
F. W. Korff

Wie kann man Propellerlärm verringern?

Bei der Technik der Lärmreduzierung muß man darauf achten, einen möglichst turbulenzarmen Vortrieb zu bekommen, wobei Leistungseinbuße und Geräuschminderung in einem ausgewogenen Verhältnis stehen, abschaffen wird man das Geräusch nicht, denn der lautlose Propeller ist bekanntlich der stehende Propeller.

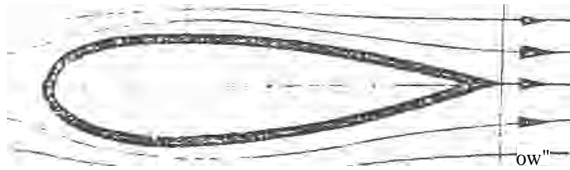
Es ist jedoch klar, daß die Strömungen, Wirbel und Turbulenzen, die aerodynamischen Vorgänge insgesamt an der Luftschraube unmittelbar, und zwar direkt proportional mit akustischen Phänomenen sich verknüpfen, so daß wir zwei verwandte Phänomene gleichzeitig haben, die wir aber jetzt hintereinander betrachten wollen, um daraus zu lernen, wie man Maßnahmen gegen Propellerlärm ergreift.

Aerodynamik

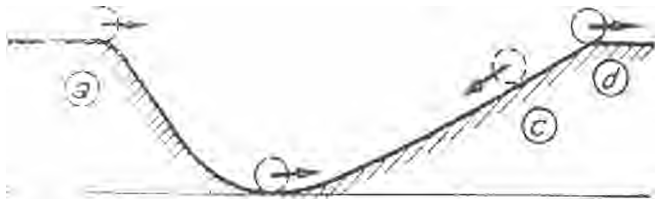
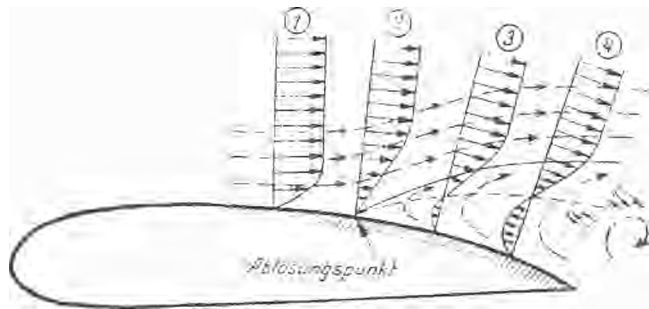
Bei der Umströmung eines gekrümmten Körpers kann man einen Bereich beschleunigter und verzögerter Geschwindigkeit unterscheiden (*Bild 1*). Verengung der Stromlinien deutet auf Beschleunigung und Druckabfall, Erweiterung auf Verzögerung und Druckanstieg. Für ein randnahe Teilchen würde also bei reibungslosen Strömungsmedien die kinetische Energie in Punkt b gerade ausreichen, um den Druckanstieg von b nach d zu überwinden. Das Teilchen wäre also in der Lage, von a nach d zu gelangen. Man kann diesen Vorgang auch mit einer Kugel veranschaulichen, die in ein Tal rollt. Wäre die Oberfläche reibungsfrei, so rollte die Kugel von a nach b und weiter von c nach d. Da aber Reibung vorausgesetzt wird, ebenso wie an dem obigen Profil, gelangt das Teilchen nur bis c und rollt dann zurück. Wir haben also in dem Bereich der hinteren Tragflächenkante mit Ablösungserscheinungen, d. h. mit Turbulenzen zu tun. Da nämlich die Reibung auch an einem Profil nicht unterbunden werden kann, so kommt das Teilchen schon bei c zum Stillstand und beginnt rückwärts abzufahren. Es tritt also in diesem Bereich eine Geschwindigkeitsumkehr, d. h. eine Rückströmung auf. Die Folge dieser Rückströmung ist die Bildung von Wirbeln und das Ablösen der Grenzschicht, wodurch ein Druckwiderstand (Wirbelwiderstand) hervorgerufen wird. Je weiter vorn der Ablösungspunkt liegt, um so breiter wird die Wirbelstraße und desto größer der Druckwiderstand. Es versteht sich, daß hinter diesem Ablösungspunkt Luftgeräusche entstehen,

Drock-- ' Druck,9,f7.51467

a 3ta

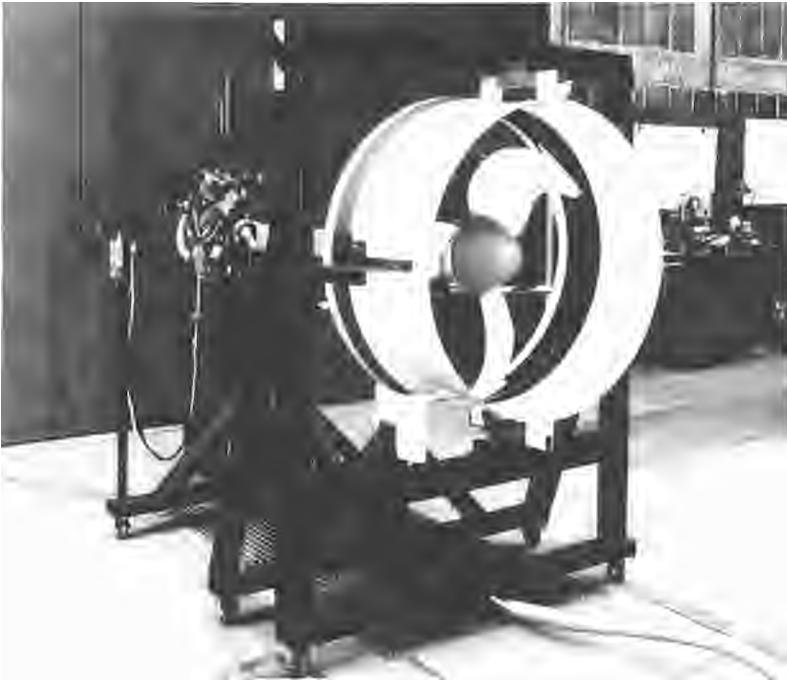


hesch/n,- kerzöge rl-



©

Bild 1



Prüfstand des Mantelstromtriebwerks

so daß wir hier eine Lärmquelle an einer Tragfläche vor uns haben. Das gleiche Phänomen ist Ihnen sicherlich bekannt, z. B. wenn man einen Wasserhahn vorsichtig öffnet, so daß der Strahl glatt und laminar fließt, dann wird man das Wasser nicht hören können. In dem Moment, in dem aus dem laminaren Strahl ein diffuser Wasserstrahl entsteht, in dem Moment ist die Strömung nicht mehr laminar, sondern turbulent und rauschend hörbar geworden. Wie das nächste Bild (*Bild 2*) zeigt, sind zwei Drittel der Oberseite einer Tragfläche von der Turbulenzgrenzschicht bedeckt. Die laminare Unterschicht geht auf der Unterseite etwa bis zur Mitte. Bei größeren Anstellwinkeln kann es zu einem Nach-Vorn-Wandern des Ablösungspunktes kommen, was man hier im Bild unter c sieht. In diesem Fall ist das $C_{a,\dots}$, also der höchstmögliche Auftriebsbeiwert eines Propellers, bereits überschritten. Die Strömung ist abgerissen, der Propeller ist in seiner Leistung wirkungslos und sehr laut geworden.

Die erste akustische Lehre, die man daraus ziehen müßte, wäre also im Fall eines Propellers Laminar-Profile zu benutzen. Durch Verwendung von Laminar-Profilen, bei denen *die* Turbulenzbildung erst nach einer

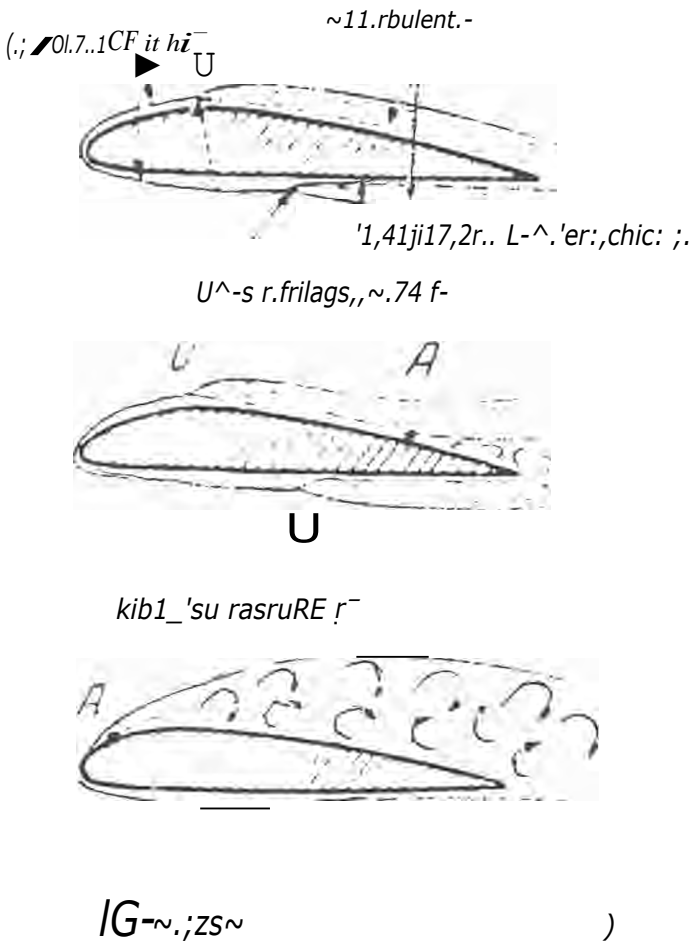


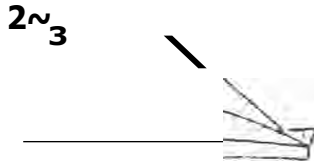
Bild 2

Länge von etwa 40 % der Blattiefe einsetzt, läßt sich der Geschwindigkeitsabfall und die Turbulenz im Nachlauf stark mindern. Allerdings sind Laminarprofile bei freifahrenden Propellern sehr empfindlich im Abreißverhalten. Sie werden allerdings in Axialverdichtern, d. h. in Gasturbinen, verwendet.

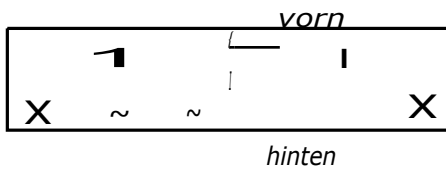
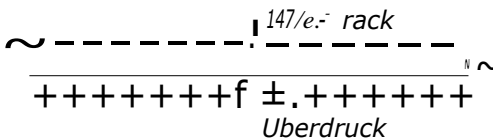
Ein Propeller ist im Grunde nichts anderes als eine rotierende Tragfläche. Bei einer Tragfläche eines Flugzeugs ist zu beobachten, daß die Oberfläche

eine andere Krümmung hat als die Unterfläche. Der Weg eines Strömungsteilchens über die Oberfläche eines Tragflügels ist daher länger als derjenige unterhalb der Tragfläche, folglich wird die Geschwindigkeit auf der Oberfläche beschleunigt und auf der Unterseite beibehalten. Es entstehen daraus Unter- und Überdrücke, wie aus *Bild 3* sichtbar. Das Verhältnis von

Bild 3



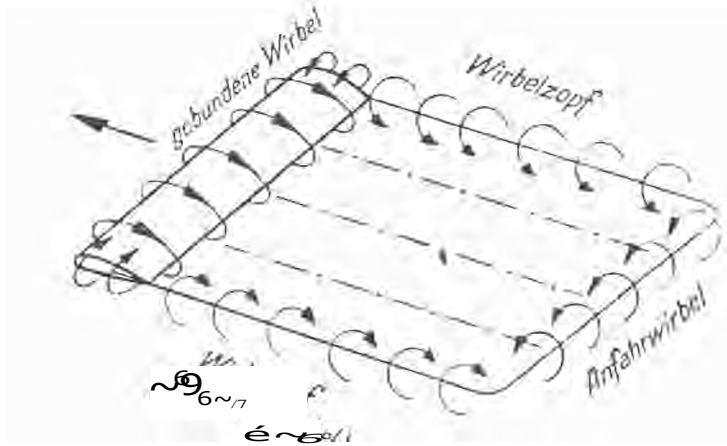
Druckverlauf um ein Tragflügelprofil



b



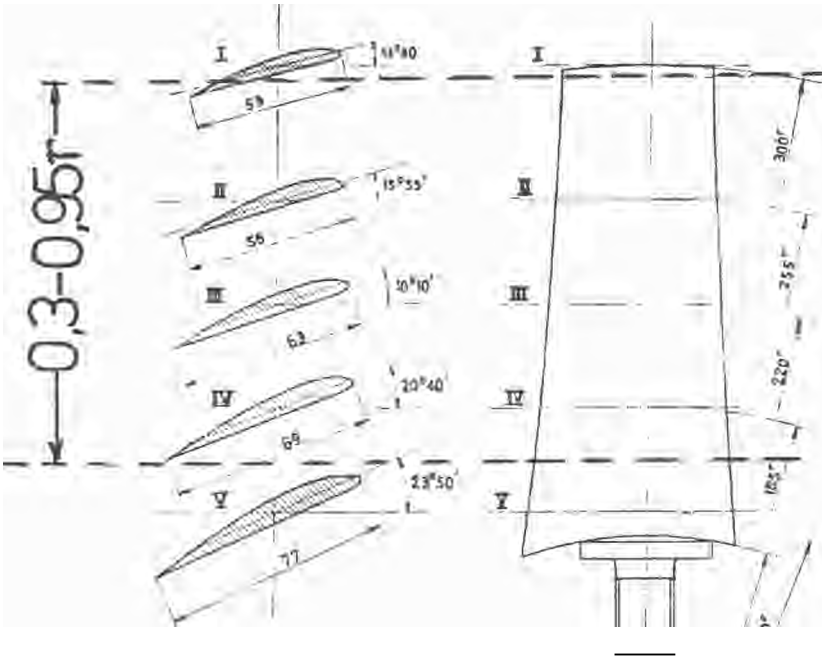
Die Entstehung der Unstetigkeitsfläche unter dem Tragflügel



Das Wirbelsystem des Tragflügels

Unterdruck und Überdruck ist etwa zwei Drittel zu einem Drittel, der Flügel hängt also gewissermaßen an einem luftverdünnten Raum und gleitet nicht auf einem Luftpolster, wie man normalerweise anzunehmen pflegt. Wie ich bereits dargestellt habe, wird der Druckausgleich hinter der Tragfläche stattfinden, aber in noch größerem Maße an der Flügelspitze. Da auf der Oberseite der Unterdruck größer ist als der Überdruck auf der Unterseite, tritt, wie auch aus dem *Bild 3* ersichtlich, ein Wirbelsystem auf. Denkt man sich nun den Flügel bewegt, so fahren die Wirbel in Flugrichtung ab. Die Drehachsen der einzelnen Wirbelbänder liegen dabei also hinter der Tragfläche. Sehr stark ausgebildet sind die Wirbelbänder, die von den Flügelen ausgehen, die sogenannten Wirbelzöpfe. Setzt sich ein Tragflügel in Bewegung, so entsteht ein sogenanntes Wirbelviereck, gebildet aus dem Anfahrwirbel des Tragflügels, den beiden Wirbelzöpfen und den gebundenen Wirbeln um die Tragfläche. Diese Wirbelfläche ist an und für sich kein stabiles System, sie beginnt sich in einiger Entfernung hinter dem Flügel aufzurollen. Es fällt dabei auf, daß die Stromlinien auf der Oberseite der Tragfläche nach innen abgelenkt werden, während sie auf der Unterseite nach außen abgelenkt werden, woraus sich die Drehrichtung des Aufrollens ergibt. Da der Sog auf der Oberseite größer ist als der Druck auf der Unterseite, ist es klar, daß die Strömung um die Tragflächenspitze herumgezogen wird. Zur Neubildung dieser Wirbelzöpfe muß dauernd Arbeit vollbracht werden, und diese Arbeit besteht in der Überwindung dieses induzierten Widerstandes. Der induzierte Widerstand macht Lärm. Eine lärmverhindernde Maßnahme wäre also, ihn zu überwinden. Man kann aber den indu-

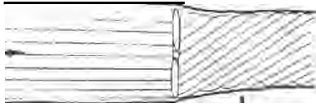
Bild 4



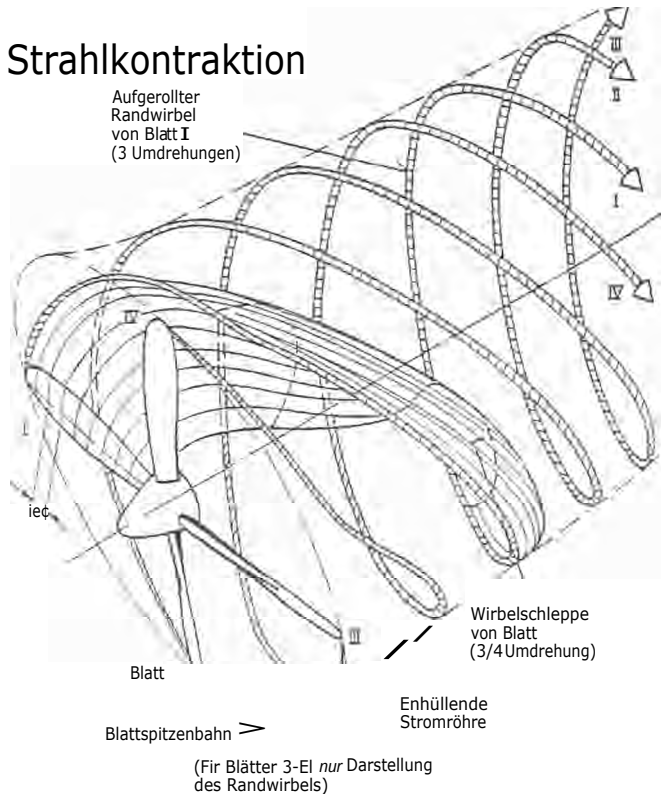
zierten Widerstand an keiner Tragfläche überwinden, es sei denn, man machte sie unendlich lang. Dies ist auch einer der Gründe, warum ich meinen Propeller in einem Rohr mit der Blattspitze in Wandnähe laufen lasse, denn auf diese Weise wird der induzierte Widerstand des Propellers, wenn nicht überwunden, so doch zumindestens sehr eingeschränkt.

Wenn man sich nun einen Propeller ansieht, so kann man ihn mit einem Tragflügel vergleichen (*Bild 4*). Der einzige Unterschied besteht darin, daß die Auftriebsverteilung von der Nabe bis zur Blattspitze sich ständig ändert, um in jedem Punkt des Sehnenabstandes von der Nabe den gleichen Auftrieb zu haben, weil sich ja mit dem Abstand von der Nabe die Drehgeschwindigkeit ortsfester Punkte auf dem Propeller erhöht. Gleichbleibenden Auftrieb fördert ein Propeller allerdings nur im Bereich von $0,3 r_R$ bis $0,95 r_R$. Wie man aus dem mathematischen Modell zur Propellerberechnung sieht (*Bild .S*), ist das Wirbelsystem an einem Propeller nicht anders als das an einer Tragfläche. Auch hier haben wir den Anfahrwirbel, wir haben den Nabenwirbel und die Blattspitzenturbulenzen, nur ist der induzierte Widerstand bei einem Propeller besonders groß, weil die Grenzschicht

Bild 5



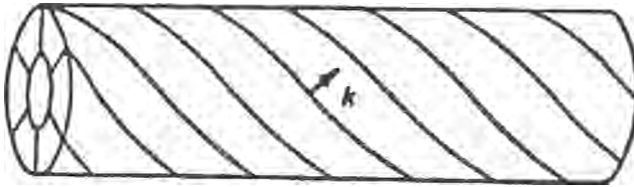
Strahlkontraktion



Mathematisches Modell zur Propellerberechnung (schematisch)

durch die Rotation nach außen geschleudert wird und, je höher die Blattspitzengeschwindigkeit, desto größer ist der Lärm. Wenn man nun, um ihn zu unterbinden, die Propellerblätter von einem Zylindermantel umschließt, dann gibt es besondere Schall-Ausbreitungsbedingungen, die von denen eines freifahrenden Propellers unterschiedlich sind. Sie hängen im wesentlichen von den Fördereigenschaften des Rohres ab. Bei einem laufenden Rotor entstehen nämlich rotierende Schallwellen, die von Tylor

Bild 6



Rotierende Schallmoden

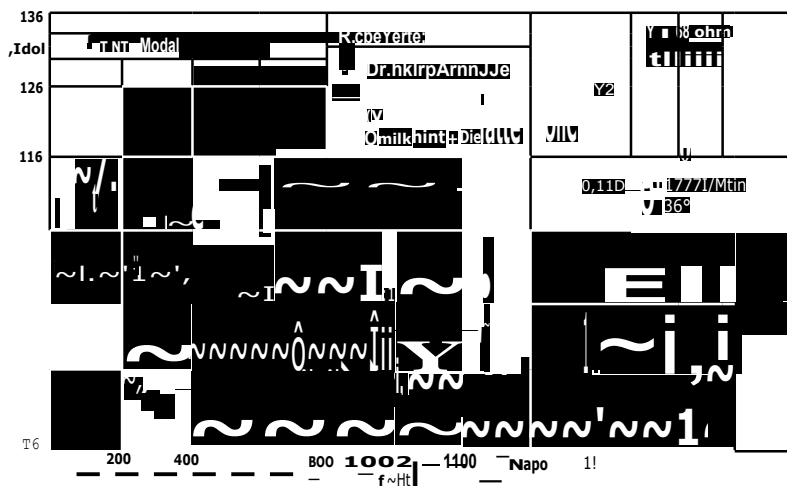
und Sofrin entdeckt wurden, die man »drehende Moden«, »spinning modes« oder »Helikalwellen« (*Bild 6*) nennt. Da die Drehgeschwindigkeit der Spinnmoden höher sein kann als die Blattspitzengeschwindigkeit der Propellerblätter, ist es selbstverständlich, daß ungedämpfte Moden auch dann auftreten, wenn die Blattspitzengeschwindigkeit kleiner ist als die Schallgeschwindigkeit. Der kritische Wert für die Lärmausbreitung in Fanantrieben, also in Mantelantrieben, liegt etwa bei 140 bis 145 m/sec, ein Wert, unter dem meine Werte weit liegen, denn mein Propeller läuft mit etwa 120 m/sec.

Akustik

Damit wären wir bereits bei der Akustik des Propellers. Eine wichtige Eigenschaft unseres Ohres muß vorweg noch erwähnt werden. Wenn zwei Schallschwingungen verschiedener Stärke vorhanden sind, registrieren Geräte jeden Schall und seine Stärke voneinander getrennt. Unser Ohr aber nimmt nur den stärkeren Schall wahr, kann also den schwächeren nicht unterscheiden. Wenn z. B. das stärkere Geräusch von der Luftschraube und das schwächere vom Auspuff des Motors herrührt, wird der Auspuff von uns nicht gehört und wir neigen dazu, das Propellergeräusch mit dem Motorengeräusch zu identifizieren. In der Regel ist es aber so, daß der Propeller um 70 % lauter ist als der Motor, so daß man, wenn man einen Motor leise machen will, zuallererst den Propeller leise machen muß, um bis an das Geräusch des Motors heranzukommen. Erst wenn man den Schallpegel des Motorengeräusches erreicht hat, lohnt es sich überhaupt, Auspuff-, Maschinen- und Ansauglärm des Motors zu verringern.

Schallquellen bewegen sich und senden Schwingungen aus: Sind die Bewegungen unregelmäßig, so gibt es ein Geräusch, sind sie regelmäßig, so

Bild 7



Blattbelastungsanteil = Drehklangharmonische aus Auftrieb und Widerstand
 Blattdickenanteil = Drehklang durch Formwiderstand des Propellers
 Diskrete Töne = stochastische und periodische Störungen im Zu- und Abstrom
 Wirbelgeräusche = Turbulenzen, Druckausgleich auf und hinter dem Propeller, vor allem an der Blattspitze

bildet sich ein Klang. Stehen die Klänge in einem gradzahligen Verhältnis zueinander, so entstehen Intervalle und aus ihnen Harmonien. Der Propeller hat alle diese Lärmarten. Er besitzt ein Terzspektrum und ein Oktavspektrum. Hier wie überall gilt, daß Drucksteigerungen zugleich Steigerungen der akustischen Kräfte hervorbringen. Beides, Druck und Akustik, sind eine Funktion des Massenflusses. Wie aus dem *Bild 7* ersichtlich, hat der Propeller drei besondere Lärmarten: Wirbelgeräusch, Drehklang und diskrete Töne. Diese drei Geräuschkomponenten teilen sich wieder in Untergeräusche auf, die ich Ihnen jetzt im einzelnen vorführen möchte.

1. Das *Wirbelgeräusch* hat allein vier Komponenten. Es entsteht
 a) durch Kraftschwankungen auf den Rotorblättern, die durch Turbulenzen in der Zuströmung erzeugt werden. Es entsteht auch
 b) durch Wirbelablösung an der Hinterkante der Blätter, sowie
 c) durch Druckausgleich an den Blattspitzen (induzierter Widerstand).
 Diese Wirbelgeräusche sind als breitbandiges Rauschen zu hören, wobei der Lärm durch den Druckausgleich an den Blattspitzen dominiert, denn je weiter der Wirbel von der Luftschraubenachse entfernt ist, desto höher ist

der Ton des Wirbels. Auch deswegen ist die Blattspitze am lautesten. Insgesamt stellt das gesamte Wirbelgeräusch der Luftschaube eine komplizierte Mischung von Tönen verschiedener Frequenzen dar.

2. Dagegen hat das **Rotationsgeräusch**, zu dem ich jetzt komme, einen bestimmten und bestimmbaren harmonischen Ton. Das Geräusch, das durch den Formwiderstand des Propellers oder durch seine Blattdicke entsteht, kann folgendermaßen erklärt werden: Eine Luftschaube schiebt beim Anlaufen des Schraubenblattes die Luft vor sich auseinander und erzeugt damit eine periodische Volumenverdrängung in der Rotorebene, die von der Stärke, d. h. Dicke des Schraubenblattes abhängig ist. Der dabei erzeugte Lärm hat nach der klassischen Theorie von Gutin und Lighthill Monopolcharakter. Der Drehklang tritt bei bestimmten Frequenzen, gemessen in Hertz, auf. Das Schallspektrum besteht aus Tönen, die sich in der Höhe durch einen Wert unterscheiden, der ein Mehrfaches des Grundtones ist (*Bild 8*). Nehmen wir die Frequenz des Grundtones oder der Fundamentale mit 1 an, dann besitzen die übrigen Frequenzen ein Mehrfaches einer Reihe ganzer Zahlen, also 2, 3, 4 usw. bis ins Unendliche. Diese Töne werden Harmonische genannt. Bei einem Propeller spricht man von Drehklang-Harmonien. Die Höhe der rein harmonischen Schwingung eines

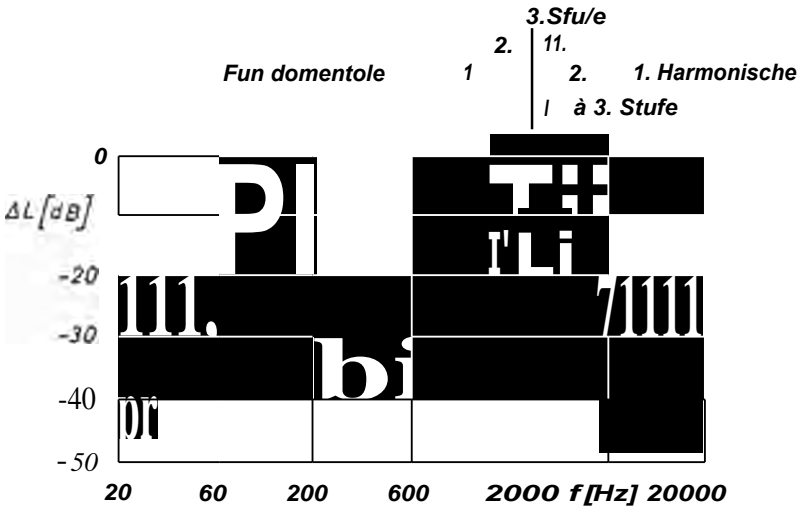


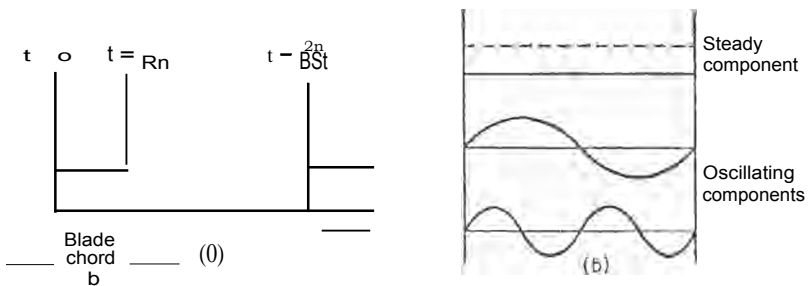
Bild 8

Tons empfindet das Ohr als die Höhe des Grundtons, während die Oberschwingungen als Klangfarbe empfunden werden. Die Amplitude der Oberschwingung ist um so kleiner, je höher die Frequenz der entsprechenden Oberschwingung ist. Je höher aber die Amplitude der Oberschwingungen ist, desto schärfer erscheint der Ton (daraus resultiert das Vorurteil, daß die »Kleinen« immer am lautesten sind). Es gilt daher, die Oberschwingungen so niedrig wie möglich zu halten. Eine Mücke z. B. ist für unser subjektives Lärmempfinden unangenehmer als eine Hummel, obwohl die Hummel lauter ist.

Der Drehklang, der also vom Formwiderstand des Propellers abhängt, erzeugt eine bestimmte Klangfarbe mit Oberschwingungen, und bei diesem Rotationsgeräusch sind es meist nur die zwei ersten Oberschwingungen, also die Grundschwingung eins, Fundamentale, und die zwei höheren Vielfachen, also zwei und drei, die Lärm machen. Die übrigen Obertöne sind wesentlich schwächer und können vernachlässigt werden. Die Schall-emission, die durch den Formwiderstand, also durch die Blattdicke, hervor-gebracht wird, wechselt mit den Propellerradien. An der Luftschraubena-achse z. B. ist der Schall überhaupt nicht vorhanden. Diese Lärmsorte kann verringert werden, wenn man das Blatt des Propellers dünn macht. Die Grenze eines solchen Verfahrens liegt auf der Hand, da ab einer gewissen Dünne sich das Propellerblatt unter der Luftbelastung verbiegt oder zu schwingen beginnt und dabei als neue Lärmquelle strahlt.

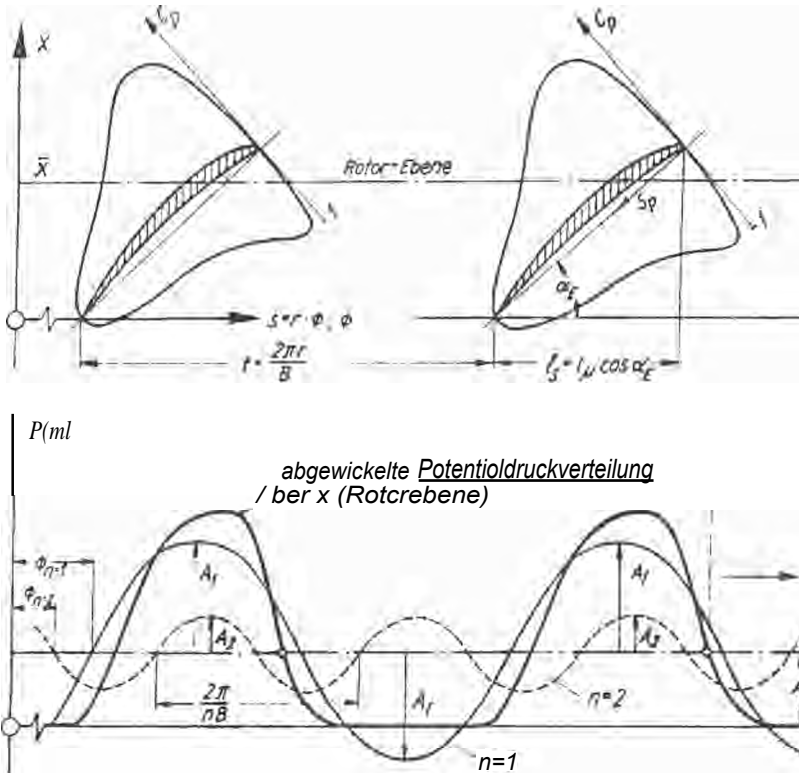
Das Geräusch durch die Blattdicke des Propellers ist eine stetige Komponente im Lärmspektrum, während die Druck- und damit auch die Lärmverteilung, die durch den Auftrieb und Widerstand des Propellers entsteht, eine umlaufende, d. h. eine oszillierende Komponente ist, gemessen von einem festen Punkt in der Rotationsebene. Daraus resultiert der Dipollärm, den man nach dem Druckverlauf der Fourier-Gleichung bestimmen kann. (Bild 9 und 10) Der Blattbelastungsanteil, der nun am meisten Lärm macht,

Bild 9



(a) Pressure distribution on element; (b) Fourier analysis of (a).

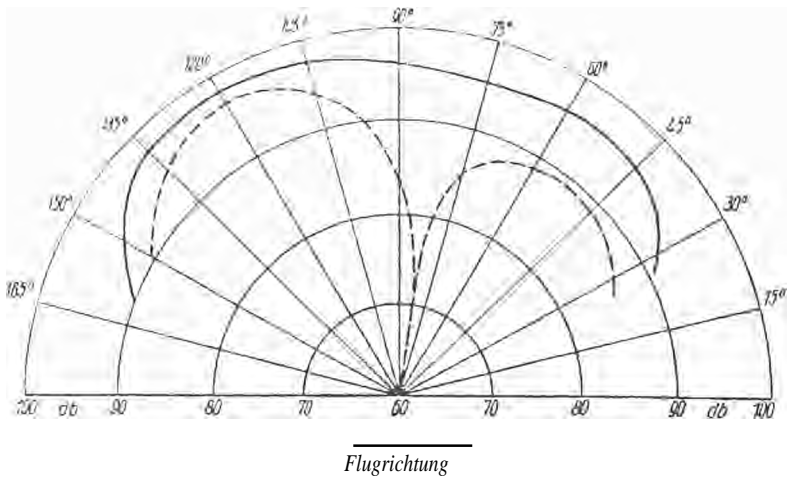
Bild 10



" Bogenmaß : $C_p(\varphi)$ - Potentioldruckverteilung längs 'P' ofoGerllöchen

ist der Drehklang, der aus Auftrieb und Widerstand des Auftriebs durch das Blatt verursacht wird. Lärm macht hier die Druckdifferenz zwischen der oberen und unteren Seite des Schraubenprofils. Der Drehklang entsteht dadurch, daß die am Flügel ausgebildeten Druckfelder in jedem festen Punkt der Schraubenebene ähnliche periodische Druckänderungen erregen. Die Größe des Schalldrucks, das Spektrum und die Richtcharakteristik der Ausstrahlung hängen von der Profilform, vom Anstellwinkel, vom Durchflußvolumen und von den Strahlungseigenschaften der Schraubenscheibfläche ab. Der Drehklang eines Flugzeugpropellers überwiegt in jedem Falle das Wirbelgeräusch. Das Wirbelgeräusch wird überhaupt erst unter der Machzahl 0,4 bedeutend. Über diesen Werten dominiert der Dreh-

Bild 11

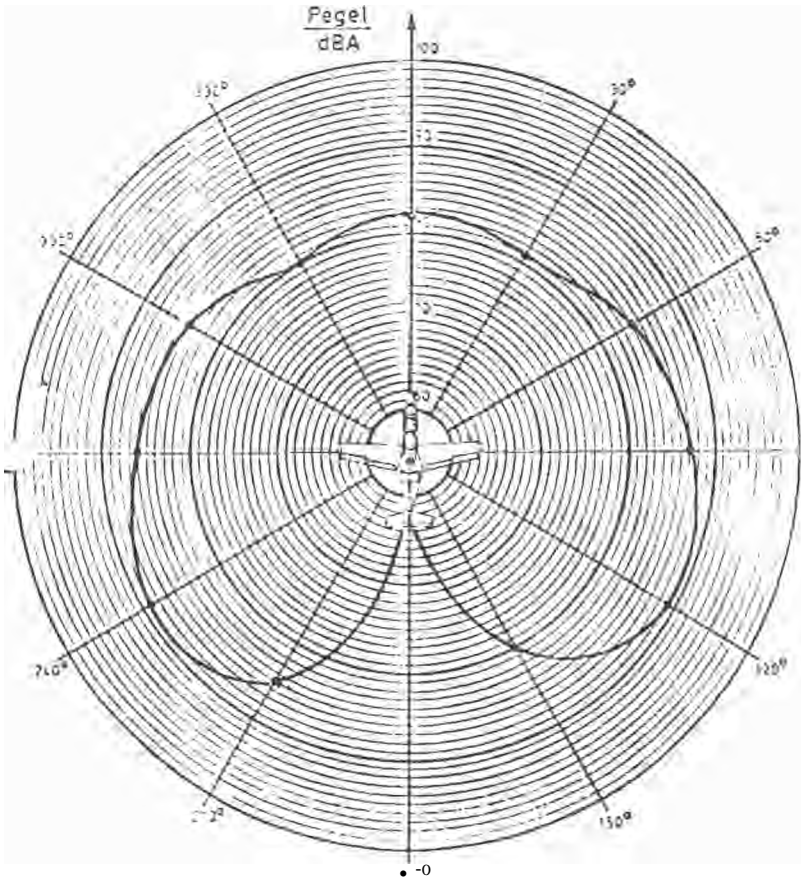


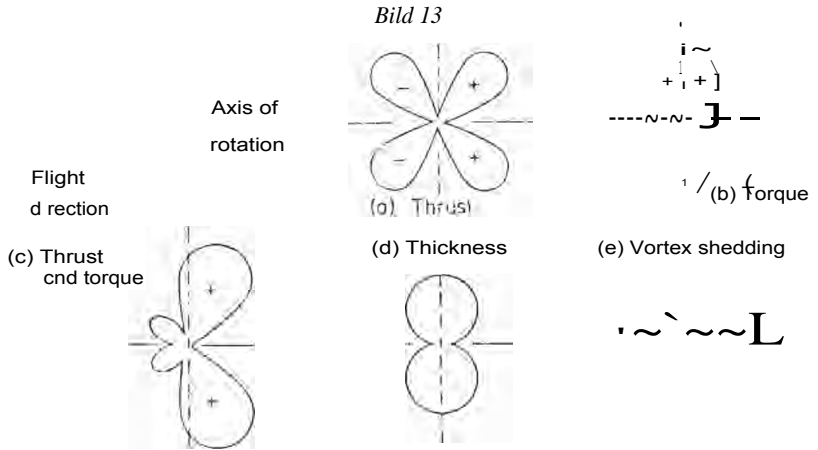
Vektorendiagramm der Schallstärke, 1-te Oberschwingung
 Die ausgezogene Kurve stellt das gesamte rotierende Geräusche, die gestrichelten das Schubgeräusch dar

klang. Am Drehklang eines Propellers läßt sich leider nicht viel ändern. Das Schubgeräusch hat eine etwas andere Ausstrahlungsrichtung als das Geräusch durch die Verdickung. Die größere Ausstrahlung hat man bei diesem Dipol etwa in 120 Grad und eine etwas geringere in der Richtung von 55 Grad. (Bild 11) Man sieht deutlich, daß der Lärm, der von der Blattdicke stetig hervorgerufen wird, relativ gering zu dem Lärm ist, der vom Drehwiderstandschub periodisch hervorgerufen wird. Ein Beispiel aus der Praxis zeigt das Bild 12. Es handelt sich um die Richtungscharakteristik des Fantrainers der Fa. Rhein-Flugzeugbau. Auch hier sehen wir, daß die größte Lärmausbreitung bei etwa 120 Grad liegt. Über die Schallausbreitung, über die Richtungscharakteristiken kann ich hier nicht ausführlich sprechen. Nur soviel, daß man sie in Patterns (Bild 13) idealisieren kann und zu einem Gesamtbild vereinigen, das in der Regel einem Kreis gleicht, der ein Kleeblatt umschließt, dessen beide vorderen Blätterpaare kleiner sind als die hinteren, in Flugrichtung gesehen. Nimmt man die Flugrichtung mit 270° an, so ist die maximale Ausstrahlung bei 30° und bei 120°.

3. Die dritte Lärmquelle am Propeller, die besonders bei Mantelstrompropellern wichtig wird, sind *Störungen im Zustrom*, durch die sogenannte

Bild 12



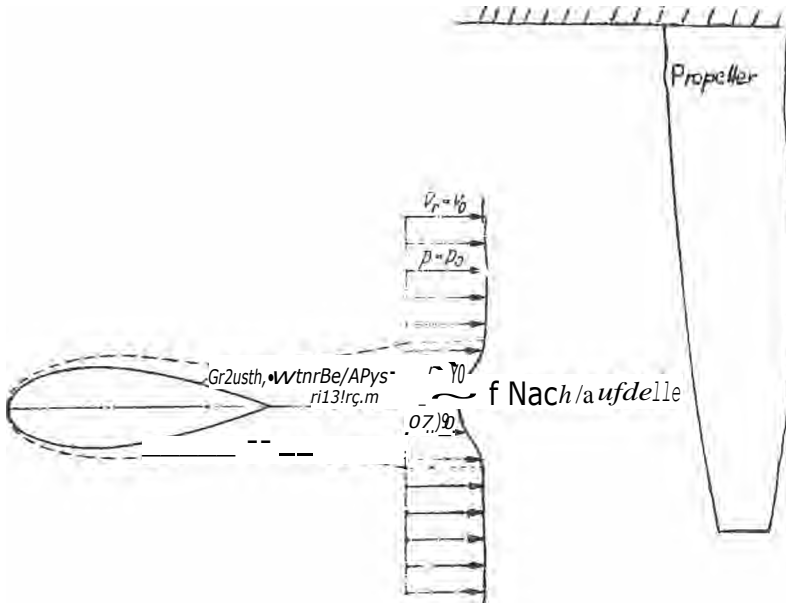


Idealized directional patterns for the various noise sources.

Nachlaufdelle. (*Bild 14*) Sie sind technisch bedingt durch Statoren vor den Rotoren, durch Finnen, durch Mantelstreben überhaupt. Sie entstehen aber auch an den Entdrallern im Abstrom. Während bei solcher Anordnung diese dritte Lärmquelle periodisch ist, jedesmal ein Geräusch abgibt, wenn das Propellerblatt die Störung passiert, so gibt es zweitens auch Störungen, die stochastischer Natur sind, durch Turbulenzen im Zustrom verursacht und zwar durch atmosphärische Bedingungen.

Durchschlägt das Propellerblatt eine Nachlaufdelle, dann entstehen akustische Impulse, sozusagen eine Sirene mit schwachem Wirkungsgrad. Es bilden sich Frequenzen höherer Harmonischer als Vielfache der Grundfrequenz. Wir kennen dies alle vom Summen der Telefondrähte im Wind. Hier haben wir die Karmonsche Wirbelstraße. Es handelt sich hierbei um den Dipol oder Strahler erster Ordnung. Wird der Luftstrom eines Propellers nicht gestört, so dominiert die Grundschwingung, während bei Störungen im Zulauf mehrere sinusförmige Signale gleich großer Amplituden, also Harmonische, sich mit der Grundschwingung überlagern. Diese Erhöhung der Drehklang-Harmonischen wird bei der A-Bewertung besonders wirksam. (Die A-Bewertung ist keine physikalische Bewertung, sondern berücksichtigt unser menschliches Hörempfinden.) Man hat gemessen, daß der Gesamtpegel um jeweils 1,5 bis 2 Dezibel ansteigt, wenn die Anzahl der Störkörper im Zustrom verdoppelt wird. Auch der Einstellwinkel des Propellers hat einen Einfluß auf die Lärmerzeugung. Vergrößert man den Winkel von etwa 19° auf 22° , so gibt das eine Erhöhung des Gesamtpegels

Bild 14



um etwa 1,5 db. Natürlich spielt auch die Rotordrehzahl eine große Rolle. Die Zunahme der Schallintensität erfolgt bei ungestörtem Rotor etwa mit der 6. Potenz der Blattspitzengeschwindigkeit. Ist die Strömung dagegen gestört, sind die Störkörper im Zustrom, nimmt sie nur mit der 3. bis 4. Potenz zu. Nachdem ich nun zur Aerodynamik und zur Akustik des Propellers einiges theoretisch gesagt habe, komme ich jetzt zur Praxis der Lärmdämpfung.

Wenn man sich lärmdämpfende Maßnahmen vorstellt, die ohne größere Leistungseinbuße ergriffen werden können, so kommt man zu folgenden Punkten:

Es bietet sich 1.) die Herabsetzung der Umlaufgeschwindigkeit eines Propellers an. Das sind große, langsam laufende Propeller mit großer Streckung und kleinen Anstellwinkeln, die allerdings am Flugzeug unpraktisch sind. Mehrblatt-Propeller sind auch nicht sehr geeignet, da im ungestörten Zustrom mit zunehmender Zahl der Propellerblätter der Propeller zwar leiser wird, aber in seinem Wirkungsgrad nachläßt. Im übrigen muß man in der Praxis stets mit Störungen des Zustroms rechnen.

2.) Herabsetzung des Formwiderstands, d. h. die Verdünnung des Propellerblatts hat auch ihre Grenze, wie ich bereits sagte. Gleichwohl kann man durch die Auswahl geeigneter Profile und geeigneter Blattformen - auf die ich noch zu sprechen komme - und Materialien einen gewissen Lärmdämpfungserfolg bekommen.

Man kann 3.) das Wirbelgeräusch verringern, indem man den induzierten Widerstand kupiert. Man zieht einen Ring um den Propeller und dichtet auf diese Weise die Blattspitze gegen die Ringwand, so daß kein Strömungsausgleich (oder nur ein sehr geringer) stattfinden kann. Bekanntlich liegt einer der Vorteile der Mantelschraube gegenüber einem freien Propeller in der Möglichkeit, den Standschub bei Beibehaltung der Antriebsleistung und des Durchmessers um 26 % zu erhöhen oder bei Schubbeibehaltung den Durchmesser auf den Faktor 0,6 des freien Propellers zu verringern. Der Grund dafür liegt, wie aus *Bild 15* und *5* ersichtlich, in der Aufhebung der *Strahlkontraktion*, wie sie der freifahrende Propeller hat. Die Schraubenkreisfläche hinter einem freifahrenden Propeller verringert sich nämlich trompetenförmig auf die Hälfte ihrer Fläche, und die Durchströmungsgeschwindigkeit verdoppelt sich im Betrieb. Dabei geht sehr viel Energie verloren. In einer Mantelschraube dagegen wird diese Kontraktion durch den sogenannten Nasenschub und die Nachleitfunktion des Rohrs aufgehoben. Hier bleibt die Geschwindigkeit die gleiche, die Schraubenkreisfläche beträgt 100 %. Vergleicht man nun einen freifahrenden Propeller mit einem Mantelpropeller, setzt bei beiden Propellern gleiche Leistungen an, so stößt man auf die Tatsache, daß ein Mantelpropeller, der einen Diameter von 111 cm hat, die gleiche Leistung hervorbringt wie ein freifahrender Propeller mit einem Diameter von 185 cm. Leider verschlechtert sich das Leistungsverhältnis sehr rasch bei schwindendem Durchmesser. Ein Mantelstrompropeller, der 90 cm im Durchmesser besitzt, hat daher nur noch die Leistung, die etwa ein freifahrender Propeller mit einem Radius von 110 cm hätte. (*Bild 16*)

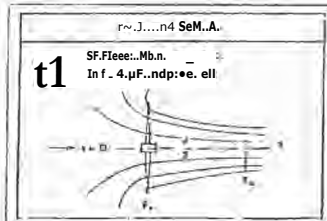
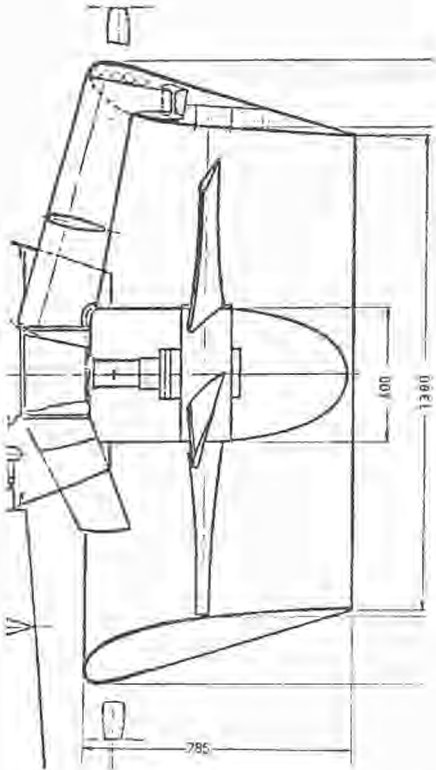
Da also der Radius des Mantelpropellers wesentlich geringer ist als der des freifahrenden Propellers, nämlich um den Faktor 0,6, so ist auch die Blattspitzengeschwindigkeit geringer. Und darin liegt der Vorteil der Mantelschraube für die Lärmerzeugung. Der Mantelvortrieb hat also insgesamt vier Lärmvorteile:

1. Die 26-prozentige Leistungssteigerung durch den Mantelantrieb führt zu einer Herabsetzung der Reisedrehzahl des Motors, was eine sekundäre Reduzierung des Lärms um 1 bis 2 dB (A) bringt. Die primäre Lärmreduzierung überhaupt erzeugt bereits 20 % Lärmeinbuße, da
2. die Blattspitzengeschwindigkeit des fast auf die Hälfte verkleinerten Propellerradius weitaus geringer ist,
3. der lärmerzeugende Druckausgleich an den Blattspitzen durch den Mantel kupiert ist und

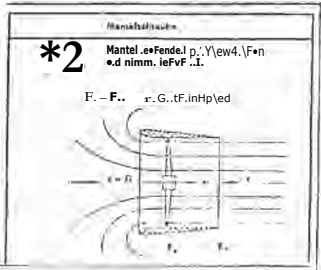
Bild 15

OORNIER

Fig.: 1.2-1 ; Geometrie der Mantelschraube



Re	.....	4
L. isMd.ea.F	.....	445
M. Sc.Ha	.....	w(
• ..	.....	N
f. f...dp.e.+F.n	.....	cl
/.. SW. M.e:ei<A.	.....	0,1
a ..l.Mw..p.	.....	1.01
• tdolddelee	.....



unterschied freifahrende Schraube Mantelschraube

IWEINFLUGZEUGBAU GHBH

Die Mantelschraube als Vortriebserzeuger

Bekanntlich liegt einer der Vorteile einer Mantelschraube gegenüber einem freien Propeller in der Möglichkeit, den Standschub bei Beibehaltung der Antriebsleistung und des Durchmesser um 26 % zu erhöhen bzw. bei Schubbeibehaltung den Durchmesser auf 0,6 des freien Propellers zu verringern. Die Bilder 1 und 2 zeigen die Zusammenhänge.

Bild 16

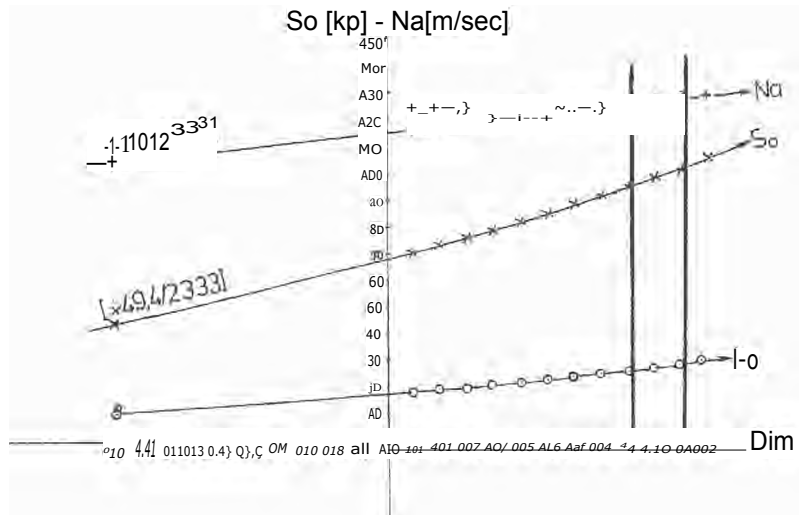
Motor = 28 PS , $N_{mot} = 4000/\text{Min}^{-1}$, $N_{prop} = 2222/\text{Min}$ h[1.8

$$\text{Schub} = S_0 = 0.16^{27} \times N a^2 \times f \times D^2 \text{ [kp]}$$

$$\text{Leistung} = L_0 = 0.16^{68} \times N : f^3 \times D^2 \times \frac{1}{\zeta} \text{ [PS]}$$

$$\text{Blattspitzengeschwindigkeit} = N a \approx 60 \times N \text{ [m/sec]}$$

D	N _a	L ₀	S ₀
0.80 100.6		10.1	44.63
1.00 120.5		18.18	70.9
1.20 144.6		29.07	113.7
1.40 171.3		20	96.6
1.60 197		24.06	111.7
1.80 222		27.05	128.81
2.00 247.2		23.1	86
2.20 272.4		24.2	89.3
2.40 297.6		as +	92.9
2.60 322.8		26.5	96.1
2.80 348		Zw. 22	99.3
3.00 373.2		29.43	103.5
3.20 398.4		30.43	107.1



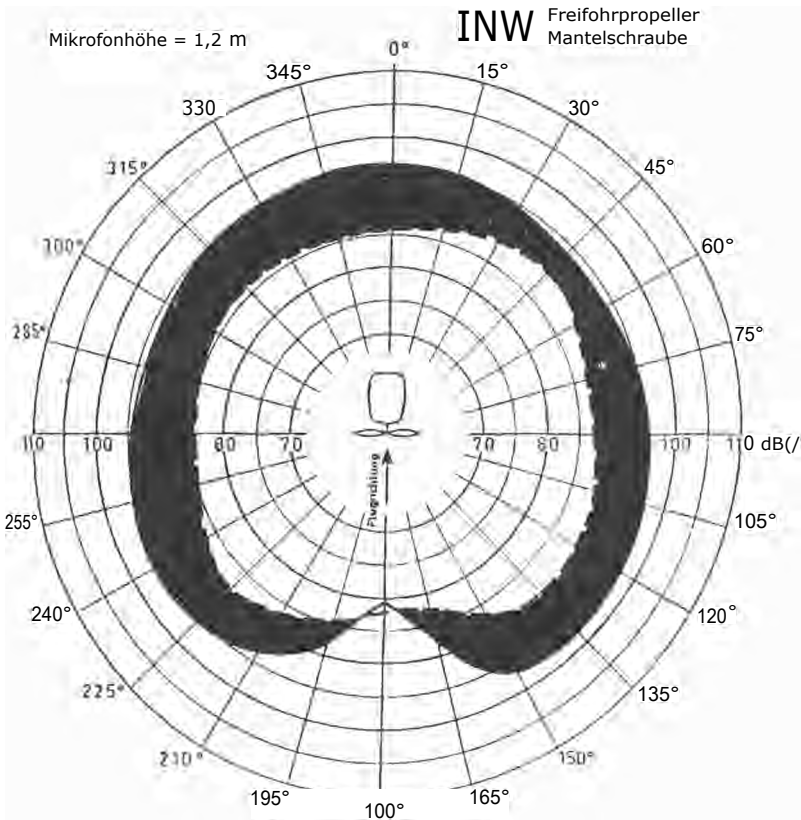
4. der Mantelinnenlärm nach außen abgeschirmt wird.

Gegenüber einem freifahrenden Propeller ergibt sich also beim Mantelstrompropeller eine Lärmreduzierung aus insgesamt vier Komponenten, was auch aus Lärmmessungen (*Bild 17*) deutlich wird. Es sei hier noch erwähnt, daß der Mantelantrieb nicht nur Vorteile, sondern auch Nachteile hat, die nicht nur in höherem Bau- und Kostenaufwand liegen. Ab der

Bild 17

Windrichtung: 240 °

Windgeschw.: 1-2 m/s

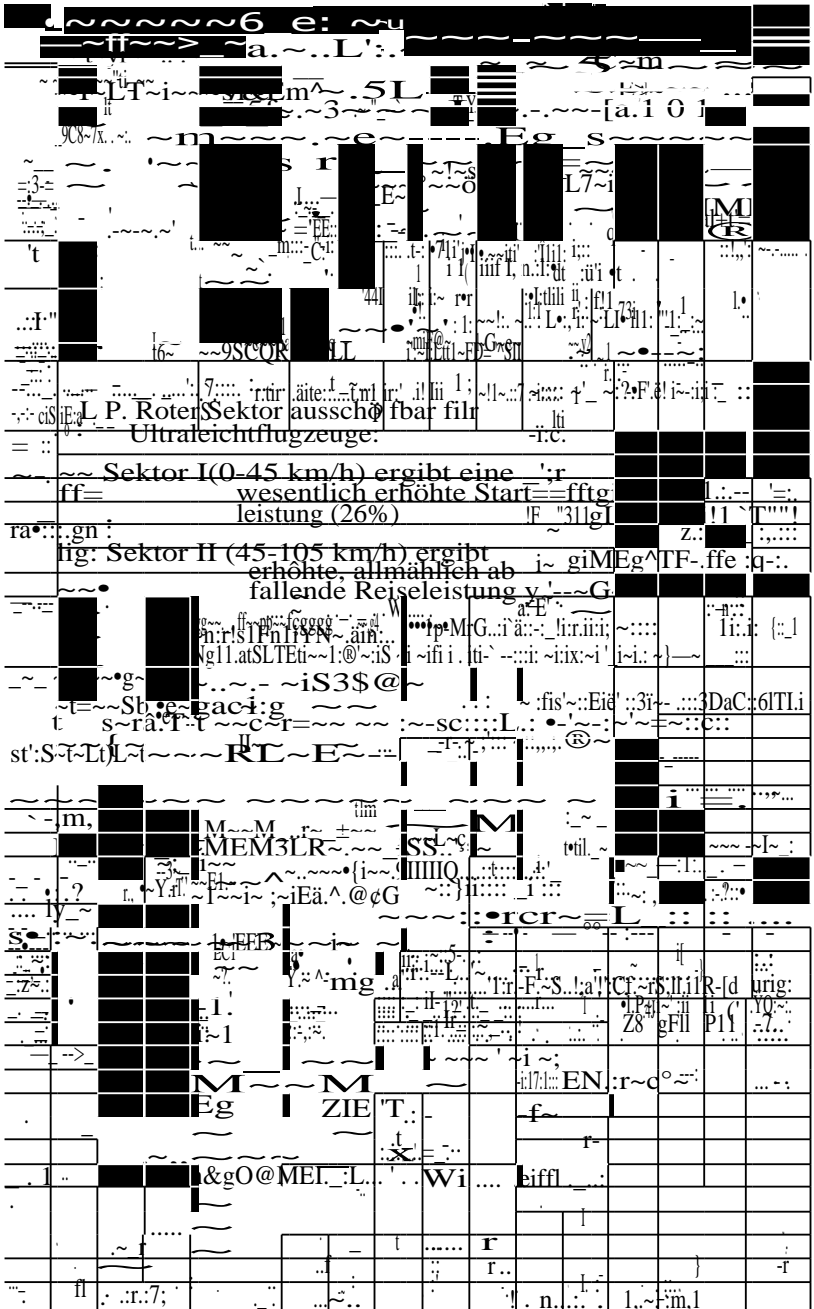


Biott-Anstellwinkel: 19,5°

Schub: 3,5 kN

Vergleich der lärmrichtcharakteristiken eines 3-Blatt-Freifahrpropellers und einer 5-Blatt-Mantelschraube

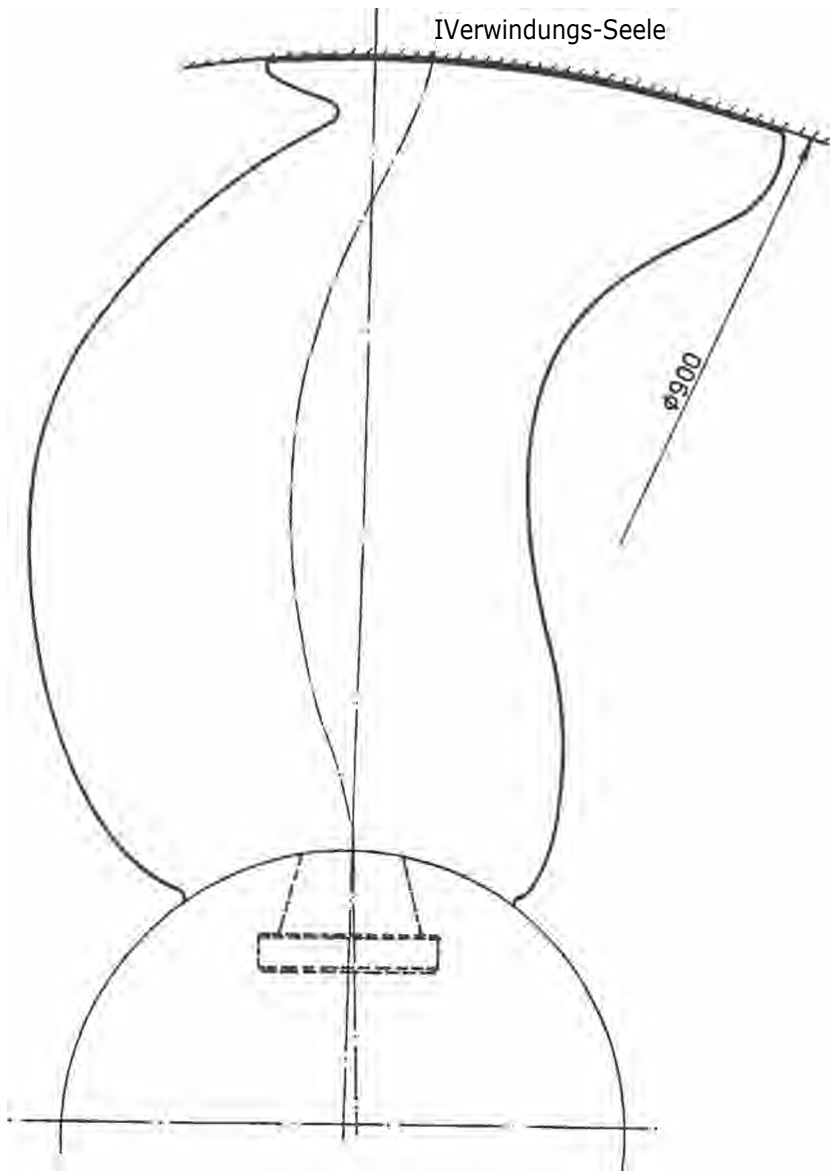
Bild 18



Geschwindigkeit von etwa 100 km/h beginnen der Mantelwiderstand zu wachsen und die Leistungen unter die eines freifahrenden Propellers zu sinken. (*Bild 18*) Aber im Spektrum von 0 bis 100 km/h ist die erhöhte Mantelleistung auszuschöpfen. Das ist aber exakt der Bereich, der für Ultraleichtflugzeuge ausgefliegen wird. Darüber hinaus ist der Mantel sehr empfindlich und reagiert auf Störungen des Zustroms mit Leistungsabfall und Geräuschzunahme. Bei Schwankungen der Blattbelastungen, wie sie durch Nachlaufdellen entstehen, gehen beim Mantelpropeller kurzzeitig oder dauernd die Drehklangharmonien auseinander und in die Höhe. Ich sagte bereits, daß unsere Ohren besonders auf Drehklänge mit höheren Ordnungszahlen reagieren. In der Praxis ist der Zustrom selten laminar, je nach Auslegung und Anbringung des Propellers wird der Zustrom durch die Rumpfkontur oder durch Statoren, Mantelstreben gestört. Im Fall eines mechanisch ungestörten Zustroms muß sogar mit lokalen Turbulenzen der Luft selbst gerechnet werden. Darauf reagiert man mit ungewöhnlichen Maßnahmen, nämlich mit besonderer Formgebung des Propellers. (*Bild 19*) In die Formgebung dieses Propellers, den man auch »Türkensäbel« (Konstrukteur: P. Giese, DFVLR Braunschweig) nennt, sind gleich drei Lärmdämpfungsmaßnahmen eingebaut. Der erste Lärmdämpfungseffekt in Folge der Blattfeilung wird dadurch erreicht, daß die schlagartigen Anstellwinkeländerungen durch die S-schlagförmige räumliche bzw. radiale Ausgleichsströmung auf der Druck- und Saugseite des Blattes gemildert werden. Der zweite damit verbundene Lärmdämpfungseffekt wird dadurch erreicht, daß die Nachlaufdelle schräg angeschnitten wird und zwar über einen möglichst langen Drehwinkel von der Nabe bis zur Blattspitze. Der kurze aber heftige Schlag einer senkrechten Anschneidung wird durch die schräge Anschneidung - ähnlich wie bei einer Wurst - in Rauschen aufgelöst.

Man muß dazu sagen, daß es eigentlich keine optimale Blattform gibt, die in allen Fällen günstig wirken würde. Vielmehr hängt die optimale Form des Rotorblatts von der Geometrie der Störung in der Zuströmung ab. Hier wie so oft ist auch in der Natur alles gegenseitig. Die Druckverteilung eines Propellers in Sehnenrichtung läßt sich durch die Wahl bestimmter Profile beeinflussen. Die Verteilung in radialer Richtung dagegen läßt sich über die Verwindung des Rotorblatts verändern. Die Praxis aber läßt deutlich erkennen, daß eine Verlagerung von Kraftanteilen zu kleineren Radien eine Abnahme des erzeugten Lärms bei allen Harmonischen zur Folge hat. Das ist der dritte Punkt der Lärminderung, denn deshalb finden wir hier bei diesem Türkensäbel die größte Breite des Propellers in Nabennähe. Dieser Verlagerung zur Nabennähe hin sind allerdings Grenzen durch den Leistungsgrad des Propellers sowie durch den maximal zulässigen Anstellwinkel gesetzt. Es kommt noch hinzu, daß ein Propeller im Innenbereich

Bild 19



wesentlich empfindlicher auf Änderungen der Axialgeschwindigkeit reagiert als im Außenbereich, d. h. schon bei kleiner Veränderung der Umlaufgeschwindigkeit kann das Ca., überschritten werden. Man kann sagen, daß bei einer gegebenen Blattspitzengeschwindigkeit der Lärm mit der Zahl der Blätter sinkt. Dies gilt nur für die ungestörte Zuströmung. In der gestörten Strömung ist es besser, die Zahl der Blätter zu begrenzen. Deshalb finden Sie an diesem Gebläse drei Blätter.

Stand Schub-Messungen beider Motoren, sowohl des freifahrenden Propellers mit 1,10 m Spannweite und des Mantelstrompropellers mit 90 cm Spannweite haben in gleicher Entfernung einen Unterschied von etwa 8 db (A) zutage gebracht, was einen Unterschied von etwa 200 % des subjektiven Schalleindrucks ausmacht. Im übrigen möchte ich darauf hinweisen, daß beide Motoren eigentlich nicht verglichen werden können, da der eine ein Dreizylinder und der andere ein Vierzylinder ist. Der Vierzylinder ist eben um 2.500 Knälle pro Minute lauter als der Dreizylinder. Daß er gleichwohl leiser ist als der Dreizylinder, liegt an dem lärmminimierten Propeller. Ich hoffe, hiermit mein Ziel, 55 db (A) in 150 m Höhe Überflug bei Vollast zu erreichen.

Ergebnisse:

Schub bei variablem Einstellwinkel des Propellers und Motorhöchstdrehzahl (a) sowie Beschränkung auf $N=4000 \text{ U/min}^{-1}$ (b):

Winkel	/	N-max (a)	/	N-4000 (b)	/	N-Propeller (a, b)	/	Schub in Kp
19°	/	4350	/	4000	/	2523 // 2333	/	46-48 // 43
20.5°	/	4100	/	4000	/	2378 // 2333	/	50-51 // 48-49
22.5°	/	3950	/		/	2291	/	52-53 //
24.5°	/	3950	/		/	2291	/	53-55 //
26°	/	3650	/		/	2117	/	55
28°	/	3400	/		/	1972	/	49-51
30°	/	3100	/		/	1778	/	49-51

Der beste Schub (ca. 55 Kp) liegt beim Einstellwinkel 26° (gemessen am Winkel zwischen der Profiltiefe der Blattspitze zur Null-Grad-Einstellung des Propellers) und bei einer Drehzahl um 4000 N/min^1 . Die Schubleistung ist im Einstellwinkelbereich 22°-26° annähernd konstant, was auf ein gutmütiges Abreißverhalten bei variablen Anstellwinkeln im Flug schließen läßt. Alle gemessenen Werte sind Standschubwerte.

Schallemission dB (A) bei variablem Einstellwinkel und Motorhöchstdrehzahl (a) sowie Beschränkung auf $N=2200 \text{ U/min}^1$ (b):

Winkel	/	N-max (a)	/	N-2200 (b)	/	dB(A) bei N-max	/	dB(A) N=2200
19°	/	4350	/	2200	/	97.5	/	83.2
20.5°	/	4100	/	2200	/	97.5	/	83.3
22.5°	/	3950	/	2200	/	96.9	/	83.2
24.5°	/	3900	/	2200	/	96.4	/	84.1
26°	/	3600	/	2200	/	95.7	/	84.7
28°	/	3200	/	2200	/	93.6	/	85.3
30°	/	3000	/	2200	/	92.6	/	86.3
32°	/	2500	/	2200	/	90.3	/	86.6

Bei abfallender Drehzahl ($4350-2500 \text{ U/min}^{-1}$) und wachsendem Einstellwinkel des Propellers ergab sich eine Lärmsenkung um 7.2 dB (A). Bei konstanter Drehzahl (2200 U/min^{-1}) und wachsendem Einstellwinkel ($19^\circ-32^\circ$) war die Lärmsteigerung 3.4 dB (A), woraus geschlossen werden kann, daß im Motordrehzahlbereich bis 4500 U/min^{-1} es vorteilhafter ist, die Drehzahl zu senken und die Einstellwinkel bzw. Lademenge der Blätter zu erhöhen, wenn der Geräuschpegel gesenkt werden soll.

Die Lärmmessung fand mit einem Brüel-Kjaer-Präzisionslärmmessgerät der Technischen Universität Berlin im Abstand von 15 Metern zur Schallquelle in Richtung der größten Schallabstrahlung (120° nach hinten, gemessen zur Motorachse) statt.

Die Festsetzung auf 2200 U/min^{-1} des Mantelstrom-Dreiblatt-Rotors ergab sich aus dem Schubvergleich zu einem zweiten Motor mit einem konventionell freilaufenden Propeller, dessen Durchmesser 20 cm grösser war ($D=1.10 \text{ m}$). Dieser Motor leistete 44 Kp Standschub bei Vollast von 3200 U/min^1 und einer Lärmabgabe von 92.2 dB (A), gemessen unter den gleichen Bedingungen. Der Mantelstromantrieb brachte 44 Kp Schub bei bereits 2200 U/min^{-1} und einem Einstellwinkel von 26° . Es wurden dabei 81.4 dB (A) gemessen.

Der Unterschied bei gleicher Schubleistung und geringerem Durchmesser beträgt also 8 dB (A)!

Der Verfasser dankt den Personen und Institutionen, die ihm bei dieser Forschung behilflich waren: Herrn Prof. Dr.-Ing. Claus Oehler (Institut für Luft- und Weltraumtechnik der Technischen Universität Berlin) für die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes und für die Beratung beim Bau des Prüfstandes, dem Rektor des Berliner Wissenschaftskollegs, Herrn Prof. Dr. Peter Wapnewski, sowie dem Kanzler der Techni-

schen Universität Berlin, Herrn Höbich, für die Unterstützung des Projekts, Herrn Dieter König (»König-Motorenbau«, Berlin), Herrn Direktor Hanno Fischer (»Rheinflugzeugbau«, Mönchen-Gladbach) für nützliche Hinweise zur Akustik und Herrn Dr.-Ing. G. Neuwerth (Lehrstuhl für Luft- und Raumfahrt der RWTH Aachen) für die leihweise Überlassung der »Türkensäbel«-Propellerblätter des Konstrukteurs Peter Giese (DFVLR Braunschweig).