

3. Neue Piezoquarzgeräte hoher Eigenfrequenz

Von Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmidt, Braunschweig

Für die genaue Untersuchung sehr rasch veränderlicher Kräfte, z. B. des Druckes im Zylinder schnell laufender Verbrennungsmotoren, kommen mechanische Indikatoren wegen ihrer großen Trägheit nicht in Frage. Auch der Membranindikator mit optischer Aufzeichnung ist dazu nicht mehr geeignet. Erst der piezoelektrische Quarzindikator eröffnete hier neue Möglichkeiten der Messung. Für eine praktisch verzerrungsfreie Wiedergabe ist es aber notwendig, daß die niedrigste Eigenfrequenz des Meßgerätes höher liegt als die höchste in dem zu messenden Druckverlauf enthaltene Frequenz. Da der Quarz selbst bei genügend kleinen Abmessungen von einigen mm Eigenfrequenzen von über 100 000 Hz hat, glaubte man, in ihm ein praktisch trägheitsfreies Meßmittel gefunden zu haben, und es wurden mit den neuen auch im Handel erhältlichen Geräten zahlreiche Arbeiten ausgeführt.

Als wir uns im Institut für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt Hermann Göring die Aufgabe stellten, den Druckverlauf bei der klopfenden Verbrennung näher zu untersuchen, erwiesen sich aber die bekannt gewordenen Quarzdruckmesser hierzu als ungeeignet; sie besaßen trotz der hohen Eigenschwingungszahl ihrer Quarze schon bei wenigen kHz störende Eigenfrequenzen. Diese langsamen Schwingungen sind eine Folge des Einbaues der Quarze. Besonders der die Übertragung des Druckes vom Zylinderraum auf die Quarze vermittelnde Stempel mit seiner großen Masse, erniedrigt die Eigenfrequenz. In gleichem Sinne wirkt die Federung durch niemals ganz genau passende Gewindgänge oder ungleichmäßiges Aufeinanderliegen der Druckflächen der Quarze und ihrer Widerlager.

Im folgenden berichte ich über Arbeiten, die von meinem Mitarbeiter W. Gohlke ausgeführt wurden und die demnächst als Forschungsheft des VDI veröffentlicht werden

Mit Hilfe des reziproken piezoelektrischen Effektes gelang es, Quarzindikatoren durch angelegte Wechselspannungen zu erzwungenen Schwingungen beliebiger Frequenz anzuregen und so ihre Resonanzkurven über den ganzen in Frage kommenden Bereich von 2000 bis 100 000 Hz aufzunehmen. Das Schema der benutzten Meßeinrichtung zeigt Abb. 1. Dabei ist D der Quarzdruckmesser, dem durch den Röhrensummer S eine Wechselspannung konstanter Größe, aber beliebiger Frequenz f zugeführt wird. Die Stirnfläche b des Quarzdruckmessers führt dann infolge der reziproken piezoelektrischen Wirkung erzwungene Schwingungen von sehr kleiner Amplitude aus. Diese Schwingungen werden nach dem Prinzip des Kondensatormikrophons gemessen. Dazu ist der Stirnfläche b in geringem Abstände von nur wenigen hundertstel mm ein Metallstempel a gegenübergestellt, sodaß ein Luftkondensator entsteht, dessen Kapazität C sich mit dem Ausschlag x der Stirnfläche des Quarzdruckmessers ändert. Dieser Kondensator wird durch eine Batterie E

- 1) VDI-Heft 407, Quarzdruckmeßgeräte hoher Eigenfrequenz, Schwingungseigenschaften und Abhilfe gegen die Störung durch Massenkräfte von W. Gohlke, mit einem Vorwort von Ernst Schmidt.

Über einen Widerstand R aufgeladen. Dabei entstehen an den Enden des Widerstandes R Spannungsschwankungen, die in bekannter Weise verstärkt werden und als Maß der Schwingungsamplitude des Quarzdruckmessers dienen. In dieser Weise aufgenommene Resonanzkurven von Quarzdruckmessern zeigt Abb. 2. Darin ist über der Frequenz f in kHz die Resonanzüberhöhung x/x_0 , d. h. das Verhältnis des Ausschlages bei einer beliebigen Frequenz zu dem Ausschlag, den eine niedrige, sicher noch störungsfrei wiedergegebene Frequenz bei gleicher Größe der angelegten Spannung hervorruft, aufgetragen.

Die Genauigkeit der Kurven ist sehr viel größer, als sie in dem kleinen Maßstab zum Ausdruck kommt. Jede Zacke der Kurve ist durch 6 bis 10 Meßpunkte belegt, und der ganze Verlauf ist durchaus reproduzierbar. Das Meßverfahren erlaubt noch Unterschiede der Schwingungsamplitude von weniger als 1 Angström = 10^{-7} mm aufzunehmen.

Das Meßgerät ist fehlerfrei, wenn die Resonanzüberhöhung $x/x_0 = 1$ ist, die Kurve also parallel zur Abszissenachse bei $x = 1$ verläuft.

Die ersten beiden Kurven der Abb. 2 beziehen sich auf bisher übliche Bauarten, die demnach schon unterhalb 6000 Hz störende Eigenschwingungen besitzen. Die dritte Kurve zeigt die Resonanzkurve der von uns entwickelten neuen Bauart. Dabei gelang es, die Hauptresonanzstelle bis auf über 40 000 Hz hinaufzuschieben.

Einen Schnitt durch die neue Bauart zeigt Abb. 3. Die Quarze sind dabei so verkleinert, daß sie mit ihrer Wasserkühlung innerhalb des normalen Zündkerzengewindes von 14 mm Dmr. Platz finden. Die druckaufnehmende Fläche des Gerätes liegt unmittelbar in der Oberfläche des Zylinderraumes des Motors, sodaß Störungen durch Eigenschwingungen der Gassäule eines Verbindungskanales zwischen Zylinder und Meßgerät vermieden werden. Zugleich sind auch die äußeren Abmessungen sehr verkleinert, und das ganze Gerät ist nicht größer als eine normale Zündkerze.

Die Federhülse zur Aufnahme und zum Vorspannen der Quarze ist in Abb. 4 gesondert herausgezeichnet. Dabei sind zwei verschiedene Arten der Befestigung des Widerlagers der Quarze gezeigt, einmal durch Schweißen, das andere Mal durch Verschrauben. Die Resonanzkurve dieser beiden Bauarten, die aber ohne Wasserkühlung aufgenommen wurden, zeigt Abb. 5. Man erkennt daraus, daß bei der geschweißten Hülse die Eigenschwingungszahl bis auf etwa 70 000 Hz hinaufrückt, und daß man mit dem Gerät bis über 55 000 Hz praktisch verzerrungsfrei messen kann. Die verschraubte Hülse hat dagegen schon bei 48 000 Hz eine Resonanzstelle, und ein praktisch verzerrungsfreies Messen ist nur bis zu Frequenzen von etwa 45 000 Hz möglich.

Durch einige weitere Verfeinerungen der Bauart kann der verzerrungsfreie Meßbereich für das ungekühlte Gerät ohne Schwierigkeit bis zu etwa 100 000 Hz ausgedehnt werden.

Auch die bisher üblichen Verstärker sind für hohe Frequenzen ungeeignet. Es mußten daher von uns auch neue Verstärker entwickelt werden. Abb. 6 zeigt den Frequenzgang, d. h. das Verhältnis der Verstärkung α bei einer beliebigen Frequenz f zur Verstärkung α_0 bei einer Frequenz 10 Hz. Die Kurven zeigen, daß handelsübliche

Verstärker bereits bei 10 000 Hz einen merklich verringerten Verstärkungsgrad aufweisen. Bei dem neu entwickelten Verstärker blieb dagegen die Verstärkung bis zu 30 000 Hz völlig konstant und nahm dann bis zu 100 000 Hz um nur 15 % ab.

Mit diesen Meßgeräten ist es nun möglich, den Druckverlauf der klopfenden Verbrennung näher zu untersuchen und zu entscheiden, ob die dabei beobachteten Schwingungen nur Eigenschwingungen des zur Resonanz angeregten Verbrennungsraumes sind, oder ob sie, was wahrscheinlicher ist, in Wirklichkeit aus der mehrfach wiederholten Reflektion einer Stoßwelle bestehen. Bei den bisherigen Piezoquarzmessern waren die störenden Eigenschwingungen ungefähr von der gleichen Frequenz wie die Grundschwingung des Verbrennungsraumes, die bei Zylinderabmessungen von der Größenordnung 10 cm etwa bei 6000 Hz liegen.

Die erste noch unvollkommene Aufnahme einer schwach klopfenden Verbrennung zeigt Abb. 7, die ein kurzes Stück des Druckverlaufes in der Nähe des Druckmaximums vergrößert wiedergibt. Außer einer Schwingung von der bereits früher beobachteten Art erkennt man beim Einsetzen der Schwingungen und auch beim Druckmaximum ausgeprägte Zacken von sehr kurzer Dauer, welche tatsächlich die steilen Druckstöße wiedergeben, die die eigentliche Ursache des Klopfens bilden und die bisher wegen der Unvollkommenheit der Meßgeräte nicht gefunden werden konnten. Die ganze Breite der Abbildung entspricht einer Zeit von 0,005 sek.

Außer durch die Eigenfrequenz der Quarzdruckmesser können Störungen auftreten durch Erschütterung der Halterung des Meßgerätes, also z. B. durch Schwingungen der Zylinderwand, in die der Quarzdruckmesser eingeschraubt ist. Ein Mittel zur Abhilfe ist die von Kluge, Linckh und Fahrenholz angegebene und in Abb. 8 dargestellte Lagerung eines Quarzes mit balligen Stirnflächen zwischen zwei Federmembranen F_1 und F_2 , die zugleich die Vorspannung des Quarzes liefern. Wären die Federkennlinien der Membranen geradlinig, so würde in der Tat eine Erschütterung der Membraneinspannung keine piezoelektrische Wirkung auf den Quarz haben, da durch seine Massenträgheit die eine Stirnfläche um ebenso viel belastet wie die andere entlastet wird. Eine genauere Untersuchung zeigt aber, daß wegen der Nichtlinearität der Federkennlinien der Membranen der Erfolg nicht befriedigt. Der zu messende Druck p wirkt in gleichem Sinne auf beide Membranen und sollte von jeder je zur Hälfte aufgenommen werden. Durch die Vorspannung des Quarzes werden aber beide Membranen in entgegengesetztem Sinne durchgebogen. Das hat zur Folge, daß beide Membranen nicht gleich beansprucht sind, sondern an verschiedenen Stellen ihrer nichtlinearen Federkennlinie arbeiten. Dazu kommt noch, daß auch die Belastungsart beider Membranen eine verschiedene ist, denn die obere Membran F_2 ist nur in der Mitte durch die Einzelkraft des balligen Quarzes belastet, während der Druck p auf die ganze Fläche der unteren Membran wirkt. Infolge dieser verschiedenen Art der Beanspruchung der Membranen bleibt der angestrebte Ausgleich der Massenkräfte unvollkommen. Man kann diesen Nachteil beheben, wenn man die Vorspannung nicht durch die Federmembranen, sondern durch eine besondere Feder etwa in Form einer Federhülse erzeugt.

Eine solche Konstruktion zeigt schematisch Abb. 9. Darin sind a die beiden Quarze, d und c ihre Widerlager, b ist die Federhülse, welche die Vorspannung der Quarze übernimmt, und F_1 und F_2

sind wieder die beiden Federmembranen. Außerdem ist aber noch eine weiche Membran e vorgesehen, welche gegen den Verbrennungsraum abdichtet und die Federmembranen der Wirkung der heißen Gase entzieht. Der Raum f kann dann mit Wasser durchspült werden, so daß die Membranfedern und die Federhülse b auf niedriger Temperatur gehalten werden können. Die Abdichtungsmembran hat außerdem den Vorteil, daß der zu messende Druck nicht unmittelbar auf die untere Membranfeder wirkt und beide Membranfedern daher tatsächlich stets in gleicher Weise beansprucht sind.

Dieser Erschütterungsausgleich erfordert also eine verwickeltere Bauart, und er ist auch mit einer Einbuße an Empfindlichkeit verbunden.

Die beschriebene neue Bauart eines Quarzdruckmessers hoher Eigenfrequenz hat sich im Motorbetrieb gut bewährt. Die Wasserkühlung erwies sich trotz der gedrängten Ausführung als völlig ausreichend. Allerdings setzt die Kleinheit der Abmessungen sehr sorgfältige Werkstattarbeit voraus.

Das neue Meßgerät ist nicht auf den Verbrennungsmotor beschränkt, sondern es dürfte auch auf anderen Gebieten, wo es sich um die verzerrungsfreie Messung sehr rasch veränderlicher Drücke oder Kräfte handelt, neue Möglichkeiten der Messung eröffnen.

Aussprache

Auf verschiedene Fragen, ob die Eigenfrequenz des Quarzes unter Umständen in der Meßanordnung eine andere als bei Einbau in den Zylinder eines Motors sei, teilte E. Schmidt, Braunschweig, mit, daß die Quarzdruckgeber in der gleichen Ausführung, wie sie in den Zylinder eingebaut werden, durchgemessen worden sind.

Auf entsprechende Fragen von Frank, Hannover, erwiderte E. Schmidt, Braunschweig, dann, daß eine Veränderung der Eichung der Quarze im Laufe längerer Zeiten stattfindet und daß Veränderungen der Anzeige während der Messung im wesentlichen auf Ungenauigkeiten in den Gewindegängen zurückzuführen sind. Durch Ausführung geschweißter Hülsen lassen sich diese Schwierigkeiten beseitigen. Dem mechanischen und elektrischen Teil des Quarzdruckgebers sei besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Die Kapazität der Zuleitungen zum Geber lasse sich durch in der Hochfrequenztechnik übliche luftisolierte Kabel wesentlich herabsetzen.

U. Schmidt, Berlin, ging sodann auf die Frage der Verringerung der Empfindlichkeit ein. Bei Benutzung sehr kleiner Meßquarze wird die dem Verbrennungsdruck ausgesetzte Fläche der Quarze besonders klein. Da die Ladungsmenge an den Belägen von dem Produkt aus Fläche mal spezifischem Flächendruck abhängt, nimmt damit auch die Ladungsmenge ab. Die vom Druckgeber abgegebene Spannung ist wiederum abhängig von den Parallel-Kapazitäten der Leitung und der Eingangsschaltung des Gleichstrom-Meßverstärkers. Diese können aus verschiedenen Gründen nicht unter ein bestimmtes Maß gesenkt werden. Es wurde deshalb angefragt, ob die beschriebenen

Geräte normale, d. h. 3 bis 600 fache Verstärkung besitzen, oder ob höhere Verstärkungen angewendet wurden.

Nach E. Schmidt, Braunschweig, ist die Ladungsausbeute des neuen Quarzdruckgebers ungefähr $1/3$ bis $1/4$ der bisher üblichen Geber. Eine Heraufsetzung der nötigen Verstärkung macht jedoch keine Schwierigkeiten.

Zinner, Augsburg, sprach sodann über die Änderung der Empfindlichkeit während der Messung durch Temperatureinflüsse. Die erforderliche Vorspannung muß unter allen Umständen durch Federn mit gerader Kennlinie erzeugt werden.

In der Lenkung des Augenmerkes allein auf die Beseitigung der Massenkkräfte sieht er eine grundsätzliche Gefahr. Die Lagerung der Quarze muß auf jeden Fall gleichzeitig vom Gesichtspunkt der Beeinflussung der Empfindlichkeit betrachtet werden. In diesem Zusammenhang weist er auf einen in der englischen Literatur erschienenen Vortrag der Ausbildung der Quarzlagerung hin, bei welchen Erschütterungen durch Gegeneinanderschaltung der hierdurch hervorgerufenen Quarzladungen kompensiert werden.

Ullmann, Dresden, schloß sich diesen Ausführungen an und machte Mitteilungen über Versuche, welche in ähnlicher Richtung an der TH Dresden durchgeführt wurden. Er machte sodann Ausführungen über die Steigerung der Empfindlichkeit des Druckgebers auf den 10 bis 20 fachen Betrag der heute üblichen Werte. Gerade die Erhöhung der Leistungsausbeute des Druckgebers ist bei den häufig erforderlich werdenden Messungen geringer Drücke besonders wichtig, damit die durch die Druckschwankungen hervorgerufenen Spannungswechsel oberhalb des durch Erschütterungen entstehenden Störpegels liegen.

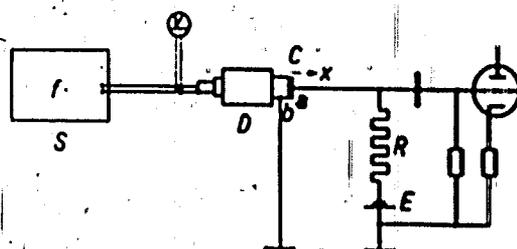


Abb. 1. Aufnahme der Resonanzkurven von Quarzdruckmeßdosen.

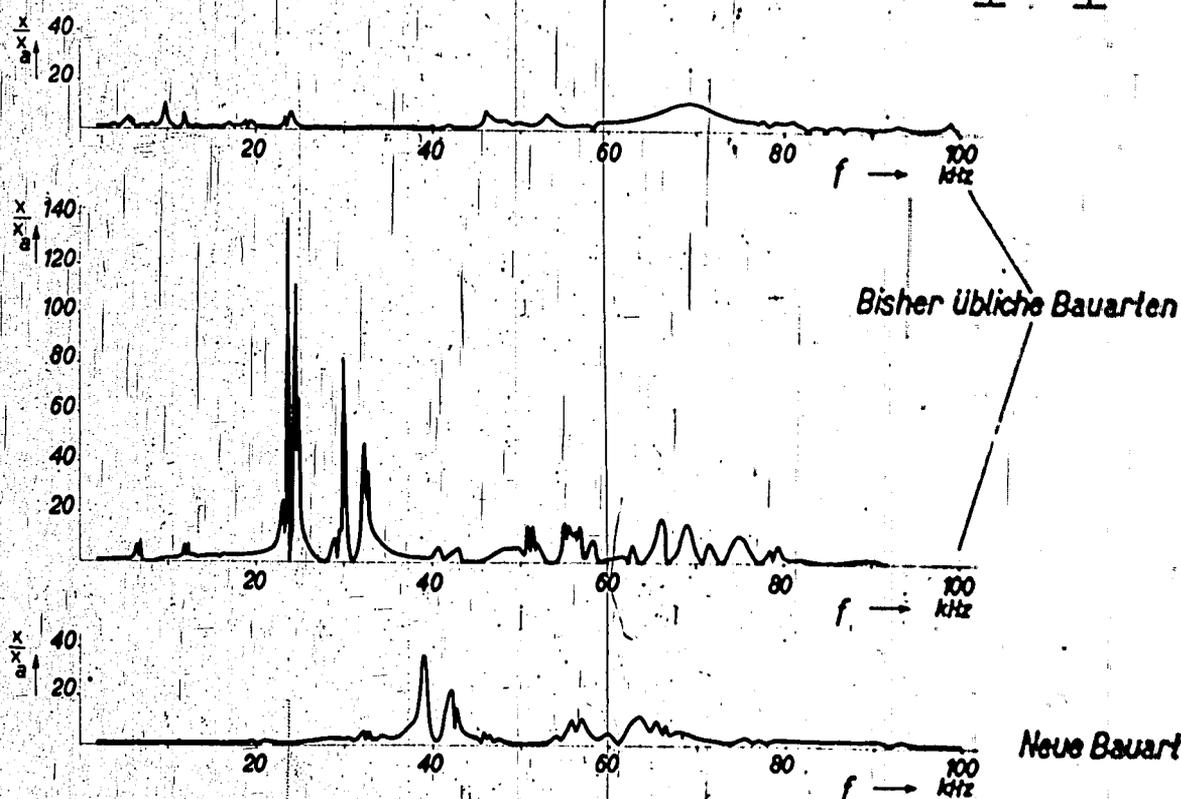


Abb. 2. Resonanzkurven von Quarzdruckmeßdosen.

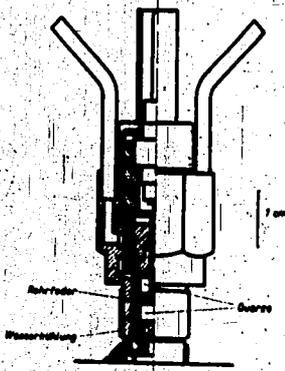


Abb. 3. Quarzdruckmeßdose neuer Bauart.

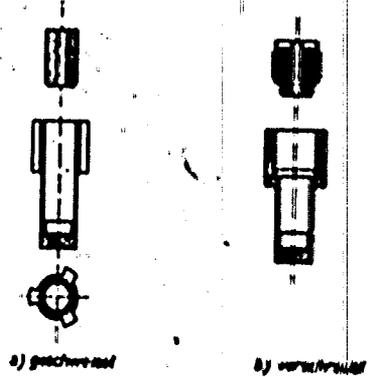


Abb. 4. Federhülsen der Druckgeber eigener Bauart.

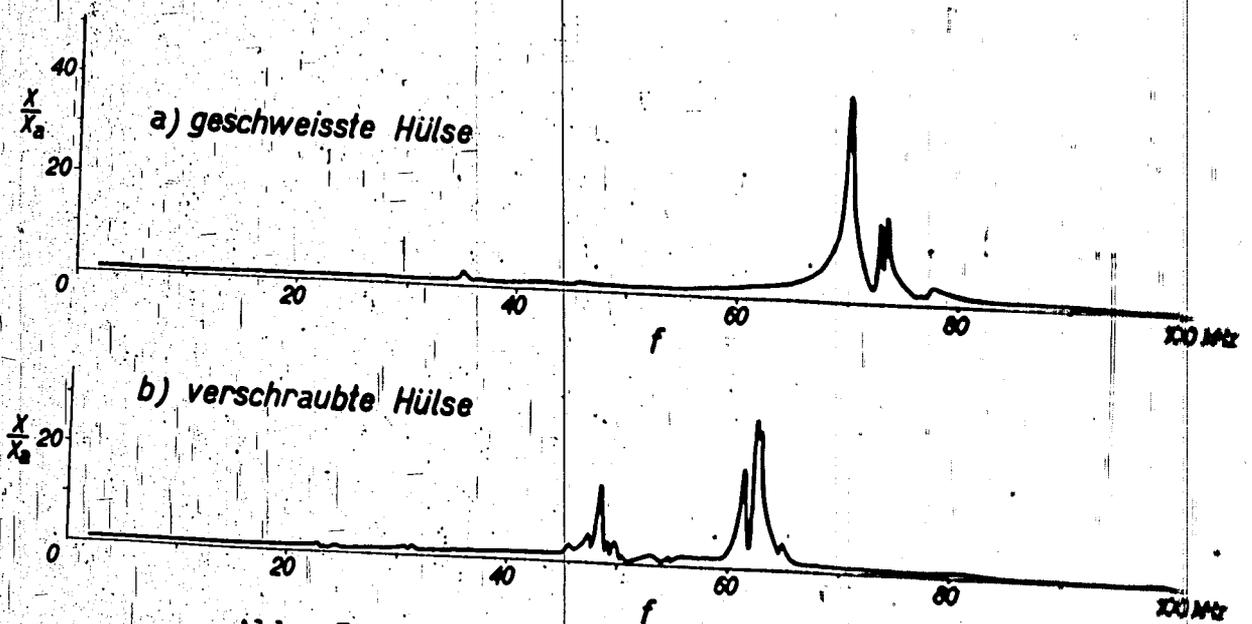


Abb. 5. Resonanzkurven der Federhülsen.

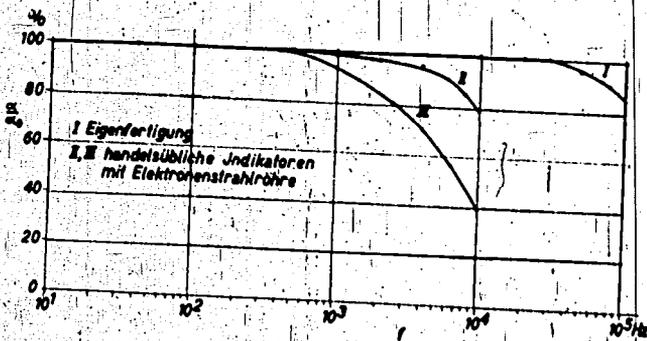


Abb. 6. Frequenzgang von Verstärkern für Quarzdruckmessungen.

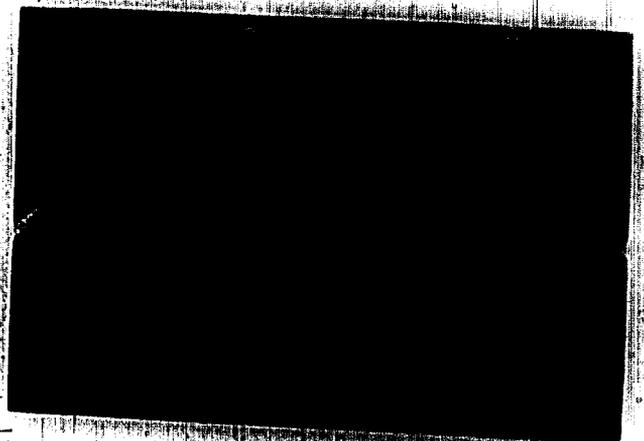


Abb. 7. Druckverlauf von schwach kopfender Verbrennung.

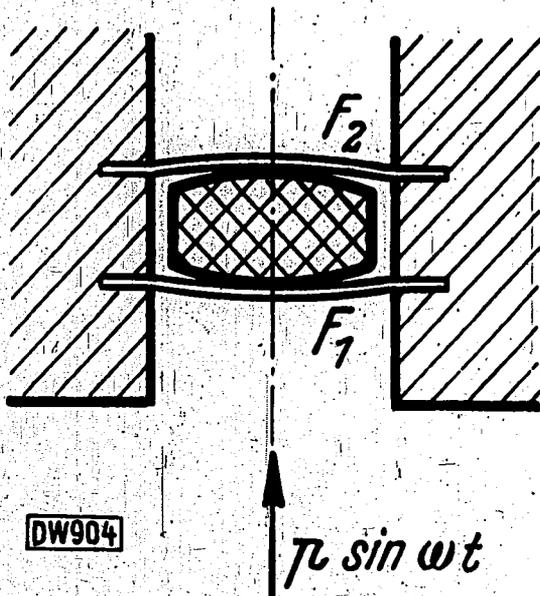


Abb. 8. Gefederter Quarz zur Vermeidung von Störungen durch Erschütterungen nach Kluge, Linckh und Fahrenholz.

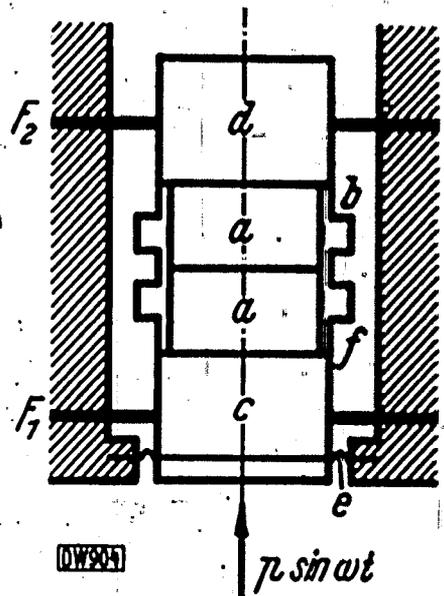


Abb. 9. Verbesserte Federung von Quarzen zur Vermeidung von Störungen durch Erschütterungen.

Im Anschluß an den Vortrag von U. Schmidt, Berlin, dessen Veröffentlichung, wie bereits eingangs mitgeteilt, vom Reichsluftfahrtministerium nicht gestattet wurde, machte Föttinger, Berlin, folgende längeren Ausführungen über das Problem der Zerstäubung eines flüssigen Mediums durch Druckluft:

Im Institut für Technische Strömungsforschung an der Technischen Hochschule Berlin wurde in den letzten Jahren das Problem der Flüssigkeitszerstäubung mit Hilfe von Druckluft ausführlich bearbeitet. Auf Veranlassung des Fachausschusses für Anstrichtechnik beim VDI wurde der Zerstäubungsvorgang an einer Farbspritzpistole mit Hilfe von photographischen Aufnahmen untersucht, welche bei mikroskopischer Vergrößerung und elektrischen Funken als Beleuchtungsquelle gewonnen wurden. An Hand der Aufnahmen konnte der Verlauf des Zerstäubungsvorganges studiert werden.

Aus dem gezeigten Lichtbild, welches den Zerstäubungsstrahl in 10 mm Entfernung von der Düsenmündung zeigt, ist zu erkennen, daß in diesem Gebiete die Zerstäubung noch nicht beendet ist. Neben fertigen runden Tropfen sind noch fadenförmige Flüssigkeitspartikel vorhanden, die sich im weiteren Verlauf des Strahles in Tropfen auflösen. Die in weiterer Entfernung von der Mündung gebildeten Tropfen sind größer, da in diesen Gebieten die Relativgeschwindigkeit zwischen Luft und Flüssigkeit geringer ist.

Der Zweck der Untersuchung des Farbspritzvorganges war u.a., die Ursache der Nebelbildung festzustellen, die oft Materialverluste bis zu 50 % zur Folge hat. Als Nebelbildner wurden hauptsächlich die kleinsten Tropfen erkannt, die wegen ihrer geringen Masse die Anstrichfläche nicht erreichen können und von der seitlich abfließenden Luft mitgenommen werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung gestatteten die Konstruktion einer neuartigen Düse, die bei 0,2 atü Betriebsdruck dieselbe durchschnittliche Zerstäubungsfeinheit erzeugt wie die alten Ausführungen bei 1 atü. Durch Vermeidung der Bildung von allzu feinen Tropfen und durch andere strömungstechnische Verbesserungen konnten die Nebelverluste auf die Hälfte vermindert werden.

Die Untersuchung des Zerstäubungsvorganges in Natur, insbesondere wenn man den zeitlichen Verlauf mit Zeitdehner aufnehmen will, stößt auf große, z. T. unüberwindliche Schwierigkeiten, welche hauptsächlich in der Beherrschung der großen Strömungsgeschwindigkeiten und in der erforderlichen mikroskopischen Vergrößerung liegen. Bei schwierigen Versuchsbedingungen reichen selbst die kurzen Belichtungszeiten der elektrischen Funken (bis etwa 10^{-7} sec.) zur Gewinnung von scharfen Aufnahmen nicht aus. Zur Erleichterung der experimentellen Untersuchungen wurden Ähnlichkeitsgesetze abgeleitet, welche die Durchführung von Modellversuchen gestatten. Es kommt hierfür neben dem Reynolds'schen Ähnlichkeitsgesetz, das die Wirkung der Reibungs- und Trägheitskräfte innerhalb der Flüssigkeit berücksichtigt, noch das Weber'sche Ähnlichkeitsgesetz in Frage, das die Reibungs- und Kapillarkräfte erfaßt. Ferner ist durch Einführung von Parameter-Kenngrößen die gegenseitige Beeinflussung beider Medien, Flüssigkeit und Gas (Luft), berücksichtigt.

Bei der Untersuchung der Zerstäubungsvorgänge kommen Großmodelle in Frage, bei welchen der Vorgang in vergrößertem Maßstab nachgeahmt wird. Dabei ergeben sich zwangsläufig geringere Geschwindigkeiten, sodaß der Gesamtvorgang beim Großmodell auch langsamer verläuft. Die Vergrößerung der linearen Abmessungen und die Verringerung der Geschwindigkeiten erleichtern sehr wesentlich die experimentellen Untersuchungen, die zweckmäßig durch einzelne oder Zeitdehneraufnahmen durchgeführt werden. Die am Modell gewonnenen Ergebnisse können dann mit Hilfe der Ähnlichkeitsgesetze auf die wirkliche Ausführung übertragen werden.

Zum Nachweis der Gültigkeit der neuen Modellgesetze für die Zerstäubung wurden vergleichende Versuche mit Wasser und Kohlenstofftetrachlorid als Zerstäubungsflüssigkeiten vorgenommen, welche völlige Übereinstimmung der Ergebnisse von Hauptausführung und Modell ergaben. Damit wird dem Forschungsingenieur das Werkzeug zur erleichterten und genauen Untersuchung der Zerstäubungserscheinungen gegeben.