatrone 11. schreibender Differenzdruckmesser 12. Filtersock zur Aufnahme des Reststaubes

Abb. 1. Versuchsanlage.

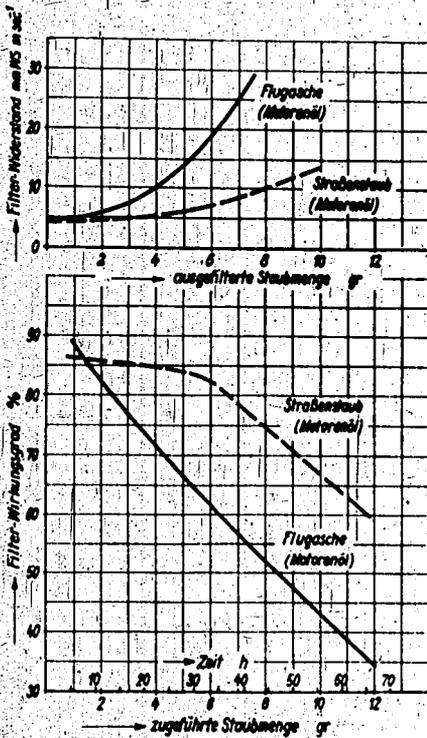


Abb. 2. Momentaner Filterwirkungsgrad und Widerstand eines Versuchsfilters bei Beschickung mit Flugasche und Straßenstaub.

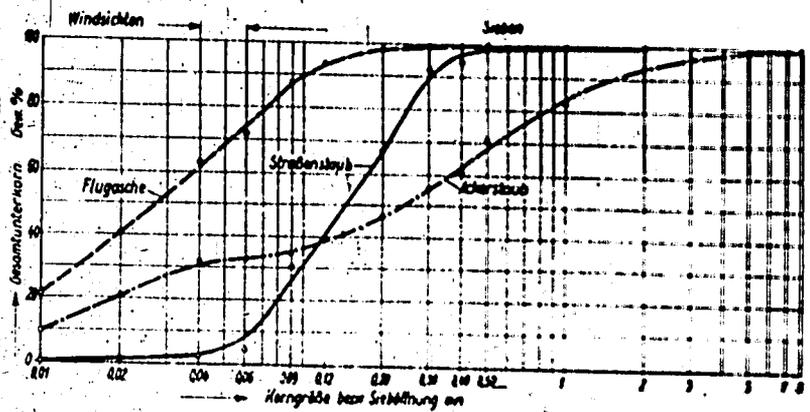


Abb. 3. Gesamtkornzusammensetzung der Staubproben.

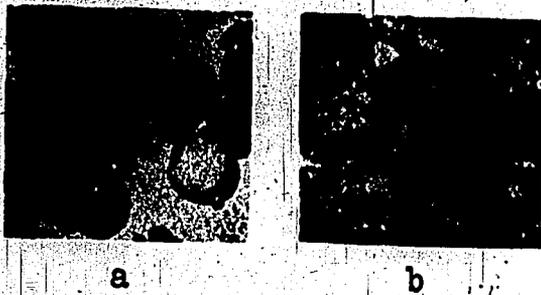


Abb. 4. Mikroaufnahmen des Versuchstaubes.
 a Flugasche
 b Straßenstaub

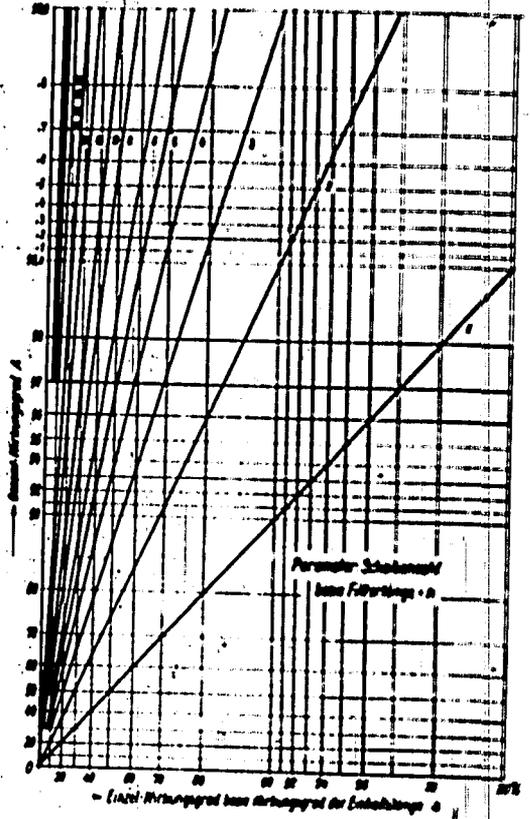


Abb. 5. Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad einer Filterscheibe bzw. Einheitslänge $[A = 1 - (1-a)^n]$.

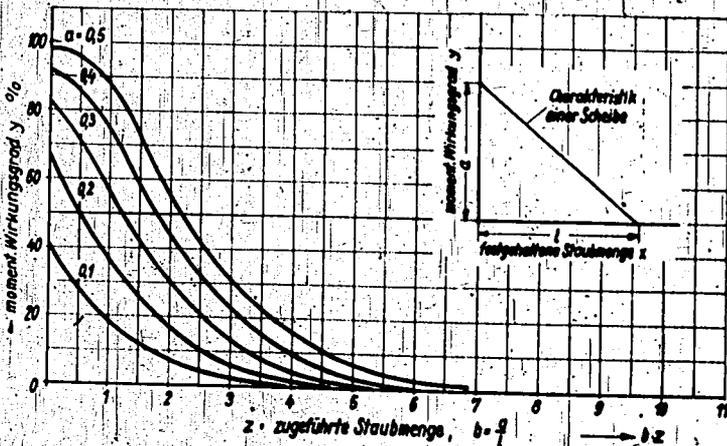


Abb. 6. Momentaner Wirkungsgrad für 5 Filterscheiben bei 10 bis 50 % Anfangswirkungsgrad.

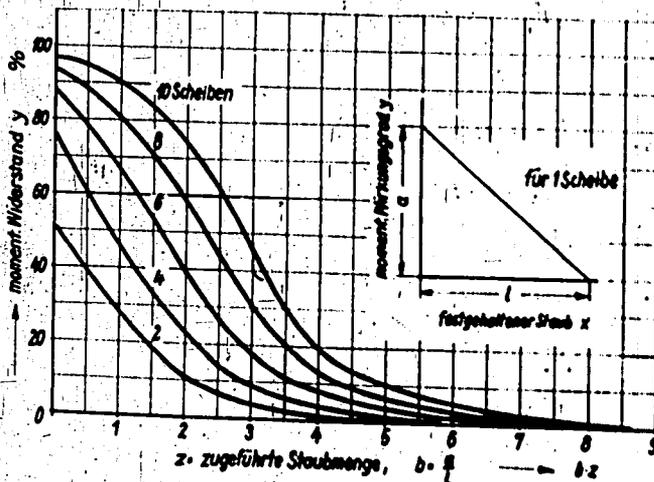


Abb. 7. Momentaner Wirkungsgrad für 2 bis 10 Scheiben bei 30 % Anfangswirkungsgrad je Scheibe.

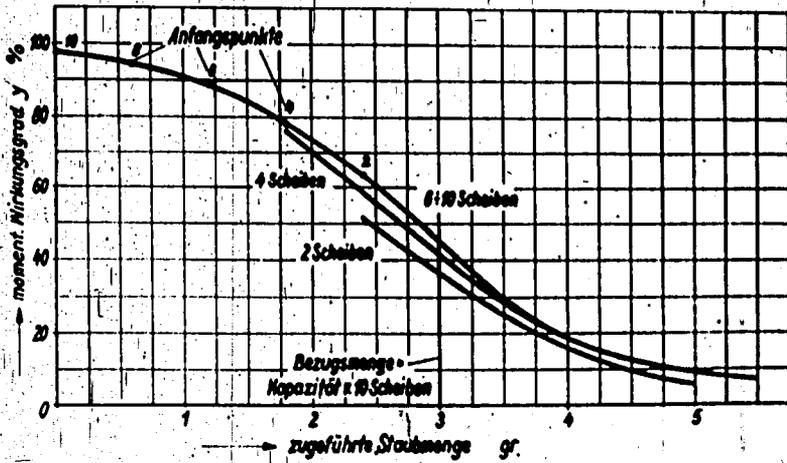


Abb. 8. Vergleich der Wirkungsgrade von Scheibenfiltern bei gleicher Scheibenkapazität ($l = 0,3$) und gleichem Anfangswirkungsgrad ($a = 0,3$) durch Verschiebung auf der Abszisse.

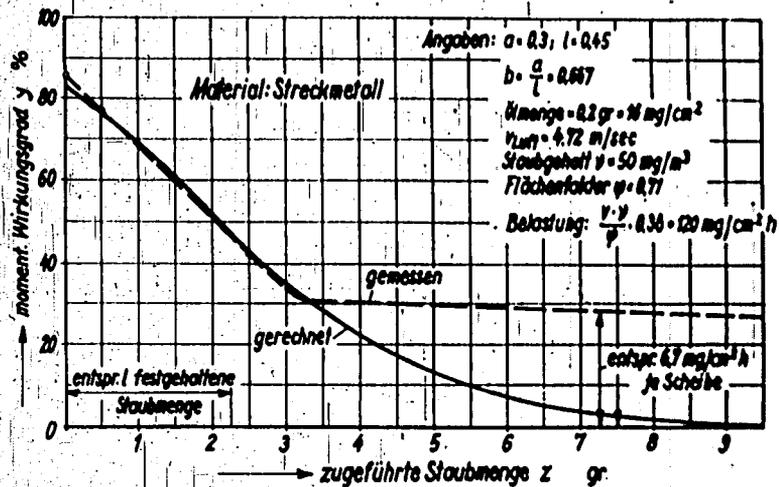


Abb. 9. Verlauf des momentanen Wirkungsgrades nach Rechnung und Versuch bei 5 Filterscheiben.

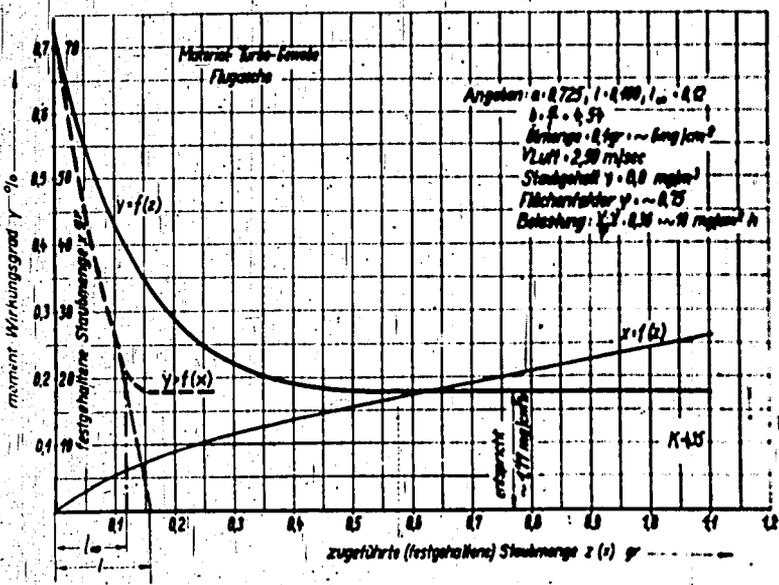


Abb. 10. Momentaner Wirkungsgrad einer Filterscheibe.

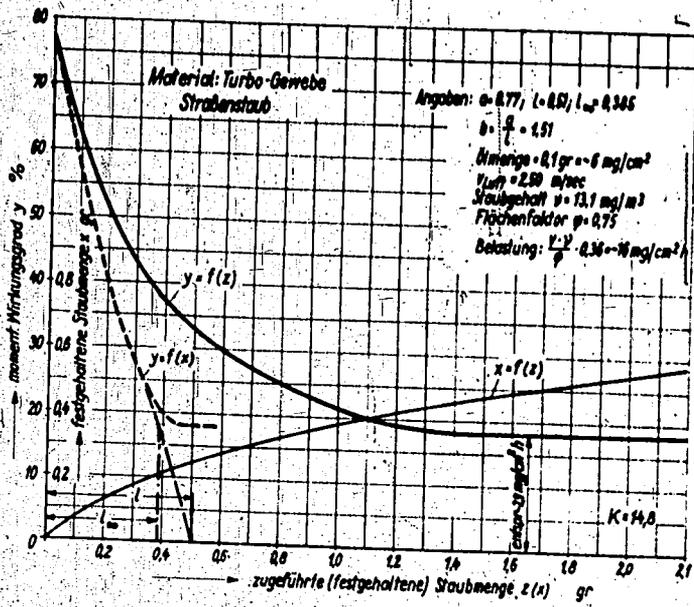


Abb. 11. Momentaner Wirkungsgrad einer Filterscheibe.

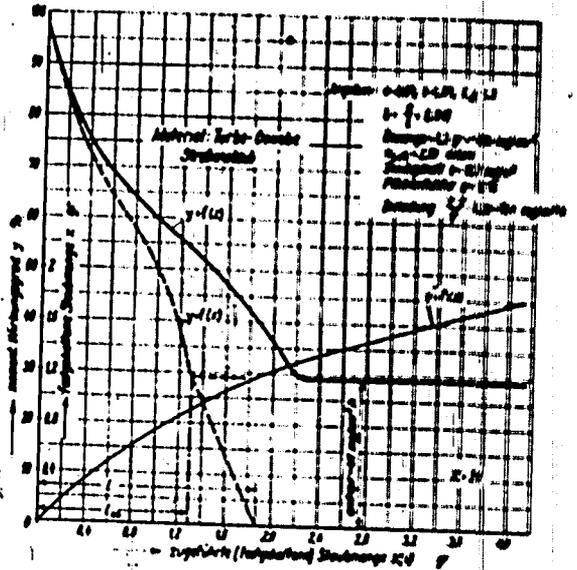


Abb. 12. Momentaner Wirkungsgrad einer Filterscheibe.

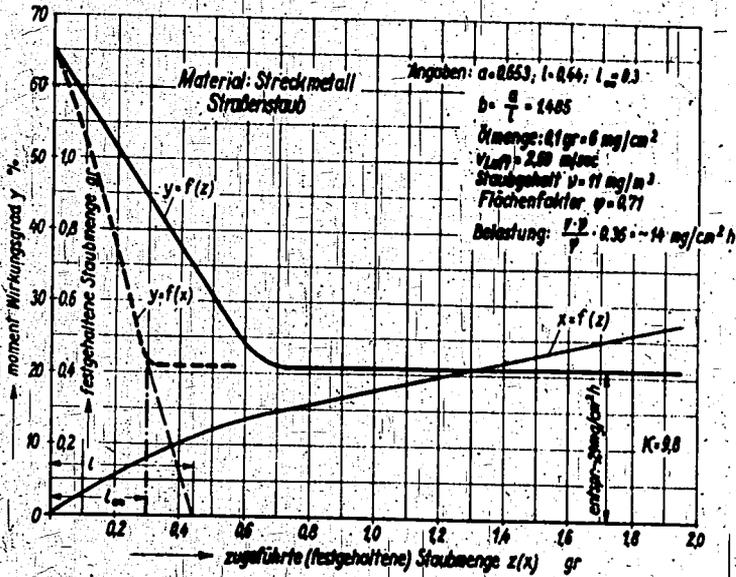


Abb. 13. Momentaner Wirkungsgrad einer Filterscheibe.

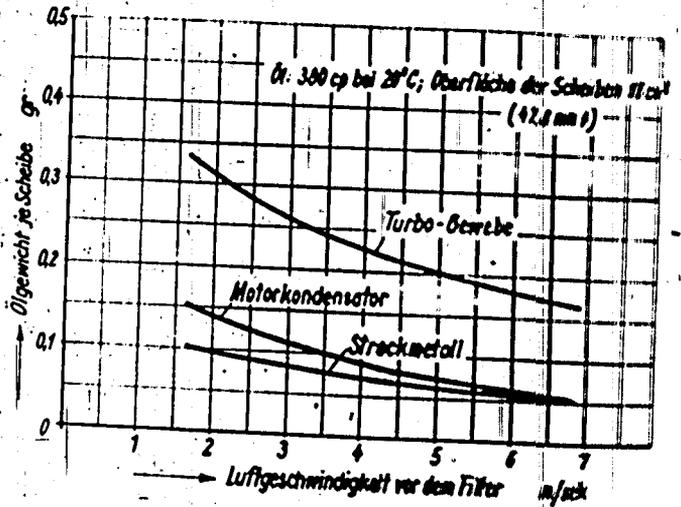


Abb. 14. Ölhalte-Fähigkeit verschiedener Filter-Materialien in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit.

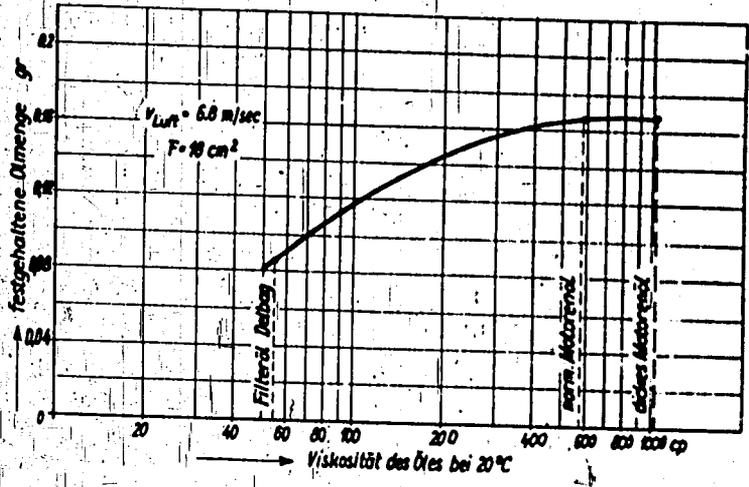


Abb. 15. Ölhalte-Fähigkeit von Filterscheiben in Abhängigkeit von der Viskosität.

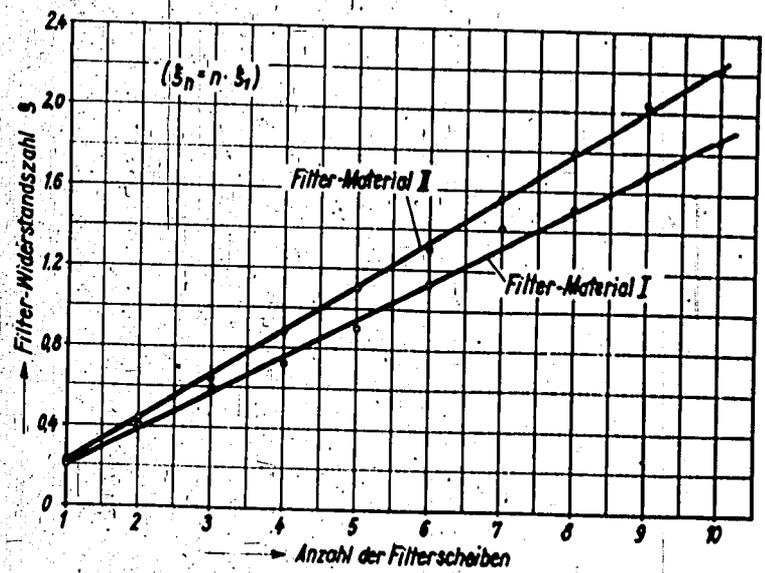


Abb. 16. Zusammenhang zwischen Scheibenzahl und Widerstandsfaktor ξ .

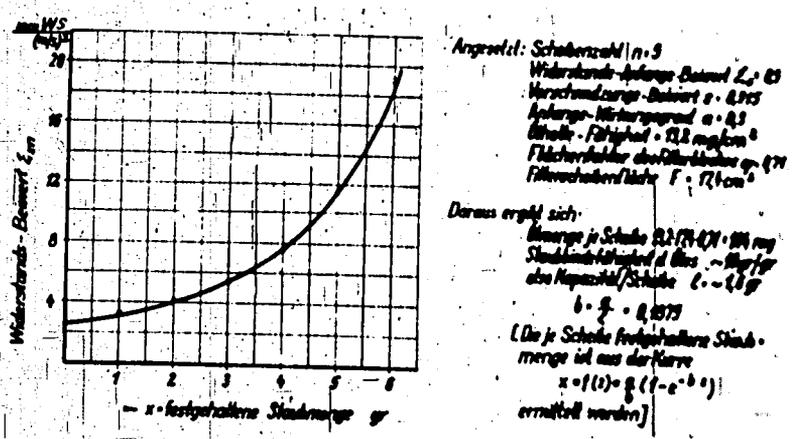


Abb. 17. Berechneter Verlauf des Widerstands-Beiwertes $\xi_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1 - s \cdot x_m)^2}$ [$\xi \cdot x_5 =$...]

Nach Abschluß der Diskussionen zu den verschiedenen Vorträgen brachte Pöttinger, Berlin, folgenden Wunsch des Reichsverkehrsministeriums zum Ausdruck:

Um zu einer weiteren Beschleunigung der Klärung bestimmter Fragen, welche in diesem Arbeitskreis behandelt werden, zu gelangen, sollten im Rahmen des Arbeitskreises kleinere Gruppen, bestehend aus Vertretern der einschlägigen Industrie und den das entsprechende Sachgebiet bearbeitenden Forschungsinstituten gebildet werden. Innerhalb dieser Gruppen sollte unter aktiver Beteiligung der Industrie ein möglichst häufiger und weitgehender Erfahrungsaustausch stattfinden, der die Weiterarbeit an dem entsprechenden Problem zu beeinflussen hätte.

In der anschließenden Besprechung dieses Vorschlages zeigt es sich, daß die allgemeine Ansicht besteht, die Gründung weiterer Untergruppen mit besonderen Arbeitstagungen sei weder für die Industrie noch für die Forschungsinstitute infolge des überall herrschenden großen Zeitmangels zurzeit möglich. Dagegen soll selbstverständlich ein möglichst schneller und intensiver Erfahrungsaustausch zwischen Forschung und einschlägiger Industrie stattfinden, welcher jedoch von Fall zu Fall durch freie und direkte Vereinbarung der entsprechenden Stellen zustande kommen kann. Die bisherigen Erfahrungen, welche der Arbeitskreis für Zweitaktmotoren sammeln konnte, haben gezeigt, daß dieser Weg zweckmäßig erscheint und auch in vielen Fällen bereits benutzt wird.

Sodann wurden die im Auftrage des Arbeitskreises von List, Graz, Zeman, Wien, und U. Schmidt, Berlin, ausgearbeiteten Normungsvorschläge für Zweitaktwertungsgrößen besprochen. Die Ausarbeitung sieht folgende Normungsvorschläge vor:

7. Normungsvorschläge für Zweitakt-Wertungsgrößen

Nr.	Begriff	Formelzeichen	Dimension	Errechnung
1	Hubvolumen des Arbeitszylinders	V_H	m^3	
2	Nutzhubvolumen	V_N	m^3	$V_N = V_H \cdot \left(1 - \frac{s}{H}\right)$ $h = \text{Hub}, s = \text{Schlitzhöhe}$
3	Verdichtungsraum	V_K	m^3	$V_K = \frac{V_H}{\epsilon - 1}$
4	Laderaum	V_L	m^3	$V_L = V_K + V_N = V_H \cdot \frac{1 - \frac{s}{H}}{\epsilon - 1}$
5a	Verdichtungsgrad	ϵ	-	$\epsilon = \frac{V_K + V_H}{V_K}$
b	Nutzverdichtungsgrad	ϵ_N	-	$\epsilon_N = \frac{V_K + V_H}{V_K} = \frac{V_L}{V_K}$
6	Laderaum-Verhältnis	1	-	$1 = \frac{V_L}{V_H}$

Nr.	Begriff	Formelzeichen	Dimension	Errechnung
7	Frischladung	L_z	$m^3/\text{Umdr.}$	Im Zyl. verbleibendes Ladungsvol. v. Außenzustand p_a und T_a
8	Restgas	R_z	$m^3/\text{Umdr.}$	Im Zyl. verbleibendes Abgasvol. v. obig. Zustand
9	Angesaugte Luftmenge	L_{ges}	$m^3/\text{Umdr.}$	in Außenzustand
10	Umrechnungsfaktor	u	-	$u = \frac{273}{T_a} \cdot \frac{p_a}{760} = 0,359 \cdot \frac{p_a}{T_a}$ Faktor z. Umrechnung des Gasvol. auf Normalzustand
11	Luftaufwand	ψ	$\frac{m^3(\text{außen})}{m^3}$	$\psi = \frac{L_{\text{ges}}}{V_H}$ Maßzahl f.d. Beurteilung der Spülpumpe
12	Güte der Spülung	λ_g	-	$\lambda_g = \frac{L_z}{L_{\text{ges}}}$ Maßzahl f.d. Beurteilung des Frischgas-Verlustes
13	Spülwirkungsgrad	λ_s	-	$\lambda_s = \frac{L_z}{L_z + R_z}$ Maßzahl f.d. Beurteilung des Gaswechsels
14	Liefergrad	λ_L	$\frac{m^3(\text{außen})}{m^3}$	$\lambda_L = \frac{L_z}{V_H}$ Maßzahl f.d. Frischluft-Auffüllung d. Zylinders
15	Ladegrad	λ_d	$\frac{m^3(\text{außen})}{m^3}$	$\lambda_d = \frac{L_z + R_z}{V_H}$ Maßzahl f.d. Auffüllung d. Zylinders
16	wahrer Ladegrad	λ_w	$\frac{m^3(\text{außen})}{m^3}$	$\lambda_w = \lambda_d \cdot 1 = \frac{L_z + R_z}{V_1}$ Maßzahl f.d. Auffüllung des Laderaumes

$$\text{Es ist: } \lambda_g \cdot \psi = \lambda_s \cdot \lambda_d = \lambda_L$$

Die Normungsvorschläge schließen sich weitgehend der bereits durch den VDI in Angriff genommenen Normung an und weichen nur in einem wesentlichen Punkt von dieser Normung ab. Während der VDI-Vorschlag mit Gasgewichten arbeitet, sieht der Vorschlag des Arbeitskreises die Benutzung der Gasvolumina, bezogen auf den Außenzustand, vor. In vielen Fällen ergaben sich trotz dieses Unterschiedes nach dem Vorschlag des VDI und dem des Arbeitskreises gleiche Zahlenwerte - nämlich dort, wo es sich um das Verhältnis

zweier Gasvolumina gleichen Zustandes handelt -. Bei der Ermittlung des Spülwirkungsgrades ergeben sich jedoch durch die Einbeziehung des Restgasanteiles im Zylinder andere Zahlenwerte. Die nach dem VDI-Vorschlag erforderliche Einsetzung des Gasgewichtes setzt die Kenntnis der Zusammensetzung des Restgasanteiles voraus. Da diese Kenntnis in den meisten Fällen nicht gegeben ist, erschien bei der Ausarbeitung die Rechnung mit dem Gasvolumen zweckmäßiger. Auch bei der Definition des Luftaufwandes erscheint die Benutzung der Gasvolumina entgegen dem VDI-Vorschlag trotz gleicher Endergebnisse günstiger, da dieser Vorschlag den Vorteil größerer Handgreiflichkeit besitzt, weil nach den Vorschlägen des VDI erst ein theoretisches Luftgewicht zu errechnen ist, während nach den Vorschlägen des Arbeitskreises das Hubvolumen als solches in Erscheinung tritt.

Die Formelzeichen unterscheiden sich ebenfalls in einigen Fällen von den VDI-Vorschlägen. Es dürfte jedoch nicht allzu schwierig sein, hier zu einer Einheitlichkeit zu gelangen.

Aus der Diskussion der dem Arbeitskreis vorgelegten Normungsvorschläge ergibt sich, daß die Durchführung und Beendigung dieser Arbeit zurzeit gewisse Schwierigkeiten macht. Einerseits sind in der Zwischenzeit vom Reichsluftfahrtministerium eigene Wertungsgrößen eingeführt worden, deren Benutzung das RLM seinen Auftragnehmern zur Pflicht gemacht hat, andererseits ist der Normungsausschuß des VDI durch weitgehende Einberufung seiner Mitarbeiter zurzeit praktisch arbeitsunfähig geworden. Richter, Wien, teilt hierzu mit, daß er sich aus diesem Grunde bei der von ihm vorgenommenen Neubearbeitung des entsprechenden Teiles des Taschenbuches der "Hütte" der Wertungsgrößen des RLM bedient habe.

Die Arbeit an den Normungsvorschlägen soll trotzdem fortgesetzt werden, hierzu soll eine Zusammenarbeit mit dem VDI und dem RLM herbeigeführt werden.

Nach Abschluß der Beratung über die Normungsvorschläge empfiehlt Föttinger, Berlin, wegen der bereits sehr fortgeschrittenen Zeit die ferneren im Tagungsprogramm enthaltenen Diskussionspunkte durch direkte persönliche Rücksprache zwischen den interessierten Tagungsteilnehmern zu klären und spricht im Anschluß daran als 1. Vorsitzender des Arbeitskreises den Vortragenden seinen Dank für ihre Bemühungen aus. Desgleichen dankt er der Geschäftsführung für die Arbeit, welche sie im laufenden Jahr und während der Vorbereitung der Tagung geleistet hat. Richter, Wien, dankt sodann im Namen der Tagungsteilnehmer den Herren des Reichsverkehrsministeriums für das dem Arbeitskreis und seinen Bemühungen entgegengebrachte Interesse und die wirksame Unterstützung der Arbeiten der einzelnen Forschungsinstitute

Nach einem besonderen Dank an den Vorsitzenden spricht er den Wunsch aus, die Tagung, deren Erfolg sich gezeigt habe, in nicht zu häufigen, aber erst recht nicht allzu seltenen Zeiträumen zu wiederholen.

Abschließend zu diesem Bericht hatte ich den Auftrag, den Mitgliedern des Arbeitskreises den Dank des Herrn Reichsverkehrsministers für die in diesem Rahmen geleistete Arbeit auszusprechen.

Die Geschäftsführung des Arbeitskreises für
Zweitakt-Motoren

gez. U. Schmidt