

Geheim



U

15

# Lilienthal-Gesellschaft

für Luftfahrtforschung

10320

603/01

Dieser Bericht ist vertraulich zu behandeln.  
Wer diese Geheimhaltungspflicht verletzt,  
setzt sich der Gefahr strafrechtlicher Ver-  
folgung und schwerer Bestrafung ge-  
genüber. Passierschutz erforderlich.

10324

Vorgeht durch die  
Zentrale für wissenschaftliche Berichte  
über Luftfahrtforschung und der Deutschen Versuchsanstalt  
für Luftfahrt e. V. Berlin-Adlershof

**Geheim**

# **Geräuschkämpfung**

**Bericht über die Sondertagung in Göttingen**

---

**am 7./8. Dezember 1937**

**Bericht 088/011**

---

**10322**

**Lilienthal-Gesellschaft für Luftfahrtforschung**  
**Berlin NW 40 · Fürst-Bismarck-Straße 2 · Fernspr. Sa.-Nr. 12 31 81**

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einführung .....	3
<b>Vorträge und zugehörige Aussprachen:</b>	
„Die Erfolge der Entlärnung in Flugzeugkabinen.“ Von H. Wehner, Berlin, und W. Willms, Berlin .....	3
Aussprache .....	8
„Erfahrungen bei der Geräuschbekämpfung bei Kraftfahrzeugen und ihre Übertragung auf die Geräuschdämpfung von Flugzeugen.“ Von O. Hoffmeister, Stuttgart .....	9
Aussprache (mit Kurzbericht von S. Ruff, Berlin) .....	11
„Neuere Untersuchungen über das Luftschraubengeräusch.“ Von W. Willms, Berlin, und W. Ernsthäusen, Berlin .....	13
Aussprache (mit Kurzbericht von E. Lübecke, Berlin) .....	20
„Ein Meßverfahren zur Untersuchung des Flugzeugschalles und seine Ergebnisse.“ Von F. v. Schmoller, Rechlin .....	22
Aussprache (mit Kurzbericht von Ferd. Trendelenburg, Berlin) .....	25
„Frequenzcharakteristik und Reichweite von Flugzeuggeräuschen.“ Von F. A. Fischer, Kiel, und E. Kutzscher, Kiel .....	26
Aussprache (mit Kurzbericht von E. Hiedemann, Köln) .....	30
„Geräuschminderungsversuche an Luftschrauben.“ Von H. Backhaus, Karlsruhe, und G. Weymann, Karlsruhe .....	31
Aussprache .....	33
„Bordfernprechgeräte für die Luftfahrt.“ Von W. Janovsky, Berlin .....	34
„Verständigung im Flugzeug.“ Von J. Sedlmayer, Rechlin, und A. Darré, Rechlin .....	38
Aussprache zu den beiden vorstehenden Vorträgen .....	42
„Schalldämpfer für Rohrleitungen.“ Von H. Reiher, Stuttgart .....	42
Aussprache .....	47
<b>Sonderaussprache</b> .....	48
<b>Zusammenfassung der Tagungsergebnisse</b> .....	48
<b>Besichtigungen:</b>	
Besichtigung der akustischen Versuchsvorrichtungen und der Meßeinrichtung für Lärmforschung auf dem Flugplatz Göttingen .....	50
Besichtigung der Aerodynamischen Versuchsanstalt und des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Strömungsforschung in Göttingen .....	50
<b>Teilnehmerverzeichnis</b> .....	51

## Einführung.

Nach Eröffnung der Tagung und Begrüßung der Teilnehmer durch Stuchey übernimmt Betz den Tagungsvorsitz mit folgender Einführung.

Die letzte Lärmtagung im Februar 1935 brachte noch verhältnismäßig wenig Mitteilungen über praktische Erfolge der Lärmbekämpfung. Sie brachte mehr ein Programm von Wünschen. Verhältnismäßig weit war damals schon die Bekämpfung des Auspuffgeräusches der Motoren entwickelt. Aber auf anderen Gebieten steckte man fast durchweg noch in den allerersten Anfängen. Als dringende Aufgaben wurden damals außer der Weiterentwicklung der Mittel zur Bekämpfung des Auspuffgeräusches hervorgehoben: die Aufklärung des Luftschraubengeräusches, Maßnahmen zur Schalldämmung in der Kabine, die Schaffung von Verständigungsgeräten und in losem Zusammenhang damit Untersuchungen über Schallausbreitung und über Schallabhören.

In der Zwischenzeit ist vor allem die Frage der Geräuschkämmung sehr erfolgreich bearbeitet worden und auch auf dem Gebiet der Verständigung sind, insbesondere von Seiten der Luftwaffe, erhebliche Fortschritte gemacht worden, über die hier berichtet werden wird. Wir sind den betreffenden Dienststellen ganz besonders dankbar, daß sie einen Bericht über diese erfolgreichen Verfahren ermöglicht haben.

Bezüglich der Luftschraubengeräusche ist man auch weitergekommen, aber im wesentlichen sind es nur experimentelle und theoretische Arbeiten, die zur Aufklärung der Grundlagen beigetragen haben. Die eigentliche Verwertung dieser Ergebnisse läßt noch viel zu wünschen übrig, obwohl innerlich fruchtbare Ansätze

zu erkennen sind, so daß die Aussicht besteht, auch hier etwas weiter zu kommen. Solange es jedoch nicht möglich ist, das Luftschraubengeräusch wesentlich herabzusetzen, hat es auch keinen rechten Zweck zur Herabsetzung des Motorengeräusches besondere Maßnahmen zu treffen, und deshalb sind die für die Motorengeräuschdämpfung an sich gegebenen Möglichkeiten bis jetzt nicht recht verwertbar. Bei dieser Sachlage wäre gerade ein Erfolg bei den Luftschrauben besonders dringend zu wünschen.

Es kann auf dieser Tagung in erheblich stärkerem Maße als auf der vorigen Tagung über Erfolge berichtet werden. Daneben bleiben aber immer noch viele Wünsche unerfüllt.

Die Arbeit auf dem Gebiete der Lärmforschung war in der Zwischenzeit sehr rego. Daher erklärt sich auch das außerordentlich große Interesse und die starke Beteiligung an dieser Tagung. So sehr dieses große Interesse auch zu begrüßen ist, so hat eine Tagung mit großer Teilnehmerzahl und so reichem Stoff auch Nachteile und entspricht eigentlich nicht, wie schon in der Eröffnung gesagt wurde, den sonst bei den Fachtagungen der Lilienthal-Gesellschaft üblichen Grundsätzen. Es ist deshalb beabsichtigt, in der Zukunft das vorliegende Arbeitsgebiet weiter aufzuteilen, so daß Stoff und Teilnehmerzahl für die Tagungen der einzelnen Teilgebiete in den sonst üblichen Grenzen bleiben.

Nun möchte ich noch der Hoffnung Ausdruck geben, daß die Tagung viele neue Kenntnisse und Anregungen vermitteln und ein starker Anreiz zu weiterem Fortschritt sein möge.

## Vorträge und zugehörige Aussprachen.

### Die Erfolge der Entlärmung in Flugzeugkabinen.

Von H. Wehner, Berlin, und W. Williams, Berlin<sup>1)</sup>.

*Die folgenden Ergebnisse der Versuche zur Bekämpfung des Kabinenlärms verdankt die Deutsche Lufthansa in erster Linie der tatkräftigen Arbeit der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL). Die DVL hat die Verfahren untersucht, hat die Vorversuche und Laboratoriummessungen durchgeführt und hat endlich die Angaben für die Maßnahmen in der Praxis gemacht. Für diese Arbeit ist die DVL der DVL ganz besonders zu Dank verpflichtet.*

In einem Raume, wie ihn die Kabine eines Flugzeuges darstellt, der allseitig vom Schall umflutet wird, stellt sich eine Schallstärke ein, deren Größe von zwei Faktoren bestimmt wird:

1. Von der Schalldämmzahl der Wände und
2. vom Schallschluckgrad im Innern des Raumes.

Die Schalldämmzahl wächst zunächst einmal mit der Masse der Wand, also mit dem Wandgewicht, und mit der Frequenz, ist aber weiterhin auch abhängig vom Schluckgrad innerhalb der Kabine.

Für den Fall, daß keinerlei Schallschluckung im

Kabinnenraum vorhanden ist, ist auch die gesamte Schalldämmung, der Unterschied zwischen Schallstärke außen und Schallstärke innen, gleich Null. Man kann das so erklären, daß bei Abwesenheit jeglicher Schallschluckung im Rauminnern keine Energie verzehrt wird und daß somit die Schallstärke im Innern auf den Wert der Schallstärke außen aufgeschaukelt wird. Erst beim Vorhandensein einer bestimmten Schallschluckung ergibt sich eine wirksame Schalldämmung. Ihren vollen Wert erreicht die Schalldämmzahl, wenn  $A \cdot F_w = A_s$ , Absorption geteilt durch Wandfläche — gleich 1 wird.

Da im Flugzeug der Schall durch alle vier Wände und durch die Decke und durch den Fußboden eintritt, somit  $F_w$  praktisch gleich der Kabinenoberfläche ist, muß die Gesamtschluckung  $A$  sehr groß sein, jedenfalls bedeutend größer, als man es sonst in der Bauakustik gewohnt ist. Dort dringt der Schall im allgemeinen nur durch eine Wand oder durch die Decke in den Raum ein.

Es mußte somit versucht werden, mit einem möglichst kleinen Gewichts Aufwand besonders hohe Werte der Schallschluckung zu erzielen.

<sup>1)</sup> Vorgelesen von H. Wehner, Berlin.

### Schallschluckende Anordnungen.

Für die Erzielung hoher Schallschluckgrade stehen grundsätzlich zwei Anordnungen zur Wahl. Die eine beruht auf der Schallschluckung poröser Stoffe, die andere auf der Energieentziehung durch Resonanz.

#### a) Schallschluckung durch poröse Stoffe.

Die Schluckwirkung poröser Stoffe wie Filz, Watta oder wollartiger Gewebe, ist darauf zurückzuführen, daß die Poren und Kanäle des Stoffes für die schwingenden Luftteilchen einen Reibungswiderstand darstellen und geeignet sind, die Schwingungsweite der Luftteilchen herabzusetzen. Würde man den Stoff unmittelbar auf der Wand anbringen, so wäre die Wirkung gering; denn an der Oberfläche der Wand ist die Geschwindigkeitsamplitude des Mediums gleich Null. Die größte Wirkung des Reibungswiderstandes wird in einem Abstände zu erwarten sein, wo ein Maximum der Schwingungsweite vorhanden ist, nämlich im Abstände einer Viertel Wellenlänge vor der Wand. Das bedeutet wiederum, daß die Schluckwirkung frequenzabhängig ist, und daß um so tiefere Frequenzen geschluckt werden können, je größer der Abstand des Schluckstoffes von der Wand ist. Da im Kabinenraum besonders die tiefen Frequenzen von 100 bis 200 Hz stark vertreten sind, wäre es zwar wünschenswert, die Wandabstände gerade auf diese Frequenzen abzustimmen. Dem jedoch stehen die beschränkten Raumverhältnisse im Wege. In der Praxis wird im allgemeinen mit einem Wandabstand von 5 bis 8 cm zu rechnen sein.

Für die Wahl des Schluckstoffes sind folgende Gesichtspunkte maßgebend:

Der Schluckstoff darf keinen zu hohen Strömungswiderstand haben, weil sonst der Schall nicht in die Poren eindringen kann. Er darf auch umgekehrt keinen zu niedrigen Strömungswiderstand haben, weil dann die erwünschten Reibungsverluste zu klein sind. Die beste Wirkung ist von einem Stoff zu erwarten, dessen Strömungswiderstand gleich dem Schallwiderstand der Luft ist, nämlich 43 akustische Ohm. Die DVL fand aus einer großen Anzahl von Proben zwei Stoffe, die dieser Anforderung am besten entsprechen:

Ein Waffelfilz der Firma Genest von 4 mm Stärke, einem Gewicht von 1,25 kg/m<sup>2</sup>, mit 39 Ohm.

ein flauschartiges Gewebe der Firma Quantmeyer & Eicke, genannt Calmuc, von 2,5 mm Stärke, 0,52 kg/m<sup>2</sup> Gewicht, mit 40 Ohm Strömungswiderstand.

Für die praktische Anwendung des Verfahrens in Verkehrsflugzeugen war weiterhin die Frage maßgebend, wie weit der Stoff durch eine starre Wand, z. B. eine Sperrholzwand, abgedeckt werden darf, ohne daß die Schluckwirkung merklich darunter leidet. Versuche haben gezeigt, daß eine 3-mm Sperrholzplatte mit Löchern von 2 mm Durchmesser im Abstand von 6 mm als Träger des Calmucstoffes für die schallschluckende Wirkung keine Nachteile bringt.

Das Ergebnis solcher Messungen zeigt Abb. 1. Bis 200 Hz ist die Schluckung gering, dann steigt sie stetig an und erreicht bei 400 Hz 80%, bei 600 Hz 95%, oberhalb 600 Hz bewegt sich die Absorption zwischen 80 und 90%. Die Wirkung kann noch verbessert werden, wenn der ganze Luftraum mit Watta ausgefüllt wird. Die Schluckung steigt dann auch noch oberhalb 600 Hz weiter an und erreicht bei 800 Hz 100%. Leider hat diese Anordnung den Nachteil eines recht hohen Gewichtes.

#### b) Schallschluckung durch Resonanz.

Eine zweite Möglichkeit der Erhöhung der Schallschluckzahl bietet die Energieentziehung durch Resonatoren. In Abb. 2 sind drei derartige Anordnungen mit ihren Schluckwerten dargestellt. Die erste Anordnung besteht aus einer 25 mm starken Sperrholzplatte, die in bestimmten Abständen Bohrungen von 6 mm Durchmesser bekam und die 50 mm Abstand von der starren Wand im Falle der Flugzeugkabine die Außenhaut hat. Die Sperrholzwand ist mit Filz hinterlegt. Diese Anordnung kann als Parallelschaltung einer großen Zahl von Helmholtz-Resonatoren aufgefaßt werden. Die Luftsaule in den Bohrungen wirkt als Masse, das dahinterliegende Luftpolster stellt die Federung dar. Die größte Schluckwirkung ist bei der Eigenfrequenz des Systems zu erwarten. Wie aus der Messung zu erkennen ist, tritt eine Schluckung von 100% in der Gegend von 200 Hz auf.

Die Anwendung einer 25 mm starken Holzwand im Flugzeug wäre unzuweckmäßig. Eine dünne Holzwand (3 mm stark), bei der 25 mm lange Pertinaxröhrchen

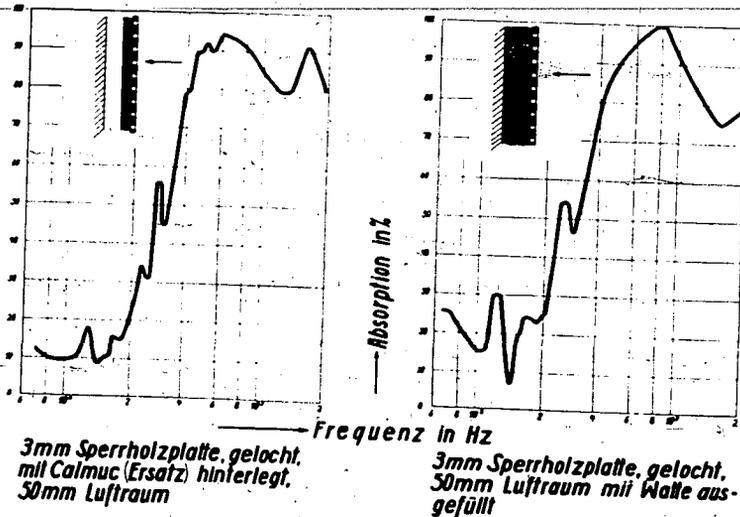


Abb. 1. Schallschluckung durch poröse Stoffe.

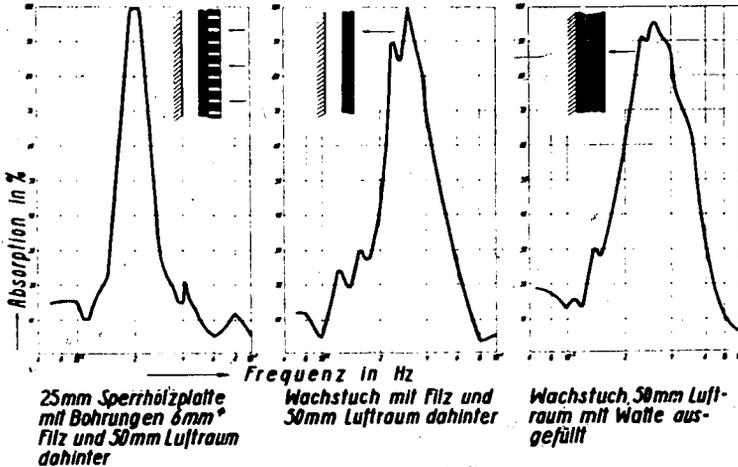


Abb. 2. Schallschlückung durch Resonanzen.

hindurchgesteckt wurden, die als Resonatorhals wirken, hat dieselbe Wirkung, wie durch Messung nachgewiesen wurde.

Die zweite Anordnung stellt eine mit Filz hinterlegte Wachstuchwand dar. Das Wachstuch ist die Masse, das Luftpolster dahinter die Federung des schwingungsfähigen Systems, die größte Schluckwirkung dieser Anordnung liegt bei 300 Hz. Diese Anordnung entspricht dem von Zandl bei der Entlärnung der Douglas Flugzeuge angewandten Verfahren.

Wird der Luftraum hinter der Wachstuchwand völlig mit Watte ausgefüllt, so erhöht sich die Wirkung: Die Resonanzkurve wird breiter, der Bereich der geschluckten Frequenzen wird größer.

#### Ergebnisse an ausgerüsteten Kabinen.

Von den gezeigten Anordnungen hat bisher die erste, nämlich das Verfahren der Schallschlückung durch

poröse Stoffe, gelochte Sperrholzwand mit Calmuc hinterlegt, praktische Anwendung gefunden. In dieser Weise wurde eine Anzahl von Neubau-Ju 52-Flugzeugen der DLH unter Berücksichtigung der Anforderungen des Flugbetriebes ausgestattet.

Abb. 3 und 4 zeigen die Inneneinrichtung dieser Flugzeuge: Der Kabinenraum ist unterteilt in Raucher- und Nichtraucherabteil. Im Raucherabteil Lesersessel, im Nichtraucherabteil Polstersessel in genopptem Stoff. Der Fußboden ist durchgehend mit Teppich ausgelegt, im Gang ein Läufer. Die Wände sind wie folgt unterteilt: Unten eine Fußleiste aus gelochtem Sperrholz, mit Calmuc hinterlegt; die Wandteile zwischen Fußleiste bis zur Fensteroberkante sind gleichfalls aus gelochtem Sperrholz, mit Calmuc hinterlegt und mit einem Dekorationsstoff überzogen, der gut schalldurchlässig ist. Die vordere Wand zwischen Führerraum und Kabine,

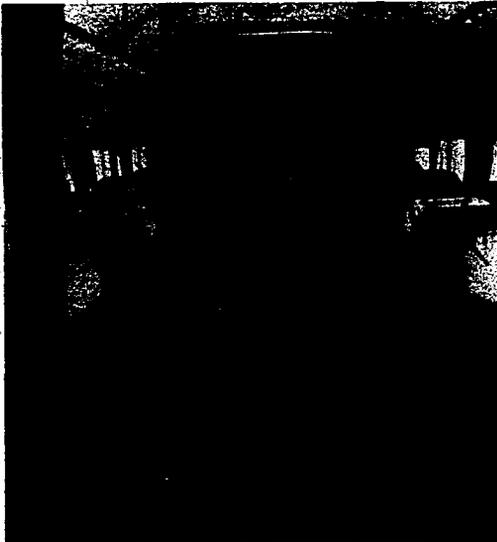


Abb. 3. Inneneinrichtung eines Ju 52-Neubauflugzeuges.

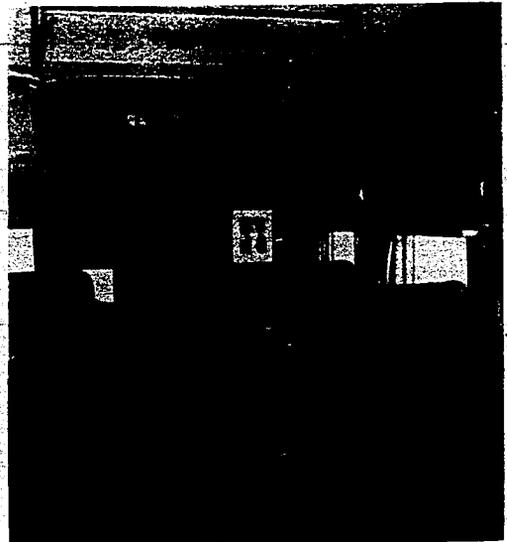


Abb. 4. Inneneinrichtung eines Ju 52-Neubauflugzeuges.

die hintere Wand und die Türen sind in der gleichen Weise aufgestattet. Die Deckenbogen sind gleichfalls aus gebleichtem Sperrholz, mit Calmuc hinterlegt und mit Dekorationsstoff verkleidet. Die Deckenfelder zeigen den gleichen Stoff, der ohne Sperrholzwischeneinlage mit Calmuc hinterlegt ist. Fenster- und Fensterrahmen sind in der üblichen bekannten Ausführung geblieben, jedoch statt der bisher verwendeten Rollvorhänge wurden Gardinen vorgesehen. Heizung, Lüftung und Beleuchtung, wie auch alle anderen Konstruktionseinzelheiten erfordern bei diesen Flugzeugen keine Veränderung.

Alle Maßnahmen zielen im wesentlichen darauf ab, die schallschluckenden Flächen möglichst groß zu machen. Was zur Verschönerung der Kabine und zur Erhöhung des Komforts beiträgt, ist auch gleichzeitig unumgängliches Mittel für die Entlärnung.

**Meßergebnisse.**

Zur Beurteilung des Erfolges der geschilderten Maßnahmen wurden Schallmessungen und Oktavspektralanalysen

mit dem objektiven Geräuschmesser von Siemens gemacht.

Abb. 5 zeigt einen Vergleich des Verlaufs der Analysenkurve einer entlärnten Ju 52 mit einer Ju 52 mit normaler Kabineausstattung bei Reisendrehzahl. Man sieht, daß die Schalldruckunterschiede in den beiden Kabinen mit wachsender Frequenz größer werden. Dar war zu erwarten, denn es liegt im Wesen der Anordnung, daß besonders die hohen Frequenzen geschluckt werden, während die tiefen Frequenzen kein wesentlichen Änderungen erfahren. Die Absenkung des Lärms macht sich im Raucherabteil (wo es in normalen Ju 52 Flugzeugen übermäßig laut zu sein pflegt) besonders bemerkbar. Es kann als kennzeichnendes Merkmal dieser Entlärnung gesagt werden, daß insbesondere die Kontraste zwischen großer Lautstärke bei Vollgas und kleiner Lautstärke bei gedrosselten Motoren wesentlich herabgemindert sind. Dieses Verhältnisse sind besonders deutlich in Abb. 6 zu erkennen. In der normalen Ju 52 (links) sind erhebliche Unterschiede zwischen Raucher- und Nichtraucherabteil und, insbesondere im

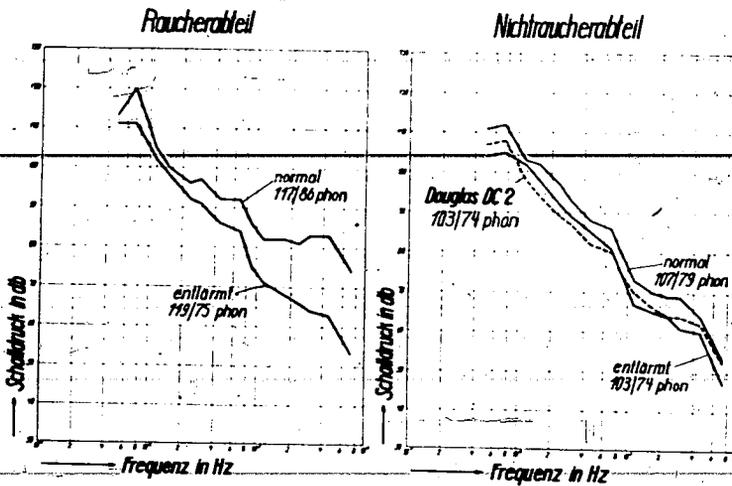


Abb. 5. Schalldruckvergleich Ju 52.

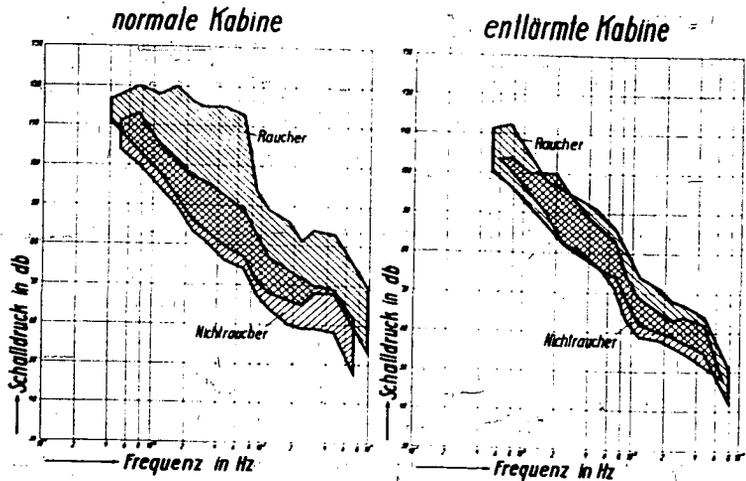


Abb. 6. Lärmkontraste Ju 52.

Raucherabteil, sehr starke Kontraste zwischen Groß- und Kleinstlautstärke. Für die schallschluckende Kabine sind die Unterschiede zwischen größter und kleinster Lautstärke klein, und der Unterschied zwischen Raucher- und Nichtraucherkabine ist nur noch unbedeutend.

In Abb. 5 sind auch die Oktavspektren der Douglas DC 2, der ja in der Frage der Geräuschbekämpfung ein guter Ruf vorausgeht, dargestellt. Der Vergleich teilt durchaus günstig für die Ju 52 aus. Besonders erfreulich war die Tatsache, daß der Übergang von der normalen Kabine der Ju 52 auf die entlärnte Kabine kein zusätzliches Gewicht gebracht hat.

Das Ergebnis der Messungen wird ergänzt durch den günstigen subjektiven Eindruck: Das Geräusch in der Kabine hat infolge der Absenkung der hohen Frequenzen einen sonoren Klang bekommen. Die Unterhaltung ist auch im Raucherabteil gut möglich, was mit dem günstigen 900-Hz-Wert von 74 phon erklärt werden kann. Die DVL hat einmal in ihrem Versuchsflugzeug Messungen der Silbenverständlichkeit durchgeführt. Die Silbenverständlichkeit stieg von 6,5% in einem völlig nackten Kabinenraum auf 48% in einer versuchsmäßig ausgestatteten Ju 52-Kabine.

Selbstverständlich sind die Maßnahmen in der Kabine als Lösung einer Teilaufgabe zu werten. Der Enderfolg in der Entlärnung eines Flugzeuges wird in nicht geringem Maße auch davon abhängen, wie weit schon bei der Planung schalltechnische Gesichtspunkte berücksichtigt wurden, z. B. möglichst große Entfernung zwischen Motor- und Luftschraube, einerseits, und Kabine andererseits, geringe Umfangsgeschwindigkeit der Luftschraube durch Verwendung unter-setzter Motoren, Verlegung der Auspuffrohre unter Berücksichtigung der abschirmenden Wirkung der Tragflächen, elastische Lagerung der Motoren, Schalenbauweise, geschlossene Holzung, Belüftung, Entlüftung usw.

Die Ausstattung der Ju 52 ist als eine Teillösung und als ein Anfang zu betrachten; denn die Gesamtstruktur lag fest, und an den Einzelheiten der Motoren und der Zelle ist nichts Grundsätzliches geändert worden. Bei den Neubauplänen der Luft Hansa jedoch, bei den viermotorigen Großflugzeugen Ju 90 und FW 200 sind auch jene über die Ausrüstung der Kabine hinausreichenden Probleme berücksichtigt worden.

Meßergebnisse von der ersten verkehrsmäßig ausgestatteten FW 200 zeigt Abb. 7. Im Nichtraucherabteil

ist das Focke-Wulf-Flugzeug - besonders nach tiefer Frequenzen hin - noch merklich günstiger als die entlärnte Ju 52. Auch der subjektive Eindruck ist durchaus gut, und eine Verständigung in der Kabine ist ohne jeden verstärkten Stimmaufwand möglich. Auch die Raucherkabine ist gut, wenngleich auch deutlich ein stärkerer Lärm feststellbar ist, der von den Auspuffstützen der rechten Motoren verursacht wird. Für die FW 200-Flugzeuge ist ein Einheitstriebwerk vorgesehen, bei dem alle Motorvorbauten aus Gründen der allerschleunigsten Austauschbarkeit einander gleich sind. Alle Auspuffstützen sind auf der linken unteren Seite angeordnet, wodurch der Auspuffschall der rechten Motoren ohne Abschirmung zur Kabine gelangen kann. In den Messungen kommt dies durch eine Schalldruckerhöhung in der Gegend von 200 Hz deutlich zum Ausdruck. Eine Änderung der Auspuffstützen ist vorgesehn.

Weiterhin ist in diesem Bilde der Lärm einer FW 200 ohne Kabinenverkleidung, also ohne wesentliche Schallschluckung im Raume, aufgetragen. Der Unterschied der beiden Kurven zeigt, welche Schalldämmung durch die Kabineneinbauten erzielt wurde.

Der Gewichtsautwand in der Kabine kann trotz guter Wirkung klein gehalten werden, Abb. 8. Die Gewichte der reinen Kabinenausstattung ohne Sessel werden für die Douglas DC 2 mit 81 kg je Flügelpaar angegeben, bei der entlärnten Ju 52 beträgt der

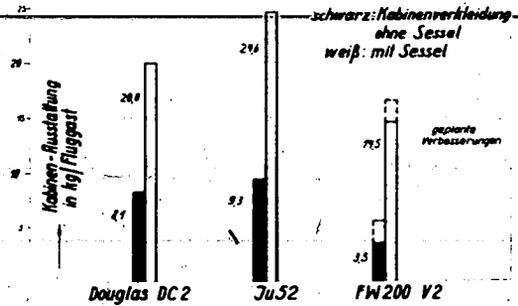


Abb. 8. Gewichtsautwand für Entlärnung.

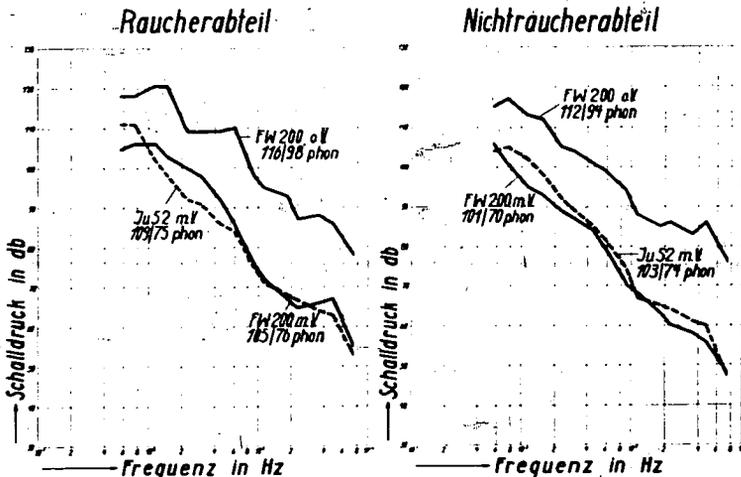


Abb. 7. Schalldruckvergleich FW 200.

Aufwand 9,3 kg Fluggast, bei der FW 200, V 2, ist eine Senkung auf 3,5 kg Fluggast gelungen. Berücksichtigt man auch das Gewicht der Sessel, die ebenfalls zur Schallschlückung beitragen, so ergeben sich die Gewichte:

- 20,9 kg Fluggast bei Douglas DC 2,
- 24,6 kg Fluggast bei Ju 52,
- 11,5 kg Fluggast bei FW 200.

Der Vergleich der deutschen Flugzeuge mit dem amerikanischen ist hier mangelhaft, weil bei den deutschen Sesseln eine Lastaufnahme von 800 kg Horizontalkraft gegenüber 400 kg bei Douglas zugrunde liegt.

Über die Wirksamkeit der Resonanzmethode liegen noch keine praktischen Erfahrungen vor; jedoch werden im Augenblick weitere Ju 52-Flugzeuge nach diesen neueren Gesichtspunkten ausgestattet. Endziel der Arbeiten wird sein, eine sinnvolle Vereini-

gung der verschiedenen Verfahren zu finden, daß bei kleinstem Gewichtsaufwand die größte Wirkung in der Entlärnung der Flugzeugkabine erzielt wird.

Es wäre verfehlt, sich mit den bisherigen Ergebnissen zufriedenzugeben; denn von einem Idealzustand sind wir noch weit entfernt. In gleichem Maße, wie die anderen grundsätzlichen Probleme der Sicherheit, der Geschwindigkeit, des Blindfluges und der Blindlandung diese endgültigen Lösung nahegebracht werden, tritt nach und nach das Problem der Sorgum das Wohlfinden des Fluggastes in den Vordergrund. Die Anforderungen an die Entlärnung werden daher in Zukunft weiter wachsen, und die wirtschaftliche Bedeutung dieser Frage für die Verkehrsfliegerei darf nicht unterschätzt werden. Wir brauchen auch weiterhin die Hilfe der Forschung, die uns neue Wege weisen soll. Die Praxis wird für jede neue Anregung dankbar sein.

## Aussprache.

Im Anschluß an den Vortrag Wehner folgte eine lebhatte Aussprache, in der über:

- a) Schalldämm- und Schallschluck Werkstoffe,
  - b) meßtechnische Fragen,
  - c) Einfluß der Fensterflächen auf den Kabinenlärm,
  - d) Durchführung der Verständlichkeitsmessungen
- gesprochen wurde.

### a) Schalldämm- und Schallschluck-Werkstoffe.

Auf Grund der Beobachtung, daß duktile Stoffe, wie z. B. feuchter Kitt, sich zur Schalldämmung besonders gut eignen, wird angefragt, ob man im Bestreben Kunststoffe zu verwenden, Stoffe gefunden und untersucht hat, die diesen Gesichtspunkten entsprechen und die auch bezüglich Gewicht günstige Werte haben (Baackhaus).

Man ist bestrebt, die bisher verwandten Faserstoffe, die zum größten Teil aus Baumwolle bestehen, schon aus Gründen der Rohstofflage durch Kunststoffe zu ersetzen. Hier tritt vor allem ein Faserstoff der I. G. Farbenindustrie hervor, der die Bezeichnung „W-K-Kurzschchnittfaser“ trägt und sich durch Feinheit und Weichheit der Faser auszeichnet. W-K-Faser ist nicht-entflammbar, unempfindlich gegen Wasser, Öle, Fette, Benzine, Säuren und Laugen, sowie aliphatische Kohlenwasserstoffe, dagegen löslich in Benzol. Ein Nachteil ist es, daß der Werkstoff höheren Temperaturen als 70 nicht ausgesetzt werden darf. (Solche Temperaturen kommen bei sehr starker Sonneneinstrahlung unter Umständen vor.) Eine laufende Großproduktion dieses Werkstoffes besteht noch nicht; aus müssen nähere Versuche erst noch zeigen, ob er für die Anwendung in Flugzeugen geeignet ist (Wilms).

Die bisher zur Schallisierung verwendeten Stoffe waren durchweg außerordentlich feuergefährlich. Im Schiffbau hat man daher ein Verfahren entwickelt, bei dem Asbest gegen die Wand gespritzt wird, so daß eine schallschlückende Asbestschicht an der Wandfläche haften bleibt. Das Verfahren hat sich sehr bewährt (Piening).

Der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt lag eine englische Patentanmeldung zur Überprüfung vor, die ein ähnliches Verfahren betrifft (Grützmaier). Die Fa. Norddeutsche Asbest- und Gummiwerke, Hamburg, hat anschließend die Lizenz dieses englischen Patentes für Deutschland erworben (Piening).

Nach dem englischen Verfahren sind auch die Untergrundbahnschächte in London teilweise ausgekleidet worden (Meyer).

Schallschluckstoffe wie Asbest kommen für den Flugzeugbau aus Gewichtsgründen nicht in Frage. Vielleicht kann man durch chemische Verfahren die Stoffe unbrennbar machen (Bullani).

### b) Meßtechnische Fragen.

Die Schallschluckstoffe werden im Hallraum unter anderen Bedingungen als in der Praxis durchgemessen. Es entsteht daher die Frage, wie sich die Stoffe bei der Auskleidung von Kabinen wirklich verhalten, da z. B. bei schwingungsfähigen Absorptionsstoffen die Gefahr naheliegt, daß sie selbst von ihrer Befestigungsstelle in Schwingungen versetzt werden. Man könnte aus den Ergebnissen der Hallraummessungen an schallschlückenden Stoffen und aus der Messung an nicht entlärnten Kabinen herausrechnen, was durch die Auskleidung erreicht werden kann und auf diese Weise feststellen, wie die theoretischen Vorhersagen mit den wirklichen Ergebnissen übereinstimmen (Meyer).

Bei der Fw 200 hat man zum erstenmal eine akustisch und ausgekleidete Kabine ausgemessen. Diese Ergebnisse liegen noch nicht vor, wohl aber die von einer Attrappe der Fw 200. Die Messungen an der Attrappe ergaben, daß die theoretischen Überlegungen sehr gut stimmen. Die Feststellungen an der Attrappe sind aber mit Vorbehalt aufzunehmen, da sie nur den Luftschall betreffen und bei der wirklichen Maschine noch Einflüsse von Körperschall usw. hinzukommen (Wehner).

Zu den Messungen an der Fw 200 ist noch zu bemerken, daß sie an einer Sonderausführung vorgenommen wurden, die nicht mit den Serienmaschinen übereinstimmt. Bei der Versuchsmaschine lag die Luftschraubenspitzen-Geschwindigkeit bei 300 m/s, während sie bei der Serienmaschine auf etwa 250 m/s herabgesetzt wird, wodurch das Geräusch noch weiter verringert wird. Die Unterschiede der Lärmhöhe zwischen der rechten und linken Kabinenhälfte werden weiter durch Änderung der Auspuffanlage behoben werden (Bullani).

Es wird angefragt, ob Vergleiche zwischen Messungen im Fluge und am Stand gemacht wurden und ob der Schall im Fluge geringer ist (v. Schmoller).

Für die Ausbildung des Verkehrsflugzeuges interessiert nur der Lärm, dem der Fluggast ausgesetzt ist. Alle Messungen sind daher im Fluge gemacht worden und in Höhen nicht unter 200 m, da Erdbodenreflexionen nur bis zu dieser Höhe eine Rolle spielen und darüber keinen Einfluß mehr haben (Wehner).

### e) Einfluß der Fensterflächen auf den Kabinenlärm.

Auf die Frage, ob die im Vortrag mitgeteilten Ergebnisse bei zugezogenen Fenstervorhängen gemessen worden sind (Sedlmayer) wird mitgeteilt, daß die Fenster Vorhänge hatten, die aber, wie es am häufigsten der Fall ist, beiseite geschoben waren. Es ist anzunehmen, daß der Einfluß der Fensterflächen nur gering sein wird (Wehner).

Bemerkenswert ist das Bestreben des Auslandes, die Fenster möglichst klein zu halten (Sedlmayer). In Deutschland macht man die Fenster im Prinzip möglichst groß und man wird nur ungern auf große Fenster verzichten. Oberdies wird der Verlust an schluckender Fläche wieder wettgemacht durch die sonstigen Kabineneinbauten, z. B. die stark schall schluckenden Sessel (Wehner).

Es erhebt sich die Frage, ob man durch Verwendung eines besser geeigneten Werkstoffes zur Verglasung nicht eine stärkere Schluckwirkung erzielt als mit gewöhnlichem Glas (Betz).

Im allgemeinen werden Sicherheitsgläser verwendet, die entweder aus plastischem Material oder aus Schichten bestehen. Diese Sicherheitsgläser dämpfen

genugend stark, und die Ergebnisse an der Ju 52 be weisen, daß dabei kleine Fensterflächen nicht unbedingt notwendig sind (Wehner). Bei mehrschichtigen Sicherheitsgläsern ist die Schalldämmung wesentlich größer als bei einfachen (Meyer).

### d) Durchführung der Verständlichkeitsmessungen.

Zum Schluß wurden auf eine Frage von Sedlmayer noch folgende Einzelheiten über die Durchführungen der Verständlichkeitsmessungen in Kabinen mitgeteilt: Die Verständlichkeitsmessungen in der Kabine wurden mit einem Magnetophon durchgeführt, d. h. die Silbentexte wurden auf Magnetophon-Filmbänder ausgesprochen und im Flugzeug durch einen Lautsprecher mit bestimmter meßbarer Lautstärke wiedergegeben. Zweck dieser Maßnahme war es, einen Normalsprecher zu haben, dessen Sprechlautstärke konstant und einstellbar war. Ein natürlicher Sprecher paßt seine Sprechlautstärke jeweils dem herrschenden Lärmpegel an; z. B. spricht er in einem Raum mit hohem Lärmpegel lauter. Eine unmittelbare Überwachung der Sprechlautstärke mittels Mikrophon und Anzeigegerät ist wegen der Anwesenheit des Flugzeuggeräusches nicht gut durchzuführen (Willms).

## Erfahrungen bei der Geräuschbekämpfung bei Kraftfahrzeugen und ihre Übertragung auf die Geräuschdämpfung von Flugzeugen.

Von O. Hoffmeister, Stuttgart.

Bei der Behandlung der Geräuschdämpfung bei Flugzeugen ist es nützlich, sich die Erfahrungen vorzuziehen, die auf verwandten Gebieten vorliegen, besonders, wenn dort die Geräuschdämpfung schon weiter fortgeschritten ist.

Besonders naheliegend ist der Vergleich des Flugzeuges mit dem Kraftwagen, da bei beiden Beförderungsmitteln die Ursachen der Geräusche und die baulichen Anordnungen verwandt sind.

Einen Überblick über die Geräuschquellen beim Kraftwagen gibt die folgende Zusammenstellung:

Luftschall.		
Triebwerk	Fahrwerk	Wagenkörper
Auspuff Ansaug Lüfter Motorblock Getriebe	Reifenprofil Federn Bremsen Bleche	Windgeräusche Scheidentöne Wirbeltöne
Körperschall.		
Dröhnen durch Motog (Massenkräfte, Gasdrehkräfte)		
" " Kardanwelle (Unwucht)		
" " Reifen (auf Straßenpflaster)		

Besonders wichtig für den Vergleich ist das Triebwerk, und zwar Auspuff und Lüfter bzw. Luftschraube. In zweiter Linie kommen die Geräusche, die vom Motorblock und Getriebe abgestrahlt werden. Die

Geräusche durch das Fahrwerk fallen weg, und die reinen Stromungsgeräusche sollen hier nicht in Betracht gezogen werden.<sup>26</sup> Wichtig sind noch die tiefen Drehgeräusche, die durch die Einwirkung mechanischer Wechselkräfte auf den Wagenkörper bzw. Kabinenkörper entstehen.

### Auf dem Luftwege übertragene Geräusche.

Der Schall wird von den Schallquellen in den Außenraum abgestrahlt und dringt dann durch die Kabinenwände ins Innere ein, s. Abb. 1.

Man kann nun unterscheiden zwischen Maßnahmen zur Geräuschminderung zugunsten der Insassen und solche zur Beseitigung der Geräusche überhaupt. Da beim Flugzeug die Beseitigung der Geräuschquellen selbst noch nicht ausreichend gelingt, sucht man durch Dämmung der Kabinenwände den Schall am Eindringen zu verhindern.

Beim Kraftwagen sind am Wagenkörper keine besonderen Maßnahmen erforderlich, da die Geräuschquellen schon am Motor und Auspuff ausreichend unterdrückt werden können. Die Schalldämmung des Kraftwagenkörpers darf gar nicht gesteigert werden, damit die Verkehrsgeräusche und Warntöne vom Lenker noch wahrgenommen werden können.

Nun ist aber heutzutage die Lautstärke im Innenraum meistens höher als diejenige im Außenraum.

Abb. 2 zeigt die Schalldruckschwingung im Innern eines solchen Wagens, der mit 4 Zylinder-Motor versehen war. Es ist dies eine Schwingung sehr tiefer Frequenz, die deutlich zusammenhängt mit der Motordrehzahl. Es erscheinen zwei Schwingungen je Kurbelwellenumdrehung, so daß als Schwingungsreger die Massenkräfte und Gasdrehkräfte zweiter Ordnung in Betracht kommen, die ja beim 4 Zylinder-Motor besonders groß sind. Die Schalldrücke sind sehr hoch, und zwar im Innenraum wesentlich höher als außerhalb. Ändert sich die Motordrehzahl, so zeigt die Amplitude des Schalldruckes deutliche Resonanzstellen.

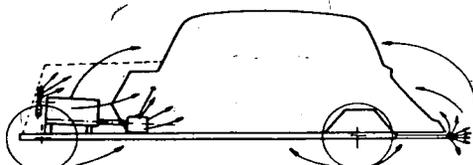


Abb. 1. Übertragungsweg des Luftschalles.

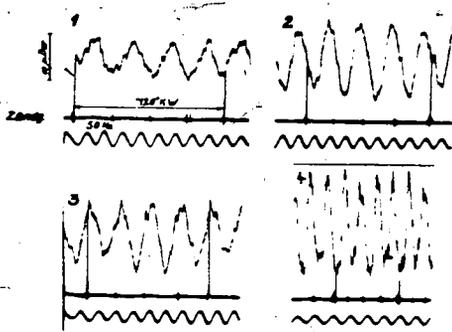


Abb. 2. Verlauf der Druckschwängung im Innern eines Kraftwagens mit 6-Zylinder-Motor

Es werden dann gewisse Übertragungsglieder in ihrer Eigenfrequenz angeregt, und zwar ist dies besonders der Fall beim Fahrzeugrahmen, aber auch bei den Karosserieteilen.

Beim Fahren über gepflasterte Straßen, Abb. 3, wirken bei manchen Wagen störende Erregungen über den Radkörper und die Rahlaufhängung auf den Fahrzeugrahmen ein. Es bilden sich dann bei allen Fahrgeschwindigkeiten die Eigenfrequenzen bevorzugt aus.

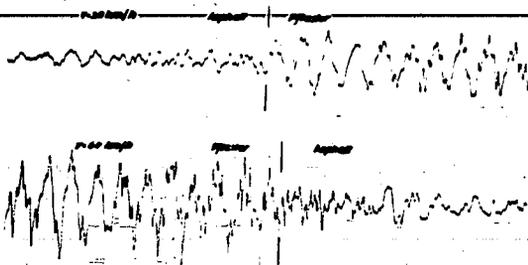


Abb. 3. Dröhnen eines Wagens bei der Fahrt über verschiedene Fahrbahndecken

In Abb. 4 ist der Weg dieser Schwingungen zu sehen. Sie gehen vom Motor oder Rad aus, über den Rahmen bis zum Wagenkörper und strahlen von dort in den Innenraum ein.

Bildet man das Verhältnis  $\frac{p_a}{p_i}$  der Schalldrücke außerhalb und innerhalb des Wagenkörpers, so erhält man Werte, wie sie in Abb. 5 dargestellt sind.

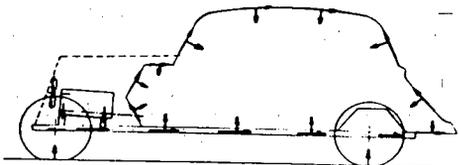


Abb. 4. Übertragungswege des Körperschalls

Bei der Messung der Schalldämmung gegen Luftschall wurde der Wagenkörper in einer schwach gedämpften Halle mit Hilfe von Lautsprechern mit reinen Frequenzen beschallt. Bei hohen Frequenzen ist die Schalldämmung sehr gut, bei sehr tiefen Tönen ist sie geringer. Es waren ja auch keine besonderen Maßnahmen ergriffen worden.

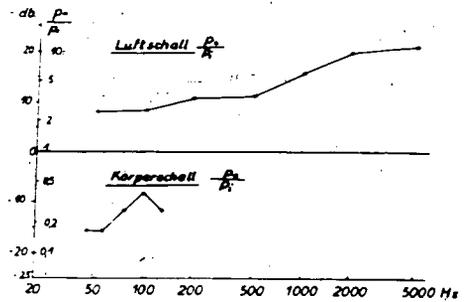


Abb. 5. Verhältnis  $\frac{p_a}{p_i}$  der Schalldrücke innerhalb und außerhalb eines Wagens

Setzt man nun den Motor in Betrieb, so kann der Innenschalldruck bis zu 20 db höher sein als der Außenschalldruck, selbst wenn dieser sehr dicht an der Wagenwand gemessen wird.

### Körperschall

Zu Beginn der Geräuschmessungen wurde einmal versucht, auch das Dröhngeräusch durch Abkleiden der Innenwände zu mindern. Aber selbst dann, wenn der gesamte Innenraum mit Putzwolle ausgestopft wurde, so daß nur noch Platz für das Mikrophon übrigblieb, zeigte sich kein Erfolg. Man muß also hier anders vorgehen.

Während des Dröhnvorganges die augenfälligen Verformungen des Wagenkörpers unter Berücksichtigung der Phasenlage, so sieht man, daß große Wandflächen als Ganzes schwingen. Die größten Schwingungsauslässe betragen bis zu 1 mm; da aber manche Wandflächen gegenphasig schwingen, ruft nur ein Differenzbetrag Schwankungen des Innenvolumens hervor, die dann zu Druckschwängungen führen, vgl. Abb. 6.

Man sollte nun meinen, daß durch den Einbau von Verstärkungen leicht Abhilfe geschaffen werden kann.

Die Versuche zeigten aber, daß auch bei Einbau sehr kräftiger Streben und Stützen die Dröhnenschwingungen bestehen bleiben.

Die Biegeschwingungen des Rahmens zwingen den starr aufgesetzten Wagenkörper zur Verformung, und die Verstärkungen des Aufbaus können die Schwingungen des Rahmens nicht unterdrücken.

Erst wenn die Verbindung des Wagenkörpers mit dem Rahmen gelockert wird, besitzen die Stützen ihre Wirksamkeit.

Kleine Änderungen an den Blechen bringen nur dann Erfolg, wenn die Bleche selbst in Eigenschwingungen geraten waren.

Die grundsätzlichen Unterschiede zwischen Luftschall und Körperschall lassen sich am besten an Hand von vereinfachten Modellen zeigen, Abb. 7.

Die linke Darstellung zeigt einen Wagenkörper, dessen Wände starr gedacht sind und auf dessen normale Seitenfläche Luftschall eindringt. Die Schall-schwingung wird durch die Wand und den Dämmstoff abgeschwächt und die Anspannkugel der Schwingungen im Innern kann durch Einbringen von Absorptionsmitteln verhindert werden.

Beim rechten Teilbild wird angenommen, daß die Wand mechanisch erregt wird. Sie wirkt beim Dröhnen, wenn die Wellenlänge des abgestrahlten Schalles groß ist gegenüber den Ausdehnungen des Innenraumes, wie ein Kompressorkolben. Der entstehende Innendruck läßt sich dann aus den Formeln für die adiabatische Zustandsänderung berechnen; das Einbringen von Absorptionsmitteln kann in diesem Fall keinen Erfolg bringen.

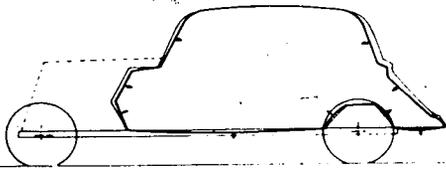


Abb. 6. Beispiel der Verformung eines Wagenkörpers beim Drohsvorgang.

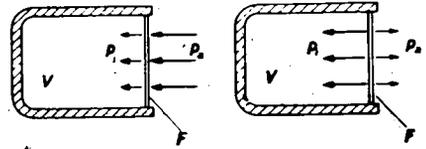


Abb. 7. Vorgang beim Auftreten von Luftschall und von Körperschall, dargestellt an einer vereinfachten Anordnung.

Aus der Formel für die adiabatische Drückänderung

$$\frac{p_p}{p} \times \frac{V}{V}$$

ergibt sich bei der Annahme eines Innenvolumens  $V = 4 \text{ m}^3$ , der schwingenden Fläche von  $F = 1 \text{ m}^2$  und einem Schwingungsausgleich von nur  $a = 0,05 \text{ mm}$  der Schalldruck  $p_a = 17,5 \text{ aBar}$ .

Die Ausstrahlung der Fläche  $F$  in den Außenraum läßt sich aus den Strahlungsgesetzen ableiten. Für das angeführte Beispiel ergibt sich bei der Frequenz 50 Hz ein spezifischer Strahlungswiderstand  $\frac{r_a}{F} = 2,2$ , somit als Schalldruck unmittelbar neben der Fläche  $F$

$$p_a = 3,5 \text{ aBar}$$

Es ergibt sich also als Verhältnis von Außendruck zu Innendruck  $\frac{p_a}{p_i} = 1$ , ein Wert, der auch bei Messungen erhalten wurde, s. Abb. 5.

Nähern sich die Abmessungen des Innenraumes dem vierten Teil der Wellenlänge, so wird die Schalldruckverteilung beim Drohen ungleichmäßig; aber erst beim Erreichen der halben Wellenlänge können akustisch bedingte Resonanzschwingungen auftreten.

Bei Wagenkörpern und Flugzeugkabinen bringt die Auskleidung der Wände mit Dämm- und Absorptionsstoffen dann eine Geräuscheminderung, solange der Hauptteil des Innengeräusches als Luftschall von außen eindringt oder als Körperschall hoher Frequenzen abgestrahlt wird.

Wird die Schalldämmung weitergetrieben, so kann durch die weitere Dämpfung der höheren Frequenzen wohl noch eine bessere Sprachverständlichkeit erzielt werden, aber die tiefen Droherscheinungen des Körper-

schalles, der durch das Triebwerk angeregt wird, bleiben bestehen. Da sie nun den wesentlichen Anteil des Innengeräusches bilden, kann die Gesamtlautstärke durch Dämmmittel nicht weiter gesenkt werden. Es sind also besondere Maßnahmen zur Beseitigung des Körperschalles anzuwenden.

Es muß hier die Verformung der Kabine durch mechanische Kräfte sehr weitgehend vermieden werden. Beim Kraftwagen hat sich aber gezeigt, daß Abstützen der schwingenden Wände wenig Erfolg bringt, weil es nur unvollkommen durchgeführt werden kann.

Den besten Erfolg brachte natürlich die Vermeidung der Erregerkräfte selbst, oder die Verhinderung der Weiterleitung derselben durch die Einführung ausreichend geteilter Motorvorbauten. Beides läßt sich aber nur unvollkommen erreichen. Günstig ist eine hohe Dämpfung der Träger, die die Schwingungen weiterleiten.

Die wesentlichsten Arbeiten müssen jedoch an der Kabine selbst durchgeführt werden. Die Verlagerung der Eigenfrequenzen von Bauteilen wird zu keinem befriedigenden Erfolg führen. Wichtig ist jedoch die Beobachtung, daß die gut gewölbten Beschläge von Kraftwagen in Ganzstahlbauweise nicht schwingen, daß alle geraden oder schwach gewölbten Bleche, z. B. Reservieradmulden, als Federmembranen wirken und das Drohen begünstigen.

Demzufolge wäre die ideale Formgebung, weil ihre Wände sehr steif und widerstandsfähig gegen Schwingungskräfte sind. Ähnliche Eigenschaften zeigt ein runder, gut gewölbter Stromlinienkörper, bei dem aber darauf zu achten ist, daß nicht durch Türen und Zwischenwände wieder schwingungsfähige Flächen auftreten.

## Aussprache.

Zu den Ausführungen von Hoffmeister wird zunächst bemerkt, daß die angeführte Formel

$$\frac{p_p}{p} \times \frac{V}{V}$$

offenbar nur gültig sein kann für den Fall, daß die Dimension des Raumes klein ist im Verhältnis zur Wellenlänge, d. h. also nur für Frequenzen unterhalb von etwa 300 Hz (Lichte).

Die Formel gilt tatsächlich nur für tiefe Frequenzen. Bei ihrer Anwendung werden die Grenzwerte nicht überschritten, da abhängig von der Motordrehzahl für den Körperschall immer nur mit niederen Schwingungsfrequenzen zu rechnen ist. Beim Kraftwagen liegen die Werte z. B. zwischen 25 und 100 Hz (Hoffmeister).

In der weiteren Aussprache wurden noch Ausführungen gemacht über:

- a) Kabinenwandschwingungen bei Flugzeugen.
- b) Einwirkung der Schwingungen auf den menschlichen Organismus.
- c) Messung sehr tiefer Frequenzen

### a) Kabinenwandschwingungen bei Flugzeugen.

Um zu veranschaulichen, welche Wandschwingungen bei Flugzeugkabinen auftreten können, teilt Willms einige Ergebnisse über Messungen an einer Ju 52 mit:

Ein Anhaltspunkt über die Größe der Schwingungen von Kabinenwänden bei Flugzeugen wird durch die Darstellung in Abb. 1 gegeben. In einer schematisch angedeuteten Abwicklung der Kabinenoberfläche sind die Schwingungsamplituden angegeben, die im Mittel in den betreffenden Feldern gemessen wurden (Ju 52, Reiseflug). An den Spanten sind die Ausschläge durchweg klein; bemerkenswert gering ist die Schwingungsamplitude des Fußbodens.

Die Oszillogramme, aus denen die Amplituden ermittelt wurden, wurden mit dem elektrodynamischen Schwingungsmesser der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) aufgenommen. In den Aufzeichnungen überwiegt die Frequenz von 55 Hz. Es handelt sich also, da die Drehzahl der Motoren 1650 U/min betrug, entweder um mechanische Schwingungen zweiter Ordnung oder um eine Anregung durch den Grundton der zweiflügeligen Luftschrauben.

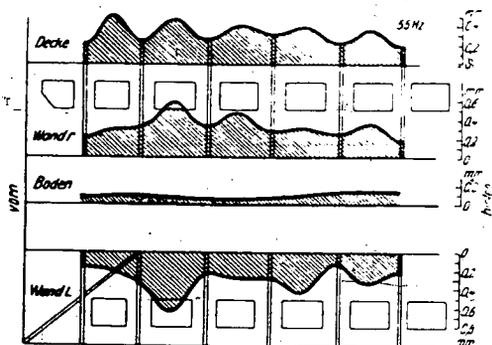


Abb. 1. Schwingungsmitteln der Ju 52-Kabinenoberfläche bei im Reiseflug.

### b) Einwirkung der Schwingungen auf den menschlichen Organismus.

Bezugnehmend auf die im Vortrag Hoffmeister erwähnten Ermüdungserscheinungen, die bei Einfluß von Dröhnschwingungen beobachtet wurden, erfolgt einmal ein Gedankenaustausch über den subjektiven Eindruck sehr tiefer Frequenzen:

Aus den verschiedenen Beobachtungen ist zu schließen, daß auch im Flugzeug die tiefen Frequenzen größere subjektive Wirkungen hervorrufen.

Trotz der zahlreichen Schallmessungen bei Flugzeugkabinen trat immer wieder einmal ein Fall ein, bei dem sich der subjektive Eindruck stärker erwies, als man auf Grund der objektiven Messung erwarten konnte. Es ist anzunehmen, daß hierbei die allertiefsten Frequenzen eine große Rolle spielen und es ist daher zu wünschen, daß die Meßgeräte, die oberhalb 200 bis 300 Hz richtig arbeiten, auch unter 200 Hz einwandfreie Ergebnisse liefern (Wehner).

Es wäre wichtig, die gleichzeitige Einwirkung tiefer und hoher Frequenzen auf das menschliche Ohr zu untersuchen: Die ganz tiefen Frequenzen in dieser ungewöhnlichen Stärke werden voraussichtlich eine außerordentliche Vorbelastung des Ohres bringen, so daß bei Überlagerung von tiefen und hohen Frequenzen die hohen Frequenzen u. U. sehr viel leiser empfunden werden als für sich allein. Auch wird sich hier die starke Nichtlinearität des Ohres auswirken (Grützmacher).

Dann wurde über beobachtete und versuchsmäßig festgestellte Schwingungseinflüsse von S. Ruff ein Kurzbiericht gegeben, s. unten.

### c) Messung sehr tiefer Frequenzen.

Die DLH-Versuche wurden mit dem Siemens-Geräuschmesser durchgeführt. Die Angabe der Meß-

ergebnisse im Lautstärkenmaß befriedigte zur Vergleichsmessungen nicht, weil die verschiedenen Meßgeräte ganz verschiedene Ohrkurven besitzen. Man ging deshalb, dazu über, die Phonwerte in Schalldruckwerte umzurechnen. Hierbei zeigten sich folgende Schwierigkeiten:

1. die statische Eichung weicht wesentlich von der Eichung im freien Schallfeld ab.
2. Soviel wir heute wissen, ist die Eichung bei Frequenzen oberhalb 200 bis 300 Hz richtig. Darunter, aber, besonders bei Frequenzen tiefer als 50 Hz, reichen die augenblicklichen Mittel nicht aus, um genaue Aussagen über den Frequenzverlauf machen zu können.

In der DVL wird an den Fragen der Messung bei tiefen Frequenzen beharrt gearbeitet und es ist zu hoffen, daß man auch hier bald zum Ziel kommt. Geklärt muß vor allem werden, ob die Durchlassigkeitbereiche des Oktavsiebes auch bei tiefen Frequenzen einwandfrei sind und ob nicht an bestimmten Stellen unerwünschte Mehrfachdurchlässigkeit auftreten (Wehner).

Die Frage der Vergleichbarkeit der Meßergebnisse mit verschiedenen Geräten mußte gelegentlich einmal gesondert besprochen werden.

Auch ganz tiefe Frequenzen lassen sich an und für sich messen. Physikalisch dürfte es hierbei keine großen Schwierigkeiten geben (Grützmacher).

Der Grund für die Abweichungen in den Lautstärkenangaben verschiedener Geräuschmesser dürfte in dem starken Anteil der tiefen Frequenzen im Flugzeuggeräusch liegen. Während man sich im allgemeinen damit begnügen kann, daß zwei Geräuschmesser im mittleren Frequenzgebiet übereinstimmende Frequenzkurven haben, müssen solche Geräte, die zu Messungen in Luftfahrzeugen verwendet werden, insbesondere auch an der unteren Grenze ihres Frequenzbereiches übereinstimmen. Der Anteil der Frequenzen beispielsweise unter 50 Hz an der Gesamtlautstärke ist so groß, daß Verschiedenheiten der Geräte unter 50 Hz sich sehr stark bemerkbar machen. Es erscheint somit notwendig, die Frequenzkurven von Geräuschmessern und Schalldruckmessern nicht nur bis zu einer Grenze von 50 oder 30 Hz vorzuschreiben und übereinstimmend zu machen, sondern auch noch darunter. Es ist nicht nur notwendig, eine untere Frequenzgrenze von Schallmeßgeräten festzulegen, sondern man muß auch noch festlegen, wie die Grenzkurve verlaufen soll (Willms).

Die Versuche an Kraftwagen zeigten ebenfalls, daß man sehr tief abwärts messen soll. Wenn z. B. beim Kraftwagen die Fenster geöffnet sind, kommen in Abständen von etwa  $\frac{1}{2}$  s Luftwirbel in das Wageninnere herein. Diese Luftwirbel rufen im Wageninnern Druckschwankungen von nur etwa 8 bis 10 Hz hervor, die sich aber sehr unangenehm bemerkbar machen. Es ist daher erforderlich, den Meßbereich noch erheblich nach unten zu erweitern (Hoffmeister).

## Einfluß von Schwingungen auf den menschlichen Organismus.

Von S. Ruff, Berlin.

### Einfluß von Schallschwingungen.

In einem Fall konnten vor einigen Monaten ganz grobe Einwirkungen im Bereich des Gehörorganes festgestellt werden, die sicherlich nicht durch den Druckunterschied beim Sturzflug bedingt waren: der Einflieger eines Flugzeugwerkes hatte mit einem Sturzbombenflugzeug eine Reihe von Sturzflügen mit einer neuen Luftschraube durchzuführen. Bei dem

ersten Flug traten nach etwa 1000 m Sturz Schmerzen in beiden Ohren auf, die sich in wenigen Sekunden zur Unerträglichkeit steigerten. Der Flugzeugführer nahm das Flugzeug so schnell wie möglich aus dem Sturzflug in die Normallage, die Schmerzen blieben jedoch in gleicher Stärke weiter bestehen, so daß er nicht im Stande zu sein glaubte, das Flugzeug sicher auf den Boden zu bringen. Die Landung gelang.

jedoch wurde er kurz danach für kurze Zeit bewußlos. Die unerträglichen Schmerzen ließen zunächst, nicht nach, sie strahlten von beiden Ohren in den Nacken aus. Die Hörfähigkeit war sehr stark herabgesetzt. Bei der Untersuchung fanden sich beiderseits stark gerötete Trommelfelle, vor dem einen Trommelfell etwas schäumiges Blut und in beiden Paukenhöhlen ein blutiger Erguß. Es bestand kein Tubenkatarrh.

### Einfluß von Erschütterungen.

Bei der DVL sind seit einiger Zeit Versuche in Angriff genommen worden, die den Einfluß von mechanischen Schwingungen auf den Menschen klären sollen. Im Augenblick wird mit sinusförmigen Schwingungen gearbeitet. Bereits bei den ersten wenigen Versuchen, die bisher durchgeführt wurden, zeigte es sich, daß

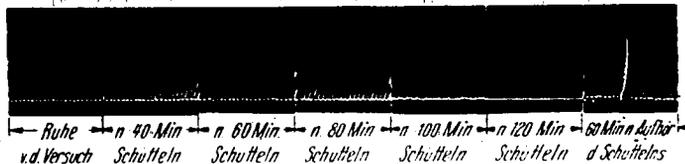


Abb. 1. Einfluß von Schwingungen auf den Patellarreflex.

Versuch L 26      Dat. 6. X. 37  
Vp. B.              V. L. Coermann  
Vers. Bod.        50 Hz (sinusförmig)  
                         Ampl. 0,7 mm

Nach Räuspern und Ausspucken fand sich jedesmal im Auswurf etwas Blut. Die Blutung und die Schmerzen konnten folglich nicht durch fehlenden Druckausgleich zwischen Mittelohr und Außenluft bedingt sein. Als Grund für die Erscheinungen wurden Schwingungen angesehen, die, vielleicht durch die Luftschraube erzeugt, der Eigenschwingung des Trommelfells entsprachen.

diese Schwingungen unter Umständen schwere Störungen im Bereich des Zentralnervensystems hervorrufen können. Abb. 1 zeigt den Einfluß von Schwingungen auf den Patellarreflex. Nach kurzer Einwirkungszeit ist er bereits nicht mehr auslösbar. Ob die Störung hierbei, wie anzunehmen ist, im Bereich des Reflexbogens sitzt, muß erst durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

## Neuere Untersuchungen über das Luftschraubengeräusch.

Von W. Willms, Berlin, und W. Ernsthausen, Berlin<sup>1)</sup>.

Als vor zwei Jahren die erste Geräuschtagung der Vereinigung für Luftfahrtforschung stattfand, war das Hauptthema der Tagung der Auspuffschall. Über das Luftschraubengeräusch wurde nach dem damaligen Stand nur ein kurzer Bericht gegeben, und ein Beitrag von Prof. Prandtl verlesen, der einige Betrachtungen über die Schallenergie von Luftschrauben enthielt. Die Klärung der Fragen des Luftschraubengeräusches wurde als besonders dringend bezeichnet. Ich habe heute über Untersuchungen zu berichten, die in der Zwischenzeit in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt auf diesem Gebiet ausgeführt wurden.

Über den Luftschraubenschall sind bisher Arbeiten von Waetzmann, den Engländern Lynam, Webb, Paris, Kemp und Hart und dem Japaner Obata bekannt geworden. Neuerdings hat Gutin in der Physikalischen Zeitschrift der Sowjetunion den alten Messungen von Paris und Kemp eine bessere Deutung gegeben.

Alle bisher bekannten Arbeiten lassen jedoch die Frage nach der eigentlichen Ursache des Luftschraubengeräusches unbeantwortet. So ist es z. B. wohl bekannt, wie eine Störung, die von einer umlaufenden Luftschraube hervorgerufen wird, sich ausbreitet, doch nicht wie sie entsteht. Mehrere Verfasser haben versucht, aus einer gemessenen Strahlungscharakteristik auf die Art und Verteilung der Quellen zurückzuschließen, ohne Näheres über die physikalische Natur der Quellen auszusagen. Obata hat dagegen wohl als erster eine Messung der Störung in der Nähe des Luftschraubenblattes vorgenommen, um auf diese Weise Aufschluß über die Natur der Quelle zu bekommen. Er hat auch darauf hingewiesen, daß Luftschraubenschall und die Störung in der Nähe der Luftschraube etwas Verschiedenes sind. Man muß offenbar bei einer Luftschraube ein Nahfeld und ein Fernfeld unterscheiden.

Zur Klärung dieser Frage wurden zunächst Messungen an Modellschrauben ohne Anstellung durchgeführt,

über die Ernsthausen in der „Luftfahrtforschung“ bereits berichtet hat<sup>2)</sup>. Hiervon ausgehend konnte Ernsthausen eine quantitative Theorie des Luftschraubenschalles aufstellen, die wir nur mit Hinsicht auf den Schub noch etwas ausgebaut haben.

Schließlich hatten wir Gelegenheit, durch Schallmessungen an Luftschrauben von Flugzeugen die Überlegungen zu prüfen und zu ergänzen.

Als Luftschraubenschall interessiert in diesem Zusammenhang nur der Drehklang, d. h. der harmonische Anteil des Luftschraubengeräusches. Der Drehklang hat ein wohldefiniertes Schallspektrum, dessen tiefste Komponente der Grundton, sich aus Drehzahl mal Flügelzahl ergibt. Ferner enthält er die gerad- und ungeradzähligen Overtöne in einer bestimmten, für ein Schraubenmuster charakteristischen Stärke und Verteilung.

Darüber hinaus erzeugt jede Luftschraube noch ein Drehgeräusch, das aus einem kontinuierlichen Spektrum besteht. Das Drehgeräusch entsteht durch die periodische Wirbelablösung hinter dem Luftschraubenblatt. Es entspricht dem, was man physikalisch einen Hiebton nennt. Das Drehgeräusch ist von verhältnismäßig hoher Frequenz und wird infolge der Absorption der Luft nicht auf große Entfernungen übertragen. In der Entfernung ist daher der Luftschraubenschall praktisch ausschließlich durch den Drehklang bestimmt.

Die Entstehung des Drehklanges ist folgendermaßen zu denken: Betrachten wir einen Punkt der Schraubenkreisfläche, so entsteht in ihm beim Vorbeigang eines Luftschraubenblattes eine Störung, die sich mit Schallgeschwindigkeit unter Abnahme ihrer Amplitude von dem Störungszentrum ausbreitet. Jedes Flächenelement der Schraubenkreisfläche stellt einen akustischen Strahler dar. Die gesamte Schallwirkung der Luftschraube in einem entfernten Aufpunkt  $P$  im Raume bekommen wir durch Integration über alle

<sup>1)</sup> Vorgetragen von W. Willms, Berlin.

<sup>2)</sup> Luftfahrtforschung, Bd. 13 (1936), S. 435.

Elementarstrahler der Luftschraubenkreisfläche unter Berücksichtigung ihrer Stärke und ihrer gegenseitigen Phasenlage.

**Stärke und Phase der Elementarstrahler.**

Der erste Teil der Aufgabe besteht also darin, die Stärke und Phase der Elementarstrahler zu bestimmen.

Aus der Messung des zeitlichen Verlaufs des Druckes in der Nähe der umlaufenden Luftschraubenblatts erhält man den Hinweis, daß die zeitliche Veränderung des statischen Potentialfeldes des Profils als Ergebnis der Elementarstrahler einzusetzen ist.

Mathematisch formuliert man die Aufgabe etwa folgendermaßen: Man lege um die Luftschraube eine geschlossen Kontrollfläche von flacher dosenförmiger Gestalt. Dann wird auf dieser Kontrollfläche in einem Flächenelement  $dS$  durch die umlaufende Schraube ein bestimmter zeitlicher Verlauf des Potentials  $\Phi$  und des Gradienten  $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$  vorgegeben. Das gesuchte Potential  $\Phi_P$  im Aufpunkt findet man aus der bekannten Formel der Potentialtheorie

$$\Phi_P = \frac{1}{4\pi} \int \int \frac{\dots (t - \frac{R}{c})}{R} \frac{\partial \Phi}{\partial n} dS - \frac{1}{4\pi} \int \int \frac{\Phi \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{R} \left( t - \frac{R}{c} \right) \right) dS}{R}$$

Diese beschreibt das Potential im Aufpunkt  $P$  in Abhängigkeit von der Verteilung von  $\Phi$  und  $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$  auf der Oberfläche des Gebietes. Die Formel gilt für die Ausbreitung von periodischen Störungen in einem zusammendrückbaren Medium, wie es die Luft darstellt, für das also die Differentialgleichung

$$\Delta \Phi + k^2 \Phi = 0$$

besteht.

Das statische Potentialfeld der Luftschraube bzw. eines Tragflügelprofils ist aber zunächst nur angebar in einem unzusammendrückbaren Medium, das der Differentialgleichung

$$\Delta \Phi = 0$$

genügt<sup>3)</sup>.

Es ist nun ein Kunstgriff, den man auch sonst bei ähnlichen Aufgaben anwendet, daß man in Gebieten, die klein zur Wellenlänge sind, die Differentialgleichung

$$\Delta \Phi + k^2 \Phi = 0 \quad \text{durch} \quad \Delta \Phi = 0$$

ersetzt. Die Ersetzung ist um so genauer möglich, je kleiner das betrachtete Gebiet ist. Wir rechnen also im Inneren unseres dosenförmigen Körpers aerodynamisch und außerhalb akustisch und erfüllen an der Grenzfläche die Grenzbedingungen

$$\Phi = \Phi' \quad \text{und} \quad \frac{\partial \Phi}{\partial n} = - \frac{\partial \Phi'}{\partial n}$$

Über den zeitlichen Verlauf der Störung in einem Flächenelement kann man aussagen, daß er sich im wesentlichen auf den Augenblick beschränkt, in dem das Profil vorbeistrichet, s. Abb. 1. Die Periode mit der die Störung auftritt, ist gegeben durch Drehzahl mal Flügelzahl. Es bedeutet nun eine wesentliche Vereinfachung, wenn man diesen Störungsverlauf durch eine Fourier-Analyse in seine harmonischen Komponenten zerlegt.

Wir betrachten also in Zukunft an Stelle der durch die Profillform gegebenen Zeitfunktion rein periodische

<sup>3)</sup> Bei einer genaueren Betrachtung muß man von dem statischen Potentialfeld einer Luftschraube in zusammendrückbaren Medium ausgehen.

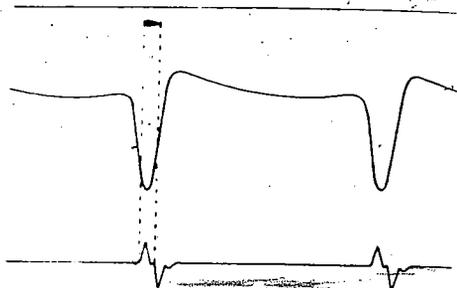


Abb. 1. Oscillographische Aufnahme der Druckdivergenz.

Störungen, deren Stärke durch ihren Fourier Koeffizienten  $k_n$  gekennzeichnet ist. Als Beispiel nähern wir uns Störungsfunktion durch eine Rechteckkurve von  $\frac{1}{2} \lambda$  Periodenlänge an und erhalten dann die Fourier Koeffizienten

$$k_n = 0,2 \quad 0,19 \quad 0,17 \quad 0,15 \quad \text{usw.}$$

Die ursprüngliche Störungsamplitude würde hier gleich 1 gesetzt. Man kann das Verfahren natürlich von Fall zu Fall der gegebenen Störung anpassen und dann verfeinern. Anschaulich ergibt sich daraus für die Strahlerformen der zweiflügeligen Luftschraube die in Abb. 2 gezeigte Darstellung.

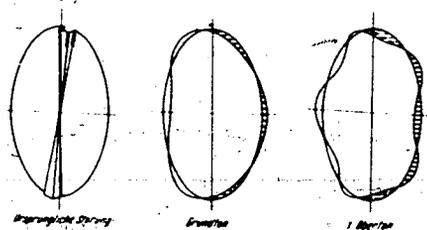


Abb. 2. Strahlerformen der zweiflügeligen Luftschraube.

Durch einige Überlegungen über die Menge des sekundlich verdrängten Mediumvolumens durch die Dicke des Profils bekommt man den Wert von  $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$  oder den Wert der Normalgeschwindigkeit auf der Kontrollfläche. Es ist die  $n$ -te Komponente von

$$v_n = \left( \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right) \frac{m \omega}{4\pi D k}$$

$m$  =  $r z$  Ordnungszahl mal Blattzahl,  
 $\omega$  Kreisfrequenz der Drehzahl,  
 $D$  Dicke des Profils.

Der Verteilung von  $v_n$  über dem Radius wird durch eine Funktion  $f(r)$  Rechnung getragen.

Den Wert von  $\Phi$  findet man aus dem Abtrieb bzw. der Zirkulation des Profils unter Berücksichtigung der Deutung des Potentials als Stoßdruck. Man erhält für Ober- und Unterseite des Profils

$$\Phi_0 - \Phi_n = \frac{z \Gamma}{m k_n}$$

hierin bedeutet  $\Gamma$  die Zirkulation und  $z$  die Anzahl der Blätter. Multiplikation mit einer Funktion  $g(r)$  gibt wieder die radiale Verteilung.

Nach der Bestimmung der Größe von  $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$  und  $\Phi$  der Elementarstrahler folgt die Berücksichtigung ihrer Phasenlage. Wir müssen unterscheiden zwischen

einer zeitlichen und einer räumlichen Phase. Die zeitliche Phase der Elementarstrahler ist dadurch gegeben, daß die Störung durch die Drehung des Luftschraubenblattes an den einzelnen Stellen nacheinander erfolgt.

$$\delta_0 = m\omega \quad (\omega = \text{Drehwinkel}).$$

Die räumliche Phase entsteht durch die verschiedenen lange Laufzeit der Störung zum Aufpunkt, s. Abb. 3.

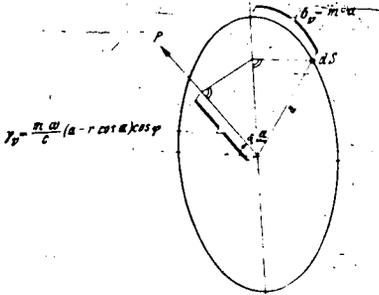


Abb. 3. Zeitliche Phase  $\delta_0$  und räumliche Phase  $\gamma$  des Elementarstrahlers  $\delta_0$ .

$$\gamma = \frac{m\omega}{c} (a - r \cos \alpha) \cos \varphi.$$

Hierin ist  $a$  der Radius der Schraube,  $\varphi$  der Winkel, den der Fahrstrahl zum Aufpunkt mit der Luftschraubenebene bildet.

In dem Ausgangsintegral kann zunächst die Integration für einen Ring der Schraubenebene durchgeführt werden und führt auf Besselsche Funktionen  $m$ ter Ordnung. Bei weit entferntem Aufpunkt tritt der

Ausdruck  $\frac{4\pi R}{c} \int_0^a \left[ m \left( t - \frac{R}{c} - \frac{R}{c} \cos \varphi \right) \right]^{-\frac{1}{2}}$  vor die

Integrale. Wir lassen ihn im folgenden fort, da er einfach die kugelförmige Ausbreitung des ganzen Vorganges wiedergibt. Wir erhalten somit die Schlußformel

$$\Phi_P = \frac{m m k}{2\pi} \int_0^a \left( D^2 J_m^2(r) - \frac{2\pi \Gamma}{r c} \cos \varphi \cdot g(r) \right) J_m^2(m v \cos \varphi) r dr$$

als Ausdruck für das gesuchte Potential im Aufpunkt P in Abhängigkeit von der Dicke D und der Zirkulation  $\Gamma$  des Profils ( $v =$  Umfangsgeschwindigkeit).

Allgemein kann man folgendes aussagen: Durch die Dicke des Profils ist ein Strahler nullter Ordnung gegeben, der ein Feld erzeugt, wie es von einer atmenden Kugel herrührt. Durch die Zirkulation ist dagegen ein Strahler erster Ordnung gegeben, der ein polarisiertes Feld erzeugt, wie es von einer hin- und herschwingenden starren Kugel herrührt. Die Richtcharakteristik erweist sich trotzdem als symmetrisch, weil der Strahler erster Ordnung eine Phasenverschiebung um  $90^\circ$  hat. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu den Ansätzen von Lynam und Webb und auch von Gutin; es scheint aber durch die Meßergebnisse, die ich nachher bringe belegt zu sein. Ferner erkennt man, daß mit zunehmender Ordnungszahl der Einfluß des Strahlers erster Ordnung immer geringer wird. Auch das wird durch die Ergebnisse bestätigt.

**Auswertung des Integrals.**

Um den Einfluß kennenzulernen, den eine bestimmte radiale Verteilung des Schubes und der Normalgeschwin-

digkeit hat, haben wir vier verschiedene Funktionen für  $f(r)$  bzw.  $g(r)$  angenommen und diese Fälle durchgerechnet. Ich beschränke mich hier darauf, das Ergebnis für den meist angenähert vorliegenden Fall einer dem Radius proportionalen Verteilung der Normalgeschwindigkeit und des Schubes anzugeben, Abb. 4 zeigt die zugehörige Funktion  $x_{2,m}$ . Hiernach kann man die Richtcharakteristik zeichnen. Zunächst für einen zweiflügeligen Propeller ohne Anstellung für eine Umfangsgeschwindigkeit  $v_0 = \frac{1}{2}c$  bzw.  $v_0 = c$ , s. Abb. 5. Der Schall wird vornehmlich in der Richtung der Luftschraubenebene abgestrahlt. Die Schallstärke nimmt mit der Umfangsgeschwindigkeit zu; der Maßstab in der oberen Hälfte von Abb. 5 ist 10mal größer. Mit der Umfangsgeschwindigkeit ändert sich ebenfalls das Schallspektrum. Bei hoher Umfangsgeschwindigkeit überwiegen die Obertöne, das bedeutet: harter, knatternder Klang der Luftschraube (Metallschrauben, W 34). Bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten überwiegt der Grundton, die Schraube klingt voller, brummender (Holzschrauben).

Je nach dem Betriebszustand der Schraube, je nach dem, ob sie mehr oder weniger Schub zu leisten hat, verändert sich nun die Richtcharakteristik durch das Hinzutreten des Strahlers erster Ordnung.

In Abb. 6 sind dieselben Richtcharakteristiken dargestellt, wie sie sich durch das Hinzutreten eines Strahlers erster Ordnung verändern, dessen Moment dreimal so groß ist wie die Ergiebigkeit des Nullstrahlers. Es wird ihm wesentlich nur der Grundton verstärkt. Das ist z. B. im Steigflug der Fall. Dagegen ist im Standversuch, bei Schleißerprüfungen, die größere Lautstärke auf einen stärkeren Strahler nullter Ordnung zurückzuführen, da das Abreißen der Strömung praktische einer Verdickung des Profils gleichkommt.

Übrigens erfahren die Ergebnisse noch eine Veränderung für den Fall der Luftschraube mit Vorkarstellung. Das bisher Gesagte galt nur für eine Luftschraube im Stand; Man kann die Vorkarstellung durch Einführung der relativen Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c'$  berücksichtigen, die sich aus der Fluggeschwindigkeit  $v$ , der Schallgeschwindigkeit  $c$  und dem Ausbreitungswinkel  $\varphi$  zusammensetzt.

$$c' = c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2} \cos^2 \varphi}$$

Außer der Geschwindigkeitskorrektur erfordert die bewegte Luftschraube auch noch eine Amplitudenkorrektur, die jedoch in erster Näherung vernachlässigt werden kann. Die hauptsächlichste Wirkung der Vorkarstellung besteht darin, daß die Charakteristik vorgeeignet wird in Richtung der Flugbewegung. Bei einer Geschwindigkeit von 300 km/h beträgt die Vorneigung etwa  $14^\circ$ .

Bevor ich noch die Schalleistung von Luftschrauben angebe, möchte ich erst an dieser Stelle einige Meßergebnisse bringen, um daran die bisherigen Aussagen der Theorie zu prüfen.

**Schallmessung an Luftschrauben.**

Wir hatten Gelegenheit Schallmessungen an einer größeren Reihe von Luftschrauben ausführen zu können. Es handelte sich um 2-, 3- und 4-Blattschrauben mit verschiedenen Umfangsgeschwindigkeiten. Da uns die Richtcharakteristik interessierte, mußten wir den Schall der Luftschraube in einem möglichst großen Winkelbereich aufnehmen, dem ein großer Entfernungsbereich bei der Annäherung des Flugzeuges bis zum Abflug entsprach. Zur Schallaufnahme war dafür das Verfahren der Oktavsieb-Oszillographie von Prof. Trendelenburg, das z. B. Dr. v. Schmoller verwendet, nicht gut geeignet. Vielmehr mußten wir ein Verfahren verwenden, das gleiche relative Meßgenauig-

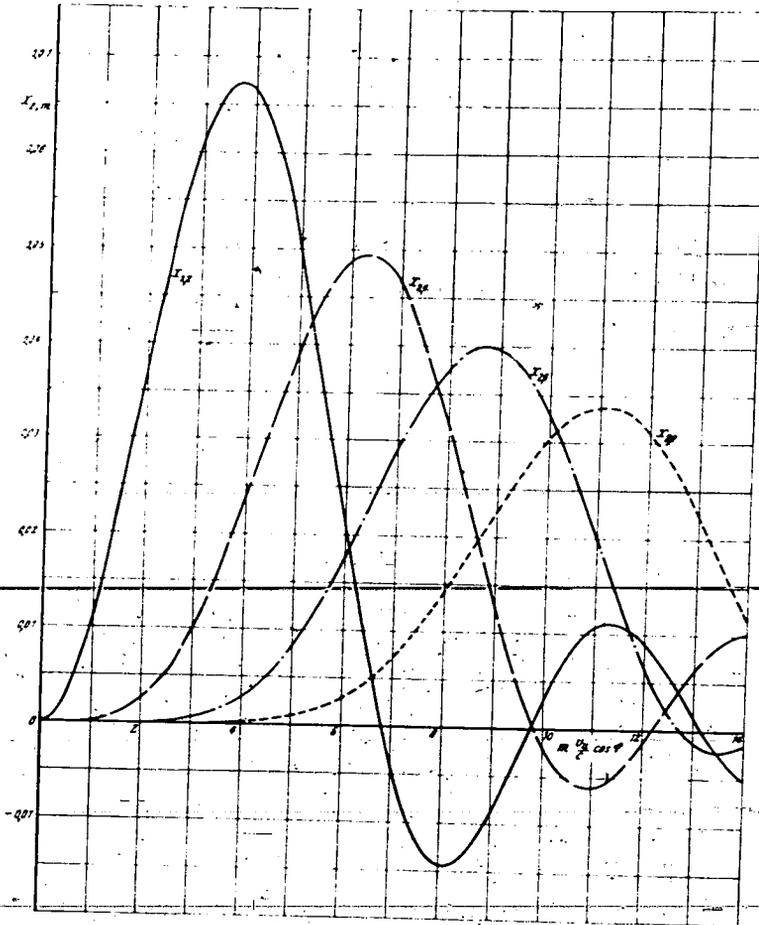


Abb. 4. Die Funktion  $x_{r,m} = \text{konst} \int_0^a r^m \cos \varphi \, dr$ .

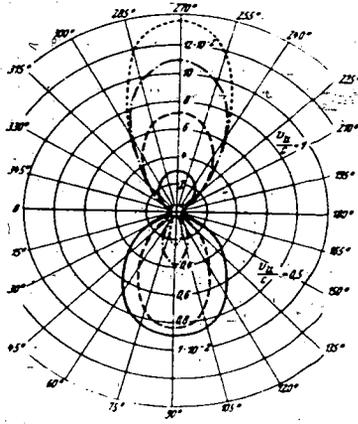


Abb. 5 (links). Zur Richtcharakteristik des Luftschraubenschalles, Strahler nullter Ordnung.

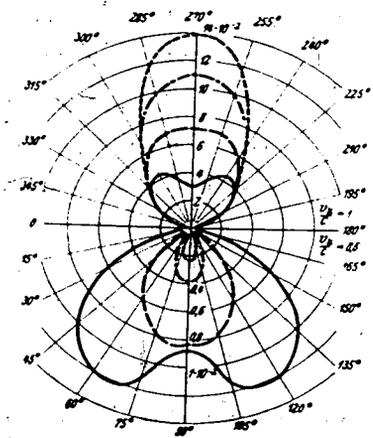


Abb. 6 (rechts). Zur Richtcharakteristik des Luftschraubenschalles, Strahler nullter und erster Ordnung (3fache Stärke).

keit bei verschiedener Entfernung gewährleistet, d. h. ein Meßverfahren mit logarithmischer Anzeige.

In Abb. 7 ist das Meßverfahren schematisch angegeben. Zur Vermeidung von störenden Bodenreflexionen ist das Mikrofon in gleicher Höhe mit der Erdoberfläche angebracht. Die Gesamtstärke des Flugzeuggeräusches wird mit dem Pegelschreiber (Neumann) gemessen. Er hat in der hier verwendeten Form einen Meßbereich von 50 db, d. h. einen Amplitudenbereich von 1:300. Wenn man von einem Gitter der Verstärkerröhren des Pegelschreibers eine Leitung abzweigt, so erfüllt der Pegelschreiber überdies noch die Aufgabe eines Amplitudenreglers. Er hält die Ausgangsspannung bei veränderlicher Eingangsspannung konstant. Das Spektrum dieser konstanten Ausgangsspannung wird im Spektrometer (Siemens) angezeigt

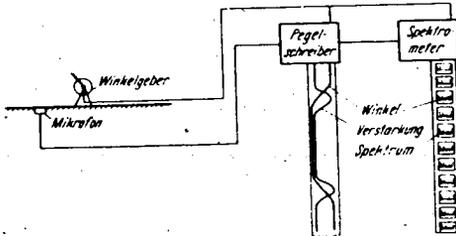


Abb. 7. Schema der Meßanordnung für Schallaufnahmen am fliegenden Flugzeug.

und auf Schmalfilm aufgenommen. Um eine Zuordnung von Pegelschreiberaufzeichnung und Filmbild zu ermöglichen, wird auf jedem Schrieb noch der Winkel aufgezeichnet, unter dem einem Beobachter das Flugzeug erscheint. Der Beobachter, der in jeder Nähe des Mikrophons steht, hat hierzu eine einfache Peilvorrichtung mit Fadenzug. Die Winkelstellung wird elektrisch auf Pegelschreiber und Spektrometer übertragen.

Bei der Auswertung sind verschiedene Umrechnungen notwendig, um aus dem am Boden von einem feststehenden Beobachter gemessenen Schall auf die Richtcharakteristik des bewegten Flugzeuges zu kommen.

1. Eine Frequenzkorrektur, die den Dopplereffekt berücksichtigt.
2. Eine Amplitudenkorrektur, die die Veränderung der Entfernung der Schallquelle während der Messung berücksichtigt.
3. Eine Winkelkorrektur, die dem Unterschied von Schallwinkel und Sichtwinkel Rechnung trägt, der durch den Unterschied von Schallgeschwindigkeit und Lichtgeschwindigkeit bedingt ist.

Unter Berücksichtigung dieser Korrekturen sind nun bei den Oberfliegermessungen die in Abb. 8 bis 16 dargestellten Richtcharakteristiken herausgekommen.

In Anbetracht der Schwierigkeit der Messungen und bei den verhältnismäßig einfachen Annahmen unserer Theorie, ist die Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis recht gut, und es ist gerechtfertigt, auch weitere Schlüsse aus der Theorie hinsichtlich der Größe der Schalleistung zu ziehen.

### Schalleistung von Luftschrauben.

Aus dem Schalldruck, der Schallschnelle und der Richtcharakteristik bekommt man die Schalleistung durch Integration über eine Kugelfläche, die die Schallquelle ganz umschließt. Dabei wurde nur der Nullstrahler berücksichtigt. Das Ergebnis ist also als das Mindestgeräusch der Luftschraube aufzufassen; je nach den Betriebsverhältnissen und Schraubentypen wird die Schalleistung des Grundtones und des ersten Obertones etwas größer sein.

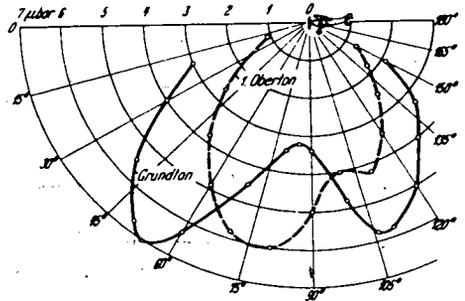


Abb. 8. Richtcharakteristik Schraube „B“, zweiflügelig (normal).

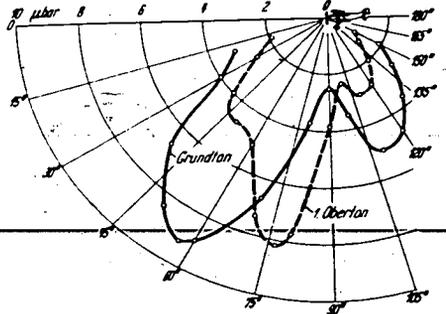


Abb. 9. Richtcharakteristik Schraube „C“, zweiflügelig (dick).

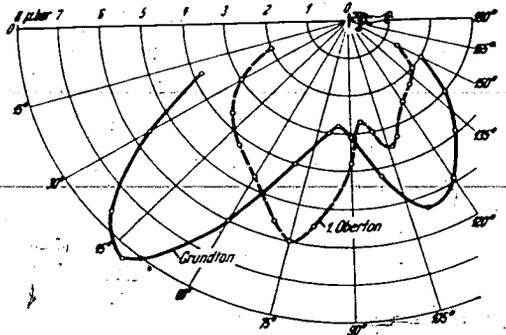


Abb. 10. Richtcharakteristik Schraube „D“, zweiflügelig (dünn).

Für die Schalleistung erhält man (wieder für den Fall einer dem Radius proportionalen Störungsverteilung) den Ausdruck

$$N_s = \frac{2\pi}{9} \rho \sigma^2 k_d^2 \omega^2 a^2 S_s \cdot m \left( \frac{m v_u}{c} \right) \quad \sigma = \frac{D}{a}$$

Da nun die aerodynamische Luftschraubenleistung

$$N_L = k_d \frac{\rho}{2} \pi \omega^2 a^2$$

ist, so erhält man

$$N_{schall} = \frac{4}{9} \frac{\sigma^2 k_d^2}{k_d} N_L m^2 S_s \cdot m \left( \frac{m v_u}{c} \right)$$

als die wichtige Formel, die den Zusammenhang von Luftschrauben- und Schalleistung angibt. Außer der Luftschraubenleistung selbst geht noch die Dicke des

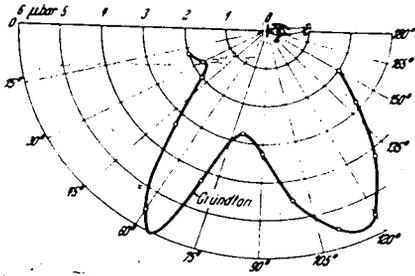


Abb. 11 (oben). Richtcharakteristik Schraube „1“ dreiflügelig (niedrige Umfangsgeschwindigkeit).

Abb. 12 (unten). Richtcharakteristik Schraube „2“ dreiflügelig (mittlere Umfangsgeschwindigkeit).

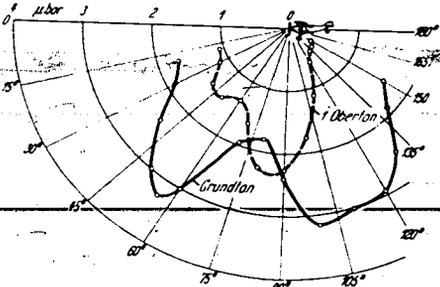
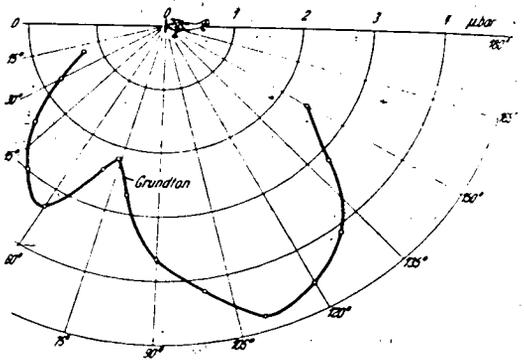


Abb. 13. Richtcharakteristik Schraube „1“ dreiflügelig (hohe Umfangsgeschwindigkeit).

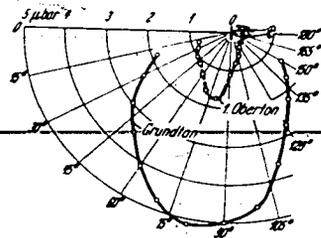


Abb. 14. Richtcharakteristik Schraube „6“ vierflügelig (niedrige Umfangsgeschwindigkeit).

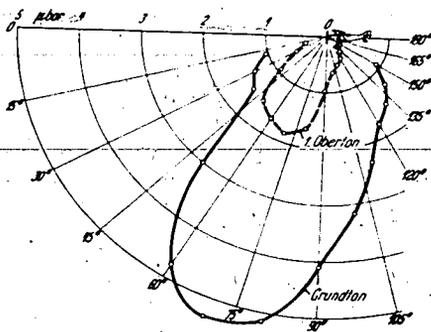


Abb. 15. Richtcharakteristik Schraube „5“ vierflügelig (mittlere Umfangsgeschwindigkeit).

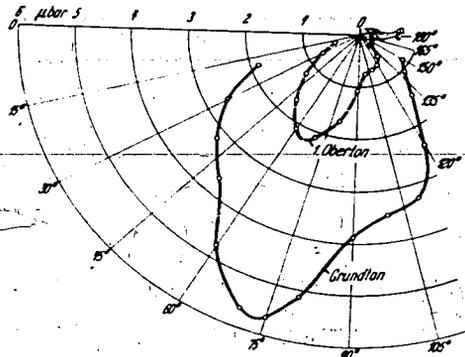


Abb. 16. Richtcharakteristik Schraube „4“ vierflügelig (hohe Umfangsgeschwindigkeit).

Profils, der Fourier-Koeffizient und eine Strahlungsfunktion  $S_{\Sigma, m}$  in das Ergebnis ein. Diese Strahlungsfunktion ist in Abb. 17 dargestellt. Es kommt darin zum Ausdruck, daß Luftschrauben mit hoher Umfangsgeschwindigkeit mehr Energie in den Obertönen als im Grundton abstrahlen.

Im Gegensatz zur Membran, deren Strahlungswiderstand durch eine einzige Funktion darstellbar ist, muß man sich die Luftschraube vorstellen als eine Anordnung einer Reihe von im gleichen Raumpunkt zusammenwirkender Strahlergruppen, die für jeden Oberton einen anderen Strahlungswiderstand hat. Hieraus ergibt sich, daß die Luftschraube ein wesentlich kom-

plizierterer Strahler ist als die bisher bekannten Strahler der Akustik bzw. der Physik überhaupt.

Als Beispiel für die Schalleistung von Luftschrauben bringe ich erstens eine Modellschraube, Abb. 18, zweitens die Schalleistung der Luftschraube für die W 34 (BMW Hornet) und der Luftschraube für die He 45 (BMW VIa), s. Abb. 19 bzw. 20. Trotzdem die Luftschraube der He 45 eine um rd. 30 vH größere Leistung hat, ist ihre Schalleistung um mehr als eine Zehnerpotenz kleiner. Dieses Ergebnis zeigt, daß die Berücksichtigung der akustischen Belange bei der Konstruktion von Luftschrauben zu sehr bemerkenswerten Erfolgen führen kann. Andererseits geht aus dem Vorge-

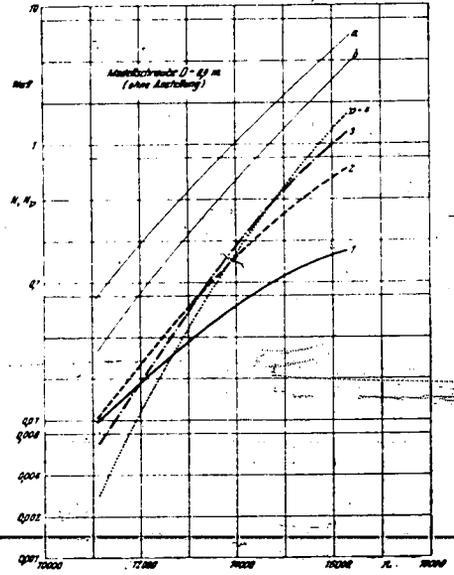
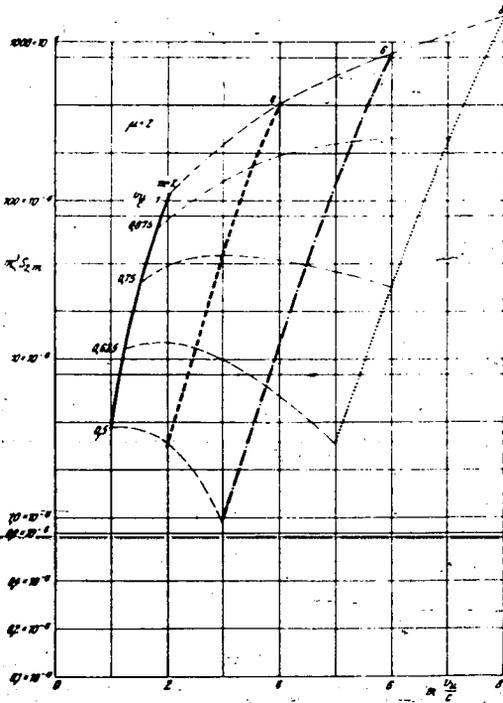


Abb. 18 (oben). Schalleistung einer Modellschraube; a) gemessen, b) berechnet aus den ersten 4 Teiltönen.

Abb. 17 (links). Die Strahlungsleistung von Luftschrauben Parameter Umfangsgeschwindigkeit.

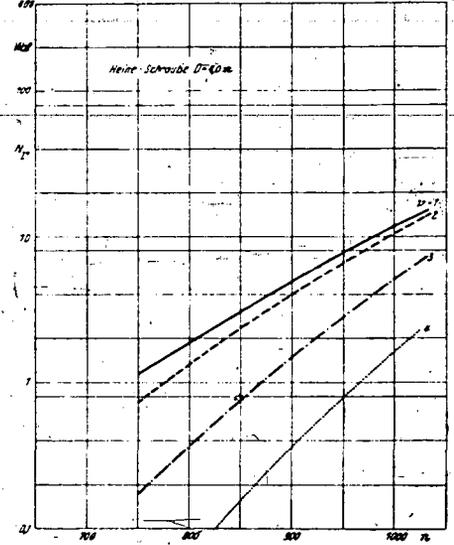
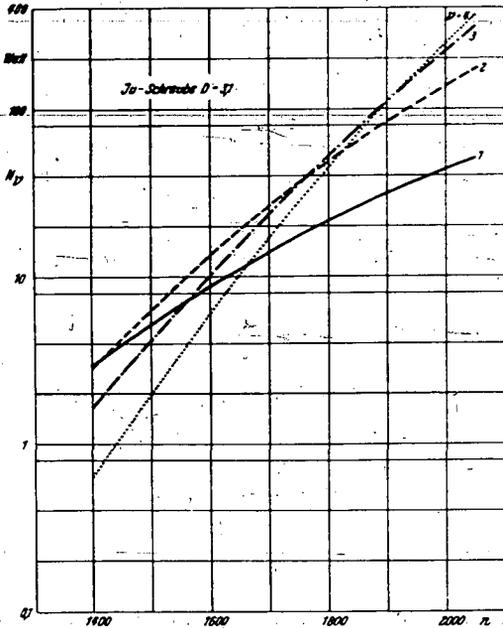


Abb. 20 (oben). Schalleistung der ersten 4 Teiltöne der Heine-Schraube (He 45).

Abb. 10 (links). Schalleistung der ersten 4 Teiltöne der Junkerschraube (W 34).

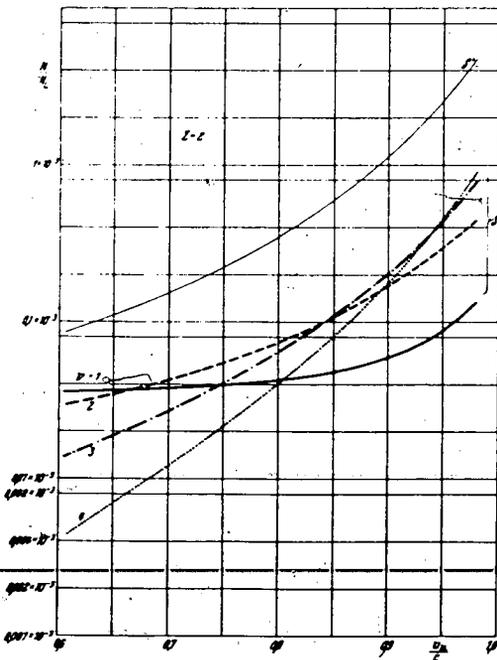


Abb. 21. Mechanisch-akustischer Wirkungsgrad von Luftschrauben.

tragenen auch wohl hervor, daß es ziemlich aussichtslos ist, durch eine verhältnismäßig geringfügige Veränderung der Blattform, des Profils bzw. des Profelfeldes eine Verminderung des Schalles zu erzielen.

### Zusammenfassung.

Zum Abschluß bringe ich noch Abb. 21, die das Gesagte zusammenfassend enthält, jedoch nur mit Einschränkung zu betrachten ist.

Über der Umfangsgeschwindigkeit ist der akustisch-mechanische Wirkungsgrad aufgetragen, der sich mit den heute verwendeten Abmessungen von Luftschrauben bei der betreffenden Umfangsgeschwindigkeit im Mittel ergibt. Aus dem Wirkungsgrad der einzelnen Komponenten ist der gesamte Wirkungsgrad, also die gesamte Schalleistung extrapoliert. Wir haben also bei Luftschrauben einen akustisch-mechanischen Wirkungsgrad von ungefähr 1 vT und im Bereich der Umfangsgeschwindigkeiten von  $0,63 \frac{vT}{s}$  bis  $0,95 \frac{vT}{s}$  eine Veränderung des Wirkungsgrades von 1:30. Bei geringen Umfangsgeschwindigkeiten ist also die Schalleistung bezogen auf die gleiche mechanische Leistung nur  $\frac{1}{30}$ . Bei geringen Umfangsgeschwindigkeiten überwiegt der Grundton, bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten überwiegen die Obertöne. Da die Obertöne für den Lautstärkeindruck maßgebend sind, so sind Luftschrauben mit hoher Umfangsgeschwindigkeit in der Nähe, z. B. in der Kabine abgehört, sehr unangenehm. In der Fernwirkung unterscheiden sich dagegen die Luftschrauben verschiedener Umfangsgeschwindigkeit nicht in dem Maße, weil durch die Absorption der Luft der Grundton schließlich doch überwiegt, und dieser ändert sich mit der Umfangsgeschwindigkeit nicht so sehr.

## Aussprache.

In der Aussprache wurden folgende Fragen behandelt:

- Luftschraubenschall bei sehr hohen Fluggeschwindigkeiten,
- Meßverfahren,
- Luftschraubenschall-Theorie.

### a) Luftschraubenschall bei sehr hohen Fluggeschwindigkeiten.

Einmal wird darauf hingewiesen, daß gelegentlich des Geschwindigkeits-Weltrekordes der Bf100 in der Fachpresse zu lesen war, daß das Flugzeug erst gehört werden konnte, als man sich im Bereich der Luftschraubenebene befand. Zutreffendenfalls würde hiernach also das angeflogene Ziel nichts hören, wenn das Flugzeug unmittelbar auf das Ziel losfliegt (Martin).

Es ist anzunehmen, daß das Flugzeug mit hoher Drehzahl geflogen wurde und daß sich daher eine starke Richtwirkung des Luftschraubenschalles in der Luftschraubenebene ergab. Ferner ist die ungewohnte Geschwindigkeit zu berücksichtigen, die zur Folge hat, daß sich der ganze Vorgang in einer sehr kurzen Zeit abspielt (Willms). Hinzu kommt, daß bestimmungsgemäß eine Flughöhe zwischen 30 und 50 m eingehalten werden mußte (v. Schmoller).

### b) Meßverfahren.

Es wurde angefragt, nach welchem Verfahren die DVL-Messungen vorgenommen wurden. Bei ähnlichen Messungen stellte die Fa. Electroacoustic fest, daß die

Intensität und die Zusammensetzung des Geräuschspektrums sehr schwankte. Oft waren die Bilder bei acht Aufnahmen in 1 s sehr verschieden (Kutzscher).

Die Ergebnisse stellen Mittelwerte aus etwa sechs Überfliegen dar. Zur Herabsetzung der Streuungen, die bei Schallmessungen über große Entfernungen meistens auf Inhomogenitäten der Atmosphäre zurückzuführen sind, wurde die Meßentfernung möglichst klein gewählt (Überflieghöhen 250 m). Der Streubereich beträgt etwa 4 db, bei schlechtem Wetter (Windgeschwindigkeit über 5 m/s) kann er auch größer sein (Willms).

Auf die Frage nach der ungefähren Größenordnung der von der DVL gemessenen Schalleistungen wird von Willms ein Wert von 100 Watt für das ganze Schallspektrum genannt.

### c) Luftschraubenschall-Theorie.

Zunächst wurden einige grundlegende Ausführungen über die Zulässigkeit der Linearisierung des Schallproblems bei Luftschrauben gemacht:

Die Berechnungen des Propellerschalles von Willms und Ernsthausen und die Abhilfversuche von Backhaus gehen von der in der Akustik üblichen Linearisierung der Schwingungsgleichungen aus. Diese Vernachlässigung mußte zunächst als sehr gewagt erscheinen, da wir es bei der Entstehung des Drehklanges mit Druckamplituden zu tun haben, die um mehrere Zehnerpotenzen über normale Schalldrücke hinausgehen und da die Geschwindigkeiten die Schallgeschwindigkeit erreichen.

Um so beachtenswerter ist es, daß die in dieser Weise vorhergesagten Richtcharakteristiken sich experimentell glänzend bestätigt haben.

Was dagegen von der linearisierten Theorie sicher nicht richtig wiedergegeben wird, ist die Beziehung zwischen Schalldruck und Umfangsgeschwindigkeit. Erfahrungsgemäß wachsen die entstehenden Schalldrücke mit der Annäherung an die Schallgeschwindigkeit nach einer viel höheren Potenz. Nun würde ferner nach der Theorie von Willms und Ernsthausen ein Teil des entstehenden Schalles dem vom Propeller aus bringenden Schall proportional sein, und es würde so mit einer grundsätzliche Grenze für die Bekämpfung des Drehklanges entstehen, indem zu einem gewünschten Schub auch eine bestimmte Schallerzeugung unvermeidlich ist. Da diese Schlussfolgerung aus einer sicher nur annähernden Theorie zu ziehen wäre, besteht die Hoffnung, daß bei der wirklichen Entstehung des Drehklanges die Schalldrücke nicht notwendig mit dem Schub wachsen müssen und daß kleine Feinheiten in der Form der Propeller, die ja in die Theorie von Willms und Ernsthausen gar nicht eingehen, doch erlauben, auch bei gleichbleibendem Schub die Drehklangentstehung zu vernichten (Cremer).

Hierzu wird erwidert, daß man sich über die großen Vernachlässigungen der Theorie sehr wohl im klaren war und daß es erst nach der Bestätigung durch die Messungen angängig war, die Theorie in der einfachen Form vorzutragen. Neben der etwas gewaltsamen Linearisierung des Problems der Unterschallgeschwindigkeit tritt bei Erreichung der Schallgeschwindigkeit, wie es bei einigen Luftschrauben schon der Fall ist, ein ganz neues Moment hinzu, in dem sich die Störung dann in Form eines Verdichtungsstoßes wie bei einer Geschoskanalwelle ausbreitet (Willms).

Es wird weiter erwidert, daß man bei der vorhandenen Theorie der wesentlich größere Teil der Schallerzeugung nicht von dem Strahler erster Ordnung, der dem Schub proportional anzusetzen ist, berührt, sondern von dem durch die reine Luftverdrängung durch die Schrauben entstehenden Strahler nullter Ordnung. Der Drehklang müßte demnach wesentlich durch Verringerung des Schraubenvolumens beseitigt werden können. Ferner ist vielfach versucht worden, durch Profiländerung der Schrauben eine Klangveränderung zu erzielen. (Die dabei auftretenden Unterschallböen haben sich aber nie als wesentlich ergeben (Ernsthausen).

Als weiterer Beitrag zur Luftschraubenschalltheorie folgt dann noch ein Kurzbericht über:

## Die Zunahme der Lautstärke mit der Umfangsgeschwindigkeit bei Schraubenlüftern.

Von E. Lubcke, Berlin.

An mehrflügeligen Schraubenlüftern (meist 8flügelig), wie sie als Ventilatoren in Industriebetrieben benutzt werden, wurden eine große Zahl von Messungen durchgeführt.

Die Umfangsgeschwindigkeit der Flügelspitzen wurde zwischen 20 und 150 m/s verändert. Dabei zeigte sich eine Zunahme der Schallstärke mit etwa der 7. Potenz der Umfangsgeschwindigkeit. Abb. 1 zeigt für Schraubendurchmesser von 20 bis 160 cm denselben Anstieg, so daß sich für größere Lautstärken im Abstände  $a$  (in m) bei einer Umfangsgeschwindigkeit von  $v_a$  (in m/s) die Lautstärke  $L$  in Annäherung durch Gleichung:

$$L = 68 \cdot 19 v_a^7 - 2019 a - 32$$

darstellen läßt:

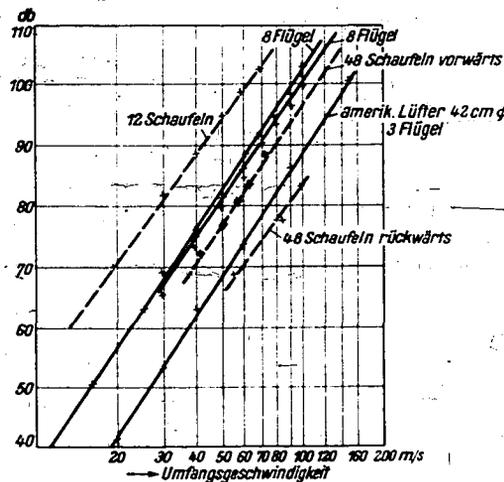


Abb. 1. Lautstärken bei Fliehkraft- und Schraubenlüftern. — Fliehkraftlüfter. — Schraubenlüfter.

Der Anstieg ist nicht nur bei dem schmalflügeligen Siemens-Betz Lüfter so groß, sondern auch bei einem in der amerikanischen Literatur als besonders geräuscharm beschriebenen Lüfter, der drei sich in der Projektion fast überdeckende Flügel besaß.

Die nach dem Fliehkraftprinzip arbeitenden Radiallüfter zeigen den gleichen Anstieg mit der Umfangsgeschwindigkeit, wobei die Zahl der Schaufeln und die Richtung ihrer Krümmung zur Drehrichtung ohne Einfluß auf den Exponenten ist.

Gleichzeitig durchgeführte Suchtonanalysen, Abb. 2, zeigten, daß die Schallergebnisse nicht nur auf wenige Linien verteilt, die Harmonische des Produktes: Flügelzahl (Schaufelzahl)  $\times$  Drehzahl in  $\text{sec}^{-1}$  sind.

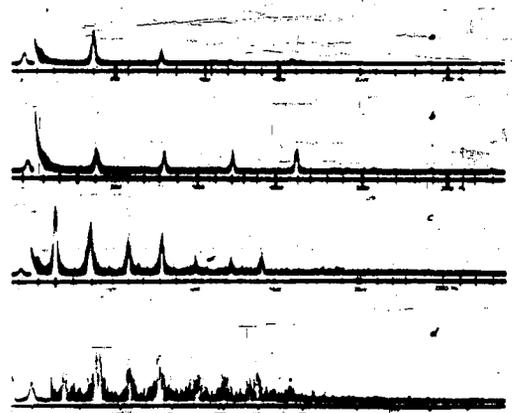


Abb. 2. Schallspektren von Siemens-Betz-Schraubenlüftern. a. 3000 U/min, ohne Metallnetz, 34 cm Dmr., b. 3008 U/min, mit Metallnetz, 34 cm Dmr., c. 1500 U/min, ohne Metallnetz, 39 cm Dmr., d. 1320 U/min, ohne Metallnetz, 160 cm Dmr.

Daß die von den Flügeln abströmenden Wirbel zur Geräuschbildung, insbesondere zur Hervorhebung der Oberschwingungen, beitragen, zeigen die beiden obersten Suchtonanalysen in Abb. 2, wobei im zweiten Fall den Lüfter ein dünnes Drahtnetz auf wenige Zentimeter genähert wurde.

Bemerkte sei noch, daß Untersuchungen über Hörtöne im Braunschweiger Akustischen Laboratorium durchgeführt werden, nach denen die Schallstärke des Wirbeltones auch mit etwa der 7. bis 8. Potenz der Umfangsgeschwindigkeit ansteigt. Der Grundton hängt dabei vom Durchmesser des States und der Umfangsgeschwindigkeit ab: Obertöne sind kaum vorhanden (< 40 db). Man könnte vielleicht annehmen, daß die Flügel und Schaufeln Wirbelstraßen abgeben, deren Frequenz durch im Wirbelbereich vorhandene Hindernisse im Takte der Flügelzahl  $\times$  Drehzahl moduliert ist. In der sich an diese Ausführungen anschließenden

besonderen Aussprache wird auf eine Anfrage, ob es sich bei den vorstehenden Untersuchungen um das Drehgeräusch oder den Drehklang handelt (Willms), erwidert, daß die Schallerscheinungen bei Umfangsgeschwindigkeiten von 10 bis 170 m/s beobachtet wurden. Das Geräusch war kein gleichmäßig kontinuierliches, sondern die hauptsächlich vortretende Frequenz entsprach genau der Zahl der Flügel, bzw. Schaufeln multipliziert mit der sekundlichen Drehzahl wie beim Drehklang (Lubcke).

Es wird ferner darauf hingewiesen, daß man neben den Geräuschwerten unbedingt auch die der Schraubenzugführte Leistung erwähnen muß. Bei einem Flugzeug ergeben sich z.B. bei verschiedenen Flügen mit verschiedener Drosselung auch ganz verschiedene Geräuschstärken. Man darf also nur dann vergleichen, wenn die zugeführte Leistung gleich ist (Ernsthausen).

## Ein Meßverfahren zur Untersuchung des Flugzeugschalles und seine Ergebnisse.

Von E. v. Schmoeller, Reclin.

Es wird über ein Meßverfahren zur Untersuchung von Flugzeugschall berichtet, das von der Erprobungsstelle der Luftwaffe Reclin für Untersuchungen benutzt wird. Die Aufgabe bestand darin, möglichst genaue Aussagen über den Schall zu machen, der von einer fliegenden Maschine abgestrahlt wird. Hierbei kommt es erstens auf das akustische Meßverfahren und zweitens auf einen einwandfreien Meßflug und dessen Registrierung an.

### Meßeinrichtung.

Für das akustische Meßverfahren ist die Oktavsiebzerlegung gewählt, welche die E-Stelle von der Firma Siemens (Prof. Trendelenburg) übernommen hat, wo es erstmalig zur Untersuchung von Flugzeugschall verwendet worden ist. Die Meßeinrichtung ist in Abb. 1 gezeigt. Es werden zwei Oktavsiebsätze ver-

zeit größer, wie Abb. 2 zeigt. In Abb. 3 ist ein Oszillogramm von Flugzeugschall während einer Oberfliegung wiedergegeben.

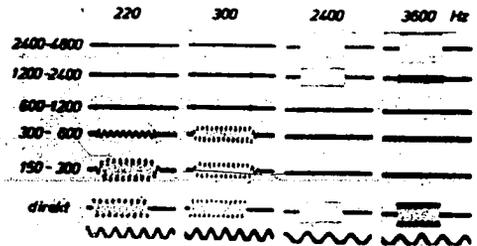


Abb. 2. Einschwingvorgänge in Siebmitte und -flanke bei verschiedenen Tiefen- und Höhenstufen.

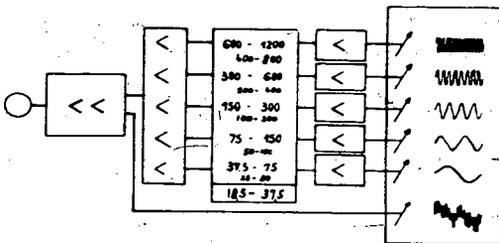


Abb. 1. Meßeinrichtung.

- a = Mikrophon,
- b = Verstärker,
- c = Entkopplungsverstärker,
- d = Oktavsieb,
- e = Leistungsverstärker,
- f = Oszillograph.

wendet, wobei der eine um eine halbe Oktave verschoben ist. Die Flanken der Siebe sind verhältnismäßig flach ausgebildet, um keine Fälschungen durch Einschwingvorgänge zu bekommen. Die Formel für den Einschwingvorgang  $t = \frac{1}{A}$  gilt nur in der Siebmitte genau. In den Flanken ist die Einschwing-

Zur Durchführung eines einwandfreien Meßfluges ist eine Meßstrecke mit bzw. gegen Wind mit Landekreuzen ausgelegt. Das Flugzeug ist mit Feinhöhenmesser ausgerüstet und fliegt mit konstanter Drehzahl und Höhe. Zur Registrierung des Fluges ist ein Bildgerät neben dem Mikrophon senkrecht nach oben justiert. Die Maschine wird während des Oberfliegens mit einer Belichtungszeit von etwa  $\frac{1}{100}$  s fotografiert. Ein elektrischer Kontakt, welcher mit dem Kompurverschluß gekoppelt ist, gibt gleichzeitig eine Marke auf dem Oszillographenfilm, in Form eines Kurzschlusses der direkten Schleife, wie Abb. 3 zeigt. Bei bekannter Geschwindigkeit des Flugzeuges kann somit der optische und unter Berücksichtigung des Schallverzuges der akustische Oberfliegungspunkt auf dem Film bestimmt werden. Abb. 4 zeigt eine solche Aufnahme eines Flugzeuges vom Boden aus, in der ferner die seitliche Abweichung der Maschine sichtbar ist.

### Auswertung.

Die Auswertung geschieht so, daß auf dem Film der jeweilige Wert des Ausschlages in jedem Sieb in Mikrobar angegeben wird und dieser Wert der Oktavsiebmitte oder der aus dem Oszillogramm ausgewerteten Frequenz zugeordnet wird. So entsteht das

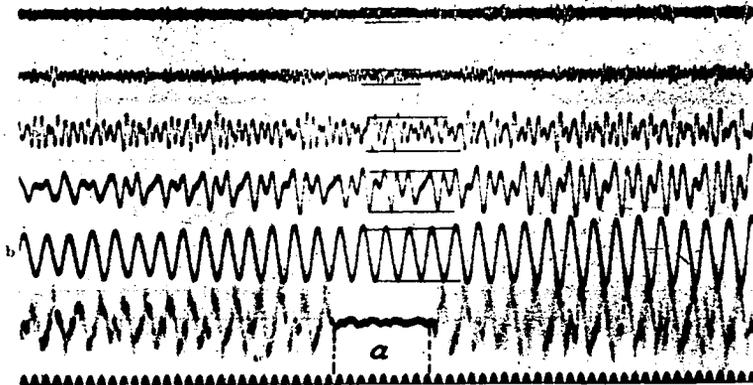


Abb. 3. Flugzeugschall bei der Überfliegung.

a = Kurzschluß  
b = Grundton der Schraube

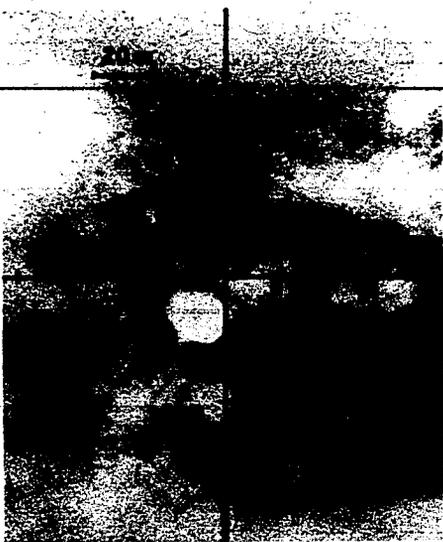


Abb. 4. Photographische Registrierung der Überfliegung.

Frequenzspektrum. Liegen mehrere Aufnahmen desselben Flugzeuges von Flügen mit und gegen Wind vor, so wird die Amplitude nicht in jedem jeweils festgelegten akustischen Überfliegungspunkt ausgewertet, sondern das Amplitudenmaximum in jedem Sieb gesucht. Auf diese Weise wird die Streuung wesentlich geringer, was offenbar auf den Windeinfluß zurückzuführen ist. Werden ferner Flüge mit einer seitlichen Abweichung von mehr als 50 m, bei einer Flughöhe von 250 m, nicht berücksichtigt, so erhält man einen Streuwert von  $\pm 12$  vH, vgl. Abb. 5.

Bei prinzipiellen Untersuchungen ist es von Wichtigkeit, ein Programm für die Versuchsreihe festzulegen: Die Trennung von Motor- und Schraubenschall ist nur dann eindeutig durchführbar, wenn diese bei verschiedenen Frequenzen liegen und diese wiederum in verschiedene Oktavsiebe fallen. Diese Werte können aber vorher rechnerisch festgelegt werden:

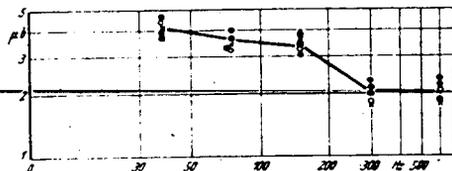


Abb. 5. Frequenzspektrum eines Flugzeuges mit Streuwerten.

$$n_{\text{Motor}} = \frac{N \cdot Z}{60} \cdot 2 \qquad n_{\text{Schraube}} = \frac{N}{60} \cdot f$$

Aus diesen bekannten Formeln, in denen  $Z$  die Zylinderzahl,  $N$  die Drehzahl und  $f$  die Anzahl der Schraubenblätter bedeutet, ist zu ersehen, daß, wenn  $Z \cdot 2 = f$  ist, beide Schallquellen dieselbe Frequenz abstrahlen. Es ist hieraus zu erkennen, daß entweder durch Veränderung der Flügelzahl oder durch Verwendung eines Getriebes bei demselben Motormuster, die beiden Frequenzen verschiedene Werte erhalten. Die Verwendung ein und desselben Motormusters ist aber für bestimmte Untersuchungen erforderlich, um mit derselben Leistung zu arbeiten. Auf diesem Wege können viele Aufgaben gelöst werden; als Beispiel sei erwähnt, daß bei Benutzung eines Getriebes zwei Schrauben gleicher Umfangsgeschwindigkeit, aber verschiedenen Durchmessers verglichen werden können; ferner können verschiedene Schrauben zur Untersuchung der Umfangsgeschwindigkeit vermessen werden.

#### Zuordnung der Obertöne.

Ist z. B.  $n_{\text{Schraube}} = 35$  Hz,  $n_{\text{Motor}} = 80$  Hz, so ist der Grundton der Schraube völlig isoliert, wogegen die Obertöne mit dem Grundton des Motors bzw. dessen Obertöne bereits zusammenfallen, also in einem Sieb auftreten. Diese können aber auch zugeordnet werden:

1. Aus der Form des Oszillogrammes ist sehr häufig die Zuordnung möglich. Abb. 6 zeigt ein Oszillogramm über sämtliche Siebe, und die Zuordnung ist eindeutig durchführbar.
2. In anderen Fällen ist die Auswertung schwieriger, doch ist es mittels des Maderschen Analysators möglich, ganz eindeutig die Teiltöne nach ihrer Intensität zu bestimmen.

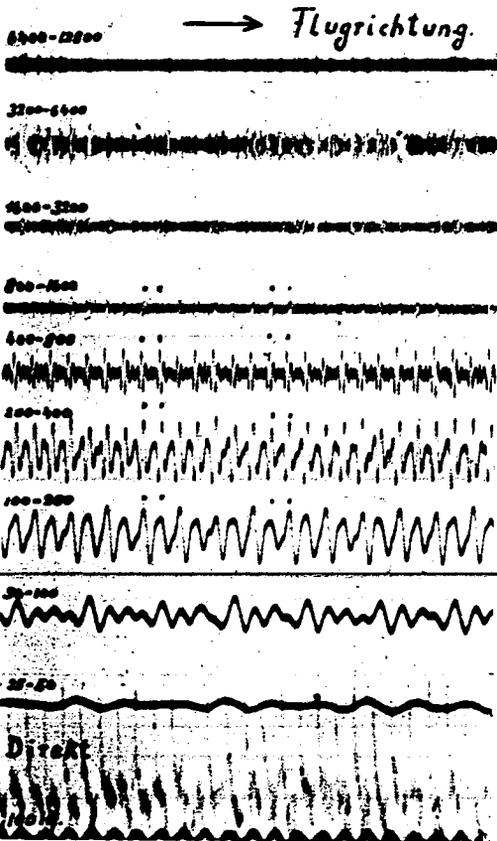


Abb. 6. Flugzeugschall. Im Sieb 100 bis 200 Grundton, bis Sieb 800 bis 1000 Obertöne zum Grundton. (Zuordnung durch Periode des Grundtones, siehe Punkte)

**Kurvenform des Schraubentones.**

Abb. 3 hatte als Beispiel eine reine Sinusform des Schraubentones gezeigt. Liegt der Schraubenton allein in einem Sieb, so ist stets die Sinusform vorhanden, unabhängig von der Flügelzahl. Liegen die Blätter nicht in einer Ebene, z. B. beim vierflügeligen Kreuzpropeller, so tritt als Grundton auch die Frequenz auf, welche der zweiflügeligen Schraube zugeordnet ist, Abb. 7. Diese Abbildung läßt im zweiten und dritten Sieb eine Überlagerung von Schwingungen erkennen, von denen eine dem Schraubenton zukommt. Mit dem Maderschen Analysator läßt sich z. B. hier jeder Teilton bestimmen, und es zeigt sich, daß der Schraubenton wesentlich überwiegt. Die Amplitude des sinusförmigen Schraubentones nimmt entsprechend der sich ändernden Intensität beim Überfliegen stetig zu bzw. ab. Es treten hiervon gelegentlich Abweichungen auf, dergestalt, daß bei einem einmotorigen Flugzeug eine Modulation dieses Tones auftritt. Abb. 8 zeigt eine solche Schwebung, deren Ursache noch nicht eindeutig geklärt ist. Vermutlich handelt es sich um einen Einfluß von der Zelle. Bei der Auswertung solcher Aufnahmen ist große Vorsicht erforderlich, da die Maximalamplituden hier größer werden. Abb. 9 zeigt die Auswertung zweier Flügel, die nacheinander durchgeführt sind, einer mit, der andere ohne Schwebung.

**Drehzahl und Schraubengrundton.**

Aus der Drehzahl des Motors folgt eine ganz bestimmte Grundfrequenz der Schraube. Wird die Drehzahl bei jedem Meßflug protokolliert, so muß diese mit der aus dem Oszillogramm im akustischen Überfliegungspunkt ausgewerteten Frequenz übereinstimmen. Die folgende Zahlentafel zeigt sehr befriedigende Übereinstimmung.

f aus Motordrehzahl	35	35	34,1	115	115	53,2	53,4
f aus Oszillogramm	35,5	34,7	34,1	114	116	52,2	53,0

**Dopplereffekt.**

Liegen Beobachter und Schallquelle in einer Richtung, so ergibt sich bei ruhender Schallquelle und bewegtem Beobachter

$$f_1 = f_0 (1 \pm v/c)$$

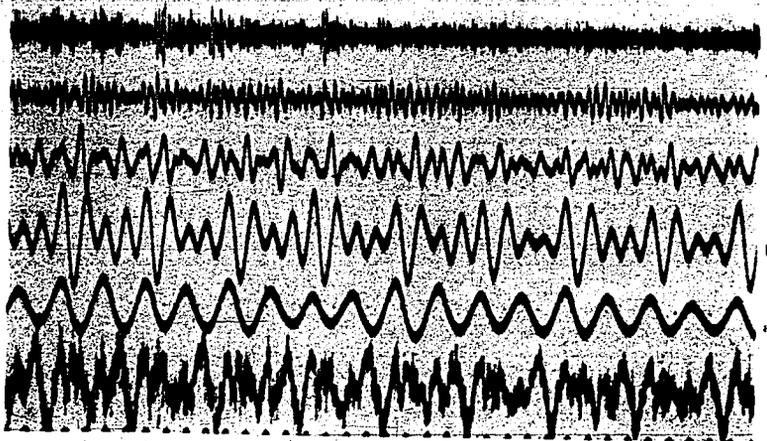


Abb. 7. Vierflügelige Schraube (Kreuzpropeller).

a = zweiflügelig,  
b = vierflügelig.

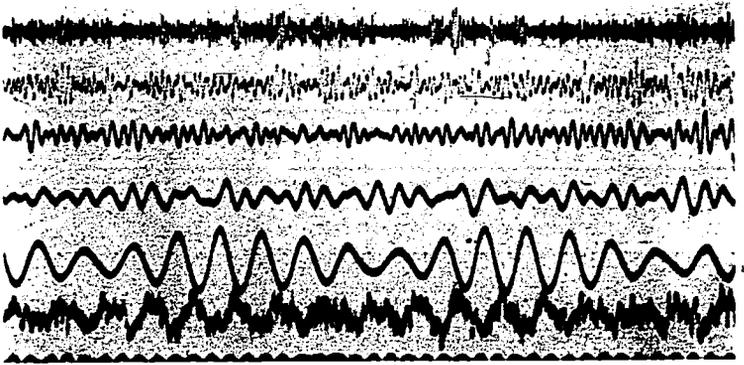


Abb. 8. Zwei-flügelige Schraube mit Schwebung. a = Grundton.



Abb. 9. Auswertung von Aufnahmen mit und ohne Schwebung. a = ohne Schwebung. b = mit Schwebung.

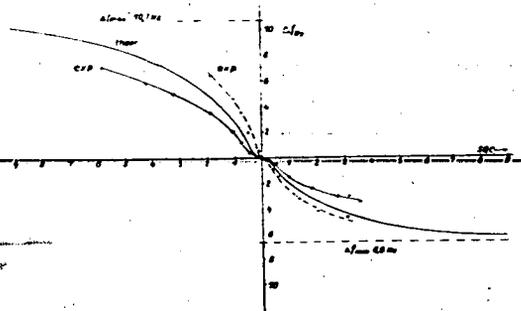
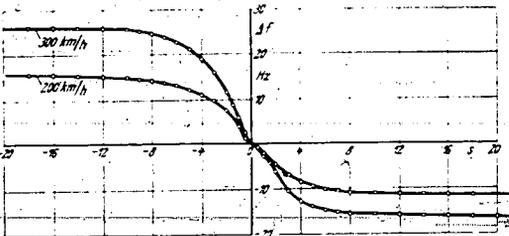


Abb. 11. Dopplereffekt (theoretisch und experimentell).



(Abb. 10. (links). Dopplereffekt (theoretisch).

und bei bewegter Schallquelle und ruhendem Beobachter folgt:

$$f_2 = \frac{f_0}{1 - v/c}$$

wo  $v$  die Geschwindigkeit der Bewegung und  $c$  die Schallgeschwindigkeit ist.

Der Unterschied ist für den Grenzfall  $v = c$  am deutlichsten:  $f_1 = 2f_0$ ;  $f_2 = \infty$ . Bei einer Geschwindigkeit von 800 km/h ist die Dopplerfrequenz schon das Dreifache des Grundtones, so daß die Absorp-

tionsverhältnisse durch den Dopplereffekt bereits merklich beeinflußt werden können.

Für den Fall der fliegenden Maschine ist  $v$  von der Höhe und Geschwindigkeit abhängig.  $f$  als Funktion der Zeit hat den Verlauf von Abb. 10 mit  $v$  als Parameter,  $h = \text{konst.}$  Die für einen praktischen Fall vorliegenden Verhältnisse ergeben theoretisch eine Kurve, wie sie in Abb. 11 gezeigt ist. Die entsprechenden experimentellen Kurven, aus zwei Aufnahmen ausgewertet, zeigen eine ziemliche Streuung; grundsätzlich jedoch denselben Verlauf.

### Aussprache.

Zunächst teilt v. Schmoller auf die Frage, ob bei seinen Versuchen ein Einfluß der Bewölkung festgestellt wurde, mit, daß hierüber keine Beobachtungen vorliegen, da die Versuche nur bei bestem Wetter und möglichst bei Windstille in einer Flughöhe von unge-

fähr 250 m durchgeführt wurden. Über die Möglichkeit der Auswertung der im Vortrag von v. Schmoller erwähnten Oktavsiel-Oszillogramme wird dann noch der folgende Kurzbericht gegeben:

## Zur Frage der Analyse nicht periodischer Schwingungsvorgänge.

Von Ferl. Trendelenburg, Berlin.

Bei oszillographischen Schalluntersuchungen ergibt sich häufig die Aufgabe, zu ermitteln, mit welcher Stärke periodische Anteile in einem verwickelt zusammengesetzten Schwingungsvorgang enthalten sind. Da gerade auch im Rahmen der von v. Schmoller behandelten Fragen häufig dieses Problem auftritt, möchte ich hierzu eine kurze Bemerkung allgemeiner Natur machen, und zwar um so mehr, als die hiermit zusammenhängenden Fragen meines Wissens in der Akustik noch nicht behandelt worden sind, insofern wir von einer kürzlich erschienenen Mitteilung von G. v. Békésy absehen.

Sind in einem kompliziert zusammengesetzten Schwingungsvorgang periodische Anteile vorhanden, so kann man Stärke und Frequenz dieser Anteile mit Hilfe einer größeren Anzahl von Fourier-Analysen ermitteln, wenn man von Analyse zu Analyse stufenweise die Basislänge verändert. Es wurde dies Verfahren bereits in der Periodenforschung, insbesondere in der meteorologischen und geophysikalischen Forschung, mit Erfolg verwendet; es sei hier auf die Ausführungen in einem Buch über Periodenforschung von K. Stumpf verwiesen.

Sehr vorteilhaft läßt sich die Analyse mit dem Mader-Analysator durchführen. Man verändert von Analyse zu Analyse die Basislänge und trägt dann die bei den verschiedenen Analysen erhaltenen Fourierkoeffizienten nach ihrer wahren Frequenz (nicht also bloß nach ihrer Ordnungszahl!) in ein Diagramm ein. Das so erhaltene „Amplitudenspektrum“ ergibt an der Stelle, an der eine wahre Periodizität in dem unter-

suchten Vorgang liegt, ein ausgesprochenes Maximum. Die Frequenz, bei welcher das Maximum liegt, ist die wahre Frequenz der Periodizität, die Höhe des Maximums entspricht genau der Amplitude der in dem komplizierten Vorgang enthaltenen periodischen Komponente. Man nennt diese Art Vorgehens die „Durchmusterung“ einer Kurve. Ergibt die Durchmusterung durch stufenweise Analyse keine ausgesprochenen Maxima und Minima, so sind keine wahren Periodizitäten in der Kurve vorhanden.

Besonders einfach gestaltet sich die Aufgabe, die Amplituden der Teiltöne eines in einem komplizierten Schwingungsvorgang enthaltenen periodischen Klanges zu ermitteln, dann, wenn die Frequenz der Periodizität genau bekannt ist; gerade dieses Problem liegt aber praktisch häufig vor.

Man braucht in diesem Fall die Fourier-Analyse genau so wie sonst auch bei der Analyse streng periodischer Vorgänge nur mit einer einzigen Basislänge, nämlich derjenigen der Grundschwingung des in Frage stehenden Klanges durchzuführen, ohne sich irgendwie darum zu kümmern, daß noch weitere nicht periodische Anteile im Schwingungsvorgang vorhanden sind. Es ergibt sich dann ohne weiteres in gewohnter Weise die Teiltonverteilung der einzelnen Teiltöne des periodischen Anteils.

Die Bemerkung wird Ihnen gezeigt haben, wie weitgehende quantitative Aussagen man bei richtiger Art des Vorgehens aus oszillographischen Aufzeichnungen machen kann.

## Frequenzcharakteristik und Reichweite von Flugzeuggeräuschen.

Von F. A. Fischer, Kiel, und E. Kützscher, Kiel<sup>1)</sup>.

Von allen physikalischen Vorgängen, die von einem Motorflugzeug verursacht werden, hat bei dem heutigen Stande der Technik der erzeugte Schall für die praktische Flugzeugordnung die weitaus größte Bedeutung. Dabei versteht man unter der Flugzeugordnung für die Flakartillerie das Auffinden und winkelmäßige Festlegen eines unsichtbaren Luftziels.

Wenn die heutige Tagung der Erforschung der Entstehung der Flugzeuggeräusche gewidmet ist mit dem Ziel, Mittel und Wege zu ihrer Minderung zu finden, so wird sich zwangsläufig eine Zweiteilung des Stoffes ergeben. Es wird sich einmal darum handeln, die Geräusche zu betrachten, die in die Kabinenräume eindringen. An diesem Gebiet ist auch die zivile Luftfahrt lebhaft interessiert. Das andere Gebiet, das die in die Ferne dringenden Geräusche zum Gegenstand hat, ist mit Rücksicht auf die Flugzeugordnung von hervorragendem militärischen Interesse.

Während man bei dem erstgenannten Problem des Kabinenschalls nicht nur durch Herabminderung der Geräuschquellen selbst zum Ziele gelangt, sondern auch noch alle möglichen Schalldämm- und dämpfungsmittel zur Anwendung bringen kann, kommt für das zweite Gebiet, das eine weitgehende Begrenzung der Reichweite der praktisch möglichen Flugzeugordnung zum Ziele hat, einzig und allein eine Herabminderung der Geräusche an den Quellen selbst in Frage.

### Reichweite der verschiedenen Frequenzen.

Bei den Geräuschminderungsarbeiten an den verschiedenen Geräuschquellen ist es nun wichtig, zu wissen,

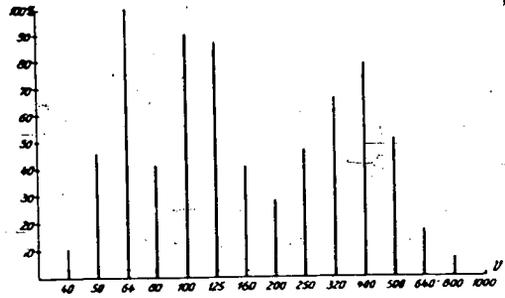
welche Teilfrequenzen der ein breites Gebiet umfassenden Frequenzcharakteristiken für die praktische Flugzeugordnung die größte Reichweite ergeben und damit die größte militärische Bedeutung haben.

Betrachten wir zunächst die Frequenzcharakteristik eines Flugzeuggeräusches in einer so geringen Entfernung von der Maschine, daß eine Schwächung des Schalles durch die Luft noch keine merkliche Rolle spielt. Abb. 1 zeigt einige solcher Darstellungen für verschiedene neuzeitliche ein- und mehrmotorige Maschinen, die unter Zugrundelegung von 100 bis 200 kurz aufeinanderfolgender Aufnahmen mit einem Siemens-Spektrometer gemacht sind. Das Spektrometer ist ein Apparat, der, ähnlich wie ein Spektralapparat in der Optik, uns das gesamte Spektrum eines Geräusches unmittelbar vor Augen führt. Wir sehen, daß zwischen 40 und 2000 Hz praktisch alle Frequenzen mit einer im allgemeinen nach höheren Frequenzen zu leicht abfallenden Intensität erzeugt werden.

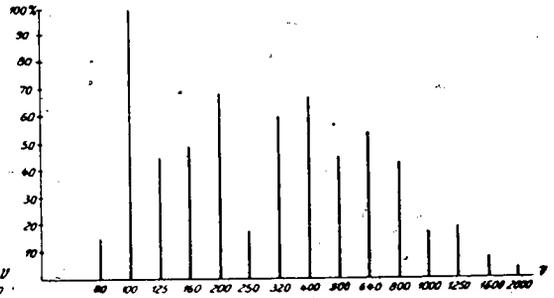
Um die Frage zu beantworten, welches Frequenzgebiet aus diesen etwa 6 Oktaven umfassenden Spektrum für die praktische Flugzeugordnung besonders wichtig ist, muß untersucht werden erstens, in welchem Maße das schallfortleitende Medium, nämlich die Luft, die einzelnen Frequenzen schwächt, und zweitens, wie das Spektrum des Störspiegels an dem Schallaufnahmepunkt, also am Erdboden, wo das zur Flugzeugordnung benutzte Horchgerät steht, im allgemeinen aussieht. Wir werden sehen, daß sich dann zwangsläufig das Gebiet ergibt, das für die praktische Flugzeugordnung und damit auch für die hier interessierende Gegenwaffe, die Geräuschminderung, das Wichtigste ist.

<sup>1)</sup> Vorgetragen von F. A. Fischer, Kiel.

Fl. T. 1 e ~ 10-15 km



Fl. T. 3 e ~ 12 km



Fl. T. 4 e ~ 15 km

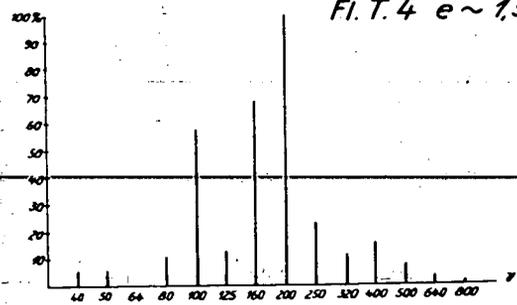


Abb. 1. Flugzeug-Geräuschspektren im Flug.

Die Schwingungsenergie, die als Schall durch die Luft wandert, wird auf ihrem Wege durch die Reibung der Luftteilchen aneinander teilweise in Wärme verwandelt, und diese Wärme wird teilweise durch Leitung, teils auch durch Wärmestrahlung der Welle entzogen. Die durch diese Einflüsse hervorgerufene Schwächung der Schallintensität ist bereits im Jahre 1888 durch Kirchhoff berechnet worden. In Abb. 2

angestellt hat, Werte, die zwischen den beiden unteren Kurven in Abb. 2 liegen. Die Messungen wurden im Jahre 1930 gemacht, um die günstigste Frequenz für Luftschall-Nobelsignale zu finden. Es sei nebenbei bemerkt, daß, da diese Signale mit dem freien Ohr empfangen werden sollen; unter Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der Ohrempfindlichkeit sich etwa 200 Hz als günstigste Frequenz ergibt.

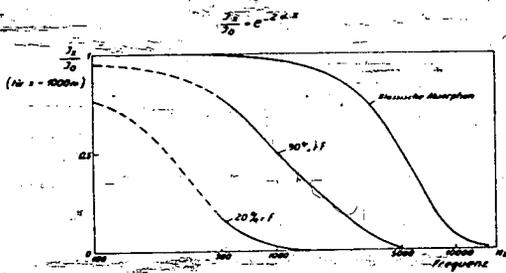


Abb. 2. Schwächungsfaktor für die Schallstärke.

Diese Messungen stehen nun in gutem Einklang mit den Rechnungen von H. O. Kneser. Dieser berücksichtigt bei seinen Ableitungen die Tatsache, daß die Moleküle eines Gases oder Gasgemisches außer der translatorischen Bewegung, die ja den Schalldruck ausmacht, auch noch Schwingungsenergie aufnehmen können. Die Aufnahme von Schwingungsenergie erfordert nun im allgemeinen eine gewisse Zeit. Hierdurch erfährt aber der Schalldruck eine Phasenverschiebung gegen die Dichteschwankung, was aber nach den Grundgesetzen der Thermodynamik notwendigerweise mit einer irreversiblen Umwandlung in Wärme verbunden ist. Für die atmosphärische Luft ergibt sich eine starke Abhängigkeit der Absorption vom Feuchtigkeitsgehalt: In Abb. 2 sind die Absorptionskurven nach Kneser für zwei Extremwerte der Luftfeuchte gezeichnet. Wir sehen also, daß ganz allgemein die hohen Frequenzen sehr viel stärker geschwächt werden als die tiefen. So ist für eine mittlere Feuchtigkeit in 1000 m Entfernung der Ton 1000 Hz bereits auf etwa die Hälfte seines Wertes gesunken, während der Ton 100 Hz nur um etwa 20% gesunken ist.

ist der Bruchteil der Schallenergie als Funktion der Frequenz aufgetragen, auf den die Intensität einer ebenen Welle in 1000 m Entfernung gesunken ist. Die obere Kurve entspricht den Kirchhoffschen Rechnungen. Es hat sich aber sehr bald herausgestellt, daß die Schallabsorption in Luft ziemlich großen Schwankungen unterworfen ist, und daß sie im Mittel erheblich größer ist, als es die Formel von Kirchhoff angibt. So ergaben, z. B. statistische Messungen, die die Electroacoustic G. m. b. H., Kiel, gemeinsam mit dem Wasserbauamt, Kiel, während eines ganzen Jahres

Ganz entsprechend verändert sich nun das Geräuschspektrum eines Flugzeuges mit der Entfernung. In Abb. 3 ist oben eines der bereits gezeigten Spektren in geringer Entfernung zu sehen. Darunter ist das in einer größeren Entfernung aufgenommene Spektrum.

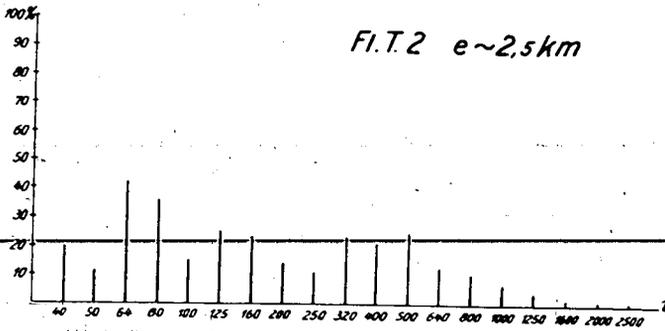
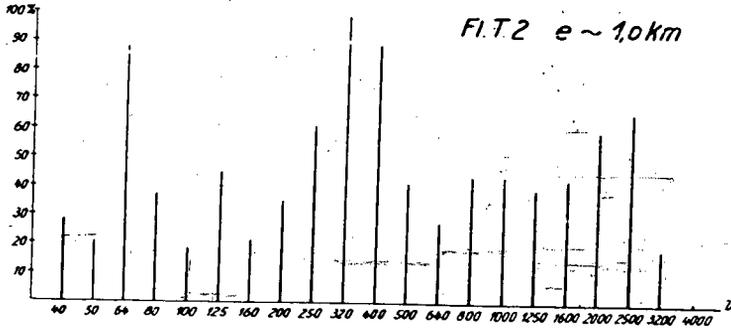


Abb. 3. Flugzeug-Geräuspektren im Flug in verschiedener Entfernung

Es ist deutlich zu erkennen, wie mit wachsender Entfernung die hohen Frequenzen gegenüber den tiefen zurücktreten. Für die Ortung auf größere Entfernungen stehen also nur die tieferen Frequenzen zur Verfügung.

#### Horchgeräte.

Aus Gründen der einfachen Bedienbarkeit arbeiten alle Hörgeräte, die im Frontbetrieb eingeführt sind, mit dem Ohr als Indikator. Abb. 4 zeigt als Beispiel

Reichweite der Geräte mitbestimmt ist, das Ohr für etwa 2000 Hz am empfindlichsten ist, während nach den tieferen Frequenzen, die uns nach dem vorhin Gesagten allein noch interessieren, die Empfindlichkeit beträchtlich abfällt. Die ganz tiefen Frequenzen werden also zwar von der Luft nur sehr wenig geschwächt, sie werden aber von dem Ohr nicht mehr genügend wahrgenommen, so daß sich für derartige Geräte ein Frequenzbereich von etwa 150 bis 800 Hz ergibt.

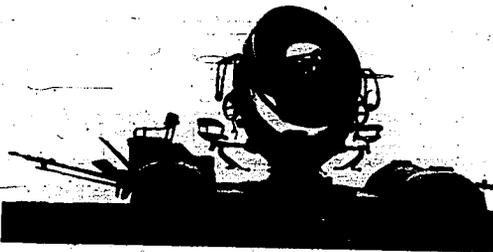


Abb. 4. Elascop auf Anhänger.

das deutsche Hörgerät, das von der Electro-acoustic G. m. b. H., Kiel, gemeinsam mit dem Heereswaffenamt entwickelt worden ist. Es besitzt für Höhe und Seite je ein Trichterpaar, das von je einem Beobachter bedient wird. Die Peilschärfe ist wesentlich durch das binaurale Hören mit vergrößerter Ohrbasis bedingt. Abb. 5 zeigt das Gerät im Betrieb.

Der Frequenzbereich, auf den derartige Geräte ansprechen, ist wesentlich durch die Ohrempfindlichkeit bestimmt. Aus den bekannten Kurven in Abb. 6 entnehmen wir, daß an der Hörschwelle, durch die die



Abb. 5. Elascop in Betriebsstellung.

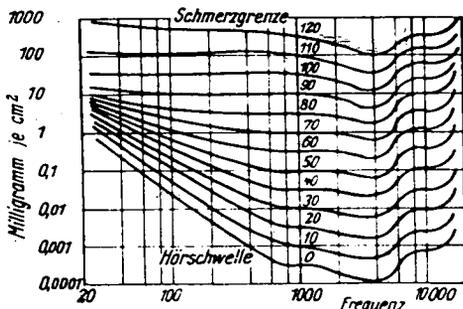


Abb. 6. Kursen gleicher Lautstärke.

Es liegt natürlich hier der Gedanke nahe, das Ohr zu umgehen und elektrische Aufnahmeorgane zu verwenden, die sich ohne weiteres so bauen lassen, daß sie gerade auf die ganz tiefen Töne gut ansprechen. Die Versuche scheitern aber daran, daß man es beim praktischen Peilen ja nicht nur mit dem Flugzeuggeräusch allein zu tun hat, sondern, daß stets auch ein mehr oder weniger starker Störspiegel durch Windgeräusche und dergleichen vorhanden ist. Dieser hat aber, wie Abb. 7 zeigt, im allgemeinen ein Spektrum, das gerade in den tiefsten Frequenzgebieten große Intensitäten aufweist. Diese Störungen verdecken dann

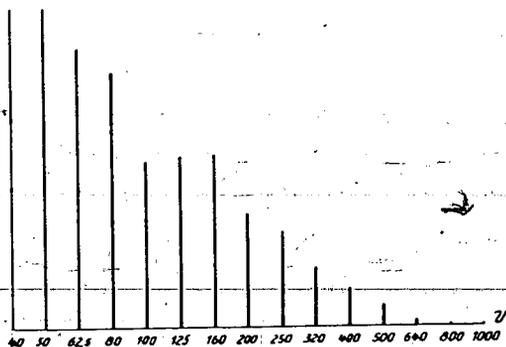


Abb. 7. Wind-Geräuschspektrum.

das zu ortende Flugzeuggeräusch und verhindern, daß mit diesem Verfahren nennenswerte Reichweiten erzielt werden.

Die Reichweiten, die mit den Trichterhöregeräten erzielt werden, hängen stark von den atmosphärischen Verhältnissen ab. Sie schwanken bei Maschinen von der Bauart der Ju 52 zwischen 8 und 15 km.

Es besteht die Möglichkeit, die Reichweite von Geräten, die mit Trichtern oder Reflektoren arbeiten, noch zu verbessern, indem man das Ohr durch elektrische Aufnahmeorgane ersetzt, was ja die Anwendung elektrischer Verstärker möglich macht.

Es sind jedoch bis heute die rein akustischen von derartigen elektroakustisch arbeitenden Geräten weder hinsichtlich Reichweite noch Peilgenauigkeit übertroffen worden.

Ein Gerät, das weder Trichter noch Reflektoren verwendet, sondern nur elektrische Empfänger, zeigt Abb. 8. Es ist dies der von der Electroacustic G. m. b. H., Kiel, entwickelte Kugelgruppenpeiler. Die Gruppe bleibt bei diesem Gerät fest im Raume stehen, und die Richtcharakteristik wird dadurch im Raume ge-

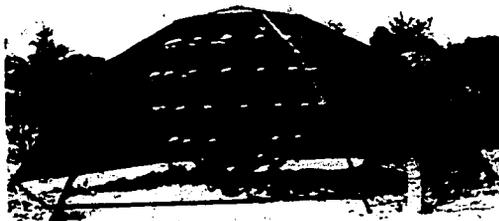


Abb. 8. Empfängergruppe mit Schutzschirm (geöffnet).

schwenkt, daß in die Leitungen der Empfänger Verzögerungsketten geschaltet werden. Diese kompensieren für die jeweils eingestellte Peilrichtung die Phasenunterschiede der Empfänger, die durch ihre relative Lage zur Schallrichtung entstehen.

Das Gerät, das dieses bewirkt, heißt daher Kompensator. Er besitzt, wie Abb. 9 zeigt, genau wie jedes andere Höregerät, je ein Handrad für Höhe und Seite. Auch das Prinzipalprinzip kann zur Anwendung

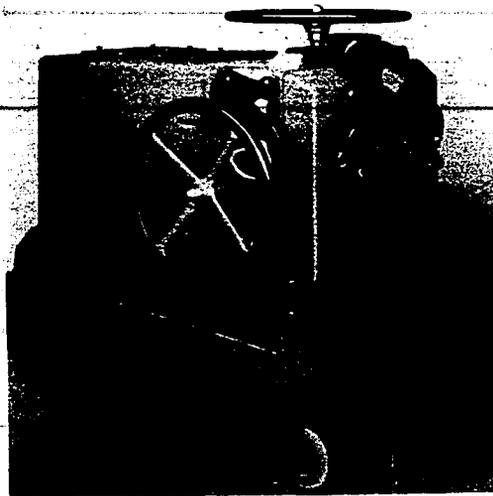


Abb. 9. Kugelkompensator.

gebracht werden. Eine derartige Apparatur hat den großen Vorzug, daß der zu bedienende Apparat an beliebigem Ort geschützt aufgestellt werden kann, getrennt vom Aufnahmeteil, der Kugelgruppe, mit der er durch praktisch beliebig lange Kabel verbunden wird.

Trotz der großen Vorzüge, die derartige Geräte besitzen, haben sie sich doch nicht eingeführt, da sie im Vergleich zu den Trichterhöregeräten für den praktischen Feldbetrieb weniger geeignet sind.

#### Zusammenfassung.

Zusammenfassend folgt also aus dem Vorgetragenen, daß das Ziel der Geräuschbekämpfung zwecks Herabminderung der Ortungsreichweite durch den Schall bei dem heutigen Stand der Höregerätetechnik der Frequenzbereich von etwa 150 bis 800 Hz sein muß.

Die bisherigen Versuche der Geräuschminderung an Flugzeugen haben praktisch keine Herabsetzung der Ortungsreichweite gebracht, was darauf zurückzuführen ist, daß bisher im wesentlichen die höheren Frequenzen des Auspuffgeräusches gemindert wurden.

## Aussprache.

Im Anschluß an seinen Vortrag wird von Fischer auf Befragen erläutert, daß die für verschiedene Entfernungen gemessenen Schallwerte nicht für senkrechte Abstände gelten, sondern für Schrägentfernungen unter bestimmten Winkeln.

In der weiteren Aussprache wurden dann noch Fragen über Windgeräusche und über Einfluß des Nebels besprochen.

### Windgeräusche.

Es wird angefragt, wie das Ohr am Hörgerät einen einmaligen Windstoß empfindet; ob das Ohr dabei unterscheiden kann zwischen Wind- und Propellerlärm (Martin).

Hierzu wird erwidert, daß das im Vortrag gezeigte Windgeräuschspektrum in erster Linie die Geräusche

enthalt, die die Windströmung an den Gegenständen der näheren Umgebung verursacht, dagegen weniger die Strömungswirkung des Windes am Mikrophon selbst (Fischer).

Hinzugefügt wird, daß das oben Gesagte auch für das rein akustisch arbeitende Hörgerät gilt. Die vom Wind an den in der Nähe des Hörgeräts befindlichen Gegenständen erzeugten Störgeräusche werden vom Hörgerät aufgenommen, sind aber im allgemeinen vom Flugzeuggeräusch gut unterscheidbar (Kutzscher).

### Einfluß des Nebels.

Die Vorstellungen über den Einfluß des Nebels auf die Schallabsorption werden in nachstehendem Kurzbericht umrissen.

## Bemerkung über die Absorption des Schalles im Nebel.

Von E. Hiedemann, Köln.

Die zuerst von E. Meyer<sup>1)</sup> entdeckte Abhängigkeit der Schallabsorption von der Luftfeuchtigkeit läßt sich bekanntlich durch die „molekulare“ Absorption im Sinne von H. O. Kneser<sup>2)</sup> in guter Übereinstimmung mit der Erfahrung erklären. Es sei aber darauf aufmerksam gemacht, daß der in die Knesersche Theorie einzusetzende Betrag der Luftfeuchtigkeit nicht dann gleich der absoluten Luftfeuchtigkeit ist, wenn sie ganz aus molekular-dispersen Wasserdampf besteht. Besteht dagegen die Luftfeuchtigkeit z. T. in Nebel, so trägt nur derjenige Anteil zur „molekularen“ Schallabsorption bei, der noch molekular-dispers ist. Nach den von Kneser<sup>2)</sup> angegebenen Kurven für die Abhängigkeit der Schallabsorption von der Luftfeuchtigkeit bedeutet aber z. B. eine Herabsetzung der Luftfeuchtigkeit von 90% auf 50% eine sehr starke Zunahme der „molekularen“ Absorption im ganzen Hörbereich. Genau dieselbe Wirkung muß eintreten, wenn nicht die absolute Luftfeuchtigkeit, sondern nur der für die „molekulare“ Absorption „wirksame“ Anteil der Luftfeuchtigkeit, nämlich der molekular-disperse, durch Nebelbildung verkleinert wird.

Außer der Zunahme der molekularen Absorption durch Abnahme der „wirksamen“ Luftfeuchtigkeit ist noch die zusätzliche Schallabsorption durch die Nebelteilchen zu berücksichtigen. Bei Nebel treten erstens Schallverluste durch Zerstreung von Schall an den Nebelteilchen ein und zweitens in einem gewissen Frequenzbereich auch durch Reibungsverluste zwischen der Luft und nicht oder nur teilweise mitschwingenden Nebelteilchen. Die Bedeutung der Schallzerstreung durch die Nebelteilchen läßt sich — mangels geeigneter experimenteller Unterlagen — vorläufig noch nicht genau übersehen, sie dürfte aber im Hörgebiet gegenüber der Wirkung der molekularen Absorption von geringer Wichtigkeit sein. Die Schallabsorption durch Reibungsverluste an den nicht oder nur teilweise mitschwingenden Nebelteilchen läßt sich dagegen theoretisch gut abschätzen<sup>3)</sup>. Für die im

Nebel vorkommenden Teilchengrößen nimmt dieser Anteil an der Schallabsorption erst bei Frequenzen über einige 1000 Hz sehr große Werte an.

Alle Faktoren bedeuten aber eine Vergrößerung der Schallabsorption beim Einsetzen von Nebel, wobei im praktisch wichtigsten Frequenzgebiet die Vergrößerung der molekularen Absorption durch Verminderung der „wirksamen“ Luftfeuchtigkeit von ausschlaggebender Bedeutung ist. Man muß daher erwarten, daß die Schallabsorption bei Nebelbildung vergrößert wird, und zwar in einem den heutigen Meßverfahren durchaus zugänglichen Maße.

Ich möchte daher fragen, ob Messungen der Schallabsorption in der freien Atmosphäre bei einer bestimmten Luftfeuchtigkeit vorliegen, wobei die Luftfeuchtigkeit einmal ganz aus Wasserdampf, das andere Mal teilweise aus Nebel bestand. Auch aus regelmäßigen Messungen der Reichweite von Schallsignalen sollte die Vergrößerung der Schallabsorption beim Einsetzen von Nebel zu erkennen sein, vorausgesetzt, daß 1. auf eine Änderung der Reichweite beim Einsetzen von Nebel besonders geachtet wird und daß 2. die mittleren Schwankungen der Reichweite nicht von derselben Größenordnung sind, wie die Verkleinerung der Reichweite durch die Änderung der molekularen Absorption.

In der weiteren Aussprache erklärt Fischer auf die Frage von Hiedemann, ob Messungen bei bestimmter Feuchtigkeit vorliegen und auf die Einwendung, daß die von ihm benutzten Kneserschen Formeln nicht für im Nebel gemessene Schallabsorption gelten, daß die statistischen Messungen von der Fa. Electroacoustic bei jedem Wetter regelmäßig (mehrmals täglich) vorgenommen wurden, ohne daß ein Einfluß des Nebels in dem untersuchten Frequenzbereich beobachtet wurde. Ferner teilt er noch mit, daß man erfahrungsgemäß beim Anflug von mehrmotorigen Maschinen zuerst die ganz tiefen Frequenzen und deren Schwebungen, dann auch die mittleren und erst bei ganz kurzen Entfernungen das gesamte Geräusch hört.

<sup>1)</sup> ZS. f. techn. Phys. 11, 253, 1930.

<sup>2)</sup> Vgl. etwa ZS. f. techn. Phys. 16, 213, 1935.

<sup>3)</sup> Vgl. O. Brandt, H. Freund und E. Hiedemann, ZS. f. Phys. 184, 511, 1937.

## Geräuschminderungsversuche an Luftschrauben.

Von H. Backhaus, Karlsruhe, und G. Weymann, Karlsruhe<sup>1)</sup>

Das Luftschraubengeräusch setzt sich aus zwei deutlich trennbaren Bestandteilen zusammen. Der eine Teil entsteht durch meist unregelmäßige Wirbelablösungen an den Flügeln. Die Komponenten dieses Geräuschanteils liegen bei größerer Frequenz und sind entsprechend ihrer Entstehung unharmonisch. Der zweite Anteil, der augenscheinlich für die akustische Wahrnehmung besonders bedeutungsvoll ist, ist ein reiner Klang, d. h. er setzt sich aus harmonischen Teiltönen zusammen. Die Grundfrequenz ist gleich dem Produkt aus Umdrehungszahl mal Blattzahl. Dieser „Drehklang“ entsteht in der Weise, daß an einer bestimmten Stelle der Schraubenebene die vorbeilaufenden Flügel periodische Störungen hervorrufen, die ihrerseits in das umgebende Medium Schallwellen aussenden. Man wird also in erster Näherung die Wirkung einer Luftschraube als Schallerzeuger der einer Gruppe von Einzelstrahlern gleichsetzen, die kreisförmig angeordnet sind, und, der Drehbewegung des Schraubenblattes entsprechend, nacheinander in zyklischer Folge erregt werden. Für eine Theorie der im folgenden besprochenen Geräuschminderungsversuche ist es nun ausschlaggebend, ob man sich diese Kreisgruppe mit Strahlern nullter oder höherer Ordnung besetzt denken soll, Abb. 1. Man wird wohl bei der theoretischen Behandlung der Zusammenhänge etwa der Drehzahl mit den Größen des Schallfeldes vor allem beim nichtangestellten Propeller zunächst Nullstrahler annehmen. Es ist aber beim Vergleich des Strömungsfeldes eines Profils ohne Anstellung mit den in Abb. 1 dargestellten Kugelstrahlern einzusehen, daß die bei solchen Profilen an der vorderen und hinteren Kante auftretenden Überdrücke zusammen mit den an den Flanken herrschenden Unterdrücken eher die Wirkung eines Strahlers zweiter Ordnung haben werden. Entsprechendes gilt für das angestellte Schraubenblatt. Hier muß vor allem die Wirkung eines Strahlers erster Ordnung vorherrschend sein, denn die auf das Medium ausgeübten Kräfte entsprechen am ehesten denen einer freischwingenden Membran, also eines typischen Strahlers erster Ordnung. Superponiert man dazu noch die Wirkung einer Kreisgruppe von Nullstrahlern, so erhält man gute Übereinstimmung von Theorie und Versuch.

Die von uns unternommenen Versuche gründen sich auf die Tatsache, daß man die Gesamtstrahlungsleistung eines akustischen Strahlers erheblich verringern kann, wenn man die Ordnung des entsprechenden Ersatzstrahlers erhöht. Ein Beispiel hierfür ist die bekannte Maßnahme, Lautsprecher mit Schallschirmen zu versehen, wodurch sie aus einem Strahler erster Ordnung zu einem Strahler nullter Ordnung werden. Die Abstrahlung besonders der tiefen Frequenzen wird hierdurch bekanntlich sehr stark erhöht. Die Rechnung zeigt, daß ein Kugelstrahler dritter Ordnung bei gleicher Oberflächengeschwindigkeitsamplitude nur 14,5 vH der Leistung des entsprechenden Nullstrahlers abstrahlt.

Will man eine Nutzenwendung dieser Tatsache beim Schraubenblatt machen, so muß man die Verteilung von Druck und Sog um das Profil so gestalten, daß ähnliche Abstrahlungsverhältnisse wie bei einem Strahler höherer Ordnung herrschen. In Abb. 1 sind unter den Kugelstrahlern entsprechende Druckverteilungen am Profil zu sehen. Die Schwierigkeit, solche Strömungsverhältnisse willkürlich zu schaffen, ist augenscheinlich; jedenfalls läßt sich am ehesten die Druckverteilung des Strahlers dritter Ordnung annähern, und zwar in der in Abb. 1 e gezeigten Weise. Durch Spaltung des Flügels

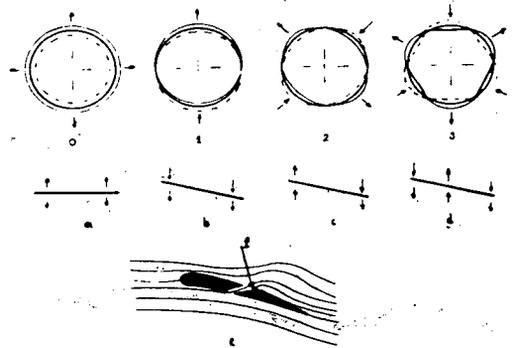


Abb. 1. Kugelstrahler nullter bis dritter Ordnung und entsprechende Druckverteilungen am Schraubenblatt.

wird ein gewisser Druckausgleich erreicht, der durch das Ausblasen von Luft an der Stelle 1 so verstärkt wird, daß die angestrebte Druckverteilung nach Abb. 1 d erreicht wird. Passiert also dieser so ausgebildete Flügel eine Stelle des Schraubenkreises, so wird diese zu einer Schwingungsform ähnlich der des Strahlers dritter Ordnung angeregt werden. Abb. 2 zeigt die Versuchsausführung eines primitiven Modells von 160 mm Durch-

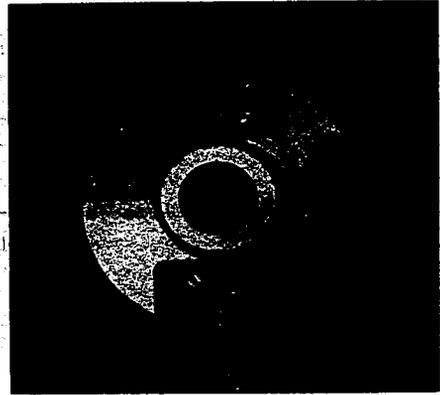


Abb. 2. Ausführung eines Modells mit Spaltflügeln und Schlitzten zum Luftausblasen.

messer. Auf einer Scheibe sitzen vier geteilte Flügelstummel, die an der Stelle a einen schmalen Schlitz haben, durch den die Luft ausgeblasen wird. Die Luft wird einer Preßluftflasche entnommen und durch die hohle Antriebswelle und vier radiale Bohrungen in der Scheibe den Schlitzten zugeleitet. Um Vergleichsmessungen mit dem normalen Flügel zu machen, können Spalt und Schlitz jedes Blattes durch ein Deckblech abgedeckt werden. Der undurchbrochene Flügel ergab die größte Drehklangintensität. Nach Öffnung des Spaltes sank der Schalldruck um 25 vH. Der zusätzliche Luftaustritt hatte dann eine sehr erhebliche Verminderung des Drehklangs zur Folge. Die Grundtonamplitude des Drehklangs sank bei 160 m/s Luftaustrittsgeschwindigkeit, entsprechend einem Druck von 1,5 at Überdruck am

<sup>1)</sup> Vorgetragen von H. Backhaus, Karlsruhe.

Reduzierwert der Flasche, und  $n = 3000$  U/min auf 10 vH des ursprünglichen Wertes. Das Optimum der Drehklangverminderung tritt bei einem bestimmten Druck der ausgeblasenen Luft auf, der mit der Drehzahl erwartungsgemäß steigt.

Die Schwierigkeit der Beobachtung bei diesen ersten Versuchen mit Modellschrauben sehr kleiner Umfangsgeschwindigkeit bestand darin, daß der Klang nicht im ganzen Versuchsraum hörbar war, sondern in unmittelbarer Nähe der Schraube mit dem Mikrophon aufgenommen werden mußte. Die Verteilung des abgestrahlten Klanges ist hiernach noch nicht ganz geklärt. Immerhin läßt sich doch soviel sagen, daß bei einer so beträchtlichen Schalldruckverminderung in der Nähe der Luftschraube auch im eigentlichen Schallfeld eine sehr erhebliche Wirkung auftreten muß.

Der komplizierte Aufbau dieses kleinen Modells konnte bei der Ausführung einer größeren Schraube von 320 mm Durchmesser nicht mehr beibehalten werden. Es hatte sich ja auch gezeigt, daß die Ausblähung als Spaltflügel nicht so wesentlich ist als das Ausblasen von Luft. Es wurde daher aus Profilmessungsröhre ein Hohlprofil gedruckt, und dieses Längs der ganzen Sogseite mit kleinen Bohrungen von rund 1 mm Durchmesser versehen, aus denen die Luft ausströmte. Diese Flügel wurden wieder auf einer Scheibe wie beim ersten Modell befestigt. Mit dieser Schraube konnten nun auch Schwebmessungen gemacht werden, und die Frage geklärt werden, ob die durch diese Maßnahmen mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwartende Schubverminderung kleiner oder größer ist als die Schalldruckverminderung. Der Versuch zeigte, daß der Schalldruck um rund 50 vH vermindert werden konnte, wenn der Druck der ausströmenden Luft richtig eingestellt war, daß aber der Schub gleichzeitig um ebensoviel abnahm. Augenscheinlich können also so einschneidende Maßnahmen zur Drehklangverminderung nicht getroffen werden, ohne daß die Strömungsverhältnisse erheblich geändert werden. Das Luftausblasen muß demnach an geeigneteren Stellen der Schraube vorgenommen werden.

An der Drehklingerverzerrung ist nun die Blattspitze erheblich beteiligt; andererseits nimmt der Schub in unmittelbarer Nähe des Schraubennendes rasch ab, so daß hier das Ausblasen von Luft in geeignete Gebiete des Strömungsfeldes nicht von bedeutenden Schubverminderungen begleitet sein wird. Es wurde daher zunächst die Druckverteilung in der Gegend der Schraubenspitze mit einem kleinen Kondensatormikrophon als Druckindikator genau aufgenommen. Das Mikrophon wird hierbei in einer besonderen Hochfrequenzbrückenschaltung mit Hochfrequenzverstärkung angeordnet, da die übliche Niederfrequenzschaltung bei Frequenzen bis etwa 200 Hz Phasenverschiebungen und damit bildlich falsche Darstellungen des Druckverlaufs ergibt. Markiert man gleichzeitig den Augenblick, in dem die Schraubenspitze das Mikrophon passiert, durch eine Kontaktverrichtung, so gewinnt man aus den oszillographischen Aufnahmen ein Bild des tatsächlichen Druckverlaufs. Es zeigt sich, daß auf der Sogseite des Blattes der Unterdruck nach der Spitze hin abnimmt, dort — d. h. in der Rotationsene — einen gewissen kleinen Wert hat, um dann nach Herumgehen um die Spitze — auf der Druckseite positiv zu werden. Bläst man demnach Luft aus der Spitze aus, so wird der dort herrschende Unterdruck kompensiert. Bei schräger Blasrichtung wird man auch hier eine Erhöhung der Strahlerordnung erzielen können; denn es wird an einer Stelle, wo im sich Unterdruck herrscht, ein zusätzlicher Druck geschaffen, der die Druckverteilung im Sinne einer Erhöhung der Strahlerordnung ändert.

Auf Grund dieser Messungen und Überlegungen wurde nun ein neues Modell von 400 mm Durchmesser, ebenfalls mit Hohlprofil, hergestellt, dessen Blatt in einen schmalen Schlitz endete, aus dem die Luft aus-

strömte. Da die Blasrichtung senkrecht zur Schubkraft orientiert ist, kann der aerodynamische Effekt nicht groß sein. Es ergab sich durchweg eine Drehklangverminderung von etwa 50 vH in der Rotationsene; auch in Richtungen, die bis zu 40° vor der Rotationsene liegen, ist die Verminderung beträchtlich. Interessant ist, daß auch hier eine Schubverminderung von ungefähr 12 vH auftritt, deren Ursache bisher ungeklärt ist. Der Schub wurde so gemessen, daß die ganze Apparatur horizontal drehbar an einem Stahlrohr aufgehängt wurde, und die Torsion durch Spiegel und Lichtzeigerablesung festgestellt wurde.

Die Zusammenhänge zwischen Drehklangverminderung, Drehzahl und notwendiger Austrittsgeschwindigkeit der Luft sind in Abb. 3 zu sehen. Als Abszisse ist die Drehzahl bzw. die Umfangsgeschwindigkeit, als Ordinate der Luftdruck bzw. nach Umrechnung die Luftaustrittsgeschwindigkeit aufgetragen. Wenn eine bestimmte Drehklangverminderung erzielt werden soll, so liegen die entsprechenden Punkte in diesem Diagramm auf nahezu geraden Linien, die um so höher liegen, je größer die gewünschte Drehklangverminderung ist. Man braucht also, um eine bestimmte Schalldruckverringerung zu erhalten, bei einer gegebenen Drehzahl eine bestimmte Luftaustrittsgeschwindigkeit, die mit wachsender Drehklangverminderung rasch steigt. Bemerkenswert an diesen Kurven ist ferner, daß für eine geforderte Drehklangverminderung bestimmte Mindestwerte der Umfangsgeschwindigkeiten und der Luftgeschwindigkeiten erforderlich sind. Das ganze dargestellte Gebiet liegt bei Umfangsgeschwindigkeiten von 50 bis 60 m/s. Extrapoliert man die Ergebnisse auf Umfangsgeschwindigkeiten von < 300 m/s, wie sie bei Schrauben normaler Größe auftreten, so kommt man auf außerordentlich große Werte der erforderlichen Luftgeschwindigkeiten, die praktisch nicht zu erreichen sind. Das einfache radiale Ausblasen stellt nun auf Grund der Druckverteilungsmessungen noch nicht die beste Anordnung dar; vielmehr ist der Effekt wirkungsvoller und die notwendige Luftgeschwindigkeit geringer, wenn die Luft aus mehreren kleinen Öffnungen in der Gegend der Blattspitze, und zwar nach verschiedenen Richtungen ausgeblasen wird. Derartige Versuche werden zur Zeit unternommen und sollen mit einem größeren Luftschraubennmodell der DWL fortgesetzt werden. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, festzustellen, ob die Luftmenge oder die Luftgeschwindigkeit für den Effekt von Bedeutung ist. Im ersteren Fall mußte man große Öffnungen und verhältnismäßig kleine Drücke anwenden, im zweiten Fall Luft aus kleinen Öffnungen unter großem Druck ausblasen, d. h. mit Luftverdichtern arbeiten. Nach den bisher gewonnenen Erfahrungen ist wohl in erster Linie die Geschwindigkeit maßgebend. Eine ideale Lösung würde man erhalten, wenn die Schraube sich die Luft aus der hohlen Nabe selbst ansaugen und nach außen durch die offenen Flügelenden abschleudern würde. Die unter Nichtberücksichtigung der Reibungsverhältnisse im Profilmern erzielbare Austrittsgeschwindigkeit wäre so gleich der Umfangsgeschwindigkeit. Die Rechnung zeigt, daß durch Eigenförderung dann nicht viel gewonnen wird, wenn die Luft schon mit einer gewissen Anfangsgeschwindigkeit in die Nabe eintritt. Sie wird dann durch die Schleuderwirkung der Schraube nur wenig zusätzlich beschleunigt. Eine Luftgeschwindigkeit vom doppelten Wert der Umfangsgeschwindigkeit, wie sie nach den Modellversuchen mindestens notwendig sein wird, kann demnach nur durch Verdichter erreicht werden. Allerdings kann man dafür mit kleinen Luftmengen arbeiten, d. h. die Luft wie aus einer Düse unter großem Druck ausblasen.

Eine andere Möglichkeit, die die Schwierigkeit der Luftzufuhr überhaupt umgeht, wäre die Anordnung mehrerer Schrauben auf gleicher Achse. Ein oder zwei

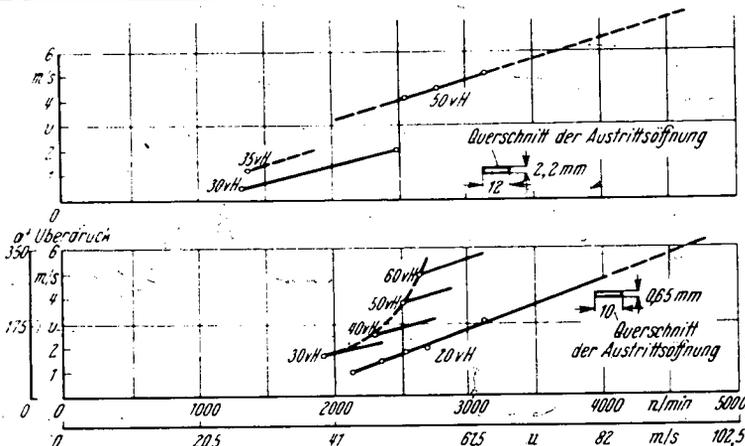


Abb. 4. Die Luftaustrittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit, als Parameter die Schalldruckveränderung.

nicht angestellte Schraubenblätter sind für den Fall des Standversuchs — in unmittelbarer Nähe, also im sogenannten Druckfeld des angestellten Blattes anzuordnen. Diese spalten durch ihre eigenen zusätzlichen Druckfelder das ursprüngliche Feld so auf, daß hierdurch die gewünschte Erhöhung der Strahlerordnung erreicht wird. Diese Anordnung ist also grundsätzlich verschieden von dem Gedanken, zwei Schrauben in größerer axialer Entfernung — etwa vor und hinter dem Tragflügel — laufen zu lassen. Hierbei sind wohl ganz bestimmte Richtcharakteristiken, also Minima des

Drehklungs in bestimmten Richtungen zu erzielen, die Gesamtschalleistung bleibt aber unverändert.

Zusammenfassend soll nochmals betont werden, daß zunächst die aerodynamische Verschlechterung der Schraubengewehr im Kauf genommen wurde, um ihre Wirkungsweise als Schallerzeuger zu beeinflussen. Wenn die grundsätzlichen Verfahren zur Drehklungsverminderung einmal erkannt sind, wird das aerodynamische Problem wieder in den Vordergrund treten und ein optimaler akustischer Effekt bei einer möglichst kleinen Änderung der Strömungsverhältnisse angestrebt werden.

## Aussprache.

Die Aussprache wird von Prandtl mit folgenden Ausführungen eröffnet:

In der Flugzeugentwicklung erstrebt man weiterhin eine erhebliche Steigerung der Geschwindigkeit. Jede Maßnahme, die die Leistung des Propellers herabsetzt, ist infolgedessen vom aerodynamischen Standpunkt aus undiskutabel; denn wenn das Flugzeug zwar weniger Lärm macht, andererseits aber von den gegnerischen Flugzeugen eingeholt wird, so ist damit kein Gewinn erzielt.

Alle vorgeschlagenen Geräuschminderungsmaßnahmen, die vom akustischen Standpunkt aus sehr gut ausgelegt sein mögen, kommen aerodynamisch auf eine Verschlechterung des Propellers hinaus. Wenn im vorliegenden Fall z. T. nur geringe Schubverminderungen gemessen wurden, so wurde dabei sicherlich das Antriebsmoment nicht mitgemessen. Jedenfalls ist es wünschenswert, daß bei den neuen Versuchen eine solche Messung mit vorgenommen wird.

Zu der Frage, wie ein Hilfspropeller zur Geräuschminderung angestellt sein soll, ist vom Standpunkt des Aerodynamikers zu sagen: Der Hilfspropeller muß so angestellt werden, daß er die Hälfte des Schubes übernimmt. Der Propeller ist also nicht 3flügelig, sondern 6flügelig auszubilden, so daß man von der 3. zur 6. Ordnung kommt.

Wenn gesagt worden ist, daß Luftschrauben mit größerer Flügelzahl konstruktiv erhebliche Schwierigkeiten bereiten, da sie eine dicke Nabe und sehr dünne Blätter ergeben, so glaubt Prandtl doch, daß es für die Entwicklung der gegebene Weg ist, zu dünneren Blättern überzugehen.

Auf die vorhergehenden Bemerkungen von Prandtl wird eingewendet, daß, wie theoretische Untersuchungen ergeben haben, eine Erhöhung der Flügelzahl nicht in allen Fällen eine Herabsetzung des Luftschraubengeräusches gewährleistet. Vielmehr muß man danach erwarten, daß nur unterhalb von Umfangsgeschwindigkeiten von etwa 0,7fachen der Schallgeschwindigkeit eine Geräuschverminderung eintritt. Oberhalb dieser Grenze steigt die Energie der höheren Harmonischen und damit die Energie der durch die Flügelzahl bestimmten Strahlerordnung verhältnismäßig stark an (Erasthausen).

### Weitere Möglichkeiten zur Minderung des Luftschraubengeräusches.

#### a) Kompensationsverfahren.

Unter Bezugnahme auf den Vortrag Willms, wonach die Schalleistung nur etwa 1% der Propellerleistung beträgt, wird die Anfrage gestellt, ob es nicht möglich ist, aus dem Propeller einen Wechselstrom an Stelle eines Gleichluftstromes austreten zu lassen, da die zur Kompensierung des Geräusches zu vernichtende Leistung doch nur gering wäre; insbesondere sei vielleicht eine Kompensierung in einem gewissen Richtungssektor möglich (Meyer).

Dem wird entgegnet, daß ein Wechselstrom nicht viel helfen wird, da die Verhältnisse am laufenden Propeller immer dieselben sind. Der Propeller befindet sich immer im gleichen Druckfeld (Backhaus). Weiter wird entgegnet, daß mit einem Wechselstrom kein Erfolg zu erzielen ist, da man beispielsweise, um das

Schallfeld eines zflügeligen Propellers in einem Sektor nachahmen zu können, ein Kreuz von Schallsendern haben müßte, die in der Phase um 90° zueinander verschoben sind (Prandtl).

Die Vorstellung, daß man durch Anordnung mehrerer Schallsender eine räumliche Schallverteilung erreicht, mit der man kompensieren kann, wird nur teilweise anerkannt.

Die Schwierigkeit einer solchen Maßnahme liegt darin, daß sie frequenzabhängig ist. Mit der Frequenz ändert sich auch die Charakteristik, und die Wirksamkeit beschränkt sich immer nur auf bestimmte Raumrichtungen (Trendelenburg).

Sicherlich lassen sich ganz gewollte Richtcharakteristiken herausbilden, die in einem bestimmten Winkel ein Minimum ergeben. Die gesamte Schallleistung wird aber nur sehr wenig oder gar nicht verringert (Weymann).

Lürenbaum macht darauf aufmerksam, daß bereits vor längerer Zeit die Möglichkeit besprochen wurde, das Schallfeld in bestimmten Raumrichtungen durch Interferenz dadurch zu schwächen, daß man zusätzliche Geräuschquellen mit definierter Phase anbringt. Eine praktische Lösung wurde bisher noch nicht gefunden, immerhin erscheint dieser Weg weiterer Beachtung wert.

Gegen diesen Vorschlag wird eingewendet, daß sich die Kopplung einer zusätzlichen Schallquelle phasen- und energiemäßig nicht befriedigend bemessen läßt (Weymann).

#### D) Synchronisierung

Es wird angefragt, ob die Möglichkeit untersucht worden ist, bei mehrmotorigen Maschinen die Geräusche durch Abstimmung der Schrauben zueinander zu vermindern (Ebert).

Hierzu wird bemerkt, daß bei einer solchen Kompensationsmaßnahme eine Geräuschminderung in bestimmten Richtungen zu erreichen ist, während man in anderen Richtungen eine Verstärkung in Kauf nehmen muß. Die abgestrahlte Schallenergie wird offenbar verdoppelt, wenn man zwei Schrauben hat (Willms).

Um die gewünschte Wirkung zu erzielen, müßte man z. B. bei einer zweimotorigen Maschine die beiden Luftschrauben genau synchron laufen lassen. Es wäre sehr wichtig, zu wissen, ob eine solche Forderung gestellt werden muß, da sie sich auf die ganze Entwicklung auswirken würde (Feucht).

Die Meinung über den Nutzen einer solchen Synchronisierung ist geteilt; einerseits hält man sie für ausfahrbar (Betz), andererseits befürchtet man Beeinträchtigung der Wirksamkeit z. B. im Kurvenflug (Gutzmacher).

#### c) Kortdüse.

Im Schiffbau brachte die Verwendung der Kortdüse Erfolg. Es stellte sich heraus, daß die Verbesserung des Schraubenwirkungsgrades den zusätzlichen Widerstand der Düse übertraf und daß der Vorschub eine Steigerung erfuhr. Vor allem wurde dabei eine starke Richtwirkung des Schalles erzielt (Piening).

Es wird zugegeben, daß der Schraubenschall durch eine Kortdüse abgedämpft wird. Für den Flugzeugbau wird die Kortdüse aber kaum in Frage kommen, weil der Belastungsgrad der Luftschraube viel kleiner ist, so daß hier der Zusatzwiderstand überwiegt.

Es wird noch erwähnt, daß die Ausführung einer Luftschraube mit herumgelegter Düse einmal in Italien versucht worden ist. Die Bauart zeigte aber ein sehr hohes Gewicht, und man hat sie daher wieder aufgegeben (Feucht).

Zum Schluß gibt Backhaus nochmals eine zusammenfassende Erwiderung, daß in seinem Vortrag ein Versuch behandelt wurde, der grundsätzlich physikalisch eine gewisse Klärung bringen soll. Man war sich klar, daß die Maßnahmen zunächst nicht sehr günstig wirken können. Man hat die Versuche aber trotzdem unternommen, um festzustellen, ob die sich ergebende Verringerung der Schraubenleistung vielleicht in Kauf genommen werden kann. Die praktische Anwendung würde dann nur in Frage kommen, wenn die Anordnung militärisch zweckmäßig ist.

## Bordfernsprechgeräte für die Luftfahrt.<sup>1)</sup>

Von W. Janovsky, Berlin.

### Einleitung.

Die Bordfernsprechgeräte haben die Aufgabe, der Flugzeugbesatzung untereinander oder in Verbindung mit Funkgeräten auch nach außerhalb eine einwandfreie Fernsprechverständigung zu ermöglichen. Normale Fernsprechgeräte sind dieser Aufgabe nicht gewachsen, da sie viel zu stark durch den im Flugzeug herrschenden Lärm gestört werden. Nachdem man aus zahlreichen Untersuchungen die Ursachen dieser starken Lärmentwicklung erkannt hat, ist es bereits gelungen, den Lärm im Flugzeug nicht unerheblich zu vermindern. Allerdings mußte man dabei feststellen, daß die Verminderung nur zum Teil durch geeignete Bauweise, z. B. der Zelle, zu erreichen ist, während zu einer weiteren Herabsetzung eine besondere schalldämmende und schallchuckende Innenverkleidung notwendig wird. Ob derartige Maßnahmen auch bei Militärflugzeugen getroffen werden können, ist fraglich. Wir müssen daher wahrscheinlich noch auf lange Sicht mit erheblichen Lärmstärken rechnen und unsere Bordfernsprechgeräte diesen anpassen. Eine wertvolle Erkenntnis haben uns aber die Versuche gebracht; sie haben übereinstimmend gezeigt, daß im Flugzeuglärm

vorwiegend tiefe Frequenzen enthalten sind und daß gerade diese tiefen Frequenzen nur sehr schwer gedämpft werden können.

### Der Einfluß von Lärm und Wind auf Hören und Sprechen.

Bevor wir untersuchen, wie die Bordfernsprechgeräte gebaut werden müssen, um möglichst wenig von Lärm und Wind beeinflusst zu werden, ist es notwendig festzustellen, in welcher Weise uns der Lärm bereits beim Sprechen und Hören behindert.

Betrachten wir zunächst den Einfluß des Lärms auf das Hören. In einem lauten Lärm geht leise Sprache erfahrungsgemäß vollkommen unter; sie wird durch den Lärm verdeckt. Andererseits bleibt aber die Schmerzschwelle unseres Ohres erhalten, d. h. wir dürfen unserem Ohr nur eine bestimmte maximale Lautstärke zumuten, um eine Schmerzempfindung im Ohr zu vermeiden. Der gesamte verfügbare Hörbereich ist bei Lärm also stark eingeengt. Das hat aber zur Folge, daß wir im Lärm die Sprache nur in einem wesentlich kleineren Lautstärkenbereich gut verstehen als in Ruhe. Diese Vorstellung konnten wir durch Silbenverständlichkeitsmessungen bestätigen. Bei einer derartigen Messung werden mehreren Beobachtern sinnlose Silben

<sup>1)</sup> Mitteilung aus dem Zentrallaboratorium der Siemens & Halske AG.

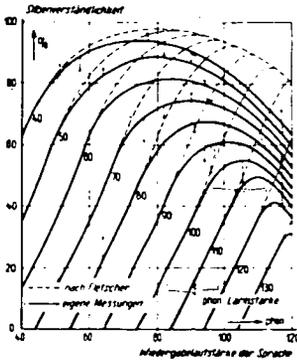


Abb. 1. Verständlichkeit bei verschiedenen Lärmstärken

vorgelesen, die die Beobachter niederschreiben müssen. Der Prozentsatz der richtig verstandenen Silben ist ein Maß für die Übertragungsgüte und wird mit „Silbenverständlichkeit“ bezeichnet. Wie diese Silbenverständlichkeit bei konstanter Lärmstärke von der Lautstärke der Sprache abhängt, zeigt Abb. 1. Bei Lärm von 40 Phon z. B. liegt die beste Verständlichkeit bei einer Sprachlautstärke von etwa 60 bis 90 Phon, bei einer Lärmstärke von 120 Phon nur in dem kleineren Bereich von etwa 110 bis 120 Phon. Bei großem Lärm muß also besonders auf richtige Einstellung der Sprachlautstärke geachtet werden. Unsere Bordkommunikationsgeräte sind daher mit Anschlußboxen mit Lautstärkereglern ausgerüstet.

Ein Hinweis zu Abb. 1 ist noch notwendig. Wie bereits erwähnt, werden Silbenverständlichkeitsmessungen mit sinnlosen Silben gemacht; in normalen Betrieb werden aber nicht sinnlose Silben, sondern zusammenhängende Worte und Sätze gesprochen. Dabei ist die Verständlichkeit natürlich bedeutend größer; so entspricht z. B. einer Silbenverständlichkeit von 10 % eine Satzverständlichkeit von rund 90 %, die also für die Abwicklung eines normalen Gespräches bereits vollkommen ausreicht.

Auf die Sprachbildung hat der Lärm einen mittelbaren und einen unmittelbaren Einfluß. Unter dem unmittelbaren Einfluß verstehen wir die Schalldrucktransformation am Kopf und die Resonanzregung der Mundhöhle durch den Lärm; beide Einflüsse konnten wir einwandfrei nachweisen. Sie bringen es mit sich, daß das Lärmerschallfeld in unmittelbarer Nähe des Kopfes bzw. des Mundes größer ist als im freien Schallfeld. Die Resonanzregung der Mundhöhle ist besonders im Wind deutlich zu hören. Der mittelbare Einfluß des Lärms geht auf die Verschlechterung des Hörens zurück; wir sprechen nämlich so laut, daß wir uns selbst mit einer uns gewohnten Lautstärke hören. Wird nun durch den Lärm unser Hörvermögen geschwächt, dann steigern wir unwillkürlich und unbewußt die Sprachlautstärke. Nach unseren Messungen spricht man z. B. bei einem Lärm von 120 Phon um rund 20 Phon lauter als in Ruhe. Dabei enthält die laute Sprache bedeutend mehr hohe Komponenten als die normale. Fernsprengeräte für Lärm müssen diese hohen Komponenten darum auch gut wiedergeben. Weitere Einzelheiten, vor allem auch die Meßergebnisse, sind in einer älteren Arbeit [1] enthalten.

#### Gegenüberstellung von Besprechungs- und Berührungsmikrofonen.

Zunächst lassen sich aus dem bereits Gesagten die Anforderungen an die Mikrophone ableiten. Erstens sollen sie natürlich möglichst wenig Lärm aufnehmen

oder, besser gesagt, eine möglichst große Sprachspannung bei einer möglichst kleinen Lärmspannung abgeben. Zweitens müssen sie die besonders wichtigen hohen Sprachkomponenten gut wiedergeben; die tiefen Frequenzen dagegen können ruhig schlechter übertragen werden. Ein derartiges Mikrophone verändert zwar die Klangfarbe der Sprache, zeichnet sich aber durch eine gute Verständlichkeit im Lärm aus. Dazu kommt noch, daß es die tiefen Lärmkomponenten, die, wie wir gesehen haben, besonders im Flugzeuglärm vorherrschen, stark unterdrückt, das Verhältnis Sprachspannung zu Lärmspannung also vergrößert. Endlich muß das Mikrophone den großen Schalldruck der Sprache und des Lärms einwandfrei verarbeiten können, es darf also nicht übersteuert werden; andernfalls würde die Sprache mit dem Lärm moduliert und dadurch schlechter verständlich.

Welcher Unterschied besteht nun zwischen einem Besprechungs- und einem Berührungsmikrophone? Das erstere nimmt Luftschall auf, das letztere vorwiegend Körperschall. Um mit einem Besprechungs-mikrophone ein möglichst günstiges Verhältnis Sprachspannung zu Lärmspannung zu bekommen, muß es also möglichst unmittelbar am Mund angeordnet werden, da ja dort die Sprache am lautesten ist. Der Lärm dagegen kann nur durch eine gewisse Frequenzbandbescheidung vor allem der tiefen Komponenten, etwas geschwächt werden. Man hat zwar versucht, durch Sprechmasken das Mikrophone gegen Lärm und Wind abzuschirmen. Nach unseren Erfahrungen stört dabei allerdings die meist ausgeprägte Resonanz der Sprechmaske. Aus dem gleichen Grund haben auch Besprechungs-mikrophone, die in Atemmasken eingebaut wurden, versagt.

Mit einem Berührungsmikrophone dagegen ist grundsätzlich eine bessere Lärmabschirmung zu erzielen. Ein gutes Berührungsmikrophone wird so gebaut, daß es in der Hauptsache nur Körperschall aufnimmt; es wird an eine geeignete Stelle des Kopfes angelegt und durch die Sprachschwingungen der Berührungsstelle unmittelbar erregt. Gegen den Luftschall des Lärms dagegen ist das Berührungsmikrophone weitgehend unempfindlich. Lediglich auf dem Umweg über den Kopf nimmt das Berührungsmikrophone etwas Lärm auf; durch den Lärm wird ja auch der Kopf zum Mitschwingen angeregt und diese Schwingungen werden natürlich auch auf das Mikrophone übertragen. Die von einem guten Berührungsmikrophone abgegebene Lärmspannung ist deshalb in der Gebrauchslage am Kopf größer, als wenn es vollkommen frei in Wind und Lärm hängt.

Neben diesen akustischen Gesichtspunkten sprechen noch praktische für die Verwendung von Berührungsmikrophenen in Flugzeugen.

#### Die Übertragung der Sprechschwingungen auf Berührungsmikrophone.

Schon früher war festgestellt worden, daß Berührungsmikrophone besonders die tiefen Sprachschwingungen bevorzugen [2]. Durch eine entsprechende elektrische Levierung wurden deshalb die tiefen Frequenzen unterdrückt, die hohen dagegen bevorzugt wiedergegeben. Unsere neueren Untersuchungen haben nun den Mechanismus der Sprachübertragung auf Berührungsmikrophone weiter geklärt.

Zum besseren Verständnis muß zunächst kurz die Sprachbildung behandelt werden. Zu diesem Zweck zeigt Abb. 2 unsere Sprechwerkzeuge. Wenn wir sprechen, werden durch den Luftstrom die Stimmbänder in Schwingungen versetzt. Diese obertonreichen Schallschwingungen der Stimmbänder gelangen nun in die Mund- und Nasenhöhle und werden dort durch deren Resonanzwirkung beeinflusst. Je nach dem Vokal, den wir sprechen, wird bekanntlich durch verschiedene Zungenstellung die Resonanz der Mundhöhle ver-

1) Die in [1] gesetzten Zahlen beziehen sich auf das Schritt-maßverhältnis.

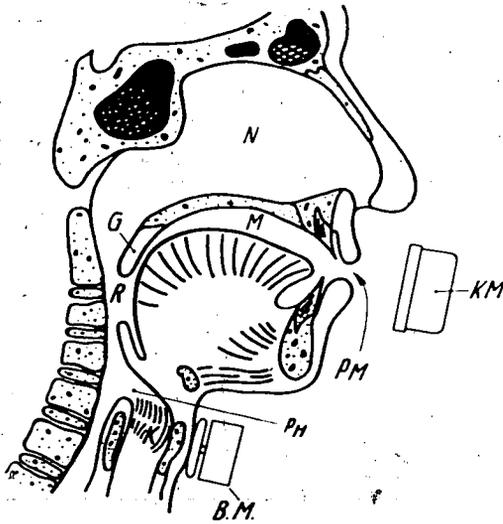


Abb. 2. Schema der Sprachorgane.  
 N = Nasenhöhle, PH = Schalldruck im Hals.  
 M = Mundhöhle, PM = Schalldruck am Munde.  
 R = Rachen, B.M. = Berührungsmikrophon.  
 G = Gaumensegel, KM = Kondensatormikrophon.  
 K = Kehlkopf.

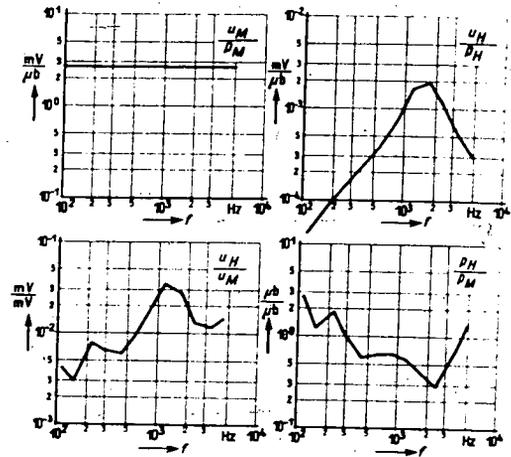


Abb. 3. Übertragung der Sprachschwingungen auf ein Berührungsmikrophon.

Aus den in Abb. 3 gezeigten drei Kurven  $\frac{u_H}{u_M}$ ,  $\frac{u_M}{p_M}$  und  $\frac{p_H}{p_M}$  kann nun der Halsfrequenzgang, d. h. das Verhältnis Schalldruck im Hals  $p_H$  zu Schalldruck am Mund  $p_M$  berechnet werden, denn es ist ja

$$\frac{p_H}{p_M} = \frac{u_H}{u_M} \cdot \frac{u_M}{p_M} \cdot \frac{p_M}{u_H}$$

Dieses Verhältnis ist ebenfalls in Abb. 3 dargestellt. Sein Verlauf ist durchaus verständlich. Die Grundtöne der Stimmbandschwingung sind im Kehlkopf stärker enthalten als im Schalldruck am Mund, die durch die Resonanz der Mundhöhle verstärkten Ober-töne, die Sprachformanten, dagegen umgekehrt. Bei tiefen Frequenzen muß also  $\frac{p_H}{p_M}$  größer oder angenähert gleich 1 sein, bei mittleren im Gebiet der Sprachformanten dagegen kleiner. Der Anstieg bei den hohen Frequenzen endlich ist offenbar darauf zurückzuführen, daß für die hohen Kehlkopfschwingungen die Mund- und Nasenhöhle als Kurzschluß wirken, so daß sie nicht zur Abstrahlung kommen, im Schalldruck am Mund daher kaum oder nur schwach enthalten sind.

Bei den Messungen zu Abb. 3 wurde ein bestimmter Text gesprochen, es waren also Vokale und Konsonanten enthalten. Wir haben die gleichen Untersuchungen nun auch auf Vokale und Konsonanten allein ausgedehnt. Abb. 4 und 5 zeigen den Frequenzgang des Halses bei den Vokalen. Er stimmt im großen und ganzen mit dem bei Sprache überein. Der Frequenzgang des Halses bei den Konsonanten f und sch in Abb. 6 dagegen zeigt charakteristische Abweichungen, die aber durchaus erklärlich sind. Die Konsonanten f und sch entstehen ja erst an den Zähnen bzw. Lippen. Sie müssen daher im Schalldruck am Mund bedeutend stärker enthalten sein als im Kehlkopf, denn jetzt liegt die Mundhöhle vor dem Kehlkopf, d. h. aber, das Schalldruckverhältnis  $p_H/p_M$  muß im ganzen Frequenzbereich kleiner als 1 sein.

Die Tatsache, daß der Frequenzgang des Halses für Vokale und Konsonanten verschieden ist, hat nun aber zur Folge, daß wir ihn durch eine elektrische Entzerrung entweder nur für Vokale oder nur für Konsonanten vollkommen ausgleichen können. Es ist also unmöglich, mit einem Berührungsmikrophon am Kehlkopf die gleiche Sprachqualität zu erzielen, wie etwa mit einem Kondensatormikrophon am Mund. Günstiger

ändert; die durch die Resonanz hervorgehobenen Ober-töne der Kehlkopfschwingung sind die sogenannten Sprachformanten.

Wird nun ein Berührungsmikrophon z. B. am Kehlkopf angelegt, so ist nach obigen ohne weiteres verständlich, daß in der Hauptsache die Kehlkopfschwingungen wiedergegeben werden; die Sprachformanten werden dagegen weniger ausgeprägt sein. Um quantitative Unterlagen über den Unterschied zwischen Kehlkopf- und normaler Sprache zu erhalten, haben wir daher folgende Untersuchungen durchgeführt: Ein Kondensatormikrophon wurde unmittelbar am Mund angeordnet, ein magnetisches Berührungsmikrophon am Kehlkopf. Die Sprachspannung des Kondensatormikrophons  $u_M$  und die des Berührungsmikrophons  $u_H$  wurden gleichzeitig über je ein Oktavsieb analysiert. Das

Verhältnis  $\frac{u_H}{u_M}$  kann bereits als Maß für die Güte der Sprachwiedergabe des Berührungsmikrophons dienen. Wie man aus Abb. 3 sieht, ist  $u_H/u_M$  nicht unabhängig von der Frequenz, sondern die tiefen Komponenten werden etwas unterdrückt. Dieser Frequenzgang wurde für das magnetische Berührungsmikrophon gewählt, um die tiefen Lärmkomponenten zu mindern.

Weiter wurde in Abb. 3 noch das Übertragungsmaß des Kondensatormikrophons, d. h. das Verhältnis Mikrophonspannung  $u_M$  zu Schalldruck  $p_M$  aufgezeichnet. Es ist bis 6000 Hz vollkommen geradlinig. Endlich konnten wir auch noch das Übertragungsmaß des Berührungsmikrophons ermitteln. Dabei muß allerdings berücksichtigt werden, daß die Kehlkopfschwingungen erst über den Hals auf das Berührungsmikrophon einwirken. Wir haben daher zunächst aus der Rückwirkung auf einen mechanischen Resonator die mitschwingende Halsmasse und -dämpfung ermittelt. Unter Berücksichtigung dieser Masse und Dämpfung kann dann das Gesamtübertragungsmaß des Berührungsmikrophons einschließlich der mitschwingenden Hals-teile, das ist aber das Verhältnis Berührungsmikrophonspannung  $u_H$  zu Schalldruck im Hals  $p_H$ , angegeben werden. Den Verlauf zeigt Abb. 3.

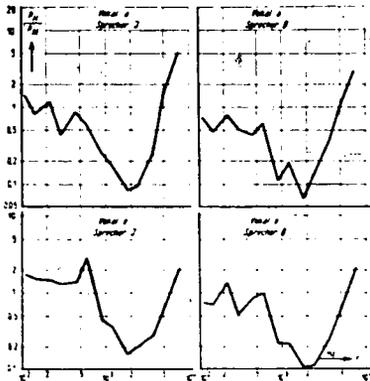


Abb. 4. Frequenzcharakteristik des Halses für Vokale a und e

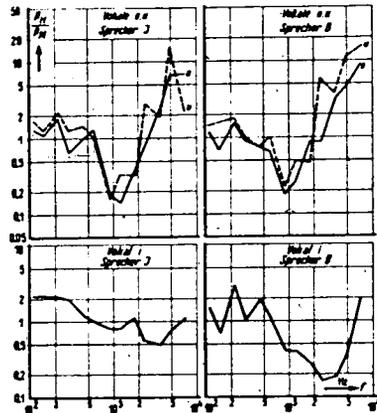


Abb. 5. Frequenzcharakteristik des Halses für Vokale o und i

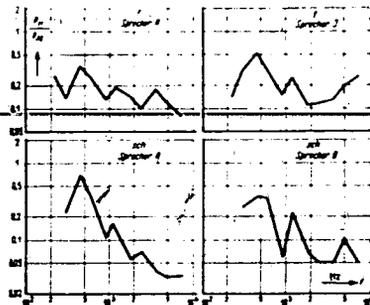


Abb. 7. Nichtlineare Verzerrung von Berührungsmikrofonen.

Abb. 6 (links). Frequenzcharakteristik des Halses für Konsonanten f und sch.

liegen die Verhältnisse, wenn das Berührungsmikrofon in der Nähe des Mundes, etwa an der Oberlippe angelegt wird. Hier sind aber wieder die Sprachschwingungen kleiner, so daß das Verhältnis Sprachspannung zu Lärmspannung ungünstiger wird; auch läßt sich das Mikrofon nur schwer hier anbringen. Aus diesem Grunde werden die Berührungsmikrofone heute entweder in die Fliegerkappe eingebaut und liegen dann an den oberen Halspartien an, oder sie werden in ein Halsband eingesetzt und nehmen dann unmittelbar die Kehlkopfschwingungen auf. In beiden Fällen ist die Sprachqualität durchaus befriedigend, so daß die Berührungsmikrofone wegen ihrer sonstigen großen Vorteile gerade für Flugzeuge auch weiter ihren Platz behaupten werden.

#### Vergleich zwischen Kohle- und magnetischem Berührungsmikrofon.

Um beste Verständlichkeit zu erzielen, müssen die Mikrophone allerdings auch möglichst verzerrungsfrei arbeiten. Wie bereits erwähnt, machen sich besonders die nichtlinearen Verzerrungen wegen der durch sie bedingten Modulation der Sprache mit dem Lärm unangenehm bemerkbar. Aus diesem Grunde wurden bei uns neben dem Kohlemikrofon auch ein magnetisches entwickelt. Es ist ja allgemein bekannt, daß Kohlemikrophone größere nichtlineare Verzerrungen haben als magnetische; sie sind dafür auch empfindlicher als die letzteren. Wie weit man aber magnetische Mikrophone im Vergleich zu Kohlemikrophen verzerrungsfrei bauen kann, zeigt Abb. 7. Beide Mikrophone wurden mit der gleichen Amplitude bei einer Frequenz von

etwa 600 Hz erregt und ihre Spannung oszillographiert. Die des magnetischen Mikrophones ist vollkommen sinusförmig, die des Kohlemikrophons zeigt ausgeprägte nichtlineare Verzerrungen. Die mechanische Aussteuerung war natürlich ebenfalls vollkommen sinusförmig und entsprach etwa der lautest möglichen Sprache. Die nichtlinearen Verzerrungen des Kohlemikrophons sind nicht konstant, sondern hängen noch stark z. B. von der Lage desselben ab.

Abb. 8 zeigt noch ein Kolgeberührungsmikrofon, Abb. 9 ein magnetisches. Ersteres ist als vollkommen



Abb. 8. Kohle-Berührungsmikrofon der SAM.

geschlossene Kapsel mit Gehäuseantrieb, letzteres mit Membranantrieb gebaut. In der Größe sind die beiden ähnlich. Mit Hilfe der neben dem Mikrofon liegenden Deckel können sie an Halsbändern befestigt werden. Ein derartiges Halsband mit zwei magnetischen

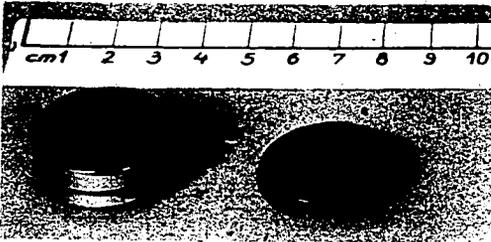


Abb. 9. Magnetisches Berührungsmikrophon der SAM.

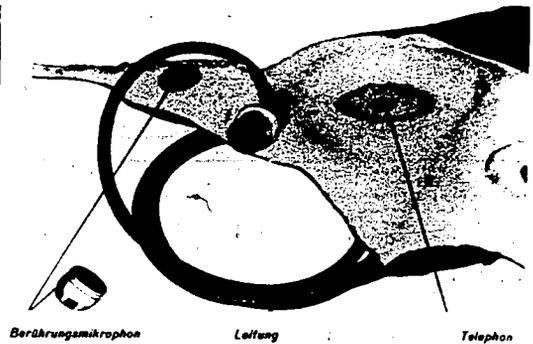
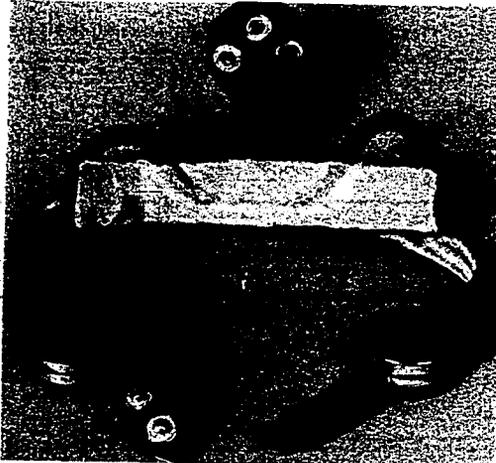


Abb. 11. Fliegerkappe mit magnetischem Berührungsmikrophon der SAM.

Abb. 10 (rechts). Halbmaske mit magnetischem Berührungsmikrophon der SAM.

Berührungsmikrophonen, das an eine Kappe angeknüpft werden kann, zeigt Abb. 10, während in Abb. 11 eine Fliegerkappe mit eingebautem, magnetischem Berührungsmikrophon dargestellt ist.

#### Zusammenfassung.

Einleitend werden die Lärmverhältnisse im Flugzeug gestreift, anschließend der Einfluß des Lärms auf Sprechen und Hören gezeigt. Einmal schränkt der Lärm ganz wesentlich unser Hörvermögen ein, zum zweiten zwingt er uns zu einer bedeutend größeren Sprechstärke als in Ruhe. Dabei enthält die laute Sprache mehr hohe Komponente als die normale. Diesen geänderten Hör- und Sprechverhältnissen müssen vor allem die Mikrophone angepaßt werden. Es folgt dann eine kurze Gegenüberstellung von Besprechungsmikrophonen und Berührungsmikrophonen. Letztere zeichnen sich vor allem durch die gute Lärmabschirmung aus. Im

folgenden wird daher nur noch das Berührungsmikrophon behandelt, und zwar wird zunächst die Sprachübertragung auf dasselbe geklärt. Dabei stellt sich heraus, daß die Übertragung für Vokale und Konsonanten verschieden ist. Endlich wird noch auf die Bedeutung der nichtlinearen Verzerrungen hingewiesen und gezeigt, daß das magnetische Berührungsmikrophon vollkommen linear arbeitet. Zum Schluß folgen noch einige Abbildungen verschiedener Mikrophone und Mikrophoneinbauten.

#### Schrifttum.

1. W. Janovsky: Fernsprechen in Lärm und Wind. ETZ 58, Heft 48, Seite 1289, 1937.
2. K. Krüger und W. Williams: Versuche zur Verbesserung von Telephonanlagen für geräuscherfüllte Räume. Z. techn. Phys. 16, Seite 565, 1937.

## Verständigung im Flugzeug.

Von J. Sedlmayer, Reclin, und A. Darré, Reclin<sup>1)</sup>.

### Allgemeine Voraussetzungen.

Die akustische Verständigung im Flugzeug unterliegt zwei Hauptvoraussetzungen:

1. Ausschaltung der Beeinträchtigung durch das Flugzeuggeräusch.

<sup>1)</sup> Vorgetragen von J. Sedlmayer.

2. Verwendbarkeit der Geräte bei gleichzeitigem Tragen einer Sauerstoff-Atemmaske.

Das Flugzeuggeräusch, das Lautstärken von 90 bis 120 Phon erreicht, läßt sich durch Anbringen des Mikrophons unmittelbar vor dem Munde und lautes Sprechen knapp übertönen, d. h. man erhält eine innerlich brauchbare Sprachübertragung.

Das Ohr wird durch die hohen Lärmstärken so stark belastet, daß ohne Schutz auch dann keine ausreichende Verständlichkeit erreicht werden kann, wenn die Sprachlautstärke am Ohr über der Geräuschstärke liegt. Außerdem tritt mit die Dauer eine Schädigung des Gehör ein. Es ist daher notwendig, das Außengeräusch am Ohr abzumildern. Am einfachsten läßt sich dies durch Kopfhörer, die in einer geeigneten Abschirmung angebracht sind, erreichen.

Durch die zweite Forderung **Verwendbarkeit** zusammen mit einer Atemmaske werden die Besprechungsmikrophone praktisch unbrauchbar.

Durch die Atemmaske wird vor dem Munde ein Hohlraum mit ausgeprägter Resonanz gebildet, der die Sprache sehr dumpf und unverständlich macht. Ferner ist die Anbringung des Mikrophons am Munde bzw. in der Atemmaske un bequem und schwierig und wegen der Atemfeuchtigkeit unhygienisch und für das Mikrophon schädlich.

Es bleibt somit nur die Möglichkeit, das Mikrophon als Berührungsmikrophon auszubilden und an einer geeigneten Stelle an den Körper anzulegen.

Damit tritt ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt hinzu: Möglichst bequeme Anbringung der Mikrophone und Telephone.

Da auch Tragvorrichtungen für Atemmaske und Brille vorhanden sein müssen, führt dies zu einer Kopfhaut. Die hiermit gegebene feste Anlage von Mikrophon und Telefon am Körper bringt weiterhin den großen Vorteil dauernder Sprech- und Hörbereitschaft.

Um die notwendigen großen Hörlautstärken erzeugen zu können, muß zwischen Mikrophon und Hörern ein Verstärker eingeschaltet werden.

Rein akustische Verständigungsanlagen, bei denen die Sprache durch Röhren übertragen wird, geben eine gute Verständigung, wenn nicht mehr als zwei Teilnehmer angeschlossen werden. Bei mehr Teilnehmern sowie bei Verwendung von Atem- und FT-Geräten zusammen mit solchen Anlagen entstehen große Schwierigkeiten. Das Verfahren ist daher von geringer praktischer Bedeutung.

**Verständigungsgeräte.**

**Mikrophone.**

Für den Abgriff der Sprachschwingungen am Körper ist maßgebend, daß

- a) die Sprache möglichst naturgetreu wiedergegeben wird,
- b) der Abstand Sprache vom Störsehall möglichst groß ist,
- c) eine möglichst geringe Behinderung auftritt.

Hierfür haben sich die Stellen zu beiden Seiten des Kehlkopfes als die besten erwiesen.

An anderen Stellen, z. B. Stirnseite oder Wangenknochen, ist die Sprachgüte zwar besser, aber die Lautstärke und daher der Abstand vom Störsehall sehr gering.

Der Nacken als Abgriffstelle wäre hinsichtlich geringster Behinderung vielleicht am günstigsten. Jedoch ist hier die Güte der Sprache merklich schlechter. Ähnliches gilt für die Stelle unterhalb der Kinnlade.

Der Störsehall wird vom Mikrophon nicht unmittelbar, sondern auch als Körpersehall über die Anlagestelle aufgenommen. Wenn die Mikrophone am Kehlkopf anliegen, erhöht sich z. B. die Störsehallaufnahme, wenn man den Mund öffnet. Eine Verringerung der unmittelbaren Störsehallaufnahme unter den Wert der mittelbaren hat keinen Zweck.

Aus Symmetriegründen und um geringste Bewegungsabhängigkeit zu erhalten, verwendet man vorteilhaft zwei Mikrophone, die durch ein Halsband neben dem Kehlkopf angelegt werden. Das Halsband wird lose getragen, daß nur eine unbedeutende Belästigung eintritt, die der beim Tragen eines steifen Kragens ähnlich

ist. Wesentlich für die Behinderung sind Größe und Form der Mikrophone.

Abb. 1 zeigt die Kopfhaut mit einem derartigen Halsband. Durch den Abgriff der Sprachschwingungen am Kehlkopf tritt eine starke Benachteiligung der höheren Frequenzen auf, die in den nachfolgenden Übertragungsgliedern ausgeglichen werden muß.

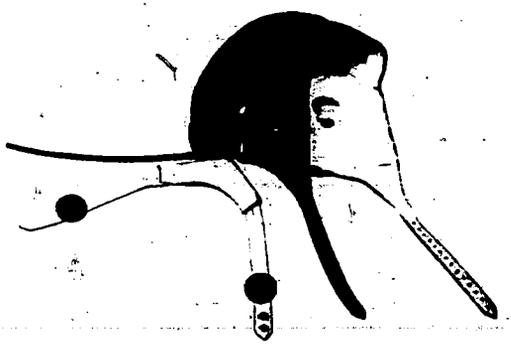


Abb. 1. Kopfhaut mit Hör- und Sprechgerät.

Die Ankopplung des Mikrophons kann durch Schüttelwirkung oder durch eine Membran erfolgen. Abb. 2 zeigt grundsätzlich die beiden Möglichkeiten. Da in beiden Fällen Membranen als wesentliche Bestandteile verwendet werden, besitzen diese Mikrophone mehr oder weniger ausgeprägte Resonanzen. Man legt diese vorteilhaft so, daß sie ein Anheben der höheren Frequenzen bewirken und dadurch die Dämpfungsverzerrung des Kehlkopfes mehr oder weniger aufheben. Infolge der Lage der Membranresonanzen im Sprachband entsteht die Notwendigkeit, den Frequenzgang des Übertragungsmasses der Mikrophone zu messen; im allgemeinen genügt die Messung des Realteiles.

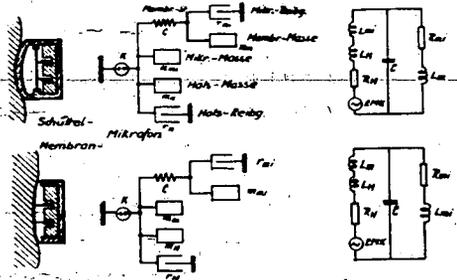


Abb. 2. Schüttel- und Membranmikrophone.

Beim Schüttelmikrophone ist diese Messung verhältnismäßig einfach, da sein Frequenzgang nur wenig durch die Eigenschaften des Halses beeinflusst wird. Das Mikrophone wird durch einen Schütteltisch mechanisch erregt, dessen Geschwindigkeitsamplitude über das interessierende Frequenzband hinweg durch einen Regelverstärker konstant gehalten wird. Die vom Mikrophone abgegebene Spannung gibt dann seinen Frequenzgang an.

Bedeutend größere Schwierigkeiten bietet die Messung eines Mikrophones mit Membranerregung, da die Eigenschwingung der Membran durch die mitschwingende Masse und die Dämpfung des Halses beeinflusst wird.

Um zu einer brauchbaren Messung zu gelangen, müssen diese Größen nachgebildet werden. Dies ist

durch einen sog. Kunsthals geschehen, der auf folgende Weise gefunden wurde:

Mit der genannten Schüttel-einrichtung, wurde ein Membranberührungsmikrophon mit einer ausgesprochenen Eigenresonanz von hinten erregt. Die Membranseite wurde an den Hals angelegt und der dabei auftretende Frequenzgang des Mikrophons gemessen. Die Resonanzkurve wurde dadurch flacher und die Resonanzfrequenz niedriger.

Dieselbe Messung wurde an einer probeweisigen Nachbildung vorgenommen und diese in ihren Eigenschaften so lange verändert, bis eine genügende Übereinstimmung mit der Kurve des Mikrophons am Hals erzielt war. Eine gute Nachbildung wurde durch eine Membran von etwa 5 cm Durchmesser aus Sämschleier erzielt. Die Membran schließt einen Behälter ab, der mit Glycerin von etwa 20% Wassergehalt gefüllt ist. Sie ist gegen das Glycerin durch eine sehr dünne aufgeklebte Gummifolie abgedichtet und durch Einreiben mit Glycerin geschmeidig gemacht. Mitbestimmend für die Richtung der Nachbildung ist die Größe der Berührungsfäche zwischen Membran und Mikrophon, die in eindeutigen Zusammenhang mit der Flüssigkeitsmenge steht, die vom Mikrophon beim Anpressen verdrängt wird.

Diese Nachbildung wurde doppelseitig ausgeführt; die eine Seite wird vom Schütteltisch erregt, und an die andere Seite wird das zu messende Mikrophon angelegt. Der so gewonnene Kunsthals wird also als weiches Zwischenglied zwischen dem Schütteltisch und dem Mikrophon gelegt, so daß er das Mikrophon in richtiger Weise erregt und belastet.

Abb. 3 zeigt das Prinzip der Meßeinrichtung, Abb. 4 die charakteristischen Kurven des Kunsthalles.

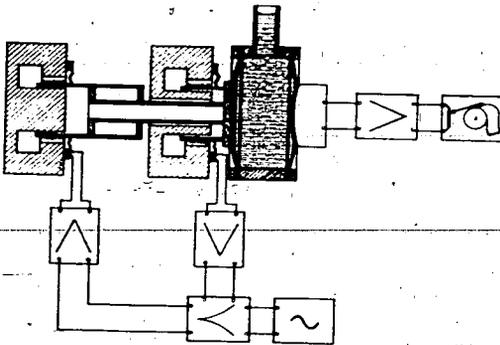


Abb. 3. Meßeinrichtung für Berührungsmikrophone.

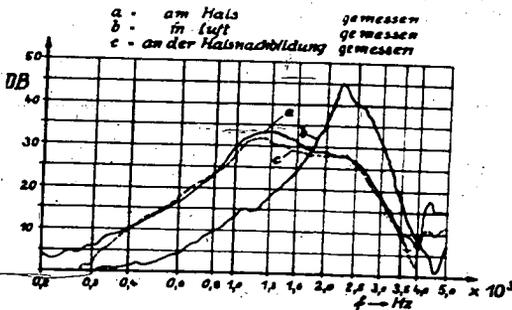


Abb. 4. Eichkurven des Kunsthalles.

Mit dieser Meßeinrichtung ist es zum erstenmal gelungen, Frequenzkurven von Membranberührungsmikrophonen aufzunehmen, die in einem eindeutigen und definierten Zusammenhang mit den durch Sprache festgestellten Übertragungseigenschaften der Mikrophone stehen.

Die Entwicklung der Halsnachbildung steht am Anfang. Nach genügender Klärung der Eigenschaften dieser Nachbildung dürfte es jedoch möglich sein, mit ihrer Hilfe das Übertragungsmaß von Berührungsmikrophonen einwandfrei zu bestimmen.

Durch Hinzunahme der von Janovsky gezeigten mittleren Übertragungsunterschiede zwischen normaler und Kehlkopfsprache kann man dann auch Sollkurven für Mikrophonfrequenzgänge aufstellen und messen.

**Einfluß der verschiedenen Mikrophoneffekte.**

**Kohlekontaktmikrophone:** Bei den Kohlemikrophonen hat sich die Verwendung zweier Membranen sehr gut bewährt. Man erzielt hiermit einbandförmige Wirkung, die eine weitgehende Entzerrung der Kehlkopfsprache ermöglicht. Bei den Kohlemikrophonen ist es sehr wichtig, daß diese Entzerrung bereits im Mikrophon stattfindet. Der Kohlegrieß bringt bekanntlich einen verhältnismäßig großen Klirrfaktor mit sich, der auch eine Vermischung von Sprache und Geräusch durch gegenseitige Modulation verursacht. Da die Entzerrung der Kehlkopfsprache eine Benachteiligung der tieferen Frequenzen bedingt, werden dadurch auch die Hauptanteile des Flugzeuggeräusches stark unterdrückt und eine schädliche Wirkung durch Modulation verhindert.

Andererseits bringt die Anwendung der zwei Membranen ein breites Übertragungsband für die höheren Sprachfrequenzen, was die Klangqualität und Verständlichkeit der Sprache erhöht. Abb. 5 zeigt als Beispiel eine solche Frequenzkurve, die über den Kunsthals aufgenommen wurde.

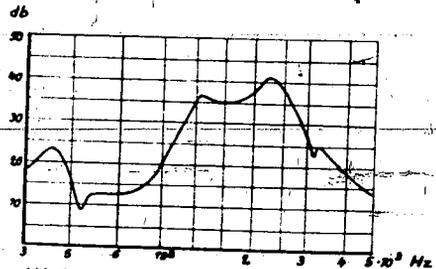


Abb. 5. Frequenzkurve eines Kohlemikrophons.

Die Geräuschaufnahme der Kohlemikrophone in Flugzeuggeräusch von 100 Phon liegt um 2 bis 3 Neper unter dem mittleren Sprachpegel. Der Klirrfaktor beträgt bei betriebsmäßiger Aussteuerung etwa 20%.

Solche Mikrophone lassen sich als reine Schüttelmikrophone ausbilden oder auch z. T. mit Membranwirkung versehen. Das reine Schüttelprinzip hat dabei den Vorteil, daß ein mehr oder weniger starkes Anliegen des Mikrophons am Hals keinen Einfluß auf die Frequenzkurve ausübt, während bei Membranwirkung dieser Einfluß beobachtet werden kann.

**Magnetisches und dynamisches Prinzip:** Wegen des bei diesen Mikrophonen geringen Klirrfaktors ist man in der Ausbildung der Frequenzkurve nicht so sehr eingesengt. Trotzdem ist es natürlich zweckmäßig, die Resonanz in den Frequenzbereich über 1000 Hz zu legen und scharfe Resonanzspitzen zu vermeiden.

Bisher wurde nur eine Membran und die Membranerregung angewendet, wobei durch die Dämpfung des Halses die Resonanzkurven genügend flach gehalten werden können. Abb. 6 zeigt die Kurve eines magnetischen Mikrophons über den Kunsthals gemessen.

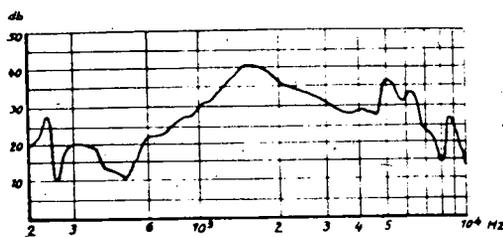


Abb. 6. Frequenzkurve eines magnetischen Mikrophons

Die Geräuschaufnahme im Flugzeuggeräusch von 100 Phon liegt bei diesen Mikrophonen 3 bis 3,5 Neper unter dem Sprachpegel. Der Klirrfaktor konnte wegen des zu hohen Klirrfaktors der Meßeinrichtung nicht einwandfrei bestimmt werden. Jedoch tritt bei diesen Mikrophonen keinerlei gegenseitige Modulation von Sprache und Geräusch auf.

**Piezoelektrisches Prinzip:** Durch Verwendung von Biegern aus Seignettesalzkristallen lassen sich Berührungsmikrophone herstellen, die etwa dieselbe Übertragungsgüte besitzen wie die magnetischen oder dynamischen Mikrophone. Der starke Temperaturgang des piezoelektrischen Effektes und der Kapazität, die dem Seignettesalz eigen sind, gleichen sich in ihrer Wirkung auf den Mikrophoneffekt ziemlich aus.

Sehr störend ist jedoch, daß die Kristalle bei  $+ 55^{\circ} \text{C}$  Kristallwasser abgeben und dadurch piezoelektrisch unwirksam werden. Temperaturen in dieser Größenordnung treten im Sommer bei unmittelbarer Sonnenbestrahlung öfters auf, so daß die Verwendung solcher Kristalle ein gewisses Gefahrenmoment mit sich bringen würde. Ebenso läßt ihr Verhalten in feuchter Luft die Verwendung bedenklich erscheinen.

### Telephone.

1. Die Hörkappe enthält Ohrablichtungen, in die die Telephone eingesetzt sind. Die Güte einer solchen Ablichtung ist bestimmt durch:

- a) Abdichtung der Außengeräusche,
- b) Lautstärke des Telefons,
- c) bequemen Sitz,
- d) Luftausgleich bei schnellen Druckschwankungen,
- e) Luftwiderstand und sonstiges Verhalten im Winde.

Abb. 7 zeigt den Schnitt durch eine Ohrablichtung, die sich als sehr vorteilhaft herausgestellt hat; ebenso

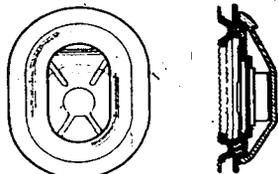


Abb. 7. Ohrablichtung.

ist die Form der Ablichtung in Abb. 1 zu erkennen. In Abb. 8 ist die damit erreichte Geräuschdämmung dargestellt. Sie wurde folgendermaßen gemessen: Eine Kopfnachbildung aus Metall, in der hinter einem künstlichen Gehörgang ein Mikrophon angebracht war, wurde in einem Hallraum mit gewoppeltem Schall beauf-

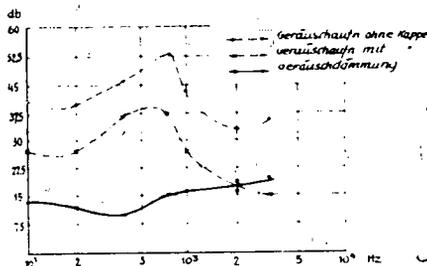


Abb. 8. Geräuschdämmung einer Hörkappe.

schlägt. Die Schallaufnahme des Mikrophons wurde einmal bei unbedecktem Kopf und einmal mit überzogener Kopfhaut gemessen. Die Messung entspricht nur angenähert der Wirklichkeit, die Annäherung läßt sich daraus erkennen, daß eine Ablichtung des Gehörganges mit Plastelin 20 bis 30 db Dämmung ergab, was der Dämmung am menschlichen Ohr entspricht.

Die Ablichtung besteht aus einem Gummiformkörper, der das Ohr möglichst eng umschließt und um das Ohr herum durch zwei Ablichtflächen am Kopfe anliegt. Diese Flächen sind mit gelocktem, kurzgeschorenem Lammfell (Schmashesen) bekleidet, um eine unmittelbare Berührung der Haut durch den Gummi zu vermeiden. Durch das Lammfell wird der notwendige Luftausgleich sichergestellt.

Das Telefon wird leicht an die Ohrmuschel angebracht. Da die Ablichtung somit das Ohr so eng wie möglich umschließt, wird die Erregung des Ohres durch das Telefon so groß wie möglich gemacht. Über dem Telefon sitzt eine Verkleidung aus Gummi, die mit dünnem Leder bezogen wird.

In die Ohrablichtung wird ein Schweißblatt gelegt, das Schweißwasserbildung verhindert und das Telefon vor Rostansatz schützt. Die Sprachfrequenzen werden durch dieses Schweißblatt praktisch nicht gedämpft.

### Verschiedene Ausführungen von Telephonen.

Das magnetische Telefon in üblicher Ausführung hat bei 800 bis 1000 Hz eine ausgesprochene Resonanz, die um etwa 4,5 Neper über der Hörschwelle liegt. Frequenzen oberhalb dieser Resonanz werden sehr stark benachteiligt. Die im Flugzeug notwendigen Lautstärken liefert dieses Telefon mit einem Klirrfaktor von etwa 20%.

Das Bestreben, das übertragene Frequenzband nach oben zu erweitern, hat auch hier zum Leichtmembranhörer geführt. Die bisherigen Erfahrungen reichen zu einem abschließenden Urteil noch nicht aus. Jedoch hat dieser Hörer auch noch eine merklich hervorstrebende Resonanz bei 2000 Hz.

Auch piezoelektrische Hörer mit Seignettesalzkristallen wurden untersucht. Sie besitzen den Vorteil, ein verhältnismäßig ausgezeichnetes Frequenzband ohne besonders hervortretende Resonanz zu übertragen. Anzeichen ist dies eine Eigenschaft der hierzu verwendeten Papier-Konsumembranen, die sich vielleicht auch auf magnetische Mikrophone übertragen läßt.

Der große Nachteil der Kristalhörer besteht in dem sehr großen Temperatureinfluß auf Scheinwiderstand und Empfindlichkeit, sowie in der Eigenschaft des Kristalls, bei  $+ 55^{\circ} \text{C}$  zu zerfallen.

### Verstärker.

Die Verstärker sind in ihrem Aufbau sehr einfach; für Kohlemikrophone wird in der Regel eine, für die anderen Mikrophonarten werden zwei Verstärkerstufen benötigt.

Die Anforderungen sind folgende:

1. Genügend große Ausgangsleistung (je Hörer rd. 30 mW bei einem Klirrfaktor  $\leq 10^4$ ).
2. Frequenzbereich von 300 bis 3000 Hz, außerhalb dieses Bereiches möglichst steiler Abfall.
3. Ausgleich der Dämpfungsverzerrung von Hals-, Mikrofon- und Hörer, was in der Regel einen leicht ansteigenden Frequenzgang bedeutet.
4. Regelung der Lautstärke an jedem Anschluß.

Der Verstärkungsabfall außerhalb des Nutzbereiches ist zur Herabsetzung des Lärmeeinflusses notwendig.

### Verständlichkeit.

Mit derartigen Anlagen kann eine Silbenverständlichkeit von etwa 40% bzw. eine Textverständlichkeit von etwa 90% erreicht werden. Bei Verwendung von Kohlemikrofonen liegt die Verständlichkeit um einige Prozent tiefer als bei den andern Mikrofonarten. Von Bedeutung ist, daß die volle Verständlichkeit von völlig ungeübten Hörern bereits nach etwa einer halben Stunde erreicht wird. Notwendig ist verhältnismäßig langsames Sprechen und klare betonte Aussprache.

### Weiterentwicklung.

Eine bedeutende Verbesserung der derzeitigen Mikrophone ist voraussichtlich nicht mehr möglich. Weder durch Änderung des Frequenzganges noch durch Ver-

ringerung der Geräuschaufnahme dürfte eine wesentliche Verständlichkeitserhöhung zu erreichen sein. Die Erniedrigung des Klirrfaktors, die bei magnetischen und dynamischen Mikrofonen erreicht wurde, bracht keine allzu großen Vorteile und kann auch kaum noch unterschritten werden.

Durch Verbesserung der Telephone hinsichtlich Frequenzgang und Klirrfaktor ist voraussichtlich noch eine Erhöhung der Verständlichkeit zu erreichen.

Eine bedeutende Verbesserung ist erst möglich, wenn das Flugzeuggeräusch erheblich verringert wird. Dadurch würden die den Rest der Verständlichkeit bildenden Konsonanten aus dem Störpegel heraustreten und auch bei Verwendung von Berührungsmikrofonen bedeutend verständlicher werden. Es wäre dann auch denkbar, an Stelle der jetzigen Hörkappen Luftschallmikrophone und Lautsprecher zu verwenden. Hierzu müßte das Flugzeuggeräusch auf etwa 60 Phon gedämpft werden; bei Höhenflügen wären Kabinenbeheizung und Belüftung Voraussetzung.

Die vorliegenden Erkenntnisse wurden in Zusammenarbeit mit dem RLM, der DVL und einer größeren Anzahl von Firmen gewonnen. In der Hauptsache waren beteiligt:

Deutsche Telefon- und Kabelwerke, Berlin	} für elektrische und akustische Fragen.
Neufeld & Kuhnke, Kiel	
Siemens Apparate und Maschinen	
Karl Heister, Berlin	
Taub & Co., Berlin	} für Ohrablichtung und Hörkappen.

## Aussprache zu den beiden vorstehenden Vorträgen.

In der Aussprache wird einmal angefragt, ob sich bei der gleichzeitigen Verwendung mehrerer Berührungsmikrophone an verschiedenen Stellen des Halses Phasenverschiebungen ergeben (Reiher). Versuche in dieser Richtung haben ergeben, daß man bei Abnahme durch zwei Mikrophone an symmetrischen Stellen, z. B. links und rechts am Kehlkopf, vollkommene Phaseneinstimmung bekommt. Voraussetzung dabei ist jedoch einwandfreies Arbeiten der Mikrophone. Mit Kohlemikrofonen ist dieses schwer zu erreichen, während man bei magnetischen Mikrofonen deutlich merkt, ob beide richtig gepolt sind (Janovsky).

Schließlich wird noch die Frage gestellt, ob den von Janovsky in Abb. 1 (s. S. 35) dargestellten Messungen

über Silbenverständlichkeit ein Lärm von bestimmter Zusammensetzung zugrunde gelegt worden ist, da zwei verschiedene Lärmarten zwar dieselbe Lautstärke haben können, während sie sich für die Verständlichkeit ganz verschieden auswirken (Wehner).

Die angegebenen Verständlichkeitsmessungen wurden bei Schiffslärm gemacht, der auf Schallkarten ausgezeichnet worden ist. Der Schiffslärm ist in Hinsicht Verständlichkeitsminderung das ungünstigste Geräusch, da sein Spektrum über den ganzen Hörbereich verteilt ist. Er hat ein Maximum bei etwa 1000 Hz. Im Flugzeug dürften günstigere Verhältnisse vorliegen (Janovsky).

## Schalldämpfer für Rohrleitungen.

Von H. Reiher, Stuttgart.

(Nach wissenschaftlichen Untersuchungen von M. Bentele, Stuttgart.)

Bei vielen Arbeitsmaschinen (Verdichter, Gebläse, Ventilatoren) und Kraftmaschinen (Dampfmaschinen, Verbrennungsmotoren) entstehen in den angeschlossenen Rohrleitungen Schwingungen der Gassäulen, wodurch die Leistungsfähigkeit und der Wirkungsgrad der Maschinen beeinträchtigt werden und störender Lärm entsteht. Ein Verhindern der meist mit dem Betriebsvorgang eng verbundenen Entstehung der Schwingung ist schwer möglich; der Einbau sogenannter Schalldämpfer bringt in gewissen Grenzen Abhilfe.

### Die Wirkung von Schalldämpfern

ist in den letzten Jahren verschiedentlich untersucht worden<sup>1)</sup>). Die Versuche haben sich jeweils auf bestimmte technische Anordnungen bzw. auf bestimmte

<sup>1)</sup> G. W. Stewart und R. B. Lindsay, Akustik (Deutsche Übersetzung von G. Schmidt), S. 125, Berlin 1931.  
<sup>2)</sup> A. Kaufmann und U. Schmidt, Schalldämpfer für Automotoren, Berlin 1932.  
<sup>3)</sup> M. Kluge, Das Problem der Dämpfung des Auspuffschalles der Kraftfahrzeugmotoren, Autom. 16 Jh., Z., Bd. 36 (1933), S. 192, und andere.

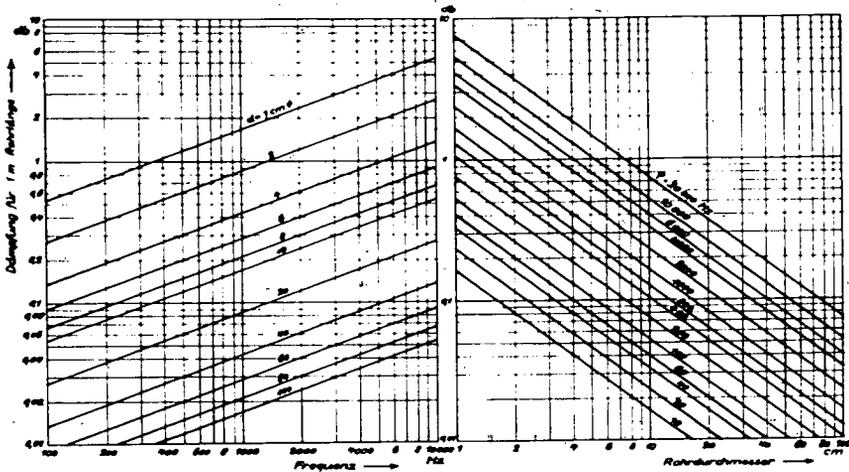


Abb. 1. Reibungsdämpfung in Röhren nach Kirchhoff (vgl. z. B. E. Waetzmann u. H. Krebs, Ann. Physik 1935, S. 247).

Frequenzgebiete beschränkt. Durch M. Bentele wurde in der letzten Zeit im Institut für Technische Physik der Technischen Hochschule Stuttgart eine Arbeit durchgeführt mit dem Ziel, das Grundsätzliche der Wirkung sogenannter Leitungsschalldämpfer zu überprüfen und das Problem der Schalldämpfer einheitlich und übersichtlich zu gestalten.

Seine theoretischen und experimentellen Untersuchungen führten zu Ergebnissen, über die an anderer Stelle ausführliche Mitteilung erfolgt ist). Über das Grundsätzliche sei hier berichtet.

Bezogen auf die Art der Wirkung gliedert Bentele die Dämpfungseinrichtungen in Rohrleitungen wie folgt:

1. Schwingungs-Isolierung der Rohrwände;
2. Reibungsdämpfung im Rohr;
3. Absorptionsdämpfer;
4. Querschnittsänderungen;
5. Interferenzrohre, Siebköpfe (Hochpaß, Tiefpaß) und Resonanzdämpfer.

**Schwingungs-Isolierung der Rohrwände.**

Das Dämpfen der Rohrschwingungen erfordert die Verwendung schwingungssteifer Werkstoffe, größerer Wandstärken usw. Im Hochbau können zu diesem Zweck die Röhre steif gemacht und fest mit den schweren Wänden des Maschinenraumes verbunden werden. Ebenso führt das Ummanteln jähraussendender Rohrleitungen zu spürbaren Dämpfungen, da hierdurch das Schwingen der Rohrwände verringert wird. Im Leichtbau sind solche Maßnahmen schwer möglich.

**Reibungsdämpfung in Röhren.**

Nach der Kirchhoffschen Theorie über die Dämpfung von Gasschwingungen in Röhren ist, wie aus Abb. 1 ersichtlich ist, eine einigermaßen spürbare Wirkung nur bei engen Röhren und hohen Frequenzen zu erwarten. Rauigkeiten der Rohrwände und Schallabstrahlung erhöhen die Dämpfung.

**Absorptionsdämpfer.**

Das Unterteilen des Gasstromes in einzelne, verschieden lange und verschiedenartig geführte Gaskanäle

\*) M. Bentele, Schalldämpfer für Rohrleitungen, Dissertation, T. H. Stuttgart 1937 (erschienen im VDI-Verlag). — Eine wirksame Bauart von Schalldämpfern für Rohrleitungen, Forschung a. d. Geb. d. Ing. Wes., 8 (1937), Nr. 6, S. 305—311.

kann die Fortleitung bestimmter Frequenzen wirksam dämpfen. Nachteile sind großer Druckabfall und geringe Dämpfung besonders bei tiefen Frequenzen. Das Ausfüllen der Kanäle mit porösen Stoffen vergrößert ebenfalls die Dämpfung, ist jedoch meist mit

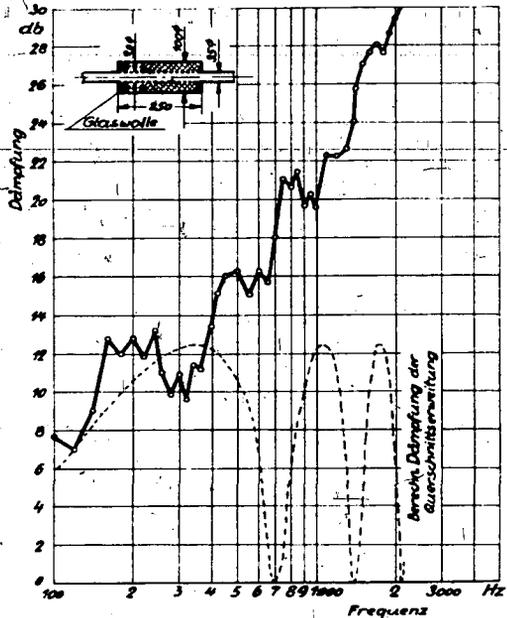


Abb. 2. Art des Aufbaues und Wirkung eines Absorptionsdämpfers (Vergleich mit der Wirkung der Querschnittserweiterung ohne Schallschluckstoff).

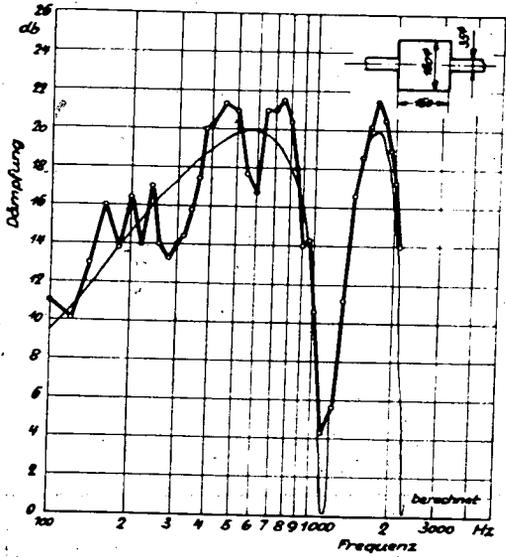


Abb. 3. Wirkung einer einfachen Querschnittserweiterung (teu-  
berEinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem  
Verhalten).

starken Druckabfall verbunden. Diese Möglichkeit wird jedoch zur Schalldämpfung ausgenutzt, wenn die Dämpfungsstoffe gleichzeitig andern Aufgaben dienen, z. B. der Entstaubung (bei Ansaugdämpfern von Verbrennungsmotoren und bei Bewetterungsanlagen), oder wenn der erhöhte Druckabfall in Kauf genommen werden kann. Das Auskleiden der Rohrleitungen mit schallschluckenden Stoffen ist verhältnismäßig wirksam, verlangt jedoch ein sorgfältiges Anpassen der Beschaffenheit des Schallschluckstoffes an die Geräuschzusammensetzung, Strömungsgeschwindigkeit und Gasart (chemische Einflüsse, Verstopfungsgefahr). Das Zusammenziehen der erforderlichen Schallschluckoberfläche in einer Rohrerweiterung verhindert das Entstehen zu großer Druckabfälle. Abb. 2 zeigt die experimentell bestimmte Wirkung eines solchen Absorptionsdämpfers, zusammen mit der theoretisch berechneten Dämpfung lediglich der Querschnittserweiterung ohne Schallschluckstoff (s. auch Abb. 3). Charakteristisch für den Dämpfungsverlauf solcher Absorptionsdämpfer ist die Anpassung an die Wirkung der leeren Querschnittserweiterung bei den tiefen Frequenzen und die alsdann mit der Frequenz stark ansteigende Dämpfung. Ausgeprägte Durchlaßstellen sind vermieden.

**Querschnittsänderungen.**

Die Höhe der Dämpfung bei Querschnittsänderungen (gleichgültig ob der Schall von dem weiteren ins engere Rohr übergeht oder umgekehrt) ist von dem Querschnittsverhältnis der aneinander stoßenden Rohrabschnitte abhängig. Die Wirkung einer einfachen Querschnittserweiterung ist aus Abb. 3 ersichtlich. Abgesehen von den Streuungen und den durch zusätzliche Resonanzerscheinungen entstehenden Einsattelungen stimmt die Wirkung recht gut überein mit den theoretisch berechneten Dämpfungen für solche Filter.

Der Hauptnachteil solcher einzelnen Querschnittsänderungen sind die von Oktave zu Oktave auftretenden Nullstellen der Dämpfung. Zur Beseitigung kann man eine Reihe von Rohrerweiterungen bzw. Verengungen zusammenschalten. Hierbei erhält man

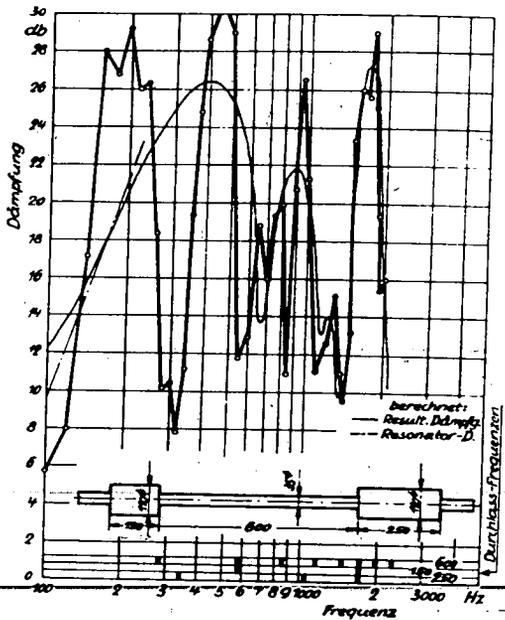


Abb. 4. Wirkung des Hintereinanderschaltens von Querschnittserweiterungen. (Es tritt eine Überlagerung der Einzelwirkungen auf, jedoch verbunden mit ausgeprägten Durchlaßstellen.)

bei Hintereinanderschaltung z. B. verschiedener Querschnittserweiterungen, z. B. in Form einer abgestuften Erweiterung, keine wesentliche Verbesserung; bei Hintereinanderschaltung einzelner Rohrerweiterungen treten Überlagerungen der Wirkungen der einzelnen Teile ein, die von den Abmessungen der engen und weiten Rohrteile und vom Abstand der beiden Rohrerweiterungen, Abb. 4, abhängen.

**Interferenzrohre, Siebketten, Resonator dämpfer.**

Durch Ansetzen geeigneter ausgebildeter Zweigstücke (akustische Scheinwiderstände) kann die Schallfortleitung in einem Rohr beeinflusst werden. Man erhält auf diese Weise Interferenzrohre und Siebketten, die der elektrischen Drossel- und Kondensator-kette analog sind, „akustische Filter“. Aus Abb. 5 ist der

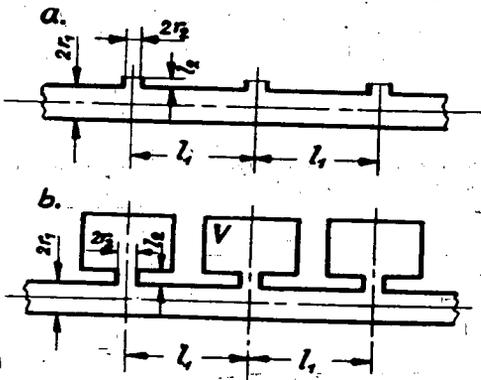


Abb. 5. Art des Aufbaues von akustischen Siebketten: a) Hochpaß, b) Tiefpaß.

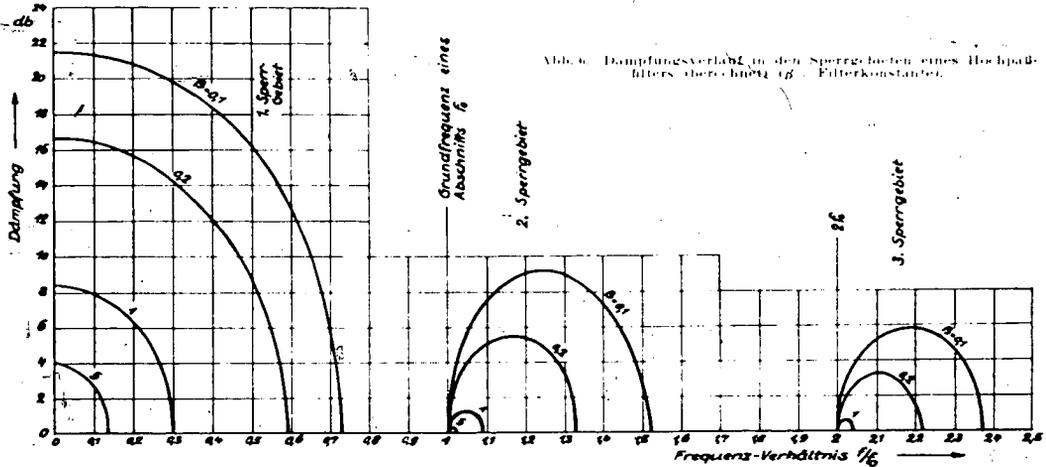


Abb. 6. Dämpfungsverlauf in den Sperrgebieten eines Hochpaßfilters über einem  $Q$ -Filterkonstanten.

prinzipielle Aufbau solcher Filter zu sehen. Abb. 6 zeigt, daß z. B. ein Hochpaßfilter eine Reihe von Sperrgebieten aufweist, zwischen denen Gebiete völliger Durchlässigkeit liegen. Für die praktische Anwendung kommt jedoch meist nur das erste Sperrgebiet zur Geltung, wie dies aus Abb. 7 ersichtlich ist. Dort zeigt das zweite Sperrgebiet nur noch eine verhältnismäßig geringe Wirkung. Durch geeignete Anordnung von Hochpaß- und Tiefpaßfilter lassen sich über größeren Frequenzgebieten liegende brauchbare Dämpfungswirkungen erzielen. Dies erfordert allerdings verhältnismäßig große Baulängen und Werkstoffaufwendungen, wie sie im Leichtbau selten möglich sind.

Wirksamer hat sich dagegen, der durch Bentele besonders eingehend untersuchte Resonator dämpfer erwiesen. Dieser Geräuschdämpfer besteht aus einer von dem zu dämpfenden Frequenzgebiet abhängigen Rohrverengung, in welche von beiden Seiten die engen Rohranschlußstücke ein bestimmtes Stück hineinragen. Durch Ändern des Kammerdurchmessers und des Abstandes der beiden Rohrenden lassen sich die Dämpfungswirkungen solcher Kammer wesentlich beeinflussen und abstimmen. Abb. 8 zeigt den theoretisch errechneten Verlauf der Wirkung solcher Dämpfer. Abb. 9 und 10 die experimentellen Ergebnisse.

Durch diese Resonator dämpfer gelingt es hiernach, über breite Frequenzbereiche wirksame Geräuschdämpfungen ohne zu starke Einsattelungen zu erzielen. Bemerkenswert ist die bei diesen Dämpfern gegebene Möglichkeit, den Dämpfer durch Verändern der Schlitzbreite zwischen den Rohrenden auf die hauptsächlich störenden Frequenzanteile abzustimmen und dort verhältnismäßig große Wirkung zu erzielen. Die Wirkung dieser Dämpfer wird gleichmäßiger, wenn die Kammer mit einem geeigneten Schallschluckstoff ausgefüllt wird (Abb. 11). Die dann erreichbare mittlere Dämpfung ist z. B. im Frequenzbereich zwischen 200 und 1000 Hz experimentell zu etwa 18 bis 20 Dezibel bestimmt worden. Solche Resonator dämpfer lassen sich zur Erweiterung des zu dämpfenden Frequenzgebietes ebenfalls als Mehrfachresonator dämpfer mit oder ohne Füllung mit Schallschluckstoffen ausbilden.

Akustische Siebe und Resonatoren eignen sich somit besonders für die Dämpfung von stark ausgeprägten, festliegenden Tongebieten.

An einigen Beispielen aus der Praxis (Dämpfung der Geräusche in einer Druckleitung für ein Rotationskapselgebläse und Dämpfung der Ansauggeräusche für Automotoren) hat sich gezeigt, daß außer der Ausbildung der eigentlichen Dämpfer die Art des

Einbaues und besonders die Länge der Zuleitungen die Wirkung der Dämpfer entscheidend beeinflussen kann. Zur Erzielung einer günstigsten Wirkung muß die Dämpfungseinrichtung soweit wie möglich an die Schallquelle herangebracht werden.

#### Zusammenfassung.

Die für die Praxis brauchbaren Geräuschdämpfer müssen bei geringstem zusätzlichem Druckabfall wirksam dämpfen. Die geräuschmindernde Wirkung einer Dämpfungseinrichtung hängt hiernach von der Art und Ausführung des Dämpfers selbst und von der Art seines Zusammenbaues mit Leitung und Geräuschquelle ab. (Bei langen Leitungen besteht geringe Rückwirkung, bei kurzen

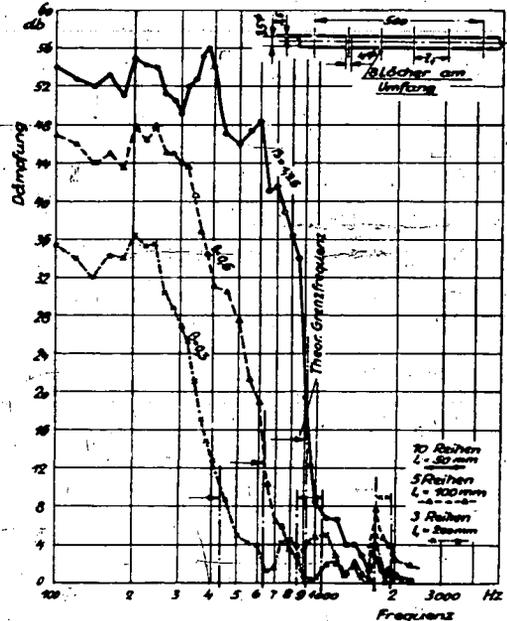


Abb. 7. Gemessene Dämpfung verschiedener Hochpaßfilter gleicher Bauart.

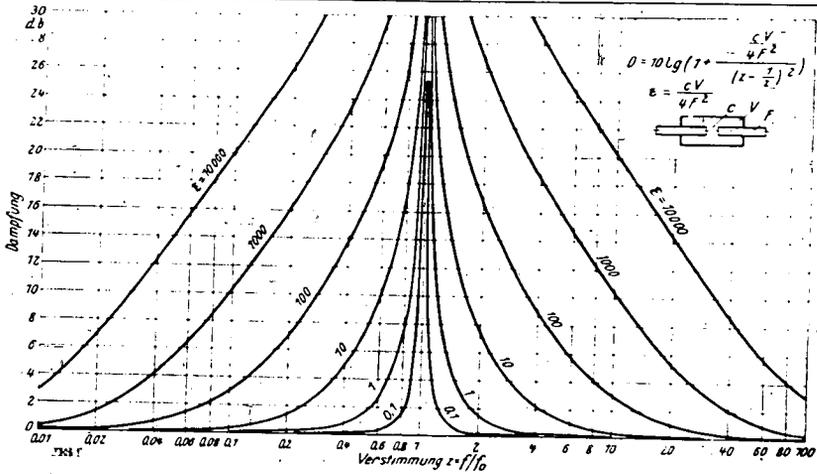


Abb. 8 (oben). Aufbau und Dämpfungsverlauf eines Resonator-dämpfers (berechnet).

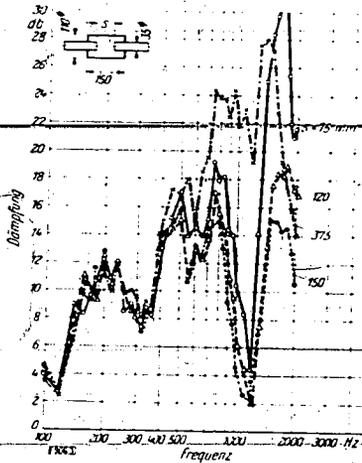


Abb. 9 (links). Wirkung eines Resonator-dämpfers bei Veränderung der Schlitzbreite.

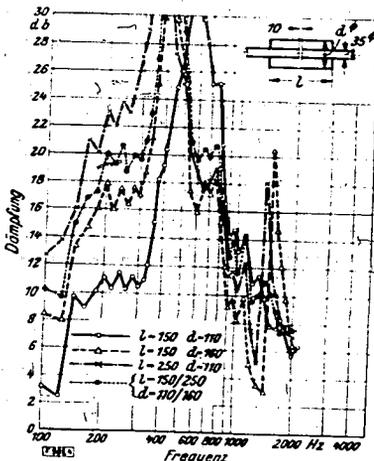


Abb. 10. Wirkung eines Resonator-dämpfers bei Verändern des Kammerolumens.

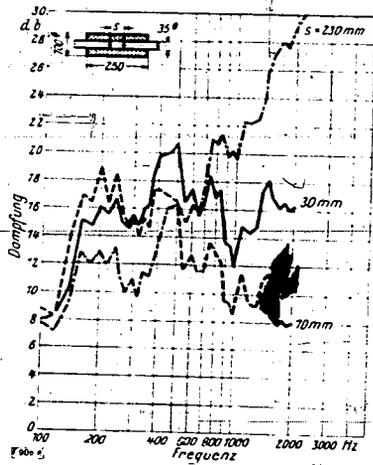


Abb. 11. Resonator-dämpfer mit Schallschluckstoff-füllung.

und bei offenen Leitungen entsteht oft ein wirksamer Einfluß auf die Dämpfungswirkung.) Bei allen Geräuschdämpfern für Rohrleitungen steigt der Raumbedarf der Dämpfer mit der Wellenlänge des zu dämpfenden Frequenzgebietes. (Eine Ausnahme stellen Hochpässe dar, die jedoch wegen ihrer ins Freie gehenden, Schall ausstrahlenden Öffnungen nur beschränkt verwendet werden können.) Eingebaute Schallschluckstoffe wirken gut bei mittleren und hohen Frequenzen. Die besonders eingehend untersuchten Resonator-dämpfer (besonders mit Schallschluckfüllung) zeigen eine über ein großes Frequenzgebiet reichende brauchbare Dämpfung, die ohne störende Durchlaßgebiete ist.

## Aussprache.

Betz weist darauf hin, daß im Vortrag Reiter erneut bestätigt wird, daß man physikalisch weitgehend in der Lage ist, Auspuffgeräusche zu dämpfen, und er eröffnet die Aussprache mit der Frage, warum diese Möglichkeit bisher noch so wenig Anwendung im Flugzeugbau gefunden hat. Die hierauf folgende Aussprache umfaßt folgende Punkte:

### b) Auspuffdämpfer für Versuchsflugzeuge.

Angesichts der Schwierigkeiten, die für den Meßtechniker durch die Notwendigkeit der Trennung von Schrauben- und Motorengeräuschen entstehen, wird vorgeschlagen, bei Versuchen durch geeignete Filter das Motorengeräusch soweit zu dämpfen, daß die Messung des Schraubengeräusches ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden kann. Eine wesentliche Beeinflussung der aerodynamischen Eigenschaften des Flugzeuges wird, wie die Erfahrungen in der DVL mit solchen Schalldämpfern gelehrt haben, nicht eintreten (Ernsthausen).

Nach den Erfahrungen der Flugerprobung wird betont, daß es gut möglich ist, solche Versuchs Schalldämpfer zu bauen, daß sich aber durch ihre Anwendung die normalen Leistungen und Eigenschaften des Flugzeuges und damit auch das Luftschraubengeräusch wesentlich verändern. Beim Versuch kommt es darauf an, daß die Luftschraube möglichst genau unter den Bedingungen arbeitet, für die sie berechnet ist. Es erscheint daher zweckmäßiger, zunächst keine Auspuffdämpfer einzubauen, sondern den Schraubenschall auf andere Weise zu isolieren (v. Schmoller).

### a) Anwendungsschwierigkeiten für Auspuffdämpfer im Flugzeugbau.

Zur Begründung der beschränkten Verwendung von Dämpfern an Flugmotoren wird vor allem auf das große Volumen hingewiesen, durch das der Dämpfer zu einem Widerstandskörper wird, der die Leistung des Flugzeuges in untragbarem Maße herabsetzt. Man könnte zwar Räume im Rumpf hinter den Sitzen zur Unterbringung des Dämpfers ausnutzen. Eine solche Anordnung stößt aber wieder auf andere Schwierigkeiten; denn das große Dämpfervolumen bedingt einen großen Materialaufwand und damit ein sehr hohes Gewicht. Dies gilt um so mehr, als eine gewisse Wandstärke nicht unterschritten werden kann und die Anwendung von Leichtmetall durch die hohe Betriebstemperatur nicht möglich ist. Unbequem ist für die Unterbringung auch die durch die Eigenart des Dämpfers bedingte Formgebung, die überwiegend runde Querschnitte verlangt.

Im Gegensatz zum Kraftwagenbau, wo weder Werkstoff noch Volumen noch Temperatur derartige Schwierigkeiten bereiten, bestehen daher im Flugzeugbau eine Reihe von Hemmnissen, die verhindern, daß man bisher die immerhin reichlichen Erkenntnisse über Auspuffdämpfung in die Praxis umsetzen konnte (Eisenlohr).

Reiter weist darauf hin, daß große Dämpferabmessungen, insbesondere zur Dämpfung der tiefen Frequenzen, rein physikalisch bedingt sind, und daß man sich mit dieser Tatsache abfinden muß. Gleichzeitig betont er, daß er sich in seinem Vortrag nicht die Aufgabe gestellt hatte, neue Auspufffilter zu bringen, sondern nur eine Ordnung der verschiedenen Filterarten.

Es wird nochmals ausdrücklich hervorgehoben, daß die erforderliche Ausbildung des Auspuffdämpfers im Prinzip eindeutig festliegt und daß in dieser Beziehung heute physikalisch keine neuen Gedanken mehr hinzuzufügen sind. Es ist jetzt lediglich die Aufgabe der Motorenfachleute, danach den Schalldämpfer, den sie brauchen, zu konstruieren. Die Forschung hat ein großes Interesse daran, daß hier in der Umsetzung der theoretischen Kenntnisse in die Praxis etwas geschieht (Lange).

Zur Stellungnahme aufgefordert, erklärt man von Seiten der Technik, daß man gleichfalls davon überzeugt ist, daß physikalisch nicht mehr viel zu gewinnen ist und daß man für alle Anwendungsfälle wirksame Dämpfer bauen kann. Das Ganze ist nur eine Frage des verfügbaren Volumens (Martin).

Es fehlt auch nicht an ernsthaften Bemühungen und von Seiten der gesamten Triebwerksentwicklung her laufen zahlreiche Arbeiten, um der praktischen Lösung näherzukommen. Da alle Bestrebungen aber beständig auf weitere Steigerung der Flugeschwindigkeit gerichtet sind, ist es bisher noch nicht gelungen, die großen Schwierigkeiten zu überwinden, die mit der Unterbringung des erforderlichen Volumens verbunden sind (Eisenlohr).

### c) Schalldämpfer mit glattem Durchgang.

Unter den praktisch erprobten Konstruktionen sind Schalldämpfer mit glattem Durchgang (Absorptionschalldämpfer) schon lange bekannt. Nach der Beurteilung haben sie einen verhältnismäßig geringen Gegendruck bei Vernachlässigung der Wirbelablösung an den Schlitzen. Nachteilig ist aber, daß sehr bald eine Verschmutzung und damit Zusetzen der seitlichen Löcher im Rohr eintritt und außerdem eine sehr schlechte Dämpfung bei tiefen Frequenzen vorhanden ist.

Die Firma Eberspächer hat jetzt Dämpfer von Amerika zur Durchmessung erhalten. Diese Schalldämpfer besitzen glatten Durchgang mit seitlichen Löchern in der Leitung. Es hat sich gezeigt, daß die tiefen Grundtöne glatt durchschlagen, was bei Anwendung als Flugzeugchalldämpfer aus strategischen Gründen untragbar ist.

Für die Dämpfung von Auspufftönen hat die Firma Eberspächer versuchsweise Tiefpaßfilter gebaut mit einer Eigenfrequenz von etwa 30 Hz. Mit dieser Ausführung sollte, abgesehen von der Gewichts- und Luftwiderstandsfrage, zunächst einmal grundsätzlich festgestellt werden, wie weit es zweck hat, den Grundton zu dämpfen.

Bei Dämpfern mit glattem Durchgang ist übrigens nicht anzunehmen, daß jeder der einzelnen Schlitze für sich selbst mit dem Raumvolumen eine besondere Resonanz bildet, wenn keine Trennwände zwischen den Schlitzen vorhanden sind. Es gibt dann nur eine Einzelresonanz, da sich alle seitlichen Leitwerte addieren (Martin).

In diesem Zusammenhang weist Reiter darauf hin, daß die durch Martin gemachten Beobachtungen durch die Messung von Bentele bestätigt worden sind. So wirken sich verschiedene Querschnittsänderungen nicht aus, wenn man sie ineinander schaltet, z. B. in Form einer abgestuften Erweiterung; nur bei Hintereinanderschaltung einzelner Rohrerweiterungen bzw. Verengungen treten Überlagerungen der Wirkungen der einzelnen Teile ein.

### d) Lage und Anpassung des Schalldämpfers.

Bezüglich der Lage des Dämpfers kann man leicht ausrechnen, an welcher Stelle der Dämpfer bei resonanzfreier Abstimmung liegen muß, da das Verhältnis der Rohrlängen zwischen Motor und Dämpfer und zwischen Dämpfer und Leitungsende stets ungerade

sein muß; entweder 1:1 (d. h. Dämpfer in der Mitte der Rohrleitung) oder 1:3, 1:5 usw. Die letzten Verhältnisse lassen sich schlecht durchführen, weil der Dämpfer zu nahe an den Motor heranrücken muß. Legt man den Dämpfer genau in die Leitungsmitte, dann ist die Leitung vorn einseitig abgeschlossen. Die Leitung hinter dem Dämpfer hat an den Stellen Sperrung, wo die Leitung zwischen Motor und Dämpfer ihre Resonanz besitzt. Diese Anordnung ist allerdings bei Dämpfern mit glattem Durchgang schlecht möglich (Martin).

Es erfolgt die Einwendung, daß dieses wichtige Problem offenbar zu einfach angesehen wird. Der Grundgedanke ist, den Schall zu dämpfen, was nur durch Umwandlung der Schallenergie in Wärme möglich ist. Wesentlich ist, den Motor durch ein ergänzen des Netzwerk richtig abzuschließen, so daß der Schall erst gar nicht entsteht.

Messungen in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt haben gezeigt, daß ein Schalldämpfer sehr verschiedenartig auf die Leistungsabgabe eines Zweitakt- oder Viertaktmotors einwirkt. Bei bestimmten Schalldämpfern wurde sogar eine wesentliche Leistungserhöhung eines Zweitaktmotors gegenüber dem

Zustande ohne Schalldämpfer beobachtet (Grützmacher).

Die Auffassung, daß bei der Dämpfung die Umwandlung der Energie in Wärme die Hauptsache ist, wird nicht allgemein geteilt. Man muß bestrebt sein, die aus dem Motor austretende fluktuierende Strömung durch die Schalldämpfung so zu beeinflussen, daß sie am Ende des Auspuffrohrs möglichst gleichmäßig herausfließt. Die Energie muß dabei im Dämpfer so bearbeitet werden, daß Umsetzung in Wärme möglichst vermieden wird (Trendelenburg).

Vom Standpunkt der Praxis wird hierzu bemerkt, daß die Anpassung des Netzwerkes nur bei 1- und 2-Zylinder-Motoren Sorge macht; denn sie ist bei Mehrzylindermotoren mehr eine strömungstechnische Angelegenheit, da hier der Schalldruck in die Größe des Strömungsdruckes fällt.

Man kann sagen, daß der von der Rohrlänge abhängige Leistungsverlust sich bei Viertaktmotoren etwa wie 10:2 verhält (2 Zylinderzahl). Bei 1-Zylinder-Motoren verliert man bei schlechtester Anpassung also etwa 10% Leistung und bei 6-Zylinder Motoren nur rd. 1,2%. Für größere Flugmotoren erscheint dieses Problem zunächst weniger wichtig (Martin).

## Sonderaussprache.

Nach Eröffnung der Sonderaussprache gibt Betz die angekündigte Aufteilung des Forschungsgebietes „Geräuschdämpfung“ bekannt. Er nennt die verschiedenen Teilgebiete, für die eine besondere Arbeitsgruppe vorgesehen ist, und die für die Leitung dieser Arbeitsgruppen in Vorschlag gebrachten Herren. Die Vorschläge werden ohne Ausnahme angenommen. Für die durchgeführte Aufteilung ergibt sich folgende Übersicht:

### Aufteilung des Forschungsgebietes „Geräuschdämpfung“.

Arbeitsgruppe.	Leiter.
1. Motorgeräusche,	Fl.-Hauptabstanz, Eisenlohr, RLM.
2. Prüfstandgeräusche,	Dr.-Ing. v. Schmoller, Est. 2 Regolin.
3. Luftschraubengeräusche,	Dipl.-Ing. Willms, DVL.
4. Kabinentfärmung und Schallwerkstoffe,	Dr. phil. Wendroth, DLII.
5. Dröhngeräusche und Körperschall,	Dr. phil. Lange, DVL.

### Arbeitsgruppe.

6. Meßgeräte für sehr tiefe Frequenzen.

7. Bordverständigungsgeräte.

### Leiter.

Prof. Ferd. Trendelenburg,  
Forschungslaboratorium Siemens,  
Dipl.-Ing. Klein, SAM.

Es wird hervorgehoben, daß auf den einzelnen Teilgebieten noch erhebliche Forschungsarbeit zu leisten ist. Soz. B. in der Frage der Messung sehr tiefer Frequenzen und in der Umsetzung der theoretischen Erkenntnisse über Luftschrauben- und Motorgeräusch. Besonders vordringlich ist die Lösung der akustischen Probleme der Motorprüfstände und der Prüfhallen. Zu diesem Punkte teilt v. Schmoller mit, daß von seiten der Estelle beabsichtigt ist, die in Rechn vorhandenen Prüfstände auf „Geräuschdämpfung beim Betrieb verschiedener Motormuster eingehend zu untersuchen. Er betont, daß es außerordentlich erwünscht erscheint, daß möglichst umgehend einige Herren zur Mitarbeit gewonnen würden, damit ein Programm für eine Arbeitstagung baldigst aufgestellt werden kann.

In der Fortsetzung der Aussprache wurde noch eine größere Zahl von Einzelfragen behandelt. Die dabei gemachten Ausführungen sind in die Aussprache zu den sie betreffenden Vorträgen eingefügt worden.

## Zusammenfassung der Tagungsergebnisse.

Die Auswertung der Vorträge und Aussprachen ergab nach Teilgebieten geordnet kurz zusammengefaßt folgende Erkenntnisse und Anregungen für die weitere Forschungsarbeit:

### Motorgeräusche.

Von den verschiedenen Motorgeräuschen ist bisher nur das Auspuffgeräusch auf mögliche Dämpfung untersucht worden. Es wird erneut bestätigt, daß für die Ausbildung der Schalldämpfer sich theoretisch nichts Wesentliches mehr beitragen läßt. Physikalisch sind alle Möglichkeiten für die Auspuffdämpfung ge-

geben; die praktische Anwendung in der Flugtechnik wird jedoch erschwert durch das erforderliche große Dämpfervolumen und durch die hieraus entstehende untragbare Erhöhung von Widerstand und Gewicht.

### Anregungen:

1. Zunächst Konstruktion eines Auspuffdämpfers für Versuchszwecke (z. B. zur Erleichterung der Trennung des Schraubengeräusches vom Gesamtgeräusch).
2. Später Fortentwicklung der Dämpferkonstruktion für den praktischen Betrieb.

3. Verbindung der Wirksamkeit des Absorptionsdampfers und des Tiefpaßfilters zwecks besserer Dämpfung der tiefen Grundtöne.

#### Prüfstandgeräusche.

Die Geräuschdämpfung auf Flugmotorenprüfständen und in Prüfhallen hat sich als besonders vordringlich erwiesen. Die für dieses Forschungsgebiet vorgesehene Arbeitsgruppe soll baldmöglichst gebildet werden, damit zunächst nach Möglichkeit an den vorhandenen Prüfständen Messungen über die bisher erreichte Geräuschdämpfung nach einheitlichen Gesichtspunkten durchgeführt werden können. Das Ergebnis soll dann der Planung für neue Anlagen zugrunde gelegt werden.

#### Luftschaubengeräusche.

Die Ergebnisse der bisherigen Versuche über die Luftschaubengeräusche haben bei Umfangsgeschwindigkeiten unterhalb der Schallgeschwindigkeit die Zulässigkeit der Linearisierung des Schallproblems bestätigt. Bei Umfangsgeschwindigkeiten, die die Schallgeschwindigkeit erreichen oder überschreiten, wird eine besondere Behandlung des Luftschaubenschallproblems notwendig sein. Erstes Ergebnis ist Ansatz und Durchführung der Berechnung des Luftschaubenschalls nach Stärke, Zusammensetzung und Richtung. Die Berechnung wurde durch die bisherige erste Versuchsreihe bestätigt.

~~Daneben—laufen—grundsätzliche Versuche, wie weil~~ physikalisch die Drehklangentstehung ohne wesentlichen Schubverlust verhindert werden kann. Hierbei wurde u. a. an Modellen versucht, durch Ausblasen von Luft am Propellerblatt eine Verminderung des Drehklanges zu erzielen. Für kleine Umfangsgeschwindigkeiten ergaben sich durch Luftausblasen an der Blattspitze etwa 50% Schallminderung bei 12% Schubverlust. Maßgebend ist für diesen Effekt offenbar nicht die ausgeblasene Luftmenge, sondern die Luftgeschwindigkeit. Da diese nach den bisherigen Erkenntnissen etwa doppelt so groß wie die Umfangsgeschwindigkeit sein müßte, würden sich bei den üblichen Umfangsgeschwindigkeiten jedoch Werte ergeben, die praktisch nicht zu verwirklichen sind; ganz abgesehen von der aufzubringenden Verdichterleistung.

#### Anregungen:

1. Versuch einer Kompensierung bzw. teilweisen Schwächung des Schallfeldes in bestimmten Richtungen durch Interferenz mit einer zweiten Schallquelle von definierter Phase.
2. Schallminderungsversuch durch Erhöhung der Ordnung des Strahlers, z. B. durch einen Hilfspropeller, der so angestellt ist, daß er die Hälfte des Schubes übernimmt.
3. Prüfung, ob Vergrößerung der Blattzahl zur Geräuschverminderung auch bei Umfangsgeschwindigkeiten größer als 0,7 Schallgeschwindigkeit noch Zweck hat.
4. Geräuschminderungsversuche bei mehrmotorigen Maschinen durch Synchronisierung der Luftschaubendrehzahlen.
5. Weiterentwicklung des akustischen Modellversuchs an Luftschaublen. Hierbei ist für die einwandfreie Beurteilung neben der Messung des Schubes auch die Messung des Antriebsmomentes durchzuführen.

#### Kabinenentlärnung und Schallschluckstoffe.

Die bisherigen Maßnahmen brachten eine erhebliche Senkung des Kabinenlärms ohne erhöhten Gewichtsaufwand. Wesentlich gemildert wurden auch die Kontraste zwischen kleinster und größter Lautstärke sowohl in der räumlichen Verteilung als auch bei verschiedener Motorbelastung.

Im Vordergrund steht die Bestrebung, die bisher erforderlichen Sparrstoffe (z. B. Calmac) durch geeignete Kunst- und Heimstoffe zu ersetzen. Bisher hat nur die Schallschluckung durch poröse Stoffe praktische Anwendung gefunden (über Wirksamkeit der Resonanzmethode liegt noch keine Erfahrung vor). Beste Wirkung, wenn Strömungswiderstand des Schluckstoffes gleich Schallwiderstand der Luft.

Sehr wichtig ist die Anbringung der Schluckstoffe in einem gewissen Abstände von der Wand (etwa  $\frac{1}{4}$  der Wellenlänge). Das im Schiffbau übliche Aufspritzen von Asbest zur Bildung eines feuerfesten, schallschluckenden Wandüberzugs kommt für den Flugzeugbau aus Gewichtsgründen voraussichtlich nicht in Betracht. Einfluß der Bemessung der Fensterflächen erscheint für die erreichbare Dämpfung nicht wesentlich.

#### Anregungen:

1. Nachprüfung, ob der im Hallraum gemessene Schluckgrad eines Stoffes seiner Wirksamkeit bei der Kabinenauskleidung entspricht.
2. Vergleichsmessungen an nackten und verkleideten Kabinen.

#### Dröhnengeräusche und Körperschall.

Körperschall und Erschütterungen werden von Luftschraubern und Motor ausgehend über den Vorbau unmittelbar durch die festen Anschlußteile zur Kabine geleitet. Sie verursachen Schwingungen der Kabinenwände und damit sehr unangenehme Druckschwankungen im Kabineninnern, die „Dröhnenschwingungen“. Gegen Dröhnenschwingungen ist die Verwendung von Schallschluckstoffen unwirksam. Abhilfe bringen nur Aussteifung und günstige Formgebung der Wände und vor allem Unterbrechung der Zuleitung des Körperschalls zwischen Motor und Kabine (z. B. federnde Aufhängung des Motors in Gummipaketeten).

Als tieffrequente Schallschwingungen wirken sich die Dröhnengeräusche stark ermüdend auf den menschlichen Organismus aus.

#### Anregungen:

1. Erweiterte Untersuchung des Einflusses von Schall und Erschütterung auf den Menschen (Ermüdungserscheinungen).
2. Prüfung des gleichzeitigen Einflusses von sehr tiefen und hohen Frequenzen auf das menschliche Ohr.

#### Meßgeräte für sehr tiefe Frequenzen.

Die Wichtigkeit der ganz tiefen Frequenzen, die praktisch noch unter 50 Hz reichen, verlangt eine erhebliche Erweiterung des Meßbereiches nach unten. Dies ist insbesondere für Geräuschmessungen erforderlich, da sich beim Vergleich von Meßergebnissen Schwierigkeiten durch die Verschiedenheit der Ohrkurven der Geräte an der unteren Frequenzgrenze ergeben. Es erscheint überhaupt zweckmäßig, von der Lautstärkemessung zur Schalldruckmessung überzugehen.

#### Anregungen:

1. Bessere Übereinstimmung der Geräuschmesser anstreben. Hierbei auch die untere Frequenzgrenze und Verlauf der Grenzkurve für die Meßgeräte festlegen.
2. Beachtung der bereits vorliegenden Arbeiten des Deutschen Akustischen Ausschusses auf diesem Gebiete.

#### Bordverständigungsgeräte.

Die Entwicklung der Bordverständigungsgeräte ist so weit gediehen, daß eine wesentliche Verbesserung

bezüglich Ausschaltung der Störgeräusche, Änderung des Frequenzganges und Erniedrigung des Klirrfaktors für die Mikrophone nicht mehr, für die Telephone dagegen noch in gewissen Maße möglich erscheint. Die erreichte Textverständlichkeit von etwa 90% könnte nur noch nennenswert verbessert werden durch Dämpfung des Flugzeuggeräusches selbst.

Das Besprechungsmikrophon ermöglicht wohl eine brauchbare Sprachübertragung, ist aber praktisch unbrauchbar bei gleichzeitiger Verwendung einer Atemmaske. Diese Forderung erfüllt nur das Berührungsmikrophon. Als beste Anlagestelle für das Berührungsmikrophon erwies sich die Stelle zu beiden Seiten des Kehlkopfes, bei Ankopplung durch Schüttelwirkung oder durch Membran.

Um das Übertragungsmaß von Berührungsmikrophonen einwandfrei zu bestimmen, wird ein sogenannter „Kunsthaal“ verwendet. Er schaltet bei Vergleichsmessungen als weiches Glied zwischen Schütteltisch und Mikrophon die Einflüsse von Halsmaske und -dämpfung aus. Hiermit gelang erstmalig die eindeutige und definierte Aufnahme der Frequenzkurve von Membranmikrophonen.

Verwendung von Seignette-Salzkristallen zu Berührungsmikrophonen ergibt wohl ausreichende Übertragungsgüte, ist aber wegen Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtigkeit bedenklich.

### Schallausbreitung und -abhören.

Für die Schallausbreitung ist die Abhängigkeit der Absorption von der Frequenz sehr wichtig. Die hohen Frequenzen werden ganz allgemein am stärksten geschwächt, so daß für die Ortung zur größeren Entfernung nur die tiefen Frequenzen verfügbar sind. Ziel der Geräuschbekämpfung hinsichtlich Reichweite muß daher die Dämpfung der Frequenzen von etwa 150 bis 800 Hz sein.

Obwohl das menschliche Ohr die für die Ortung in Frage kommenden tiefen Frequenzen schlecht wahrnimmt, war eine Verbesserung bei Ersatz des Ohres durch elektrische Organe wegen der störenden Windgeräusche nicht zu erzielen. Die rein akustisch arbeitenden Geräte sind bis heute hinsichtlich Reichweite und Genauigkeit noch nicht übertroffen worden.

Für die Absorption des Schalles wurde eine starke Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit festgestellt. Ebenso ist mit einer vergrößerten Absorption durch Nebel zu rechnen, obwohl die bisherigen Messungen noch keinen Einfluß in dem untersuchten Frequenzbereich erkennen lassen.

### Anregung:

Messung der Schallausbreitung in Abhängigkeit von Luftfeuchtigkeit und Nebel, insbesondere systematische Messung der Ausbreitung von Schallsignalen.

## Besichtigungen.

### Besichtigung der akustischen Versuchsvorrichtungen und der Meßeinrichtung für Lärmforschung auf dem Flugplatz Göttingen.

Vor der Besichtigung wurden die Einrichtungen, die hauptsächlich dazu dienen, den akustischen Modellversuch zu entwickeln, von H. G. Käßner, Göttingen, und R. Tegtmeyer, Göttingen, wie folgt beschrieben.

### Meßeinrichtungen für Lärmforschung in der AVA, Göttingen.

Ein Flugzeugmodell im Maßstab 1:40 ist an einem hohen Rundlauf befestigt und kann sich in 11 m Höhe über dem Erdboden auf einem Kreise mit 19 m Halbmesser bewegen. Der Antrieb des Modellpropellers erfolgt durch einen schnelllaufenden Drehstrommotor. Ebenso erhält der Rundlauf über ein in der Mastspitze sitzendes Getriebe seinen Antrieb durch einen schnelllaufenden Drehstrommotor, um den schädlichen Luftwiderstand des Rundlaufs auszuschalten und bei verschiedenen Schubbelastungen der Schraube Schalluntersuchungen vornehmen zu können. Die Bahngeschwindigkeit des Modells beträgt bis zu 40 m/s. Die Umdrehungszahl des Modellpropellers kann bis zu 24 000 U/min gesteigert werden. Die Drehzahlen der schnelllaufenden Motore können durch elektrische Drehzahlmesser sehr genau eingehalten und durch geeignete Antriebsaggregate stufenlos geregelt werden. Bei stärkerem Wind ist es nicht möglich, den Innenantrieb des Rundlaufs zu benutzen.

Der elektroakustische Teil der Versuchseinrichtungen entspricht etwa dem Stand der Technik. Mit einem Schalldruckmesser der Siemenswerke und einem Bändchenmikrophon werden die in den Schallfeldern herrschenden Drücke unmittelbar in Mikrobar gemessen. Fehlerquellen, verursacht durch frequenzabhängige Resonanzstellen des Mikrophons und der Induktivitäten der Meßgeräte sowie der Zusatzverstärker, beseitigt eine sorgsam ermittelte Korrektionskurve.

Um aus dem Klanggemisch die niedrigen Harmonischen auszusieben, die ja aus Gründen der Hörbarkeit vom Boden aus militärisch besonders interessieren und deren theoretische Deutung am ehesten möglich erscheint, wird ein Tiefpaßfilter benutzt, der unter der Bezeichnung „Siemens Stromreiner“ bekannt ist.

Der Gang der Geräuschuntersuchung ist folgender: Die vom Mikrophon aufgenommenen Propellergeräusche werden durch den Schalldruckmesser zunächst verstärkt, im Tiefpaßfilter geseiht und nach einer weiteren Verstärkung vom Universal-Oszillographen mittels einer Hochfrequenzschleife, deren Amplitude in Mikrobar geeicht ist, photographisch registriert. Die jeweilige Stellung des Flugzeugmodells ist ebenfalls im Oszillographen zu erkennen.

Zur Untersuchung der Frequenzabhängigkeit sämtlicher Geräte, die besonders sorgfältig durchgeführt werden muß, stehen ein Schwebungstonsender und als Normempfänger ein gutes, statisch untersuchtes Kondensatormikrophon zur Verfügung.

Als wertvolle Ergänzung zu den obigen Geräten ist ein elektrischer Tonfrequenzanalysator, das Siemens-Tonfrequenz-Spektrometer, mit äußerst hoher Analysiergeschwindigkeit vorgesehen, der die Propellergeräusche mit einer Braunschen Röhre in Form eines Amplitudenspektrums unmittelbar sichtbar macht.

Das eingebaute 27stufige Oktavsieb ist auch einzeln von Hand zu bedienen, und die Ausgangsspannung jedes Filters kann getrennt oszillographiert werden.

### Besichtigung der Aerodynamischen Versuchsanstalt und des Kaiser-Wilhelm-Institutes für Strömungsforschung in Göttingen.

Die Besichtigung der Aerodynamischen Versuchsanstalt, bei der den Tagungsteilnehmern gleichzeitig ein Einblick in den Betrieb des großen Windkanals ermöglicht wurde, und die Besichtigung des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Strömungsforschung trugen zur wertvollen Ergänzung des Tagungsprogramms wesentlich bei.

## Teilnehmerverzeichnis.

<b>Eisenlohr</b> , Fl.-Hauptstabsing., Dipl.-Ing. <sup>1)</sup>	Reichstufahrtministerium
<b>Feucht</b> , Dipl.-Ing. (Vertretung für K. A. Schmidt).	"
<b>Lorenz</b> , Dr.-Ing. <sup>1)</sup>	"
<b>v. Richthofen</b> , Dipl.-Ing.	"
<b>Roesler</b> , Dr.-Ing.	"
<b>Schumacher</b> , Ing. <sup>1)</sup>	"
<b>Grupe</b> , Dipl.-Ing.	Eutw. Bauaufsicht, Telefunken Gesellschaft für draht- lose Telegraphie m. b. H., Berlin
<b>Darré</b> , Dr.-Ing.	Erprobungsstelle der Luftwaffe Rechlin
<b>Mannschatz</b> , Dipl.-Ing.	" " " "
<b>Sedlmayer</b> , Dipl.-Ing.	" " " "
<b>v. Schmoller</b> , Dr.-Ing.	" " " "
<b>Albitz</b> , Hauptmann (E).	Heereswaffenamt, Berlin
<b>Piening</b> , Dr.-Ing.	Konstruktionsamt des Oberkommandos der Kriegs- marine, Berlin
<b>Lange</b> , Dr. phil.	Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt, Berlin-Adlershof
<b>Lürenbaum</b> , Prof. Dr.-Ing.	" " " "
<b>Ruff</b> , Dr. med.	" " " "
<b>Willms</b> , Dipl.-Ing.	" " " "
<b>Schurig</b> , Dr.-Ing.	Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt, Braunschweig
<b>Prandtl</b> , Prof. Dr. phil., Dr.-Ing. E. h., Dr. techn., h. c. <sup>2)</sup>	Kaiser-Wilhelm-Institut für Strömungsforschung, Göt- tingen
<b>Betz</b> , Prof. Dr. phil.	Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen
<b>Kübner</b> , Dr.-Ing. <sup>3)</sup>	" " " "
<b>Langer</b> , Dipl.-Ing.	" " " "
<b>Stüper</b> , Dr.-Ing. <sup>3)</sup>	" " " "
<b>Tegtmeier</b> , Ing.	" " " "
<b>Backhaus</b> , Prof. Dr. phil.	Technische Hochschule Karlsruhe
<b>Weymann</b> , Dip.-Ing.	" " " "
<b>Cremer</b> , Dr.-Ing. habil.	Technische Hochschule Berlin
<b>Grötzmacher</b> , Reg.-Rat, Dr.-Ing.	Physikalisch-Technische Reichsanstalt Berlin
<b>Hoffmeister</b> , Dipl.-Ing.	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeug- motoren an der Technischen Hochschule Stuttgart
<b>Mesmer</b> , Dr. phil.	Aerodynamisches Institut der Technischen Hochschule Aachen
<b>Meyer</b> , E., Prof. Dr. phil.	Institut für Schwingungsforschung Berlin
<b>Reiher</b> , Prof. Dr.	Technische Hochschule Stuttgart
<b>Rein</b> , Prof. Dr. med. <sup>2)</sup> , <sup>3)</sup> , <sup>4)</sup>	Universität Göttingen
<b>Hjedemann</b> , Dr. phil. habil.	Universität Köln
<b>Bornemann</b> , Dipl.-Ing.	Arado-Flugzeugwerke G. m. b. H., Brandenburg a. d. Havel
<b>Wellenstein</b> , Dr.	Atlas-Werke Aktiengesellschaft, Bremen
<b>Stieglitz</b> , Dipl.-Ing.	Brandenburgische Motorenwerke G. m. b. H., Berlin- Spandau
<b>Tonn</b> , Dr.-Ing. <sup>3)</sup> , <sup>4)</sup>	Brandenburgische Motorenwerke G. m. b. H., Berlin- Spandau
<b>Wehner</b> , Dipl.-Ing.	Deutsche Lufthansa A. G., Berlin
<b>Wendroth</b> , Dr. phil.	" " " "
<b>Dodel</b> , Ing.	Daimler-Benz A. G., Stuttgart-Untertürkheim
<b>Kuhn</b> , Dipl.-Ing.	Dornier-Werke G. m. b. H., Friedrichshafen a. B.
<b>Martin</b> , Dr.-Ing.	J. Eberspächer, Eßlingen a. N.
<b>Fischer</b> , Dr. phil.	Electroacoustic G. m. b. H., Kiel
<b>Kutzscher</b> , Dr. phil. habil.	" " " "

- 1) Hat nur am 7. 12. teilgenommen.  
2) Hat nur am 8. 12. teilgenommen.  
3) Hat an Flugplatzbesichtigung nicht teilgenommen.  
4) Hat an AVA-Besichtigung nicht teilgenommen.

<b>Gaß,</b> Dipl.-Ing.,	Siebel Flugzeugwerk Halle Kömm. Ges. Halle, d. Saale
<b>Bullian,</b> Dr. phil.,	Focke-Wulf Flugzeugbau A. G., Bremen
<b>v. Doepp,</b> Dipl.-Ing.,	Junkers Flugzeug- und Motorenwerke A. G., Abt. Strömungstechnik, Dessau
<b>Orth,</b> Obering.,	Hugo Heine-Propellerwerk, Berlin
<b>Riepl,</b> Ing.,	Ernst-Heinkel-Flugzeugwerke, Seestadt Rostock
<b>Rühl,</b> Dr.-Ing.,	Henschel-Flugzeugwerke A. G., Schönefeld
<b>Huep,</b> Ing.,	Junkers Flugzeug- und Motorenwerke A. G., Flugzeugbau, Stammwerk Dessau
<b>Klein, F.,</b> Obering. <sup>1)</sup> ,	Junkers Flugzeug- und Motorenwerke A. G., Flugzeugbau, Stammwerk Dessau
<b>Heck,</b> Dipl.-Ing. <sup>2)</sup> ,	Junkers Flugzeug- und Motorenwerke A. G., Motorenbau, Stammwerk Dessau
<b>Scheibe,</b> Dr.-Ing.,	Junkers Flugzeug- und Motorenwerke A. G., Motorenbau, Stammwerk Dessau
<b>Janovsky,</b> Dr.-Ing. <sup>3)</sup> , <sup>4)</sup> ,	Siemens & Halske AG, Berlin-Siemensstadt
<b>Klein, G.,</b> Dipl.-Ing. <sup>5)</sup> , <sup>6)</sup> ,	Siemens Apparate und Maschinen G. m. b. H., Berlin Siemensstadt
<b>Lübecke,</b> Prof. Dr.-Ing., Dr. phil.,	Siemens-Schuckert-Werke AG, Berlin-Siemensstadt
<b>Trendelenburg,</b> Ferd., Prof. Dr.,	Forschungslaboratorium der Siemens-Werke, Berlin Siemensstadt
<b>v. Burger,</b> Dr. phil.,	Telefunken Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie m. b. H., Berlin
<b>Benecke,</b> Dr. phil. <sup>7)</sup> , <sup>8)</sup> ,	Telefunken Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie m. b. H., Berlin
<b>Ernsthausen,</b> Dr.-Ing.,	Telefunken Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie m. b. H., Berlin
<b>Lichte,</b> Dr. phil.,	Telefunken Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie m. b. H., Berlin
<b>Ebert,</b> Dr.-Ing.,	Vereinigte Deutsche Metallwerke, Zweigniederlassung Frankfurt a. Main-Heddernheim
<b>Klatte,</b> Ing.,	Theodor Klatte, Bremen
<b>Brode,</b> Dipl.-Ing.,	Lilienthal-Gesellschaft für Luftfahrtforschung
<b>Kosmehl,</b> Stenograph,	
<b>Strohmeier,</b> Dr. phil.,	
<b>Stuchtey,</b> Prof. Dr. phil.,	

10373

<sup>1)</sup> Hat nur am 7. 12. teilgenommen.  
<sup>2)</sup> Hat nur am 8. 12. teilgenommen.  
<sup>3)</sup> Hat an Flugplatzbesichtigung nicht teilgenommen.  
<sup>4)</sup> Hat an AVA-Besichtigung nicht teilgenommen.