

LAUT LEISE LEISER

DLR-Triebwerksakustiker erforschen Brennkammergeräusche

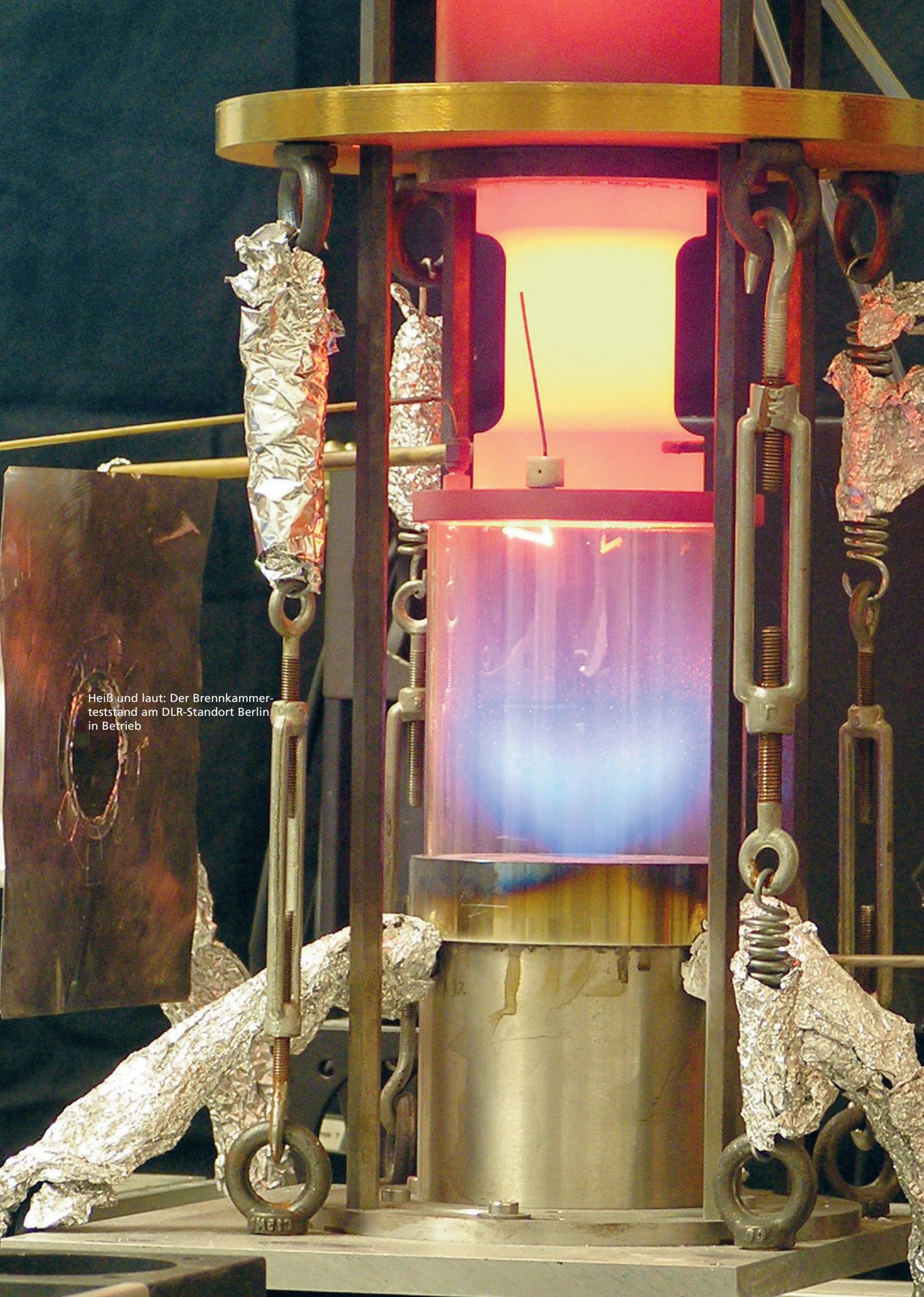
Von Dr. Friedrich Bake, Ingo Röhle und Dr. Lars Enhardt

„Die Propeller machten ein schreckliches Geräusch. Das Flugzeug vibrierte, da es Kolbenmotoren hatte. Sie konnten sich nicht einmal mit ihrem Nachbarn unterhalten. Es war nicht so romantisch, wie ich erwartet hatte ... Fliegen sollte doch etwas Elegantes sein.“

Hans von Ohain, Erfinder des Strahltriebwerks

Vom Wahrwerden des Menschheitstraums Fliegen vor rund einhundert Jahren bis zur alltäglichen Nutzung des Flugzeugs als Verkehrsmittel war es ein kurzer Weg. Geräuschreduzierung war dabei niemals das Hauptziel der Entwicklung. Doch gegenüber Maschinen mit dem ersten kolbengetriebenen Propellertriebwerk sind Flugzeuge mit modernen Turbofan-Antrieben schon deutlich leiser geworden. In den letzten Jahrzehnten wurden vor allem die Strahl- und Rotorgeräusche reduziert. Infolgedessen gerieten die Brennkammergeräusche in den Fokus der Betrachtung, denn prozentual gesehen nahm deren Anteil am Fluglärm zu. Um die Geräusche reduzieren zu können, muss man verstehen, wie diese überhaupt zustande kommen. Die Gruppe Brennkammerakustik des DLR in Berlin widmet sich diesem Thema.





Heiß und laut: Der Brennkammer-
teststand am DLR-Standort Berlin
in Betrieb

Auch wenn der Lärmpegel heutiger Maschinen bereits gesenkt werden konnte, ist der Fluglärm eine Herausforderung für die Forschung. Die Zunahme des Luftverkehrs und dichte Bebauung machen die unangenehmen Auswirkungen für viele Menschen deutlich spürbar. Die drei Antriebsarten Turbofan (Düsenjet), Turboshaft (Helikopter) und Turbo-prop (Propellerflugzeug) dominieren heute den kommerziellen Luftverkehr. Die darin enthaltenen Geräuschquellen sind leicht zu identifizieren: Brennkammer, Rotoren und Strahl.

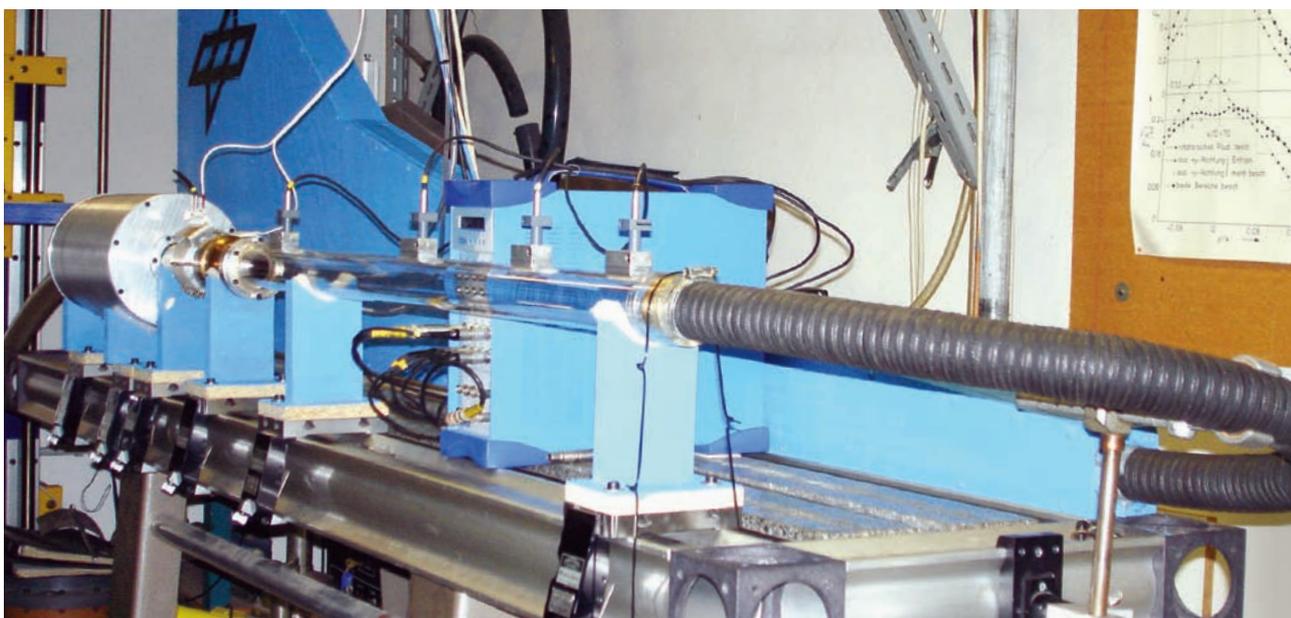
Zu Beginn der Entwicklung von Strahltriebwerken dominierte das Strahlgeräusch die Geräuschemission von Flugzeugmotoren. Das „Auspuffgas“ war im Verhältnis zur Umgebungstemperatur sehr heiß und wurde mit sehr hoher Geschwindigkeit ausgeworfen. Nach der Theorie des britischen Mathematikprofessors und Akustikers Sir James Lighthill (1924-1998) nimmt das Strahlgeräusch mit steigender Geschwindigkeit zu. Die wichtigste Geräusch mindernde Ver-

änderung an Flugzeugmotoren war daher die Erfindung der Fantriebwerke in den 1950er Jahren. Statt eines heißen und schnellen Strahls erzeugt ein Fantriebwerk einen langsameren und kühleren Strahl mit einem wesentlich größeren Querschnitt. Schub ist das Produkt aus Massenstrom und Geschwindigkeit. Reduziert man die Geschwindigkeit, muss man bei gleich bleibendem Schub den Massenstrom entsprechend vergrößern.

Dieser größere Massenstrom wird beim Fantriebwerk durch einen großen Ventilator (Englisch: „Fan“) erzeugt. Das Innere des Triebwerks mit Kompressor, Brennkammer und Turbine wird seitdem als „Kerntriebwerk“ oder „Hauptstrom“ bezeichnet, der Ventilatorstrom als „Nebenstrom“. Die Lighthill-Theorie trifft auch auf einen kalten, wirbelfreien Strahl zu. Zusätzliche Strahlgeräusche werden von der Kombination aus Temperatur- und Geschwindigkeitsunterschieden (Entropieschall) sowie Wirbelbildung und Wirbelauflösung verursacht.

Heute trägt der „Hauptstrom“ nur noch einen kleinen Teil zur Schubleistung bei. Dadurch hat der Anteil der Strahlgeräusche am Gesamtgeräusch abgenommen, der prozentuale Anteil der Rotorgeräusche aber zugenommen. Mit neuen Materialien für die Rotoroberflächen und durch die Formoptimierung mit Hilfe der Strömungssimulation in modernen Hochleistungscomputern konnten die Entwickler den Rotorlärm bereits deutlich reduzieren. Infolgedessen setzte sich der europäische Zusammenschluss zur Verbesserung des weltweiten Flugtransportsystems, das Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE), das Ziel, den empfundenen Lärmpegel von Flugzeugen bis zum Jahr 2020 um 50 Prozent zu verringern.

Aufgrund der großen Vorlaufzeiten in der Triebwerksentwicklung muss sich die Entwicklung von leiseren Triebwerken heute noch stärker auf die Verminderung der Geräusche des Kerntriebwerks und hier speziell auf die Brennkammergeräusche konzen-

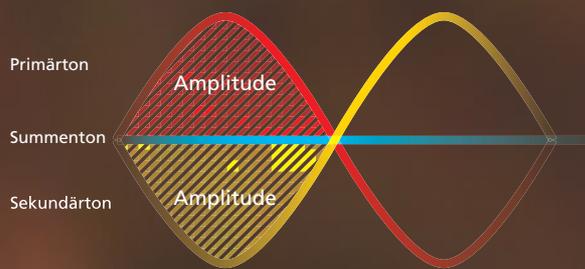


Der Entropiewellengenerator (EWG) im DLR in Berlin: An diesem Versuchsstand wurde das Phänomen des Entropieschalls erstmals experimentell eindeutig nachgewiesen.

MIT DEM RICHTIGEN TON

Drucklufteinblasung kann den Lärm mindern

Triebwerkslärm dominiert den abgestrahlten Lärm des Flugzeugs bei den meisten Flugzuständen. Möglichkeiten zu seiner aktiven Lärmreduzierung werden von der Abteilung Triebwerksakustik des Instituts für Antriebstechnik untersucht. Dabei arbeiten die Wissenschaftler mit Kollegen der Technischen Universität Berlin zusammen.

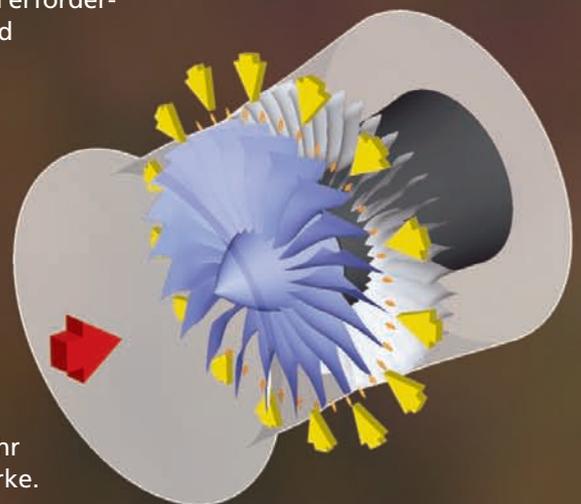


Prinzip der Geräuschminderung bei zeitverzögerter Überlagerung zweier gleichstarker Schwingungen mit gleicher Amplitude

Das Prinzip der aktiven Lärmreduzierung besteht darin, einen störenden Ton mit einem zweiten Ton zu überlagern. Eine Auslöschung des Primärtons erfolgt, wenn der Sekundärton so eingestellt ist, dass seine Sinusschwingungen die Schwingungen des Primärtons genau spiegeln. Dazu muss das Gegenschallfeld über die gleiche Frequenz und Lautstärke (Amplitude) wie die ursprüngliche Schallquelle verfügen.

Einen großen Anteil am Triebwerkslärm hat der Gebläse- oder Fanlärm. Der Fan hat die Aufgabe, möglichst viel Luft für den Schub des Triebwerks zu fördern. Dabei entstehen Töne, deren Grundfrequenz (Blattpassierfrequenz) sich aus der Multiplikation der Fandrehzahl und der Anzahl der Fanschaufeln ergibt. Zusätzlich ist die Struktur des Schallfelds auch abhängig von dem Verhältnis der Anzahl der Fanschaufeln zur Anzahl der nachfolgenden Statorschaufeln (nicht rotierende Schaufeln).

Durch die Einblasung von Druckluft über Düsen am Gehäuseumfang kann ein Gegenschallfeld generiert werden. Die Struktur des dadurch erzeugten Gegenschallfelds ist abhängig von der Anzahl der verwendeten Düsen. Es sollten ebenso viele Düsen wie Statorblätter vorhanden sein. Die Anpassung der Amplitude und der zeitlichen Abfolge des Gegenschallfelds erfolgt über die Einblasmenge und die Winkelposition der Düsen auf dem Gehäuseumfang. Die hierzu erforderlichen Düsen sind klein und leicht. Druckluft steht im Triebwerk ohnehin in ausreichender Menge zur Verfügung, sodass leisere Triebwerke nicht zwingend größere Triebwerke sein müssen. Die Schallminderung ist indessen erheblich: Bei einzelnen Geräuschkomponenten beträgt sie bis zu drei Viertel der vom menschlichen Ohr wahrgenommenen Lautstärke.



Prinzip Aktive Geräuschminderung mit Drucklufteinblasung an einer Fanstufe

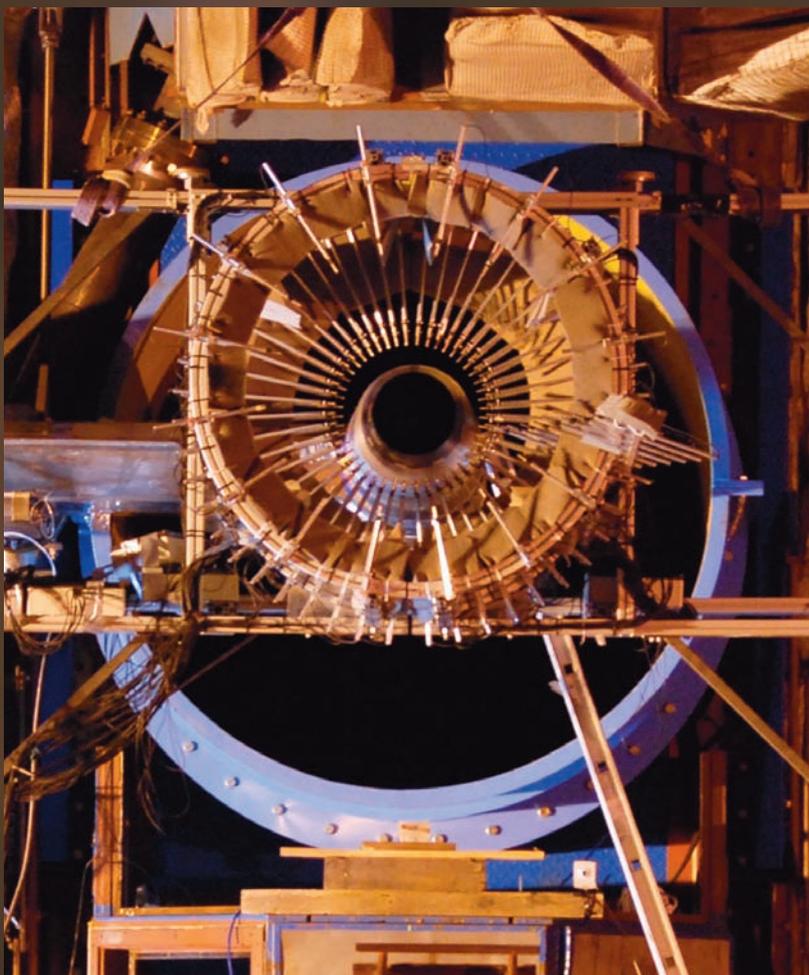
GEZACKT WIRD ES LEISER

Mikrofonmessungen der Turbulenz-Strukturen

Strahlärm ist immer noch die lauteste und lästigste Schallquelle beim Flugzeugstart und deshalb Forschungsgegenstand der Triebwerksakustiker im DLR. Im Projekt LEXMOS führten sie in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner Tests auf einem großen Strahlärmprüfstand in England durch. Dabei sollte der Einfluss der Zacken auf die Umfangstruktur der Strömungsturbulenz im Strahl untersucht werden. Dazu ordneten die Wissenschaftler des DLR 110 Mikrofone ringförmig um den Düsenstrahl an.

So wollten sie ermitteln, wie groß und wie schnell die Turbulenzstrukturen sind, wie gut sie organisiert sind und wie sie sich entlang des Strahls entwickeln. Kernpunkt der Studie sind die großskaligen Strukturen im Strahl. Diese haben einen großen Anteil am gesamten Strahlärm, da sie den Lärm effizienter abstrahlen. Das Anbringen von Zacken in der Düsenhinterkante führte im Versuch zu einer Strahlärminderung von ein bis zwei Dezibel pro Triebwerk. Dies würde die Lärmkontur des Flugzeugs beim Start um 20 bis 40 Prozent verringern.

Die Ergebnisse des DLR zeigen, dass das Aufbrechen der großen organisierten Wirbel durch die Zacken in kleinere Turbulenzstrukturen nur nah an der Düse funktioniert. Demnach wäre es zukünftig erforderlich, die turbulenten Strahlstrukturen noch weiter stromab zu stören, um die Lärm mindernde Wirkung der Zacken zu erhöhen.



trieren. Diese tragen nicht nur in Fantriebwerken, sondern auch in Turbopropmaschinen und Hubschraubermotoren zur Geräuschemission bei.

Der Brennkammerschall setzt sich aus drei Komponenten zusammen: Brennergeräusche, Entropieschall und Wirbelschall. Vieles spricht dafür, dass der Direktschall des Brenners im Geräuschmix der Brennkammer eine eher geringe Rolle spielt. Aktuelle Schätzungen gehen davon aus, dass der Entropielärm etwa den zehnfachen Pegel des Direktschalls erreicht. Um diese Schätzungen experimentell zu überprüfen und die realen Geräuschverhältnisse zu quantifizieren, betreibt die Gruppe Brennkammerakustik des DLR zwei Prüfstände in Berlin, ein dritter ist im Bau.

Im Brennkammerprüfstand sind die wesentlichen Parameter einer realen Brennkammer nachgebildet: Brenner, Verwirbelungszone und Düse sind vorhanden und lassen sich von den Temperatur- und Strömungsverhältnissen her in Bereichen betreiben, die den realen Verhältnissen in der Brennkammer eines kleinen Strahltriebwerks ähneln. Der so genannte Entropiewellengenerator (EWG) hat eine ähnliche Geometrie wie eine echte Brennkammer, ermöglicht es aber, Entropie-Ereignisse von kontrollierter Stärke und Dauer zu erzeugen, ohne dass dafür ein Brenner notwendig ist. Dazu braucht man sowohl kontrolliert erzeugte Temperaturunterschiede als auch eine kontrolliert beschleunigte Strömung. Beides leistet der Entropiewellengenerator.

Die Temperatur des Gases, das in den EWG einströmt, kann durch Platinheizdrähte, die im Lufteinlass verspannt sind, angehoben werden.

Strahlärm auf dem Prüfstand. In der Mitte des Bilds das Düsenmodell mit 20 Zacken an der Hinterkante und drei Ringen aus insgesamt 110 Mikrofonen um den Strahl.

Das geschieht praktisch ohne Zeitverzögerung und gestattet den Forschern, in Stärke und Dauer genau kontrollierte Hitzepulse zu erzeugen. Die Strömungsgeschwindigkeit des Gases lässt sich bis zur Schallgeschwindigkeit an der Düse variieren.

Wissenschaftler des DLR konnten erstmals eindeutig den Entropieschall nachweisen und zeigten, dass dieser tatsächlich um ein Vielfaches lauter ist als der Direktschall, und zwar genau in der theoretisch erwarteten Größenordnung. Die numerische Simulation der Verhältnisse im EWG stimmt nahezu mit den experimentellen Daten überein.

Der Entropiewellengenerator

hat sich inzwischen als eine weltweite Forschungsplattform etabliert. Er soll von einer Arbeitsgruppe am Londoner Imperial College nachgebaut werden und wird von einer Toulouser Forschergruppe und von der Universität in Stanford numerisch simuliert. Das ermutigt die Gruppe, nun auch den Wirbelschall auf ähnliche Weise zu untersuchen. Ein Wirbelschallgenerator ist kurz vor der Fertigstellung.

Noch lassen sich nicht alle Geräuschquellen der Brennkammer eindeutig identifizieren. Der Nachweis, die Quantifizierung und die Analyse der spektralen Zusammensetzung des Entropieschalls war ein wichtiger Schritt, die Analyse des Wirbelschalls ist der nächste.

Autoren:

Die drei Autoren sind Wissenschaftler im DLR-Institut für Antriebstechnik. Dipl.-Ing. Friedrich Bake ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Gruppe Brennkammerakustik in der Abteilung Triebwerksakustik; Dr. rer. nat. Lars Enghardt leitet die Abteilung Triebwerksakustik. Dr.-Ing. Ingo Röhle leitet die Gruppe Brennkammerakustik in der Abteilung Triebwerksakustik.

DER FORTSCHRITT KAM LAUT

Im Vergleich zu Wasser ist Luft ein eher dünnes Medium. Daher ist es ungleich schwieriger, ein Flugzeug zu bauen als ein Schiff. Blätter und Nusschalen schwimmen passiv. Diese Funktion nachzuahmen, gelang daher schon vor Tausenden von Jahren. Die hochkomplexen und dynamischen Material-, Antriebs- und Steuerungsanforderungen des Vogel- oder Insektenflugs technisch abzubilden, ist hingegen alles andere als selbstverständlich und daher extrem schwierig.

Luft wird entweder dann tragfähig, wenn das Verhältnis von Eigengewicht zur Fläche des Fluggeräts einen nur geringen Auftrieb erfordert (Drachen, Leichtflugzeuge, Segelflugzeuge, Luftschiffe) oder wenn die Geschwindigkeit hoch genug ist, um einen sehr großen Auftrieb zu erzeugen (Fracht- und Passagiermaschinen, Düsenjäger). Der Gleitflug ist nach heutigem Wissensstand für größere Nutzlasten ungeeignet. Der Ballonflug mit Luftschiffen hat derzeit keine größere kommerzielle Bedeutung. Was bleibt, sind starke Antriebsmotoren, die dem Flieger den nötigen Schub geben.

Von der Einführung des Motorflugs durch die Gebrüder Wright 1904 bis in die späten 1930er Jahre hat man dafür ausschließlich Kolbenmotoren mit Luftschaube genutzt. Deren Geräusch und Vibration nahm man hin, weil man zunächst keine bessere Idee hatte und der Fortschritt, der sich geräuschvoll Bahn brach, als etwas Positives erlebt wurde.

Mitte der 1930er Jahre kamen dann Frank Whittle in England und Hans von Ohain in Deutschland unabhängig voneinander auf die Idee, die Takte eines Verbrennungsmotors in einem kontinuierlichen Prozess ablaufen zu lassen. Zunächst wird die Luft komprimiert, dann mit Treibstoff gemischt und wie in einem Bunsenbrenner gezündet. Ein Teil des expandierenden Gemischs treibt eine Turbine an, die den Kompressor dreht. Der Rest der Energie erzeugt nach dem Rückstoßprinzip den Strahlschub, der für den Vortrieb sorgt. Um den Prozess in Gang zu bringen, bedarf es nur noch eines Anlagers, der entweder elektrisch oder mit einem kleinen Kolbenmotor betrieben wird. Alternativ lassen sich mit einem solchen Motor auch Propeller (Turbopropmaschinen) und Luftschauben (Turboshaftmaschinen in Helikoptern) antreiben, wobei die Hauptschubleistung durch den offenen Rotor erzeugt wird. Diese drei Antriebsarten dominieren heute den kommerziellen Luftverkehr.