

## Der Einfluss konstruktiver Aspekte sowie Betriebscharakteristika auf die Lärmintensität eines Hubschraubers

Betaneli, A.J.; Apchaidse A.A.; Tawadse, N.G.

*Die vorliegende Abhandlung stellt die Arbeit des Institutes für Flugwesen der Georgischen Technischen Universität dar, deren Zielsetzung darin bestand, den Einfluss konstruktiver Aspekte sowie bestimmter Betriebscharakteristika auf die Lärmemission von Hubschraubern zu erforschen.*

*Die primären Lärmquellen wurden festgestellt sowie deren Eingehen in die Gesamtintensität des Lärms eingestuft.*

*Der Einfluss bestimmter Betriebszustände auf die Lärmemission eines Hubschraubers wurde ergründet, eine Spektralanalyse der emittierten Signale für verschiedene Flugzustände durchgeführt (siehe Tab. 1, Literaturverweis /3/).*

*The submitted paper represents the work of the institute of Aviation of the Georgian Technical University, whose objective it was, to classify the influence of constructional aspects as well as certain operating characteristics on the noise emission of helicopters.*

*The primary sources of noise were determined as well as their entering total intensity of the noise was classified.*

*The influence of certain operating conditions on the noise emission of a helicopter was fathomed, a spectrographic analysis of the emitted signals for different flight conditions was accomplished (see Tab. 1, Bibliography /3/).*

### 1 Einleitung

Maschinenakustische Produkthanforderungen gewinnen aufgrund verschärfter gesetzlicher Bestimmungen sowie steigender Marktanforderungen immer mehr an Bedeutung. Die maschinenakustischen Eigenschaften eines Produktes werden weitestgehend in der Konstruktion festgelegt.

Die Aero-Akustik, auf dessen Gebiet Forschungsarbeiten vom Institut für Flugwesen der Georgischen Technischen Universität Tbilissi durchgeführt wurden, ist ein Teil der Maschinenakustik.

Der unangenehme Einfluss des Aero-Lärms auf den Menschen, den er in der Kabine eines Flugkörpers (nahes Lärmfeld) oder auf angrenzendem Gelände eines Flugplatzes (fernes Lärmfeld) er-

fährt, ist sowohl von der konstruktiven Charakteristik als auch vom Flugzustand abhängig. Der von modernen Flugzeugen erzeugte Lärm ist ein Zusammenspiel der Strömungsgünstigkeit der Flugzelle sowie des Lärms von Haupt- und Hilfsanlagen. Darunter ist der Lärm von Treibwerken, sowohl auf der Erde als auch beim Flugvorgang wichtiger.

Allerdings ist das aerodynamische Lärmniveau auf den einzelnen Etappen des Fluges, z. Bsp. auf der Voretappe zur Landung eines Schwergewichtsflugzeuges, welches mit Turbinen-Luftstrahltriebwerken ausgestattet ist, die dann im niedrigeren Leistungsbereich arbeiten, höchst wichtig.

Vom aero-akustischen Standpunkt her ist es daher von Bedeutung, die Ursachen des Lärms beispielsweise eines Hubschraubers sowie die Eigenarten der Fortpflanzung des Lärms zu ergründen. Beides ist verknüpft mit der Akustik seiner Hubschraube, den Charakteristiken des Motors sowie den Betriebszuständen des Hubschraubers.

Der vorliegende Beitrag stellt die Arbeit des Institutes für Flugwesen der Georgischen Technischen Universität und deren Hauptergebnisse auf diesem Forschungsgebiet dar.

### 2 Lärm erzeugende Hauptquellen

Aus Forschungen ergab sich, dass der vom Motor, der Transmission sowie vom Getriebe erzeugte Lärm bei Verwendung eines Turbinen-Luftstrahltriebwerkes für das ferne Lärmfeld nicht von entscheidender Bedeutung sind, da die von ihm erzeugten, hochfrequenten mechanischen Schwingungen rasch in der Atmosphäre verschwinden. Im nahen Lärmfeld erfolgt es umgekehrt; diese Schallquellen stellen die Lösung des Problems dar.

Die Steigerung der Motorleistung des Hubschraubers, des Rotorantriebes und der Umdrehungsgeschwindigkeit der Hubschraube ruft die bedeutende Steigerung der Lärmintensität und die scharfe Änderung ihrer Charakteristik hervor, was mit einer vermehrten Strömungsablösung auf den Schraubenblättern verbunden ist. Es ist auch bemerkens-

wert, dass sich die Spektralcharakteristiken des Lärms von Hub- und Steuerluftschrauben voneinander stark unterscheiden. Dies ist auf die stark unterschiedliche Umdrehungsfrequenz und das unterschiedliche Abmaß zurückzuführen. Die vergleichsweise niedrige Geschwindigkeit der Hubschraube, der große Durchmesser sowie die komplizierte räumliche Bewegung der Rotorblätter in den Strömungsverhältnissen sowie die geringe Strömungsgünstigkeit bedingen die Rückverschiebung des Lärmspektrums der Schraube im Diapason der niedrigen Frequenz und rufen die Modulation von Schallschwingungen hervor.

Die aerodynamischen Eigenarten der Schrauben eines Hubschraubers und die von ihnen ausgehenden akustischen Quellen haben komplexeren Charakter als die eines Flugzeuges. Ein Aspekt besteht darin, dass die Achse der Hubschraube des Hubschraubers fast senkrecht zum Flugvektor gerichtet

sich je nach Art des Wechsels der aerodynamischen Kraft in die ununterbrochenen und impulsiven Ausstrahlungen teilen; nach dem Spektrum der Ausstrahlungen: in den harmonischen und breiten Diapason.

Oft wird die Ausstrahlung des harmonischen Spektrums als Lärm der Umdrehung sowie die Ausstrahlung mit breitem Diapason als stürmischer Lärm bezeichnet.

Im Unterschied zu den Turboschraubflugzeugen gewinnt bei der Behandlung des Lärmfeldes der Sinn dieses Fachausdruckes an Klarheit. In diesem Fall sind die Bestandteile, die den harmonischen und breiten Diapason des Lärms aufweisen, entsprechend eine Superposition verschiedener Bestandteile von impulsiven und ununterbrochenen Ausstrahlungen. Die erste Tafel stellt die Hauptquellen des Lärms der Schraube eines Hubschraubers sowie deren Charakteristik dar. (siehe **Tab. 1**)

Art des Lärms	Quelle des Lärms	Maximum der Richtung der Ausstrahlung	Spektrum der Schallausstrahlung
Lärm der ununterbrochenen Umdrehung	Zugkraft	$\varphi_M = 20 \div 60^\circ$ $\beta_M = 0$ (Dipol)	mit dem diskreten + breiten Diapason $f_M = 1/T$
Der impulsive Lärm der Umdrehung – das Zusammenwirken des Schraubenblattes und des Wirbels – Kompressionsfähigkeit der Luft	Zugkraft von Blättern	$\varphi_M = 30^\circ$ $\beta_M = 20 \div 30^\circ$ (Dipol)	mit dem diskreten + breiten Diapason $f_M = 1/\tau$
	Widerstandskraft	$\varphi_M = 0$ $\beta_M = 0$ (Dipol)	mit dem diskreten + breiten Diapason $f_M = 1/\tau$
Auspufflärm (ununterbrochen) der Umgegend (der Luft)	Abgasstoß	gleichmäßig im Raum (Monopol)	mit dem diskreten + breiten Diapason $f_M = 1/\tau$
Zusammenwirkung (ununterbrochen)	Tensor der Spannungen	gleichmäßig im Raum (Dipol)	mit dem diskreten + breiten Diapason $f_M = 1/T$

Anmerkung: T – Periode der Folge von Blättern der Schraube;  $\tau$  - Dauer des Druckimpulses;  $\varphi_M$  – Charakteristischer Winkel der Ungleichmäßigkeit der Ausstrahlung in der vertikalen Ebene des Hubschraubers;  $\beta_M$  – Analoge Winkel in der horizontalen Ebene.

**Tab. 1:** Hauptquellen des Lärms der Schraube eines Hubschraubers

ist und nicht ihm parallel, wie es im Fall der Flugzeugschraube ist. Die zweite Eigenart besteht darin, dass die Interferenz der Turbulenzfährte der Hubschraube in Erscheinung tritt, die von der Kabine des genug großen Ausmaßes, welche nicht weit entfernt liegt, bedingt wird.

Hubschrauber mit zwei kleinen Hubschrauben haben weiterhin die Eigenart, dass beide Schrauben miteinander durch die aufgenommenen Strömungen in Wechselwirkung stehen.

Die Ausstrahlung, die aufgrund der Wechselwirkung zu dem nicht stationären Umkreis der Hubschrauben des Hubschraubers entstanden ist, kann

### 3 Der Einfluss des Betriebszustandes auf die Lärmintensität des Hubschraubers

Unter Berücksichtigung der Eigenarten der Lärmerzeugung sowie Lärmfortpflanzung im Umkreis kann man den Schluss ziehen, dass die Charakteristiken der akustischen Ausstrahlung vom konkreten Betriebszustand (Kreuzflug, Landeanflug, „Hängenbleiben“ auf niedriger Höhe, Landung sowie Start), als auch von der Lage des Schalldruckempfängers im nahen oder fernen Lärmfeld des Hubschraubers bedeutend abhängig sind.

Der maximale Betrag des Gesamtlärmes, der beim Kreuzflug in verschiedenen Höhen vom Hubschrauber zum Beobachter (der sich auf der Erde aufhält) erreicht wird, wird gerade über seinem Kopf gemessen. Die Dauer des anregenden Signals ist im Fall des Hubschraubers höher, als die Dauer des analogen Signals, das beim Überflug des Strahlflugzeuges gemessen wird. Dies ist durch die geringere Fortbewegungsgeschwindigkeit des Hubschraubers zu erklären.

Die Erforschung der Eigenarten des von der Schraube des Hubschraubers erzeugten Lärmes beruht auf der Strömungsgünstigkeit, die die Achsenrichtung der Schraube hat, was im Fall von Flugzeugen, welche durch einen Kolbenmotor angetrieben werden, in Erscheinung tritt. Für sie kann die Schätzung des Gesamtniveaus des Schalldruckes im Hauptbereich der Ausstrahlung (50-500 Hz), bei den Flügen in niedrigen Höhen (z. Bsp. 30-350m), durch die empirischen Formeln ausgedrückt werden:

$$L = 16 \log N_{\text{Schr}} - 20 \log d_{\text{Schr}} - 3(n-2) + 38 V_R / a_0$$

$N_{\text{Schr}}$  – aufgebrachte Leistung an der Schraube

$d_{\text{Schr}}$  – der Durchmesser der Schraube

$n$  – die Anzahl der Blätter

$$V_R = d_{\text{Schr}} \pi n_R$$

$n_R$  – Umdrehungszahl der Schraube.

Die Verwendung eines solchen Modells ist für die Hub- und Steuerschrauben möglich, jedoch nur im Zustand des Fluges mit geringer Geschwindigkeit. Im horizontalen Flugzustand, für den Fall, dass die Kreuzgeschwindigkeit  $V_c \geq 70 \text{ m/sek}$  und die Kreisgeschwindigkeit der Blattenden der Schraube  $V_R \geq 210 \text{ m/sek}$ , treten bedeutende Ungleichmäßigkeiten des Angriffswinkels der Blätter und der Luftströmungsgünstigkeit auf den hinteren und vorderen Seiten der Ebene der Rotorumdrehung in Erscheinung.

Beim Umdrehungsvorgang bewegt sich das einzelne Blatt in ständigen Wechselzuständen, die durch die Neigung der Rotorebene zur Richtung der Verschiebung des Hubschraubers erzeugt werden. In Zusammenhang mit der Zunahme der  $V_c$ - oder  $V_R$ -Geschwindigkeit steigt die Geschwindigkeit der Blattenden, und sie kann auf der vorderen Seite der Rotorscheibe Schallgeschwindigkeit erreichen.

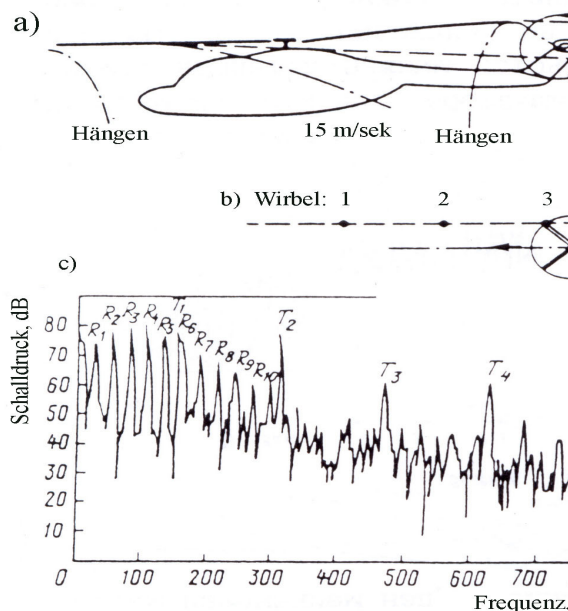
Es ist angemessen, für Blattenden dieser Geschwindigkeiten, Blätter zu verwenden, die ein trans-schallgeeignetes, dünnes Profil haben, zu verwenden. Auf der hinteren Seite der Scheibe können sich bei niedrigen Kreuzgeschwindigkeiten die Angriffswinkel von Blättern solchen kritischen Bedeutungen nähern, für die das Abreißen des Stroms in Erscheinung tritt. In solchen Fällen werden die Ungleichmäßigkeiten des Stroms und die Turbulenzwirbel auf der hinteren Seite der Schraube erzeugt.

Bei der Bestimmung des Gesamtlärmes des Hubschraubers muss deshalb auch die Existenz solcher Bestandteile berücksichtigt werden. Wie z.B die akustischen Signale, die mit der nicht stationären Belastung der Schraube, mit der Dicke der Blätter und mit der impulsiven Ausstrahlung verbunden sind.

Die Geschwindigkeiten der Rotorumdrehung und die des horizontalen Flugs des Hubschraubers sind die Hauptfaktoren, die den akustischen Druck auf die Schraube der gegebenen geometrischen Form bestimmen.

Der impulsive Lärm, der von Blättern der Schraube erzeugt wird, hängt von seiner Orientierung zum Vektor der Bewegung und von der Verschiebungsrichtung beim Treffen im Wirbelfeld ab. Die Schallwellen, die von der Stoßwelle erzeugt werden und die für die Schraube kennzeichnend sind, sowie die bei der Landung und Manövern erzeugten Schallwellen werden als die spezifischen Kennzeichen des Lärms, den der Hubschrauber ausstrahlt, behandelt. Jede Turbulenz, die von Schraubenblättern verursacht wurde, wird durch vier Blätter der Steuerschraube überkreuzt (siehe **Bild 1 a,b**). Die betragsmäßig größten Zusammenwirkungen treten dann in Erscheinung, wenn die Ebene der Blattumdrehung zu der Richtung der Fortpflanzung von Wirbeln  $90^\circ$  beträgt. Dies ruft das Entstehen von Gruppen von Impulsen hervor, die sich in den gleichen Intervallen wiederholen. Die Periode ihrer Wiederholung wird vom Zeitabschnitt bestimmt, in dem in der Ebene der Umdrehung von Blättern der nächste Wirbel getroffen wird. Der Gesamtlärm des Hubschraubers enthält in diesem Fall die vordergründigen Harmoniken, die von der Steuerschraube erzeugt werden, siehe **Bild 1 c**.

**Bild 1 a** zeigt die Trajektorien von Wirbeln, die von den Hubschrauberblättern erzeugt werden, im Zustand des horizontalen Flugs und des „Hängenbleibens“.



**Bild 1 (a,b,c):** Lärm, resultierend aus der Zusammenwirkung von Hub- und Steuerschrauben eines Hub-

**Bild 1 b** stellt die Kreuzpunkte der Trajektorien von Hub- und Steuerschraubenblättern dar.

**Bild 1 c** zeigt das Spektrum mit engem Bereich der Ausstrahlung im Zustand der Landung des Hubschraubers in einer Entfernung von 5 Kilometer (die Geschwindigkeit des Steuerschraubenblattes beträgt 77 km/sec); Das Intervall zwischen den zentralen Frequenzen- 1,6Hz; Effektive Breite- 5,5Hz; R: – die Maximalbeträge des Lärms der Hubschraube; Ti- die Maximalbeträge des Lärms der Steuerschraube.

Der an den Blattenden der Hubschraube, die sich in Trans-Schall- und Überschallbereichen befindet, anliegende verdichtende Strom ist eine bedeutende Quelle der Schallausstrahlung sogar im Zustand des Hängenbleibens des Hubschraubers, wenn auf die Blätter die stationäre und symmetrische Belastung wirkt. Sogar der an den Blattenden gebildete Verdichtungssprung, der für bestimmte Machzahlen in Erscheinung tritt und durch die geometrische Form des Blattendes bestimmt wird, beeinflusst außerdem bedeutend den Lärm im fernen Lärmfeld.

Im Zustand des horizontalen Flugs mit genug hohen Geschwindigkeiten (die Geschwindigkeit der Blattenden nähert sich dann der Schallgeschwindigkeit (Machzahl  $M > 0,8$ ), tritt die intensive Ausstrahlung des Lärms auf die Weise des schneidenden scharfen Geprassels in Erscheinung. Der zu dieser Zeit erzeugte impulsive Lärm wird durch die spitze Amplitude charakterisiert und die akustische Energie pflanzt sich vor allem in der Umdrehungs-

bene des Rotors fort, der Flugrichtung des Hubschraubers entlang.

Es ist bemerkenswert, wie sich aus den Forschungen ergab, dass das hohe Niveau des Gesamtlärms der Schraube des Hubschraubers das ornithologische Problem ausschließt, was im Fall von Flugzeugen in Erscheinung treten kann.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der von uns errungenen Forschungsergebnisse kann man folgende Schlüsse ziehen:

Die Lärmspektralcharakteristiken des Hubschraubers sind hauptsächlich den entsprechenden Charakteristiken von Luftschrauben gleichartig. Der Hauptunterschied zwischen den Arten des Lärms, den Flugzeuge mit Kolbenflugmotoren und mit Hubschraube erzeugen, besteht darin, dass der Lärm des Hubschraubers häufig den impulsiven Charakter hat und dieser macht es schwer, die Eigentümlichkeiten der Generationsbedingungen der Spektralcharakteristiken und die Fortpflanzung zu erforschen, wie das auf **Bild 1 c** dargestellte Beispiel über die Spektralanalyse des Lärms des Hubschraubers für die Frequenzen des engen Bereichs bestätigt.

Im Lärmspektrum tritt ein Ruck von Frequenzen von diskreten Bestandteilen mit der Wirkung von Doppler und dem Wechsel von Charakteristiken  $\varphi_M$  und  $\beta_M$  sowie der Richtung des Schallsignals in Erscheinung. Dies ergibt sich aus dem Phänomen: „der Hubschrauber nähert sich dem Beobachter oder entfernt sich von ihm beim Vorgang des Flugs“. Die Durchschnittsfrequenz der Folge von Blättern für die Hubschraube des Hubschraubers ist  $R \approx 20\text{Hz}$ , aber für die Steuerschraube  $T \approx 100\text{Hz}$ .

Im Allgemeinen hängen diese Frequenzen von der Geschwindigkeit der Umdrehung der Schraube und von der Anzahl an Blättern ab. Das Lärmspektrum des Hubschraubers enthält außer dem Hauptton die Harmoniken, die für die Hub- und Steuerschrauben kennzeichnend sind. Auf die generations- und tonhaltenden Bestandteile üben die aerodynamischen Bedingungen einen Einfluss aus. Der Lärm des impulsiven Charakters kann auch in den Verhältnissen des Flugs bei durchschnittlichen Geschwindigkeiten erzeugt werden, was die konvektive Wechselwirkung der Strömung, die vom

Endteil eines Blattes abgerissen ist, an der turbulenten Strömung, die durch die Bewegung des anderen Blattes erzeugt wird, bedingt.

Das akustische Spektrum des Hubschraubers enthält sowohl die diskreten Bestandteile, als auch die Bestandteile, die einen breiten Bereich zeigen. Das diskrete Spektrum entspricht den entsprechenden Harmoniken der Frequenzen der Folge von Blättern von Hub- und Steuerschrauben. Aber das Spektrum, was durch den breiten Bereich charakterisiert wurde, umfasst praktisch den ganzen Diapason der Hörbarkeit. Die ferne akustische Zone des Hubschraubers ist dem Flugvektor gegenüber nicht symmetrisch. Dies wird vor allem bei Vor- und Rückwärtsbewegungen durch die verschiedenen Bedingungen der Erzeugung von Schallwellen im Umkreis bedingt. Die höheren Niveaus des Schalldrucks im Lärmspektrum des Hubschraubers sind im Diapason der niedrigen Frequenz (weniger als 300 Hz) spürbar, aber die höhere Lärmintensität des Hubschraubers in diesem Bereich wird im Diapason der durchschnittlichen und hohen Frequenz wiedergefunden, die dem Maximum von diskreten Bestandteilen des impulsiven Lärms entsprechen.

Der scharfe, spitze Zuwachs des Auftriebs, die turbulenten Ströme und Strömungsstöße auf den Enden von Drehblättern rufen beim Start des Hubschraubers beim Manöver- oder Kreuzflug auch die Bildung von diskreten und impulsiven Signalen Lärm hervor. Dieser muss dem Mechanismus, der den zusätzlichen Lärm erzeugt und der mit der Wechselwirkung der Zelle und der Hubschraube verbunden ist, hinzugefügt werden.

Es folgt also daraus, dass die akustischen Charakteristika des von verschiedenen Hubschraubern erzeugten Lärms, sich voneinander bedeutend unterscheiden. Hiermit zeichnet sich der Lärm durch das hohe Niveau im Diapason der niedrigen Frequenz aus, der sich auf fernen Strecken fortpflanzen kann.

## 5 Literatur

- /1/ Dietz, P.; Gummersbach, F.: Lärmarm Konstruieren XVIII: Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele, Dortmund/Berlin, 2000
- /2/ Tepnadse, S.A.; Betaneli, A.J.: Apchaidse A.A., Die Analyse der Gesetzmäßigkeiten der aerodynamischen Lärmerzeugung von Flugzeugen, IMW- Institutsmitteilung Nr. 28 (2003), TU Clausthal, S.123-126
- /3/ Saginadze, N.R. ;Betaneli, A.J.: On the Possibility of Improving the Birdproofness of Aircrafts, Georgian Engineering News, 2000, №1, pp. 76-81