

ICAS Paper No. 68-33

MEASUREMENTS OF THE NOISE OF AIR JETS FROM SLOT  
NOZZLES WITH AND WITHOUT SHIELDS

by

Friedrich-Reinhard Grosche  
Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen  
Göttingen, Germany

**The Sixth Congress  
of the  
International Council of the  
Aeronautical Sciences**

DEUTSCHES MUSEUM, MÜNCHEN, GERMANY / SEPTEMBER 9-13, 1968

Preis: DM 2.00

The Board of Directors

of the

International Brotherhood of

Brotherhood of Carpenters and Joiners of America

has the honor to acknowledge the receipt of your check of \$100.00

for 1911

# SCHALLMESSUNGEN AN LUFTFREISTRAHLEN AUS SCHLITZDÜSEN MIT UND OHNE ABSCHIRMUNG

von

Dipl.-Phys. F.-R. Grosche

Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen

## Uebersicht

Aus Schlitzdüsen austretende Freistrahlen erzeugen höhere Schallfrequenzen und ergeben kürzere turbulente Vermischungszonen als Freistrahlen aus runden Düsen mit gleichgrossen Austrittsquerschnitt.

Dies gibt die Möglichkeit, den Lärm eines Strahls durch Abschirmung mittels geeigneter Reflektoren abzumindern. Hierzu wurden für kalte Luftfreistrahlen, die aus Schlitzdüsen austreten, Messungen im akustischen Fernfeld durchgeführt. Dabei hatte der mit der Machzahl  $Ma = 0,98$  austretende Strahl einen Austrittsquerschnitt von etwa  $1 \text{ cm}^2$ .

Der Einfluss der Länge der Abschirmung und des Abstandes zwischen Abschirmung und Strahlachse auf die Lärminderung wurde untersucht.

Die Messungen zeigten, dass bei kleinem Schildabstand an der Hinterkante des Schildes zusätzlich Schall erzeugt wird, der die Abschirmwirkung beeinträchtigt.

## Bezeichnungen

Geometrische Grössen (s. Bild 3 und Bild 4)

$\varphi$	Winkel zwischen Strahlachse und Verbindungslinie Düse-Mikrofon
$x$	Koordinate in Richtung der Strahlachse
$y$	Abstand des Abschirmschildes von der Strahlachse
$l$	Länge des Abschirmschildes
$h$	Schlitzweite der Schlitzdüse (Schlitzhöhe)
$b$	Schlitzlänge der Schlitzdüse (Schlitzbreite) $b = 46 \text{ mm}$
$F$	Austrittsquerschnitt der Düse

## Stoff- und Strömungsgrössen

Index 1 bezeichnet Zustände in der Vorkammer und Index 2 im Austrittsquerschnitt der Düse

$\kappa$	Adiabatexponent, $\kappa = 1,4$
$\rho$	Luftdichte
$p$	Druck

$a = \sqrt{\kappa p / \rho}$	Schallgeschwindigkeit
$U_2$	Ausströmgeschwindigkeit aus der Düse
$Ma_2 = U_2 / a_2$	Ausström-Machzahl
$S = \rho_2 U_2^2 F$	Düsenschub
$S_0$	Strahlschub der Schlitzdüse mit $h = 2 \text{ mm}$ Schlitzweite bei der Ausström-Machzahl $Ma_2 = 0,98$ ; $S_0 = 1,28 \text{ kp}$
$\Delta S = S_0 - S$	Durch den Abschirmschild verursachter Schubverlust

## Akustische Grössen

$a_0$	Schallgeschwindigkeit in der Umgebung des Strahls
$f_m$	Mittenfrequenz eines Terzbandes
$L$ [db]	Schallpegel, bezogen auf $10^{-12} \text{ Watt/m}^2$
$L_f$ [db]	Schallpegel eines Terzbandes
$L_f^*$ [db]	Schallpegel eines Oktavbandes
$N$ [Watt]	Schalleistung

## 1. Einleitung

Die Forderung, den Lärm von Strahltriebwerken auf ein erträgliches Mass zu reduzieren, hat zu einer grossen Zahl von Untersuchungen geführt, die sich einerseits mit dem Mechanismus der aerodynamischen Schallerzeugung, andererseits mit den praktischen Möglichkeiten zur Verringerung des Strahlgeräusches beschäftigen. Literaturhinweise hierzu und eine kurze vereinfachte Darstellung der theoretischen Zusammenhänge, die sich im wesentlichen auf Arbeiten von M. J. Lighthill [1, 2, 3, 4], G. M. Lilley [5], H. S. Ribner [6, 7, 8] und A. Powell [9] stützt, sind in [10] zu finden.

Die meisten bisher untersuchten und zum Teil auch schon technisch angewandten Methoden zur Verringerung des Strahlärms beruhen auf dem

Prinzip, die Stärke der turbulenten Schallquellen und damit die insgesamt abgestrahlte Schalleistung zu reduzieren. Hierzu gehört z. B. die Aufteilung des Schubstrahls in mehrere miteinander interferierende Teilstrahlen durch "corrugated nozzles" und Mehrfachdüsen und vor allem die Herabsetzung der Strahlgeschwindigkeit durch die Einführung von Zweikreistriebwerken mit grossem Massendurchsatz. Die rotationssymmetrische Richtungsverteilung des abgestrahlten Schallfeldes bleibt dabei im wesentlichen erhalten.

Eine andere Möglichkeit, die vom Strahl erzeugte Schallintensität in bestimmten Raumwinkelbereichen zu verringern, besteht nun darin, gerade die Richtungsverteilung des Schallfeldes zu beeinflussen. Man kann z. B. entsprechend Bild 1 versu-

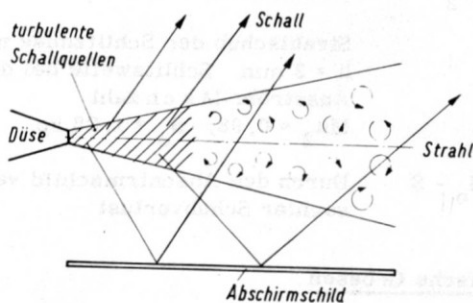


Bild 1: Prinzip der Abschirmung

chen, mit Hilfe von geeigneten Schallreflektoren bestimmte Raumwinkel akustisch abzuschirmen, so dass der grösste Teil der Schallenergie in einer unschädlichen Richtung, etwa nach oben, abgestrahlt wird.

Als Düsenform bietet sich für dieses Prinzip die Schlitzdüse an, da sie eine kürzere turbulente Vermischungszone und höhere Schallfrequenzen ergibt als die Kreisdüse mit gleichgrossem Austrittsquerschnitt. Die Reflektorwirkung eines Abschirmschildes ist nämlich um so höher, je kleiner die Schallwellenlänge und die Länge der turbulenten Vermischungszone gegenüber den Schilddimensionen ist.

Daneben könnte man bei Anordnung der Schlitzdüsen entlang der Tragflügelhinterkante eines Flugzeugs die Abschirmschilde, die die Ausbreitung des Strahlgeräusches nach unten verhindern sollen, gleichzeitig für Start und Landung als auftriebserhöhende Klappen ausbilden.

Aufgrund derartiger Überlegungen wurden von D. J. Maglieri und H. H. Hubbard Messungen an Schlitzdüsen mit Abschirmschild durchgeführt [13, 14]. Diese Modelluntersuchungen an kalten Luftstrahlen ergänzte W. D. Coles durch entsprechende Messungen [15] an einem Originaltriebwerk.

Nach [13] und [14] verringerte die Kombination ei-

ner sehr gestreckten Schlitzdüse ( $b/h = 200$ ) mit einer sehr grossen Abschirmplatte ( $l/h = 190$ ) die maximale Schallintensität um bis zu 20 db gegenüber der Kreisdüse mit gleichem Austrittsquerschnitt. Der Abstand zwischen Düsenkante und Schild war bei diesen Untersuchungen sehr klein, so dass der Strahl praktisch über die ganze Schildlänge am Abschirmschild anlag. Diese Anordnung war gewählt worden, um den Abschirmschild in der Praxis auch als strahlablekende Klappe (Strahlableitung durch Coanda-Effekt) verwenden zu können.

Es ist aber leicht einzusehen, dass der Abstand zwischen Schild und Strahl einen erheblichen Einfluss auf das Schallfeld haben kann. Bei grossem Schildabstand (im Verhältnis zur Schlitzweite und zur Schildlänge) wird der turbulente Freistrahldurch die Abschirmung nicht oder nur wenig gestört. In diesem Falle ändert sich nur die Schallausbreitung infolge der Reflexion der Schallwellen am Schild. Bei kleinem Schildabstand liegt die Strömung dagegen über ein mehr oder weniger langes Stück am Abschirmschild an, so dass sich ein Wandstrahl ausbildet. In diesem Falle wird also die Strömung und damit ausser der Schallausbreitung auch die Schallerzeugung selbst beeinflusst.

Die vorliegenden Untersuchungen an Schlitzdüsen ohne und mit Abschirmschild befassen sich in erster Linie mit diesem Punkt, nämlich mit der Abhängigkeit des Schallfeldes vom Abstand zwischen Strahlachse und Schild. Der erste Teil der Arbeit behandelt Messungen des Schallspektrums und der Richtungsverteilung des Schalls. Dabei wurden der Schildabstand und die Schildlänge variiert. Im zweiten Teil wird über einige Versuche zur Bestimmung der Schallquellenverteilung im Strahl berichtet.

## 2. Messungen der Richtungsverteilung und des Schallspektrums im akustischen Fernfeld

### Versuchsanordnung

Bild 2 zeigt eine Skizze des Versuchsstandes. Das Mikrophon ist an einem Schwenkarm in 1,66 m Abstand von der Düse befestigt, es lässt sich auf einem horizontalen Kreisbogen um den Düsenmittelpunkt herumschwenken. Die Schlitzdüsen und Abschirmschilde können senkrecht und parallel zur Schwenkebene des Mikrofons eingebaut werden, so dass man die Schallabstrahlung in der Ebene senkrecht zum Düsen Schlitz und in der Schlitzebene untersuchen kann. Die nächste feste Wand ist etwa 4 m von der Düse entfernt; störende Schallreflexionen wurden nicht festgestellt. Die akustische Messausrüstung besteht aus einem 1/4" Kondensatormikrophon, einem Verstärker, einem Terz-Oktavfilter und einem Pegelschreiber von Bruel u. Kjaer. Sie erlaubt Schallmessungen im Frequenzbereich von ca. 30 Hz bis 100 kHz und Frequenzanalysen im Bereich von



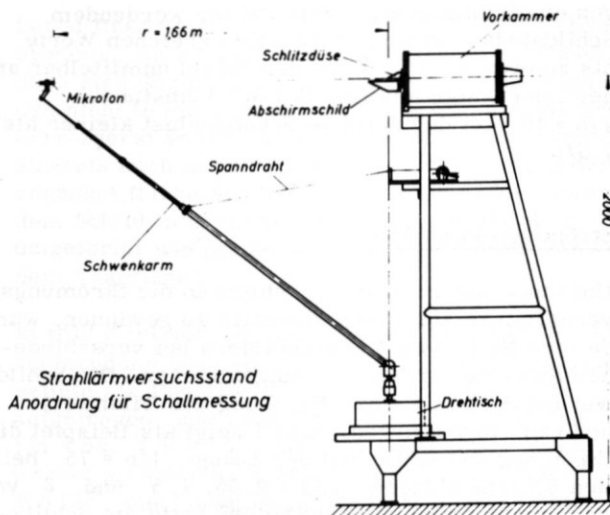


Bild 2: Skizze des Versuchsstandes

30 Hz bis 40 kHz. Wegen der kleinen Düsen-  
dimensionen liegen die zu messenden Schallfre-  
quenzen grossenteils im oberen Teil dieses Fre-  
quenzbereichs. Der Mikrofonschwenkarm ist auf  
einem synchron mit dem Pegelschreiber zu betrei-  
benden Drehtisch befestigt, so dass die Richtungs-  
verteilung des Schallfeldes automatisch registriert  
werden kann.

Der Düsen Schub wird aus der Kraft bestimmt, die  
der Strahl auf eine senkrecht zur Strahlachse ste-  
hende Prallplatte ausübt. Die Prallplatte ist als  
Pendel aufgehängt, der Winkelausschlag wird optisch  
gemessen (vgl. [11]). Während der Schall-  
messungen wird die Schubmessanordnung entfernt.

Düsen und Schilde. Die untersuchten Schlitz-  
düsen haben die Schlitzlänge  $b = 46 \text{ mm}$  und die  
Schlitzweiten  $h = 2 \text{ mm}$  und  $4 \text{ mm}$ . Damit ist  
die Streckung des Schlitzes verhältnismässig klein,  
nämlich  $b/h = 23$  bzw.  $11,5$ . Die Schlitzdüsen  
sind in Bild 3 skizziert. Da es bei den geplanten  
Messungen vor allem auf die Untersuchung von  
Wechselwirkungen zwischen Abschirmschild und

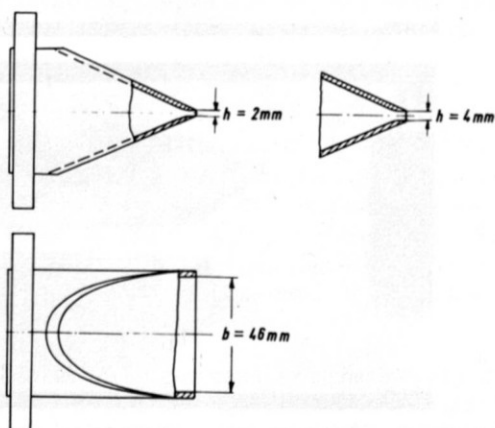


Bild 3: Schlitzdüsen

Strahl ankam, wurden die wegen der kleinen Streck-  
ung des Düsen Schlitzes zu erwartenden Randein-  
flüsse in Kauf genommen.

Als Abschirmschilde dienten etwa 2 mm starke  
Blechplatten, die zur Dämpfung der Eigenschwin-  
gungen auf der Rückseite mit Plastilin beklebt wa-  
ren. Die Schildlänge variierte zwischen  $l = 50 \text{ mm}$   
und  $200 \text{ mm}$ , die auf  $h = 2 \text{ mm}$  Düsen Schlitz-  
weite bezogene Schildlänge lag also zwischen  
 $l/h = 25$  und  $100$ . Die Schildbreite betrug  
 $100 \text{ mm}$ , sie war damit etwa doppelt so gross wie  
die Länge des Düsen Schlitzes. Bild 4 zeigt die An-  
bringung des Schildes an der Schlitzdüse.

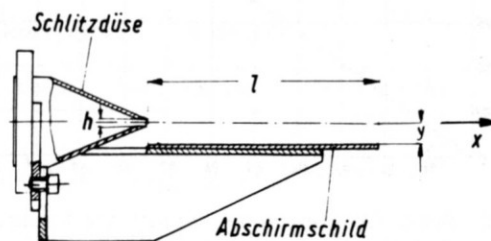


Bild 4: Schlitzdüse mit Abschirmschild

#### Ausführung der Messungen

Als erstes wurde der Düsen Schub ohne und mit Ab-  
schirmschild gemessen und der Strömungsverlauf  
am Schild durch Anstrichbilder sichtbar gemacht.  
Darauf folgten die Schallmessungen. Hierbei wur-  
den die Richtungsverteilungen des Schallfeldes in  
den Ebenen senkrecht und parallel zum Düsen-  
schlitz gemessen und anschliessend Frequenzspek-  
tren unter einigen charakteristischen Winkeln zur  
Strahlachse aufgenommen.

Die meisten Messungen wurden mit der Schlitzdüse  
mit der Schlitzweite  $h = 2 \text{ mm}$  durchgeführt. Ei-  
nige Kontrollmessungen mit der  $4 \text{ mm}$ -Schlitzdüse  
sollten in erster Linie einen möglichen Einfluss  
der Re-Zahl erkennen lassen. Zum Vergleich mit  
den Schlitzdüsen wurde auch eine Kreisdüse mit  
 $10 \text{ mm}$  Durchmesser untersucht. Der Schildab-  
stand wurde bei den Messungen jeweils in weiten  
Grenzen variiert. Ausser bei den Schubmessungen  
war die Ausström-Machzahl konstant, sie betrug  
 $Ma_2 = 0,98$ .

#### Schubmessungen

Um verschiedene Düsenformen - die Abschirmung  
soll hier als Teil der Düse gelten - hinsichtlich  
ihrer Schallabstrahlung miteinander vergleichen zu  
können, müssen die gemessenen Schallpegel auf  
gleiche Ausströmgeschwindigkeit aus der Düse und  
auf gleichen Schub bezogen werden. Die Ausström-  
geschwindigkeit hatte bei allen Schallmessungen  
den gleichen Wert, da Ausström-Machzahl und  
Temperatur konstant gehalten wurden. Der Schub  
änderte sich dagegen mit dem Düsenquerschnitt

und wegen der unter Umständen auftretenden Strömungsverluste auch mit der Düsenform. Er wurde daher mit Hilfe der schon erwähnten Prallplattenanordnung experimentell bestimmt.

Bild 5 stellt den auf den Austrittsquerschnitt der Düsen bezogenen Schub  $S/F$  für verschiedene

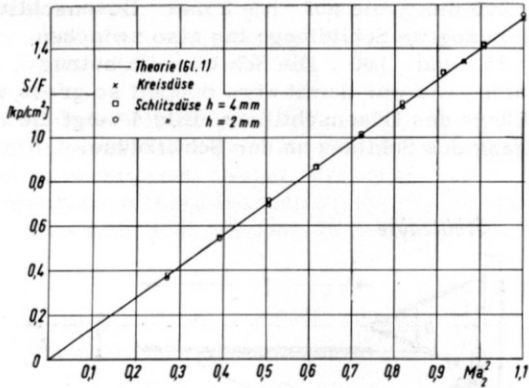


Bild 5: Schub/Austrittsquerschnitt als Funktion der Ausström-Machzahl

Düsen als Funktion des Quadrates der Ausström-Machzahl dar. - Theoretisch gilt bei reibungsfreier Strömung ohne Strahlkontraktion:

$$\frac{S}{F} = \rho_2 U_2^2 = \kappa p_2 Ma_2^2 \approx p_o \frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{p_1}{p_o} \right)^\frac{\kappa-1}{\kappa} - 1 \right] \quad (1)$$

mit  $p_1$  als Vorkammerdruck,  $p_2$  als dem Druck in der Düsenmündung, der gleich dem äusseren Luftdruck  $p_o$  angenommen wurde, und mit  $Ma_2 = U_2/a_2$  als der Ausström-Machzahl. Der gemessene Schub der Düsen ohne Schild entspricht, wie Bild 5 zeigt, sehr gut dieser Gleichung.

Die Reibungsverluste am Abschirmschild verringern den erzeugten Schub, und zwar um so mehr, je kleiner der Schildabstand und je grösser die Schildlänge ist.

In Bild 6 ist der relative Schubverlust  $\Delta S/S_o$  bei der Machzahl  $Ma_2 = 0,98$  als Funktion des Schildabstandes  $y/h$  aufgetragen, und zwar für verschieden lange Schilde. Die Schubverluste stei-

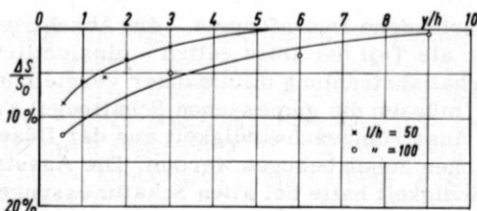


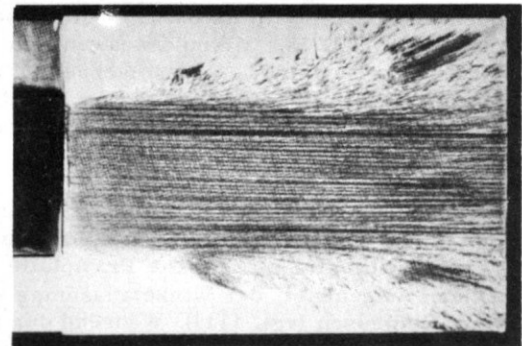
Bild 6: Relativer Schubverlust als Funktion des Schildabstandes

gen erwartungsgemäss mit kleiner werdendem Schildabstand erheblich an. Sie erreichen Werte bis zu etwa 12 o/o, wenn der Schild unmittelbar an der Düsenkante anliegt. Bei Schildabständen  $y/h > 10$  ist der relative Schubverlust kleiner als 1 o/o.

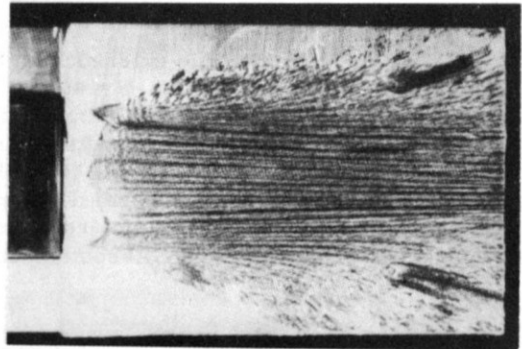
### Strömungsaufnahmen

Um einen unmittelbaren Einblick in die Strömungsverhältnisse am Abschirmschild zu gewinnen, wurde eine Reihe von Anstrichbildern bei verschiedenen Schildabständen  $y$  aufgenommen. Die Schilde wurden dazu mit einer Mischung aus Titanweiss und Oel eingestrichen. Bild 7 zeigt als Beispiel die Strömung am Schild mit der Länge  $l/h = 75$  bei den Schildabständen  $y/h = 0,55; 1,5$  und  $6$  von der Strahlachse; die Schlitzdüse hatte die Schlitzweite  $h = 2$  mm.

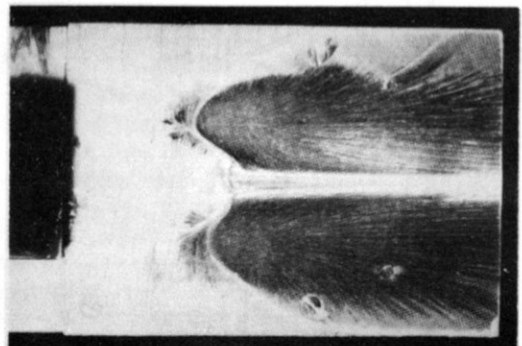
Wie erwartet, verschiebt sich die Anlegelinie annä-



$y/h = 0,55$



$y/h = 1,5$



$y/h = 6$

Bild 7: Strömung am Abschirmschild bei verschiedenen Schildabständen; Schildlänge  $l/h = 75$

hernd linear mit wachsendem Schildabstand strom-abwärts. Es ist ausserdem deutlich zu erkennen, dass sich der Strahl bei grösseren Schildabständen nicht in einer Ebene an den Schild anlegt, sondern zuerst an den Seiten und erst weiter strom-abwärts auch in der Mitte. Anscheinend wird der zunächst flache Strahl durch das Druckfeld über dem Schild in ähnlicher Weise zu zwei Wirbeln umgeformt wie die Diskontinuitätsfläche hinter einem Tragflügel.

In Bild 8 ist der Abstand  $x_A/h$  zwischen der Düsenmündung und dem düsenächsten Teil der Anlegelinie als Funktion des Schildabstandes  $y/h$  aufgetragen, und zwar für die drei Schildlängen  $l/h = 50$ ,  $l/h = 75$  und  $l/h = 100$ . Der Strahl breitet sich demnach etwa unter einem Winkel  $\vartheta \approx 14^\circ$  aus, denn es ist  $(y - h/2)/x_A \approx 0,25 = \tan \vartheta$ .

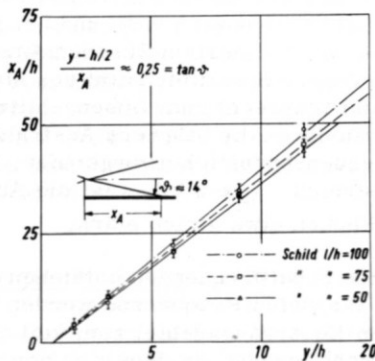


Bild 8: Abstand der Anlegelinie des Strahls an den Schild von der Düse als Funktion des Schildabstandes

Bei Schildabständen  $y/l > 0,25$  sollte der Strahl den Abschirmschild also nicht mehr berühren. Da die Strömungsgeschwindigkeit mit wachsendem Abstand von der Strahlachse asymptotisch gegen Null geht, ist diese Angabe allerdings nur als ein Anhaltspunkt zu betrachten.

### Schallmessungen

Alle Schallmessungen wurden, wie schon erwähnt, bei der Ausström-Machzahl  $Ma_2 = 0,98$  vorgenommen.

Der Schallpegel  $L$  [db] =  $10 \log(I/I_b)$  ist in üblicher Weise auf die Intensität  $I_b = 10^{-12}$  Watt/m<sup>2</sup> bezogen, die etwa der Hörschwelle des menschlichen Ohres entspricht. Der in den Schallspektren aufgetragene Pegel  $L_f(f_m)$  stellt die Schallintensität in einem Frequenzband von 1 Terz (1/3 Oktave) Bandbreite dar;  $f_m$  ist die Mittenfrequenz des Bandes.

Die Umrechnung gemessener Schallpegel auf gleichen Düsen Schub erfolgte anhand des Lighthill'schen  $U^8$ -Gesetzes. Danach gilt für die Schalleistung  $N$  von turbulenten Freistrahlen aus ein-

ander ähnlichen Düsen:

$$N \sim \frac{\rho_0 U_2^8 F}{a_0^5} \approx \frac{U_2^6}{a_0^5} S \quad (2)$$

Bei konstant gehaltener Ausströmgeschwindigkeit  $U_2$  wächst die Schalleistung also proportional dem Schub. Man erhält daher für die auf den Schub  $S_0$  (Schub der Schlitzdüse mit  $h = 2$  mm Schlitzweite ohne Abschirmschild bei  $Ma_2 = 0,98$ ) umgerechnete Schalleistung:

$$N_{\text{korrigiert}} = N_{\text{gemessen}} \cdot \frac{S_0}{S} \quad [\text{Watt}] \quad (3)$$

bzw. beim Uebergang auf die Schallpegel:

$$L_{\text{korrigiert}} = L_{\text{gemessen}} + 10 \log \frac{S_0}{S} \quad [\text{db}] \quad (4)$$

Das Korrekturglied  $10 \log S_0/S$  ist entsprechend den relativ geringen Schubverlusten durch die Abschirmschilde (vgl. Bild 6) im allgemeinen kleiner als 1 db.

### Ergebnisse der Schallmessungen ohne Abschirmschild

Die Richtungscharakteristiken der beiden Schlitzdüsen, d.h. die gemessenen Schallpegel in Abhängigkeit von der Abstrahlungsrichtung, sind in Bild 9 aufgetragen. Zum Vergleich miteingezeichnet ist die Richtungsverteilung der Kreisdüse mit 10 mm Düsendurchmesser. Die Messwerte sind auf glei-

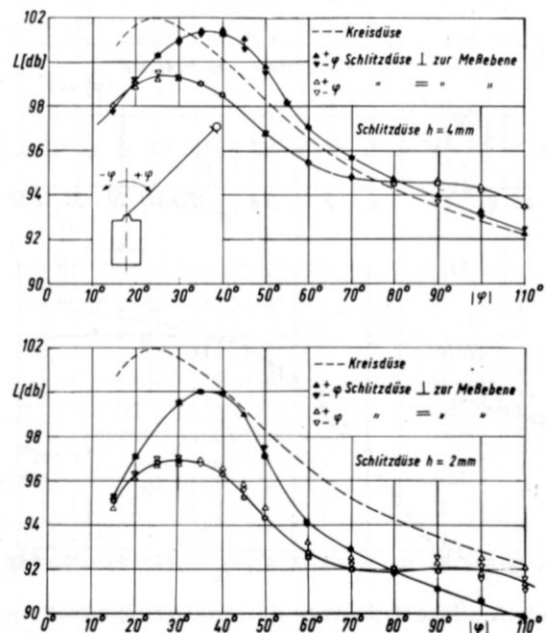


Bild 9: Richtungsverteilungen ohne Schild



chen Düsen Schub umgerechnet; die Schallpegel der Schlitzdüse mit  $h = 4 \text{ mm}$  Schlitzweite wurden dazu um  $3 \text{ db}$  herabgesetzt, die der Kreisdüse um  $0,7 \text{ db}$  erhöht. Die Diagramme stellen jeweils die Richtungsverteilungen der Schallabstrahlung in der Schlitzebene und senkrecht zur Schlitzebene dar.

Die Maxima sind in der Ebene senkrecht zum Düsen schlitze erheblich ausgeprägter als in der Schlitzebene. Diese Abweichung des Schallfeldes von der Rotationssymmetrie ist bei der Düse mit der Schlitzweite  $h = 2 \text{ mm}$  am stärksten; sie nimmt mit der Streckung  $b/h$  des Düsen schlitzes zu.

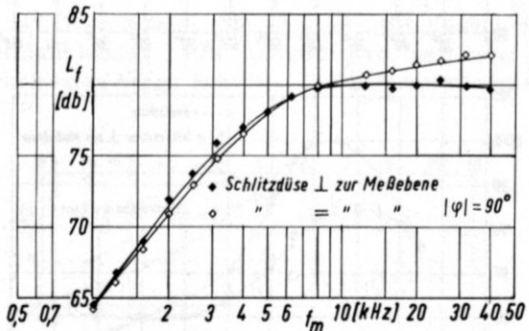
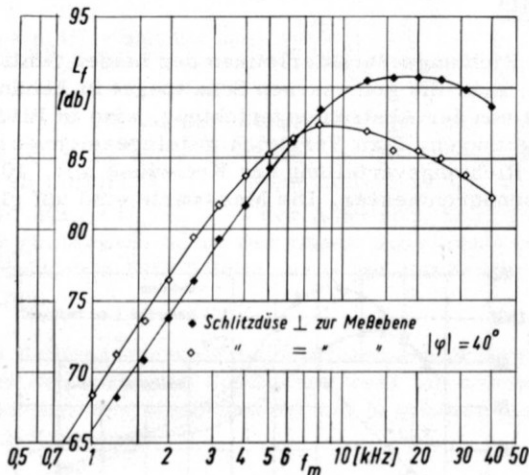
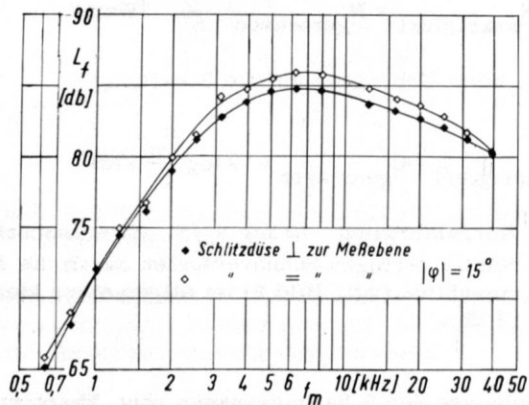


Bild 10: Schallspektren der Schlitzdüse mit  $h = 2 \text{ mm}$  Schlitzweite unter verschiedenen Winkeln zur Strahlachse

Im Vergleich zur Kreisdüse treten die Schallpegelmaxima unter grösseren Winkeln zur Strahlachse auf und sind - besonders bei der Schlitzdüse mit  $h = 2 \text{ mm}$  Schlitzweite - merklich niedriger. Im Hinblick auf die abgestrahlte Schalleistung kompensieren sich diese beiden Effekte allerdings teilweise. Eine Integration über den erfassten Raumwinkelbereich  $15^\circ \leq \varphi \leq 115^\circ$  ergab für die  $4 \text{ mm}$ -Schlitzdüse eine um  $0,2 \text{ db}$ , für die  $2 \text{ mm}$ -Schlitzdüse eine um  $2,5 \text{ db}$  geringere Schalleistung als für die Kreisdüse. (Die Werte sind auf gleichen Schub bezogen.) Es ist hierbei allerdings zu berücksichtigen, dass das Schallfeld der Schlitzdüse mit  $h = 2 \text{ mm}$  Schlitzweite infolge des grösseren Anteils an hohen Frequenzen durch die Luftdämpfung etwas mehr geschwächt wird als das Schallfeld der beiden anderen Düsen.

Bild 10 zeigt unter verschiedenen Winkeln  $\varphi$  zur Strahlachse aufgenommene Schallspektren der  $2 \text{ mm}$ -Schlitzdüse bei senkrecht und bei parallel zur Messebene orientiertem Düsen schlitze. Hiernach wird die grössere Schallintensität des Maximums in der Ebene senkrecht zum Düsen schlitze (vgl. Bild 9) allein durch die stärkere Abstrahlung im oberen Frequenzbereich hervorgerufen; im unteren Frequenzbereich  $f_m < 8 \text{ kHz}$  ist die Abstrahlung in beiden Ebenen etwa gleich stark.

Die höchsten Schallfrequenzen entstehen dicht an der Düse, die tiefen Frequenzen werden weiter stromab im Uebergangsgebiet zum voll ausgebildeten Freistrahle erzeugt, in dem sich der Strahlquerschnitt bereits dem kreisförmigen Querschnitt des ausgebildeten Strahls nähert. Diese Vorstellung gibt eine qualitative Erklärung für die experimentellen Ergebnisse, da die Abweichungen des Strahlquerschnitts und der Richtungsverteilung des erzeugten Schallfeldes von der Rotationssymmetrie einander entsprechen.

Die in Bild 11 dargestellten Schallspektren der

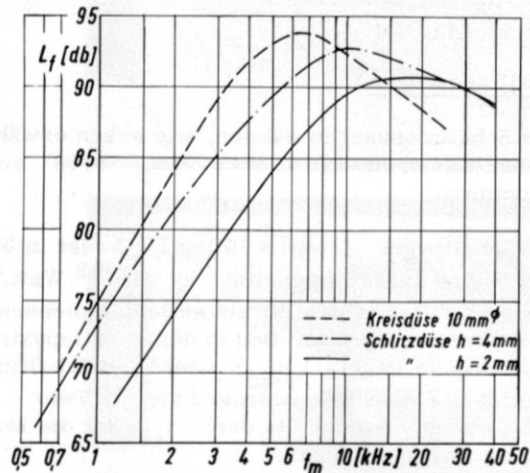


Bild 11: Schallspektren der Kreisdüse und der Schlitzdüsen; jeweils unter dem Winkel der stärksten Schallabstrahlung gemessen. Schlitzdüsen senkrecht zur Messebene



Kreisdüse und der beiden Schlitzdüsen wurden etwa unter dem Winkel der stärksten Schallabstrahlung aufgenommen, nämlich unter  $\varphi = 30^\circ$  bei der Kreisdüse und unter  $\varphi = 40^\circ$  bei den Schlitzdüsen. (Düsen Schlitz senkrecht zur Messebene.) Sie zeigen die erwünschte Verschiebung zu höheren Frequenzen, d. h. zu kleineren Schallwellenlängen beim Uebergang von der Kreisdüse zur Schlitzdüse und bei abnehmender Schlitzweite  $h$ . Die Wellenlänge der Schallwellen, die der Abschirmschild reflektieren soll, muss ja möglichst klein gegen die Abmessungen des Schildes sein, da sonst der Abschirmeffekt durch den um die Schildränder herumgebogenen Schall mehr oder weniger stark beeinträchtigt wird.

### Ergebnisse der Schallmessungen mit Abschirmschild

Ebenso wie bei den Messungen ohne Schild wurde auch mit Schild die Schallabstrahlung in der Ebene senkrecht zum Düsen Schlitz und in der Schlitzebene untersucht. Ausser bei einigen besonders erwähnten Kontrollmessungen mit der 4 mm-Schlitzdüse fand hierbei die Schlitzdüse mit  $h = 2$  mm Schlitzweite Verwendung.

Richtungsverteilungen. Bild 12 zeigt die in erster Linie interessierenden Richtungsverteilungen in der senkrecht zum Düsen Schlitz stehenden Ebene, und zwar für vier verschiedene Schildlängen  $l/h = 25, 50, 75$  und  $100$ . Kurvenparameter ist der Abstand  $y/h$  des Schildes von der Strahlachse. Die linke Hälfte der Diagramme stellt jeweils die abgeschirmte Seite des Schallfeldes dar. Die Richtungscharakteristik der Schlitzdüse ohne Schild ist als gestrichelte Kurve mit eingezeichnet.

Das Schallfeld ändert sich bei allen Schildlängen in ähnlicher Weise mit dem Schildabstand. Als Beispiel betrachten wir in Bild 12 das Diagramm für die Schildlänge  $l/h = 75$ : Bei kleinen Schildabständen  $y/h \leq 3$  ist die gemessene Schallintensität auf der abgeschirmten Seite nur schwach von dem Winkel  $\varphi$  zur Strahlachse abhängig. Während der Schallpegel in der Nähe des Intensitätsmaximums bei  $\varphi \approx -40^\circ$  durch den Schild um etwa 7 db herabgesetzt wird, ist er unter grossen Winkeln  $-\varphi \geq 70^\circ$  sogar höher als ohne Schild. Bei mittleren Schildabständen  $6 \leq y/h \leq 25$  wird die Schallintensität unter sehr grossen und unter sehr kleinen Winkeln zur Strahlachse mit wachsendem Schildabstand geringer, unter  $\varphi \approx -40^\circ$  ändert sie sich dagegen nur wenig. Die Richtungsverteilungen haben daher in diesem Winkelbereich ein ziemlich ausgeprägtes Maximum. Bei noch wesentlich grösseren Schildabständen, wie z. B.  $y/h = 37,5$  in Bild 12 c, bei denen das Verhältnis von Schildabstand zu Schildlänge  $y/l \geq 0,5$  wird, behindert der Schild die Schallausbreitung unter kleinen Winkeln zur Strahlachse kaum noch. Unter grossen Winkeln  $\varphi \approx -90^\circ$  bleibt die Abschirmwirkung dagegen noch weitge-

hend erhalten.

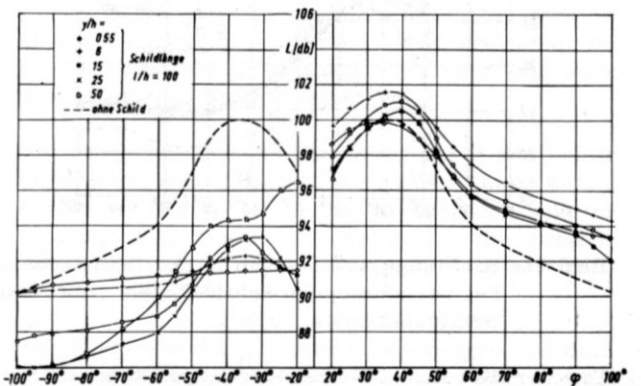
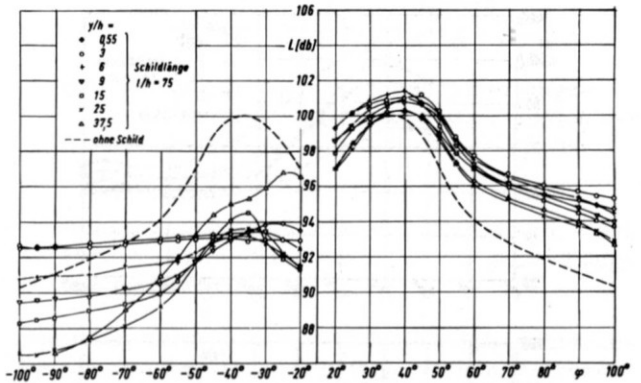
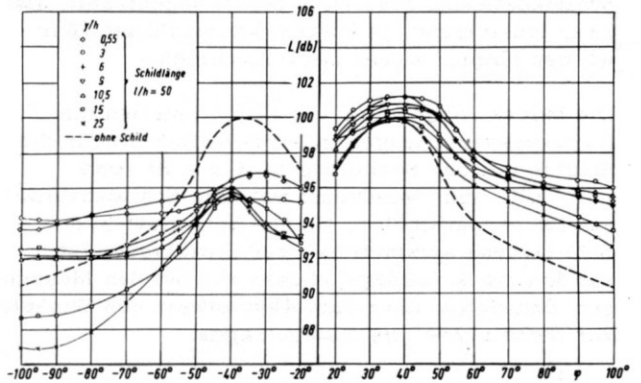
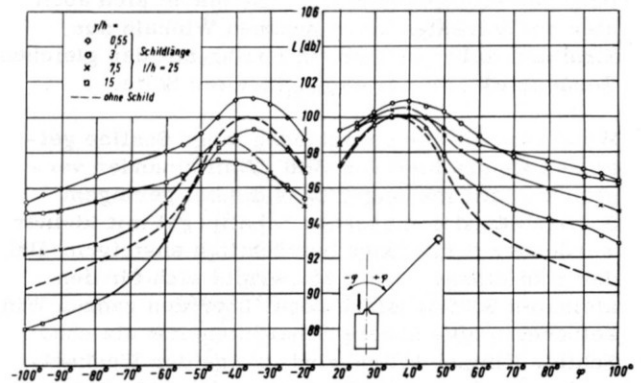


Bild 12: Richtungsverteilungen in der Ebene senkrecht zum Düsen Schlitz bei verschiedenen Schildlängen  $l/h$  und Schildabständen  $y/h$

Auf der nichtabgeschirmten Seite ( $\varphi > 0^\circ$ ) ist der Einfluss des Schildabstandes auf die Richtungsverteilungen geringer. Er macht sich auch hier am stärksten unter grossen Winkeln zur Strahlachse bemerkbar, und zwar mit der gleichen Tendenz wie auf der abgeschirmten Seite.

Wenn man die für verschieden lange Schilde geltenden Diagramme von Bild 12 miteinander vergleicht, fällt ins Auge, dass die bei geringem Schildabstand gemessenen Schallpegel mit kleiner werdender Schildlänge beträchtlich ansteigen. Bei der Schildlänge  $l/h = 25$  ergibt sich für den kleinsten Schildabstand sogar über den ganzen Winkelbereich eine höhere Schallintensität als ohne Schild. Offensichtlich wird infolge der Wechselwirkung zwischen Strömung und Schild bei kleinen Schildabständen zusätzlich Schall abgestrahlt, und zwar umso mehr, je kürzer der Schild ist. Wir werden hierauf später zurückkommen.

Die beiden Diagramme von Bild 13 stellen die Richtungsverteilungen in der Schlitzebene für die Schilde mit den Schildlängen  $l/h = 50$  und  $l/h = 100$  dar; wiederum mit dem Schildabstand als Kurvenparameter. Da das Schallfeld in der Schlitzebene symmetrisch zur Strahlachse ist, wurden die Schallpegel ebenso wie bei den Messungen ohne Schild über dem Absolutwert des Winkels zur Strahlachse  $|\varphi|$  aufgetragen.

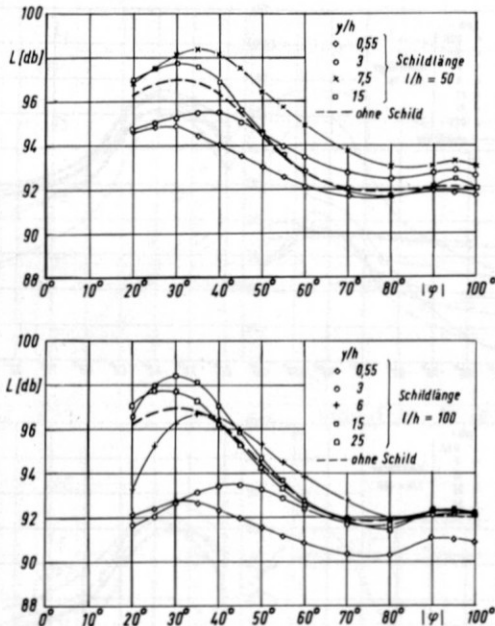


Bild 13: Richtungsverteilungen in der Schlitzebene bei verschiedenen Schildlängen  $l/h$  und Schildabständen  $y/h$

Der parallel zum Düsen-schlitz liegende Schild kann die Schallausbreitung in der Schlitzebene nicht behindern. Abweichungen von der Richtungsverteilung ohne Schild müssen daher im wesentlichen vom Einfluss des Schildes auf die schaller-

zeugende Strömung herrühren, der mit wachsendem Schildabstand rasch abnehmen sollte.

Wie Bild 13 zeigt, wird die Schallabstrahlung in der Schlitzebene bei sehr kleinem Schildabstand merklich reduziert, und zwar am stärksten unter kleinen Winkeln zur Strahlachse. Der Effekt nimmt mit der Schildlänge zu. Wenn der Schildabstand vergrössert wird, geht dieser günstige Einfluss des Schildes rasch verloren. Bei mittleren Schildabständen erhält man sogar gegenüber der Richtungsverteilung ohne Schild leicht erhöhte Schallpegel, die wahrscheinlich zumindest teilweise durch den am Schild reflektierten Schall bedingt sind. Bei grossen Schildabständen, bei denen der Strahl den Schild nicht mehr berührt, unterscheiden sich die Richtungsverteilungen ohne und mit Schild erwartungsgemäss kaum noch voneinander.

Auftragung über den Schildabstand. Deutlicher als aus den Richtungsverteilungen selbst kann man die Abhängigkeit des Schallfeldes vom Schildabstand erkennen, wenn man einige charakteristische Schallpegel direkt als Funktion des Schildabstandes aufträgt. Dies ist in Bild 14 für die abgeschirmte Seite der Ebene senkrecht zum Düsen-schlitz und in Bild 15 für die Schlitzebene geschehen. Der Schallpegel  $L_{\max}$  im Maximum der Richtungsverteilung und die unter Winkeln von  $60^\circ$  und  $90^\circ$  zur Strahlachse gemessenen Pegel wurden - mehr oder weniger willkürlich - als die charakteristischen Schallpegel ausgewählt und über dem Schildabstand  $y/l$  aufgetragen. Kurvenparameter ist dabei die Schildlänge  $l/h$ . Die entsprechenden Schallpegel der Kreisdüse und der Schlitzdüse ohne Schild sind zum Vergleich als Bezugslinien miteingezeichnet. Die Schallpegel wurden nach Gl. (4) auf gleichen Düsen-schub umgerechnet, die Korrekturen sind jedoch mit maximal 0,7 db gering. Die Auftragung über  $y/l$  statt über  $y/h$  wurde gewählt, weil sie eine wesentlich übersichtlichere Anordnung der Kurven ergibt und demnach dem Problem besser angepasst zu sein scheint.

Die in Bild 14 dargestellten Ergebnisse für die Ebene senkrecht zum Düsen-schlitz kann man in folgender Weise zusammenfassen:

1. Mit wachsender Schildlänge werden die Schallpegel auf der abgeschirmten Seite bei allen Schildabständen niedriger. Maximal werden die Pegel durch den längsten untersuchten Schild ( $l/h = 100$ ) gegenüber den entsprechenden Schallpegeln der Kreisdüse um 8 bis 10 db reduziert.
2. Aenderungen des Schildabstandes wirken sich am stärksten unter grossen Winkeln zur Strahlachse aus. Mit abnehmendem Schildabstand wächst die unter dem Winkel  $\varphi = -90^\circ$  gemessene Schallintensität um bis zu 8 db an, unter dem Winkel  $\varphi = -60^\circ$  um bis zu 5 db.

Die beste Abschirmung ergibt sich infolgedessen

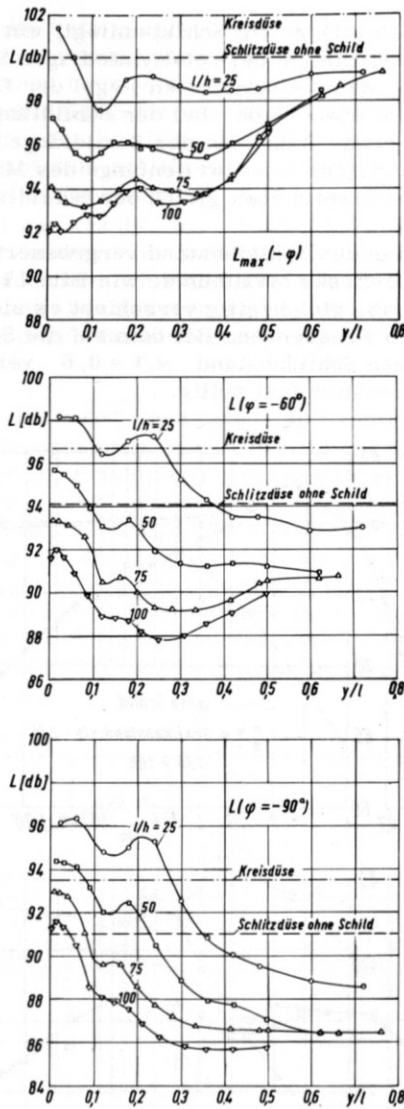


Bild 14: Schallintensität auf der abgeschirmten Seite des Strahls als Funktion des Schildabstandes bei verschiedenen Schildlängen

nicht bei sehr kleinen, sondern bei mittleren Schildabständen.

Um ein Mass für eine quantitative Abschätzung des Optimums zu gewinnen, wurde die Schallintensität im abgeschirmten Sektor über den Raumwinkel integriert. Die sich daraus ergebende Schalleistung ist in Bild 16 ebenfalls als Funktion des dimensionslosen Schildabstandes  $y/l$  aufgetragen. (Die Leistungspegel sind auf die in den gleichen Raumwinkel abgestrahlte Schalleistung der Kreisdüse bezogen.) Danach erhält man für die untersuchten Schilde die optimale Abschirmwirkung bei Schildabständen  $0,25 \leq y/l \leq 0,5$ .

- Die verringerte Abschirmwirkung bei kleinen Schildabständen deutet - wie schon weiter vorn erwähnt wurde - auf eine zusätzliche Schallabstrahlung infolge der Wechselwirkung zwischen

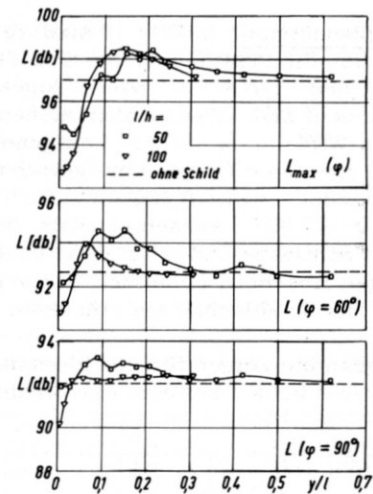


Bild 15: Schallintensität in der Schlitzebene als Funktion des Schildabstandes bei verschiedenen Schildlängen

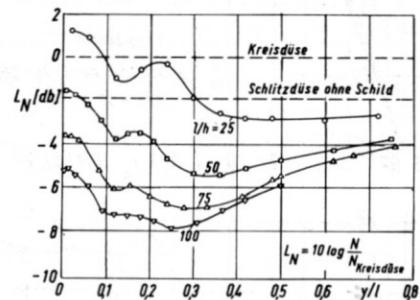


Bild 16: In den abgeschirmten Sektor abgestrahlte Schalleistung als Funktion des Schildabstandes bei verschiedenen Schildlängen

Strömung und Schild hin, die offenbar am stärksten ist, wenn der Strahl über die ganze Länge des Schildes anliegt.

Die Diagramme von Bild 15 für die Schallabstrahlung in der Schlitzebene unterstreichen die schon bei der Diskussion der entsprechenden Richtungsverteilungen getroffenen Feststellungen, wenngleich die Verringerung der Schallpegel unter kleinen Winkeln zur Strahlachse bei dieser Auftragung nicht genügend erfasst wird.

Die Beeinflussung der Strömung durch den Schild verursacht offensichtlich nur in der Ebene senkrecht zum Düsenstrahl eine zusätzliche Schallerzeugung, während die Abstrahlung in der Schlitzenebene zumindest bei sehr kleinem Schildabstand deutlich reduziert wird.

Zur Kontrolle durchgeführte Messungen mit der Schlitzdüse mit  $h = 4$  mm Schlitzweite erbrachten im wesentlichen die gleichen Ergebnisse.

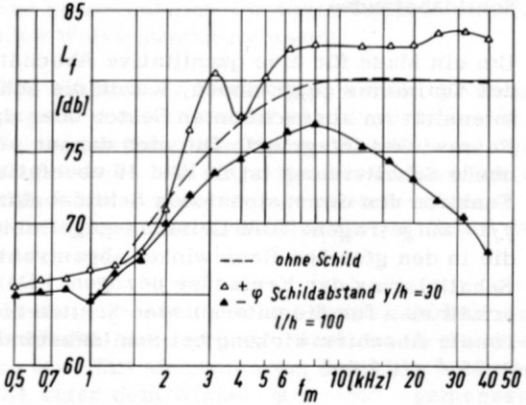
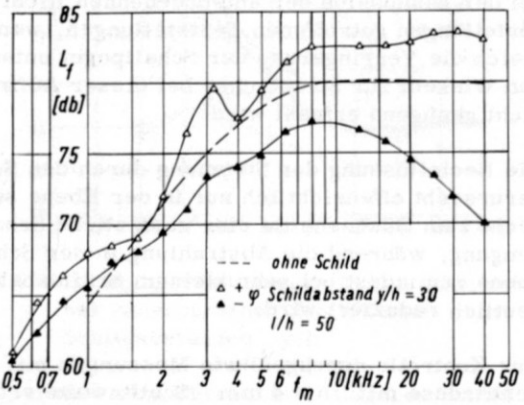
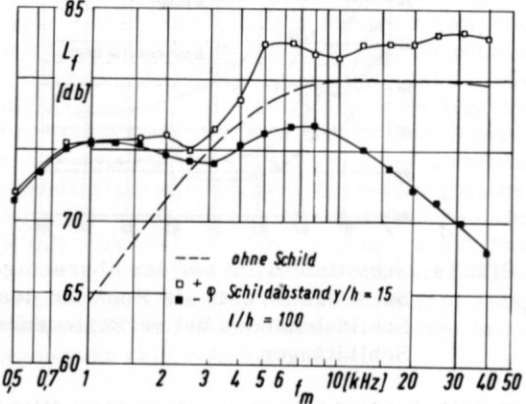
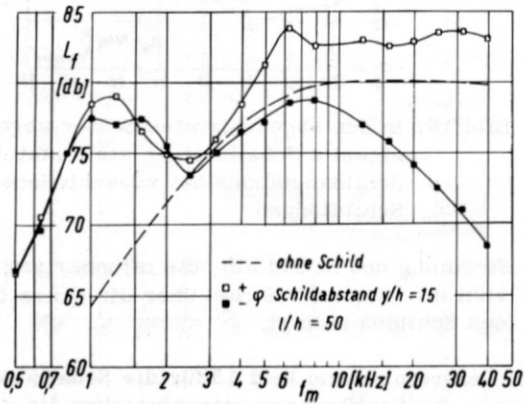
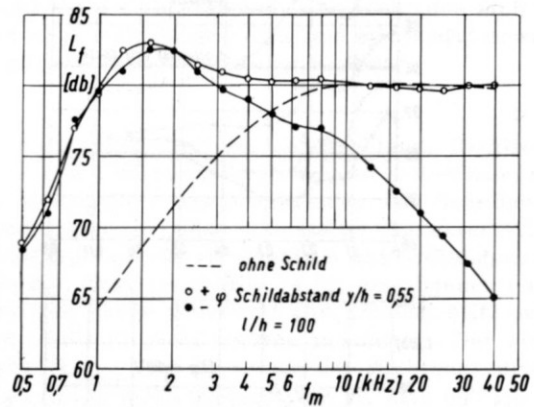
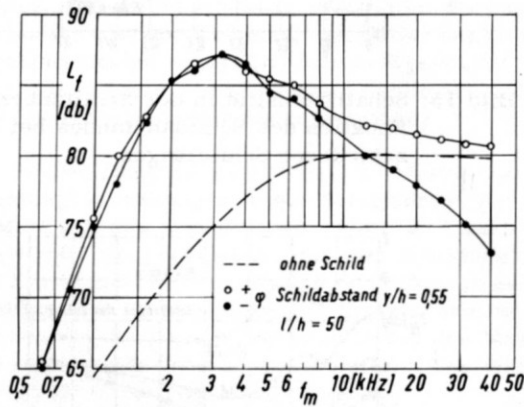


**Schallspektrum.** In Bild 17 sind Terzspektrogramme für die Schilde mit den Schildlängen  $l/h = 50$  und  $l/h = 100$  wiedergegeben, die in der senkrecht zum Düsenschlitz stehenden Ebene unter den Winkeln  $\varphi = \pm 90^\circ$  aufgenommen wurden. Die einzelnen Diagramme gelten für die Schildabstände  $y/h = 0,55; 15$  und  $30$ . Die Winkel  $\varphi = \pm 90^\circ$  wurden gewählt, weil der Einfluss des Schildabstandes auf den Schallpegel, wie im vorigen Abschnitt erläutert, unter grossen Winkeln zur Strahlachse am stärksten ist.

Die Diagramme zeigen für den kleinsten Schildabstand  $y/h = 0,55$ , bei dem der Strahl über die

ganze Schildlänge am Schild anliegt, ein ausgeprägtes Maximum bei relativ niedrigen Schallfrequenzen, das die maximalen Pegel der Düse ohne Schild um etwa 7 db bei der Schildlänge  $l/h = 50$  und um etwa 3 db bei der Schildlänge  $l/h = 100$  übersteigt. Die Schallwellenlänge des Maximums ist dabei jeweils etwa gleich der Schildlänge.

Wenn man den Schildabstand vergrössert, nimmt die Höhe dieses Maximums, wie Bild 17 zeigt, erheblich ab; gleichzeitig verschiebt es sich zu niedrigeren Frequenzen. Bei dem auf die Schildlänge bezogenen Schildabstand  $y/l = 0,6$  verschwindet es schliesslich fast völlig.



Schildlänge  $l/h = 50$

Schildlänge  $l/h = 100$

Bild 17: Schallspektren unter  $\varphi = \pm 90^\circ$  in der Ebene senkrecht zum Düsenschlitz bei verschiedenen Schildabständen



Die durch die Reflexion der Schallwellen am Schild bedingte Abschirmung wird erwartungsgemäss erst im oberen Frequenzbereich wirksam, in dem die Schallwellenlängen wesentlich kleiner als die Abmessungen des Schildes sind. Sie ändert sich nur wenig mit dem Schildabstand. Bei der höchsten erfassten Frequenz  $f_m = 40$  kHz werden die Schallpegel um 12 db bis 15 db herabgesetzt. Die starke Zunahme der Schallabstrahlung mit kleiner werdendem Schildabstand, wie sie im vorigen Abschnitt beschrieben wurde, ist also praktisch allein durch das niederfrequente Maximum bestimmt.

Die unter  $\varphi = -60^\circ$  und  $\varphi = -40^\circ$  aufgenommenen Spektrogramme, die in Bild 18 dargestellt sind, zeigen im Prinzip das gleiche Verhalten wie die unter  $\varphi = -90^\circ$  gemessenen Spektren. Allerdings spielt das niederfrequente Maximum - vor allem bei  $\varphi = -40^\circ$  - gegenüber den im oberen Teil des Spektrums gemessenen höheren Schallpegeln nur noch eine untergeordnete Rolle. Daraus erklärt sich der schwächere Einfluss des Schildabstandes auf die Schallabstrahlung in diesem Winkelbereich.

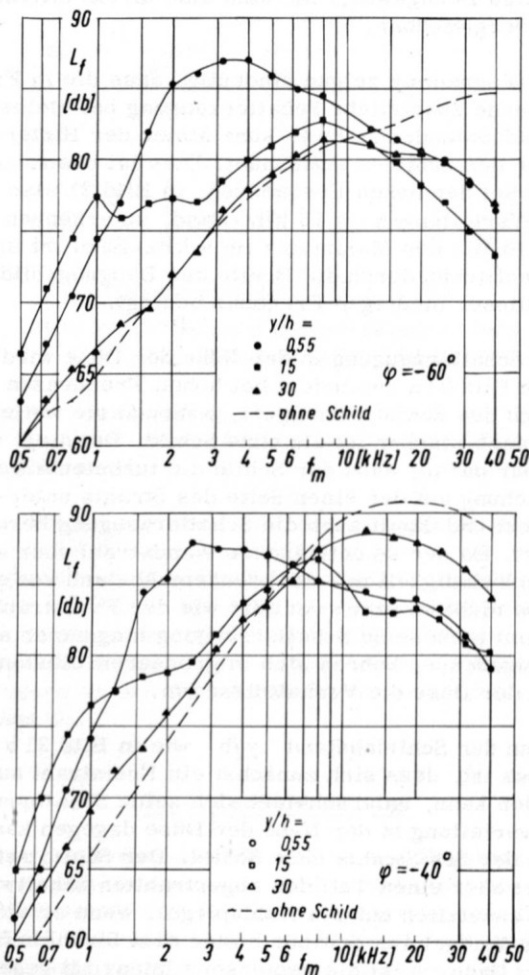


Bild 18: Schallspektren auf der abgeschirmten Seite des Strahls bei verschiedenen Schildabständen. Schildlänge  $l/h = 50$

Es erhebt sich nun die Frage, wie die zusätzliche Schallerzeugung im niederfrequenten Teil des Spektrums zustande kommt. Man könnte annehmen, dass sie beim Anlegen des turbulenten Strahls an den Schild oder durch die turbulente Strömung entlang der Schildoberfläche hervorgerufen wird, da bekanntlich die Wechselwirkung zwischen Turbulenz und festen Wänden zu einer Dipolstrahlung führen kann, die erheblich intensiver als die Quadrupolstrahlung der freien Turbulenz ist (vgl. [16, 17, 18, 19]). Dem steht aber entgegen, dass die gemessene Schallabstrahlung umso stärker ist und bei umso höheren Frequenzen liegt, je kleiner die Länge des Schildes ist. Diese Beobachtung lässt eher vermuten, dass der zusätzliche niederfrequente Schall im wesentlichen von den turbulenten Druckschwankungen an der Hinterkante des Schildes herrührt.

Um diese Frage zu klären, wurde versucht, die Verteilung der Schallquellen längs der Strahlachse experimentell zu bestimmen.

### 3. Die Schallquellenverteilung im Strahl

Gesucht wird die Verteilung der Schallquellen entlang der Strahlachse, d.h. genauer gesagt die Abhängigkeit der Schalleistung pro Längeneinheit des Strahls,  $dN/dx$ , von der x-Koordinate.

#### Messverfahren

Es erscheint zunächst als naheliegend, die Verteilung aus Schalldruckmessungen am Strahlrand zu ermitteln. Das akustische Nahfeld ändert sich jedoch sehr stark mit dem - unbekanntem - Abstand von der Schallquelle. Man kann daher aus der im Nahfeld gemessenen Druckamplitude nicht ohne weiteres auf die von der betreffenden Stelle abgestrahlte Schalleistung schliessen.

Das Prinzip des von uns erprobten Verfahrens [18] besteht nun darin, die turbulenten Schallquellen mit Hilfe eines grossen Hohlspiegels auf ein Gebiet ausserhalb des Strahls abzubilden, und die Intensitätsverteilung in diesem Abbild, die nicht vom Nahfeld der turbulenten Druckschwankungen beeinflusst wird und daher im wesentlichen der Verteilung der den Spiegel bestrahlenden Schallquellen entspricht, auszumessen. Eine Prinzipskizze der Anordnung zeigt Bild 19. Der sphärische Hohlspiegel ist einen Spiegelradius seitlich von der Strahlachse angebracht. Der Durchmesser des Hohlspiegels und der

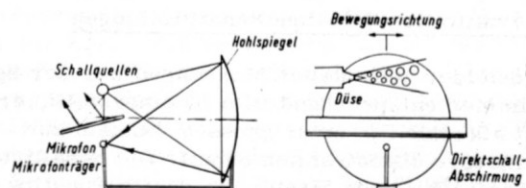


Bild 19: Prinzipskizze der Hohlspiegelanordnung

Spiegelradius betragen jeweils etwa 1 m. Die vom Strahl ausgehenden Schallwellen erzeugen analog zu Lichtwellen ein Abbild der turbulenten Schallquellen. Das eingezeichnete Mikrofon misst die Schallintensität in diesem Abbild. Um die Auswirkung der nach den Gesetzen der Strahlenoptik zu erwartenden Abbildungsfehler möglichst gering zu halten, wird das Bild der Schallquellen nicht durch eine Bewegung des Mikrofons allein abgetastet, sondern Spiegel und Mikrofon werden gemeinsam in Richtung der Strahlachse verschoben. Die direkte Schallausbreitung vom turbulenten Strahl zum Mikrofon wird durch eine ausreichend grosse Abschirmplatte - die "Direktschall-Abschirmung" in Bild 19 - soweit unterdrückt, dass die Schallintensität am Mikrofon praktisch allein durch die vom Hohlspiegel gebündelten Wellen bestimmt ist.

Eine grundsätzliche Schwierigkeit bei der Anwendung strahlenoptischer Überlegungen auf akustische Probleme liegt in der sehr viel grösseren Wellenlänge des Schalls, die zu Beugungseffekten führt. Im vorliegenden Falle macht sich die Beugung am Rande des Hohlspiegels störend bemerkbar. Nach einer einfachen Abschätzung, die durch Kontrollmessungen an einer punktförmigen Schallquelle bestätigt wurde, liegt das erste Beugungsminimum bei der beschriebenen Anordnung im Abstand  $x_B \approx 1,2 \lambda$  von der Mitte des Beugungsbildes (vgl. Bild 20). Die Beugung erschwert also vor allem die genaue Ortung der sehr niederfrequenten Schallquellen.

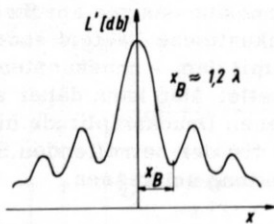


Bild 20: Intensitätsverteilung im Beugungsschild einer punktförmigen Schallquelle

Als ein zweiter Punkt ist zu beachten, dass die gemessene Schallquellenverteilung nicht für die insgesamt abgestrahlte Schalleistung gilt, sondern nur für den Teil, der durch den Hohlspiegel aufgefangen wird. Man muss daher u. U. mehrere Messungen mit verschiedener Spiegelstellung durchführen und die Ergebnisse in geeigneter Weise überlagern.

#### Die ermittelten Schallquellenverteilungen

Bei den hier behandelten Messungen war der Spiegel immer entsprechend Bild 19 eingestellt, er erfasst also nur den unter grossen Winkeln zur Strahlachse abgestrahlten Schall. Die Schallintensität im Abbild des Strahls wurde als Funktion des Abstandes  $x/h$  von der Düsenmündung regi-

striert. Die Ausström-Machzahl betrug wieder  $Ma_2 = 0,98$ . Um auch einen Einblick in die Frequenzabhängigkeit der Schallquellenverteilungen zu erhalten, wurden neben der Gesamtintensität auch die Intensitäten in den Oktavbändern mit 2 kHz bis 31,5 kHz Mittenfrequenz gemessen.

Bild 21 gibt einige der gewonnenen Ergebnisse wieder. Die Diagramme zeigen die Verteilungen der Gesamtintensität und der Intensität in den Oktavbändern mit 16 kHz und 4 kHz Mittenfrequenz für den Schild mit der Länge  $l/h = 50$  bei sehr kleinem (Bild 21 a) und bei mittlerem Schildabstand (Bild 21 b). Aufgetragen ist jeweils die gemessene Intensitätsverteilung im Abbild des Strahls für die drei Fälle:

Schlitzdüse ohne Schild,

Strahl zwischen Schild und Hohlspiegel,

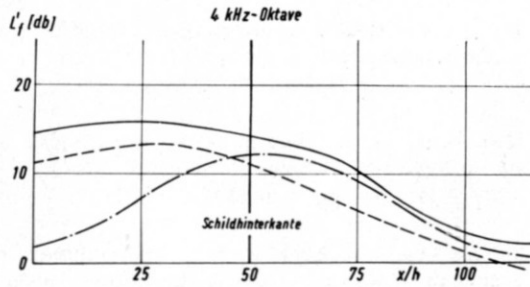
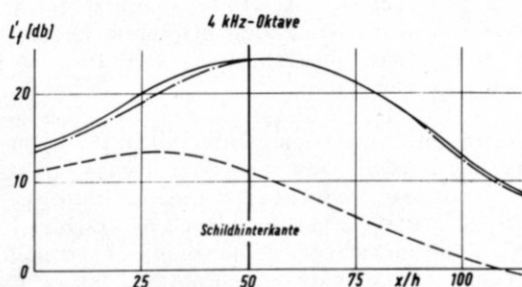
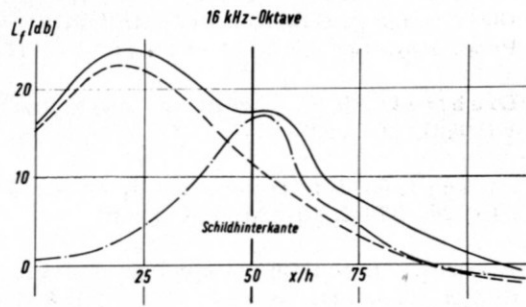
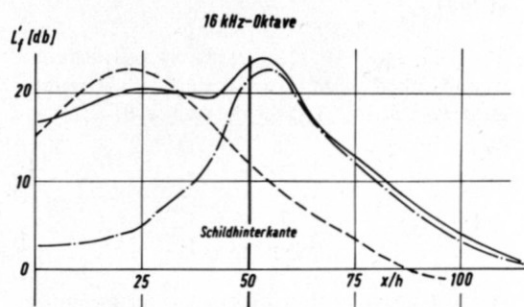
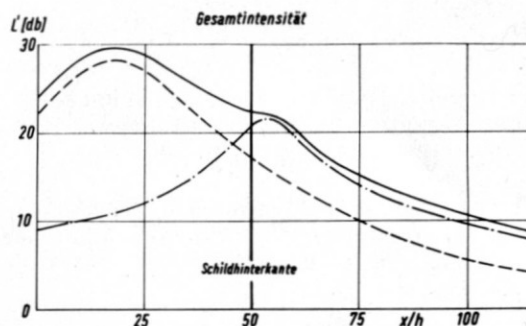
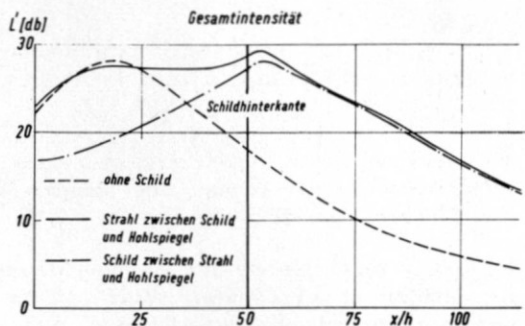
Schild zwischen Strahl und Hohlspiegel (Strahl abgeschirmt).

Die angegebenen Schallpegel  $L'$  und  $L'_f$  beziehen sich auf denselben, allerdings willkürlich gewählten Bezugswert; sie sind also direkt miteinander vergleichbar.

Die Diagramme zeigen eindeutig, dass die in Frage stehende zusätzliche Schallerzeugung bei kleinen Schildabständen an bzw. kurz hinter der Hinterkante des Schildes stattfindet. Dies ist besonders klar bei den hohen Frequenzen, in Bild 21 also an den Verteilungen im 16 kHz-Band, zu erkennen. Die Breite des Maximums im 4 kHz-Band ist im wesentlichen durch die Breite des Beugungsbildes bei dieser niedrigen Frequenz bedingt.

Die Schallerzeugung in der Nähe der Düse wird nach Bild 21 a zumindest bei hohen Frequenzen durch den Schild verringert, während sie weiter stromab stärker ist als ohne Schild. Das liegt offenbar daran, dass der Schild die turbulente Vermischung auf der einen Seite des Strahls unterdrückt und damit auch die Schallerzeugung herabsetzt. Da der so entstandene Wandstrahl aber seine Geschwindigkeit mit wachsendem Abstand von der Düse nicht so rasch verliert wie der Freistrahle, nimmt auch seine Schallerzeugung langsamer ab. Infolgedessen kehren sich in grösserem Abstand von der Düse die Verhältnisse um.

Wenn der Schildabstand  $y/h$  wie in Bild 21 b so gross ist, dass sich zunächst ein Freistrahle ausbilden kann, unterscheidet sich seine Schallquellenverteilung in der Nähe der Düse dagegen kaum von der des Strahls ohne Schild. Der Schild reflektiert aber einen Teil der abgestrahlten Schallwellen zusätzlich auf den Hohlspiegel, wenn er sich vom Spiegel aus gesehen hinter dem Strahl befindet. Dadurch ist die gemessene Intensität gegenüber dem Strahl ohne Schild auch dicht hinter der Düse um einige Dezibel erhöht. Auf der abgeschirmten Seite erhält man dagegen natürlich eine



a) Schildabstand  $y/h = 0,55$

b) Schildabstand  $y/h = 15$

Bild 21: Schallquellenverteilungen längs der Strahlachse. Gesamtintensität und Intensität in den Oktavbändern mit 16 kHz und 4 kHz Mittenfrequenz. Schildlänge  $l/h = 50$

starke Verringerung, und zwar um bis zu 30 db im 31,5 kHz-Band und um bis zu etwa 20 db im 16 kHz-Band.

beeinträchtigen. Es ist daher erforderlich, den Abschirmschild in einem Abstand vom Strahl anzubringen oder aber sehr lange Schilde zu verwenden.

Messungen mit dem 200 mm langen Abschirmschild an der 2 mm-Schlitzdüse und an der 4 mm-Schlitzdüse, also mit den relativen Schildlängen  $l/h = 100$  und  $l/h = 50$ , bestätigen die erläuterten Ergebnisse gut. Mit grösser werdender relativer Schildlänge  $l/h$  nimmt dabei die Schallerzeugung an der Schildhinterkante erwartungsgemäss ab.

Die Untersuchung der Schallquellenverteilungen längs der Strahlachse hat gezeigt, dass der zusätzliche Schall an bzw. kurz hinter der Hinterkante des Schildes erzeugt wird. Die Ursachen der Strahlerzeugung und andere Methoden zu ihrer Verringerung, z. B. durch geeignete Formgebung der Schildhinterkante, werden z. Zt. noch untersucht.

#### 4. Zusammenfassung

Abschliessend seien die wichtigsten Ergebnisse kurz zusammengefasst: Schlitzdüsen mit Abschirmschild strahlen in der senkrecht zum Düsen-schlitz stehenden Ebene zusätzlich Schall verhältnismässig niedriger Frequenz ab, und zwar um so mehr, je kürzer der Schild und je geringer der Schildabstand ist. Diese zusätzliche Schallerzeugung kann die Abschirmwirkung des Schildes stark

Die Anregung zu der vorliegenden Arbeit ging von Professor Dr. A. Betz aus. Professor Betz ist am 16. April 1968 verstorben. Ich möchte ihm an dieser Stelle für die vielfältigen Ratschläge und Anregungen danken, die er mir zuteil werden liess. Gleichzeitig danke ich der Aerodynamischen Versuchsanstalt, insbesondere Herrn Professor Dr. H. Schlichting und Herrn Dr. F.W. Riegels für ihre Anteilnahme und Unterstützung.



### Literatur

- [1] Lighthill, M.J.: On sound generated aerodynamically. I. General theory. Proc. Roy. Soc. A 211 (1952), pp. 564-587
- [2] Lighthill, M.J.: On sound generated aerodynamically. II. Turbulence as a source of sound. Proc. Roy. Soc. A 222 (1954), pp. 1-32
- [3] Lighthill, M.J.: The Bakerian Lecture, 1961. Sound generated aerodynamically. Proc. Roy. Soc. A 267 (1962), pp. 147-182
- [4] Lighthill, M.J.: Jet noise. AIAA Journal 1 (1963), pp. 1507-1517
- [5] Lilley, G.M.: On the Noise from Air Jets ARC 20, 376-N 40-FM 2724 (1958)
- [6] Ribner, H.S.: On the strength distribution of noise sources along a jet. UTIA Rep. 51 (1958)
- [7] Ribner, H.S.: Aerodynamic sound from fluid dilatations - a theory of the sound from jets and other flows. UTIA Rep. 86 (1962)
- [8] Ribner, H.S.: The generation of sound by turbulent jets. Advances in Appl. Mech., Vol. 8 (1964), pp. 103-182
- [9] Powell, A.: Mechanisms of aerodynamic sound production. AGARD Rep. 466 (1963)
- [10] Grosche, F.-R.: Untersuchungen zur Lärmentwicklung turbulenter Freistrahlen. Teil I: Grundlagen, Versuchsanordnung, Uebersichtsmessungen. AVA-Bericht 66 A 13 (1966)
- [11] Grosche, F.-R.: Untersuchungen zur Lärmentwicklung turbulenter Freistrahlen. Teil II: Messungen an einer Schlitzblende ohne und mit Abschirmschild. AVA-Bericht 68 A 08 (1968)
- [12] Grosche, F.-R.: Untersuchungen zur Lärmentwicklung turbulenter Freistrahlen. Teil IV: Zur Verteilung der Schallquellen in turbulenten Strahlen. AVA-Bericht 68 A 20 (1968)
- [13] Maglieri, D.J., Hubbard, H.H.: Preliminary measurements of the noise characteristics of some jet-augmented-flap configurations. NASA Memo 12-4-58 L (1959)
- [14] Maglieri, D.J.: Shielding flap type jet engine noise suppressor. J. Acoust. Soc. Amer. 31 No. 4 (1959), pp. 420-422
- [15] Coles, W.D.: Jet engine exhaust noise from slot nozzles. NASA TN D-60 (1959)
- [16] Curle, N.: The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound. Proc. Roy. Soc. A 231 (1955), pp. 505-517
- [17] Powell, A.: Aerodynamic noise and the plane boundary. J. Acoust. Soc. Amer. 32 No. 8 (1960), pp. 982-990
- [18] Ffowcs Williams, J.E.: Thoughts on the problem of aerodynamic noise sources near solid boundaries. AGARD Rep. 459 (1963)
- [19] Meecham, W.C.: Surface and volume sound from boundary layers. J. Acoust. Soc. Amer. 37 No. 3 (1965), pp. 516-522

### Abstract

Air jets flowing out from slot nozzles generate sound of higher frequencies and have shorter turbulent mixing zones than jets from circular nozzles of equal exit area. This suggests that a reduction of jet noise should be possible by shielding the jet with suitable reflectors.

Measurements have been conducted in the acoustic far field of cold air jets from slot nozzles of about  $1 \text{ cm}^2$  exit area. The Mach number was  $Ma = 0.98$ . Flat plates were used as acoustic shields. The influences of the length of the shield and of the distance between shield and jet axis have been investigated. If the distance between shield and jet is low, additional noise, which reduces the shielding effect, is produced at the end of the shield.

### Résumé

Les jets de l'air des tuyères à fente produisent un son des fréquences plus hautes et ont des zones turbulentes à mélange plus courtes que ceux des tuyères circulaires de la même coupe transversale de la sortie.

C'est pourquoi il peut être, qu'il est possible de réduire le bruit d'un jet en cachant le jet par un réflecteur propre.

Des mesurages ont été faits dans le champ acoustique distant d'un jet de l'air froid. Il est sorti des tuyères à fente d'une coupe transversale de  $1 \text{ cm}^2$  environ avec un nombre de Mach  $Ma = 0.98$ . Les écrans acoustiques ont consisté de tables planes.

Les influences de la longueur de l'écran et de la distance de l'écran et de l'axe du jet ont été examinées. En ce cas que la distance de l'écran et du jet est courte de bruit additionnel, qui réduit l'effet désiré de l'écran, est produit à la fin de l'écran.