

# Die Analyse der Gesetzmäßigkeiten der aerodynamischen Lärmerzeugung von Flugzeugen

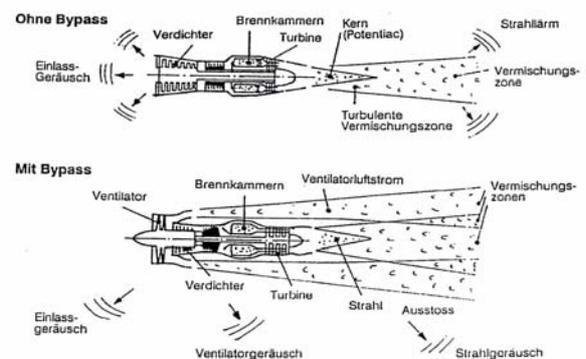
Tepnadse, S. A.; Betaneli, A. J; Apchaidse, A. A.

## 1 Einleitung

P. Dietz und F. Gummersbach haben in Ihrer grundlegenden Monographie /1/ auf folgendes hingewiesen.

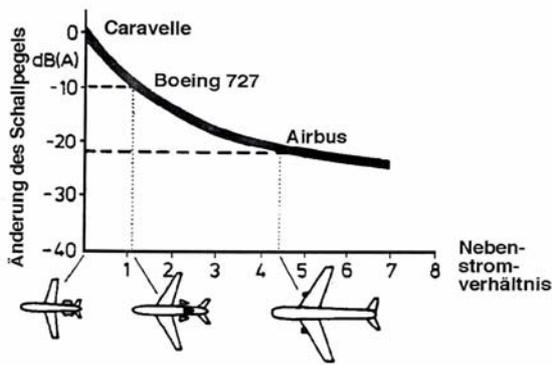
Bei der Entwicklung von Produkten muss der Konstrukteur ständig und in allen Konstruktionsphasen Entscheidungen mit dem Ziel treffen, die gegebenen Produkthanforderungen zu erfüllen. Maschinenakustische Aspekte bleiben dabei, wie die Praxis zeigt, oft unbeachtet, da der Konstrukteur keinen einfachen Zugriff auf das relativ komplexe maschinenakustische Wissen hat. Die Minimierung der Geräusentwicklung stellt in der Regel keine Hauptforderung dar, die eine hohe Aufmerksamkeit erfährt, sondern ist eine - wenngleich immer bedeutendere - Nebenforderung. Dies hat zur Folge, dass eine mögliche Lärmproblematik erst in späten Phasen des Konstruktionsprozesses oder sogar erst bei Einführung des Produkts zutage tritt. Stellt sich beispielsweise beim Prototyp heraus, dass ein Produkt die maschinenakustischen Anforderungen von Seiten des Gesetzgebers oder des Marktes nicht erfüllt, so sind zeit- und kostenintensive Nachbesserungen nicht zu vermeiden. Oft sind dann nur noch Isolations- und Kapselungsmaßnahmen möglich, obwohl die Wahl einer anderen Funktionsweise oder auch nur die Auslegung auf einen anderen Betriebspunkt wesentlich effektivere und einfachere Maßnahmen zur Geräuschminderung bilden können. In der Monographie /1/ ist die prinzipielle Vorgehensweise zur Konstruktion lärmärmer Produkte beschrieben. Ausgehend von den Anforderungen eines Konstruktionsobjektes kann nach der Erstellung eines Konzeptes bzw. bei Bestehen einer Maschine ein Schallflussmodell erstellt werden. Zur zielgerichteten Unterstützung des Konstrukteurs ist die Bereitstellung maschinenakustischer Lärminderungsmaßnahmen in Form von Konstruktionsbeispielen ein sehr probates Mittel, da es dem Konstrukteur direkt Lärminderungsmaßnahmen präsentiert /1/ Als ein gutes Beispiel für lärmarmes konstruieren ist in der Monographie /1/ ein Mantelstromtriebwerk beschrieben. Bei modernen Strahltriebwerken hat sich das Mantelstromtriebwerk durchgesetzt, bei dem neben

einer Verringerung der Geräusentstehung gleichzeitig auch der Wirkungsgrad erhöht werden konnte. Bei der Triebwerksform ohne Bypass strömt die Luft durch das Triebwerk und wird nach der Verbrennung als Freistrahel wieder ausgestoßen. Dabei kommt es zu einer typischen Geräuschanregung eines Freistrahls, indem der heiße Abgasstrahl mit hoher Geschwindigkeit auf die ruhige Umgebungsluft auftrifft, was zur Ausbildung eines Potentialkerns und einer dahinterliegenden Vermischungszone führt.



**Bild 1:** Strahltriebwerk mit und ohne Bypass

Durch eine konstruktive Umgestaltung der Luftführung wird nur ein Teil der Luft durch das eigentliche Triebwerk geleitet, der wie bei dem Triebwerk ohne Bypass einen Freistrahel ausbildet. Der andere Teil des Luftstroms (Mantelstrom genannt) wird am äußeren Triebwerksmantel vorbeigeführt und umhüllt den Freistrahel, **Bild 1** unten. Der außen vorbeigeführte Luftstrom weist dabei eine kleinere Strömungsgeschwindigkeit auf, was zu einer herabgesetzten Geschwindigkeitsdifferenz der Luftströme (zwischen Mantelstrom und Außenluft sowie zwischen Freistrahel und Mantelstrom) führt. Dadurch wird die Wirbelbildung vermindert, welche mittels eines hohen Nebenstromverhältnisses noch weiter reduziert werden kann. Moderne Triebwerke weisen ein Nebenstromverhältnis von mindestens 1:5 auf (**Bild 2**).



**Bild 2:** Lärminderung in Abhängigkeit des Nebenstromverhältnisses

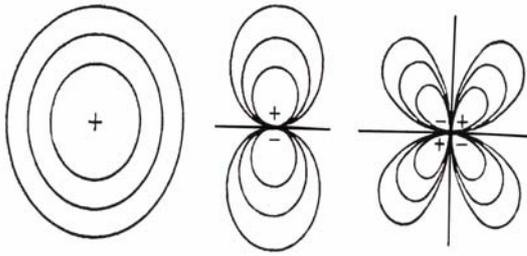
In diesem Zusammenhang wurden vom Institut für Flugwesen der Georgischen Technischen Universität, theoretische und experimentelle Forschungsarbeiten durchgeführt, die denen in der Monographie aufgeworfenen Ideen entsprechen und welche für die Flugsicherheit sehr wichtig ist.

Die folgende Arbeit umfasst jenen Teil der durchgeführten Untersuchungen, bei der die Gesetzmäßigkeiten der aerodynamischen Lärmerzeugung des Flugzeugs besprochen werden.

## 2 Die Ursachen der aerodynamischen Lärmerzeugung

Im Unterschied zu akustischen Tönen, die mit den Schwingungen der festen Körper zusammenhängen, wird der aerodynamische Lärm durch die Turbulenzstruktur der Luftstrombewegung bestimmt. Er entsteht bei hohen Reynoldszahlen ( $Re > 10^3$ ) im Strom. Die Turbulenzbewegung des Stromes und die von ihr hervorgerufene akustische Ausstrahlung werden als einheitliche makroskopische Bewegung im Medium besprochen. Die Gesetzmäßigkeiten, die sich auf der Flugzeugoberfläche und auf seiner Triebwerksanlage bilden und entwickeln, sind höchst vielfältig. Die komplizierte Wechselwirkung der Turbulenzstrukturen der Strömungen bestimmt das gemeinsame akustische Feld des Einheitssystems der Zelle und der Triebwerksanlage des Flugzeugs. Turbulenzbewegungen, die solch ein Feld bilden, sind in folgenden Zonen zu lokalisieren: bei Berührung mit der Flugzeugoberfläche; in den inneren Kanälen des Motors; in den vom Motor herausgeströmten reaktiven Strahlen; in den Wirbelbewegungen, die sich hinter den Flügeln bilden und hinter den Bestandteilen des Flugzeugs die eine schlechte Windschlüpfigkeit haben. Die Wechselwirkung der Wirbel und akustischen Bestandteile des Turbulenzstromes bestimmen die Gesetzmäßigkeiten der Turbulenzstruktur und der akusti-

schen Schwingungserzeugung. Die Zonen, die Turbulenzbewegungen umfassen, erregen die Schallschwingungen im nahe gelegenen Medium, die sich noch in einer großen Entfernung fortpflanzen. Hierbei: je höher der Turbulenzgrad des Stromes, desto mehr seiner kinetischen Energie wird in akustische Schwingungsenergie umgewandelt. Es sei außerdem auch jener Umstand angemerkt, dass die Lokalisation solcher Turbulenzbewegungen sogar in den Zonen der Wirbelbewegungen erfolgt, die von diesen Zonen beim Entfernenvorgang auf das potentielle akustische Feld übergeht. Die Ursache besteht darin, dass die Wirbel großen Maßes in Wirbel minderen Maßes umgewandelt werden und entsprechend die stufenartige Überführung der Turbulenzenergie erfolgt. Das bedeutet, dass die Wirbel großen Maßes als Quellen der akustischen Ausstrahlung in den Zonen wo sie sich bilden, oder nah bei ihnen, nicht besprochen werden können. Mit zunehmender Entfernungen erfolgt ihre Transformation und sie wandeln sich in die effektiven Quellen des aerodynamischen Lärmes um. Die Quellen der akustischen Ausstrahlungen werden nach den Mechanismen, mit denen die kinetische Vorschallenergie des Stromes in die akustische Energie übergeht, in Klassen geteilt. Unter diesen ist der Monopol am einfachsten (**Bild 3.1**). Er entsteht in jenem Abschnitt des Stromes, wo die periodische Änderung des Wirbelumfangs oder der Gasmasse erfolgt. Quellen eines Monopols können, die pulsfähige Strömung des Strahles von dem Auspuffrohr des Motors, der Vorgang des pulsfähigen Brennens der Mischung des Brennstoffes und der Luft und andere, sein. Der Dipol gehört zu einer komplizierteren Klasse der Ausstrahlungsquellen (**Bild 3.2**), er ist eine Gesamtheit von Punktquellen, die zwei gleiche Leistungen haben und voneinander wenig entfernt sind. Noch komplizierter ist der Quadrupol (**Bild 3.3**). Ihn können wir uns als zwei dipolische Quellen, die nicht weit voneinander entfernt bestehen, vorstellen. Solch eine Ausstrahlung ist für den Lärm des Turbulenzstromes und auch für den Lärm, der sich durch die Mischung des vom Motor herausgeströmten Strahles und der Luft bildet, charakteristisch. Stromenergie in die akustische Energie umzuwandeln, ist im Fall eines Dipols unwahrscheinlicher, als für den Monopol und am unwahrscheinlichsten für den Quadrupol.



**Bild 3:** Quellen der akustischen Ausstrahlung: 1- Monopol, 2- Dipol, 3- Quadrupol

Wie bereits bekannt, ist die Kennzeichnung der Schallwelle die Länge ihrer Welle  $\lambda$ , aber die Turbulenzbewegungen werden durch die Wirbel  $L$  charakterisiert. Die Forschung ergab, dass für die Ströme der Vorschallgeschwindigkeit, für deren Machzahl  $M = u/c < 1$  (wo  $u$  die durchschnittliche Geschwindigkeit der Strombewegung ist, aber  $c$  die Geschwindigkeit der Schallfortpflanzung), die Kompaktheit der aerodynamischen Lärmquelle kennzeichnend ist. Die Schallschwingungsfrequenz, die der Turbulenzstrom bildet, ist  $U/L$ . Deshalb ist die Länge der Welle  $\lambda = L/M$ , dabei gilt:  $\lambda > L$ , für die Ströme, die Unterschallgeschwindigkeit haben. Für die Überschallbewegungen wird der Mechanismus der Ausstrahlung transformiert und die Schallquellen werden nicht kompakt. Man bezeichnet die nichtkompakten Quellen des aerodynamischen Lärmes als Wirbel der Turbulenzbewegung, deren Massen größer, als die Länge der Schallwelle ist.  $L > \lambda$

Von uns wurde auch das Verhältnis der akustischen Leistung der Schallwelle  $W$  zu den Parametern des Turbulenzstromes untersucht. Die Forschungen werden für die mono-, di-, und quadrupolischen Ausstrahler in den Fällen der kompakten und nichtkompakten Quellen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 1** angegeben.

Schallquellen Ausstrahler	kompakt	Nicht kompakt
Monopol	$W \sim \rho_0 U^3 L^2 M$	$W \sim \rho_0 U^3 L^2 M^{-1}$
Dipol	$W \sim \rho_0 U^3 L^2 M^3$	
Quadrupol	$W \sim \rho_0 U^3 L^2 M^5$	

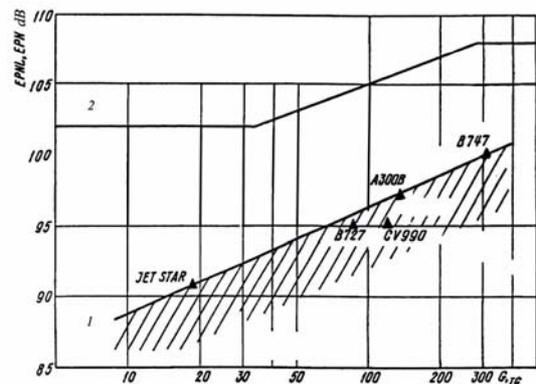
**Tabelle 1**

Aus den Angaben der Tabelle 1 geht hervor, dass die Effektivität, wann mechanische Energie des Turbulenzstromes in die akustische Energie umwandelt wird, zur Machzahl  $M$ ,  $M^3$  und  $M^5$  für den

Monopol, Dipol und Quadrupol entsprechend proportional ist. Solch eine Verminderung der Wirksamkeit von Ausstrahlungsquellen wird in Verbindung mit dem Zuwachs ihrer Kategorie dadurch hervorgerufen, dass die aus den einzelnen Quellen ausgestrahlten Wellen einander teilweise kompensieren. Bei einer Zunahme der Bedeutungen der Machzahl  $M$ , was eine Verminderung des kompensationsfähigen Effekts von Wellenenergien hervorruft, wird die Länge der Schallwelle  $\lambda$  und das Wirbelmaß  $L$  im gleichen Maß von den einzelnen Quellen ausgestrahlt. Beim weiteren Zuwachs von  $M$ ,  $m > 1$  (nichtkompakte Quellen), erfolgt die akustische Ausstrahlung durch die einzelnen Quellen, die weniger von der Struktur des Monopols abhängen.

**3 Der von der Windschlüpfigkeit der Zelle hervorgerufene Lärm**

Wie wir schon erwähnt haben, ist eine der Quellen des beim Flugvorgang des Flugzeugs entstehenden aerodynamischen Lärmes, der durch die Windschlüpfigkeit seiner Oberfläche hervorgerufene. Es ergab sich, dass der Einfluss bei der Bildung der gemeinsamen Ursache von Lärm groß ist: Die durch die Windschlüpfigkeit hervorgerufene Lärmhöhe der Zelle, der modernen Flugzeuge ist nur um 3- 7 EPN dB geringer, als die Höhe der Normativgrenze, welche zulässig ist. Auf dem **Bild 4** ist die aerodynamische Lärmhöhe der Flugzeuge verschiedener Art beim Vorgang der Landung (schraffiertes Feld).



**Bild 4:** 1- Aerodynamische Lärmhöhe der Flugzeuge bei der Landung; 2- zulässige Grenzhöhe von Lärm nach gültiger Normativakte

Der große Zuwachs des aerodynamischen Lärmes bei der Landung ist dadurch bedingt, dass die entsprechende Gestaltung von Fahrwerken, die Abweichungen der Vorflügel und die Klappe mit genug großen Winkeln berücksichtigt werden. Es ruft die

Trennungen des Luftstromes beim Vorgang der Windschlüpfigkeit und zusätzlich die Erzeugung der starken, nichtstationären Turbulenzwirbel hervor, die seinerseits die Quellen des intensiven Lärmes sind. Es sei angemerkt, dass die Biegung der Stromlinien bei der Wechselwirkung des Turbulenzstromes mit der Oberfläche des Flugzeugs erfolgt (sowohl in den ununterbrochenen als auch in den unterbrochenen Fällen), was die nichtstationären aerodynamischen Kräfte zusätzlich begünstigt. Dies gibt Grund zur Annahme, dass die Dipolabstrahlung den Lärm von Flugzeugen dominiert.

Die durch die Windschlüpfigkeit des Flugzeugs hervorgerufene Lärmhöhe kann durch die empirische Formel:

$$L = 10 \lg \left[ (\sin \theta / R)^2 (v^6 S / \lambda^4) \right] + K, \quad (1)$$

ausgedrückt werden. Wo  $\theta$  ein Winkel ist, der zwischen dem Vektor der Flugzeuggeschwindigkeit und jenem Vektor liegt, der die Entfernung vom Flugzeug bis zum Punkt der Beobachtung umfasst; R- die Entfernung vom Flugzeug bis zum Punkt der Beobachtung;  $v$ - die Fluggeschwindigkeit; S- die Fläche des Flugzeuges;  $\lambda$  - die Flügelstreckung; K - experimentale Konstante, deren Bedeutung von der Art des Flugzeugs abhängt.

Die Experimente haben ergeben: K beträgt für die reaktiven Flugzeuge beim Vorgang des Kreuzerflugs 44 dB, aber für die Flugzeuge die Schraubenmotoren haben 49 dB. Die Lärmhöhen für Flugzeuge verschiedener Art sind bei der Landung ungefähr um 3-6 dB höher, als im Kreuzerflug.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

1. Es wurde der Mechanismus der aerodynamischen Lärmerzeugung des Flugzeugs analysiert. Es wurde der Einfluss der Zellkonstruktion und der Einfluss seiner Bestandteile auf den Vorgang der Turbulenzwirbel im umströmten Strom erklärt, die seinerseits die Erregung der Schallwellen im Medium hervorrufen. Es wurden die Gesetzmäßigkeiten, die den Übergang von der kinetischen Energie auf die akustische Energie verdeutlicht, und die Eigentümlichkeiten der Quellen, die Schallschwingungen erregen, dargestellt.
2. Es wurde das Verhältnis der akustischen Leistung der im Turbulenzstrom erregten Schallwellen zu den Parametern des Stromes festgestellt. Für die Unterschallgeschwindigkeiten des Stromes ( $M < 1$ ) ist die Effektivität, die den Übergang von der mechanischen Energie auf die a-

kustische Energie beschreibt, für die Quellen der Arten von Monopol, Dipol und Quadrupol zu  $M$ ,  $M^3$  und  $M^5$  entsprechend proportional. Für die Ströme der Überschallgeschwindigkeit ( $M > 1$ ) und der schallnahen Geschwindigkeit ( $M \approx 1$ ), wenn die Länge der ausgestrahlten Welle von gleichem Maß oder mehr als das Maß der Turbulenzwirbel ( $\lambda \approx L$  oder  $\lambda > L$ ) ist, verringert sich das Verhältnis der akustischen Leistung (W) bedeutend.

3. Die größte Quelle des Lärmes ist der aerodynamische Lärm bei der Landung des Flugzeugs. Der Biegungsgrad des Stromes vergrößert sich unter dem Einfluss der Vorflügel, dem ausgefahrenem Fahrwerk und der Klappe. Oft erfolgt die Trennung des Stromes hinter den herausgezogenen Bestandteilen. Dies ruft zusätzlich die nichtstationären, aerodynamischen Kräfte hervor und vergrößert bedeutend die Höhe des aerodynamischen Lärmes. Die Berechnungen haben ergeben, dass die Lärmhöhe, die durch die Windschlüpfigkeit der Zelle der modernen Flugzeuge hervorgerufen werden, durchschnittlich um 3-7 EPN dB weniger ist, als die zulässige Grenzhöhe nach den Normativakten, in Einzelfällen ist sie sogar höher.
4. Die Dipolabstrahlung dominiert in den Schallwellen.
5. Die Bedeutungen der empirischen Konstante K, die Formel (1) enthält, beträgt 43-44 dB beim Vorgang des Kreuzerfluges für die reaktiven Flugzeuge, aber für die Flugzeuge, die Luftschraubenantrieb haben 48-49 dB.

#### 5 Literatur

- /1/ P. Dietz, F. Gummersbach, Lärmarm Konstruieren XVIII: Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele, Dortmund/Berlin 2000;
- /2/ Die Methoden der aerophysikalischen Forschungen beim Flug, Moskau „Maschinostroenie“, 1985, 108 s;
- /3/ Lamli Dsh, Panowski G. A. Die Struktur der Atmosphärenturbulenz. Moskau „Mir“, 1966, 64 s;
- /4/ Apchaidse A.A, Iwanow A.A. Die Funkstrahlungsforschung der Zone der vertikalen Überbelastung der Flugzeuge in den Schicht-Regenwolken. „Gidrometeoizdat“, 1989, Seiten 112-115.