

UNTERSUCHUNG DER LÄRMEMISSION EINES KLEINEN TURBOJET TRIEBWERKS MIT UNTERSCHIEDLICHEN DÜSENTYPEN

R. Schmidt, F. Wellhäuser, A. Hupfer
Aeronautical Engineering, Fakultät Maschinenbau,
Universität der Bundeswehr München (UniBw M), Deutschland

Zusammenfassung

Ein Forschungsschwerpunkt am Institut Aeronautical Engineering an der UniBwM liegt in der Auslegung und Optimierung kleiner Schubtriebwerke bis 500 N Schub. Kleine Turbojet-Triebwerke unterliegen aufgrund der miniaturisierten Bauweise einem relativ geringen Gesamtwirkungsgrad. Ferner führen hohe Abgastemperaturen und Lärmemissionen zu Limitierungen bei den Anwendungsgebieten. Untersuchungen zum Lärmspektrum von kleinen Turbojet-Triebwerken sind bisher nur in begrenztem Umfang durchgeführt worden. Zur Aufklärung des generellen Lärmniveaus wird das Lärmspektrum eines 200 N Triebwerks in unterschiedlichen Winkelpositionen mit Richtmikrofonen vermessen. Über die richtungsabhängige Messung und eine Frequenzanalyse sollen die Lärmquellen identifiziert und das Lärmabstrahlverhalten analysiert werden. Verschiedene Typen von Schubdüsen werden an dem Triebwerk untersucht. Zusätzlich wird die Veränderung des Lärmspektrums und das Abstrahlverhalten durch die Kombination mit einer Ejektordüse untersucht.

1. EINLEITUNG

Kleine Turbojet-Triebwerke in einem Schubbereich bis 1000 N zeichnen sich durch höchste Schub-Gewichtsverhältnisse und niedrige Systemkomplexität aus. Damit eignen sich solche Antriebssysteme besonders für schnelle, autonome Flugsysteme. Elektrische Antriebe erreichen bisher noch nicht die nötige Leistungsdichte und den geforderten Vortrieb bei höheren Fluggeschwindigkeiten. Moderne Bauweisen, wie der Turbofan, können bei kleinen Baugrößen aufgrund der hohen Komplexität und der notwendigen Fertigungsanforderungen nicht oder nur zu hohen Kosten hergestellt werden können.

Den Vorteilen des einfachen Aufbaus bei kleinen Turbojet-Triebwerken steht deren niedriger thermischer Wirkungsgrad unter 10% und der damit hohe Brennstoffverbrauch entgegen. Weitere Probleme bereitet die Integration der kleinen Turbojet Triebwerke in die Luftfahrtsysteme. Die Abgastemperaturen bis 900 °C führen zu einer hohen thermischen Belastung der umliegenden Struktur, die vorzugsweise aus faserverstärktem Kunststoff mit einer maximalen Temperaturverträglichkeit von weniger als 300 °C bestehen. Zudem erschwert der hohe Schalldruckpegel bis zu 120 dB den Einsatz in der Nähe von besiedeltem Gebiet. Im Aufgabenbereich Überwachung und Aufklärung begrenzt die hohe Lärmemission die Einsatzmöglichkeiten, da die Lärmentwicklung die eigene Erkennbarkeit des Luftfahrzeugs erhöht.

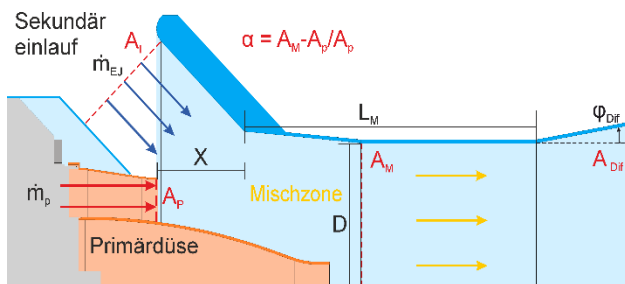


BILD 1: Parameter der Ejektordüse

Ein Konzept zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit der kleinen Turbojet-Triebwerke stellt die Ejektordüse da (BILD 1). Die Ejektordüse arbeitet nach dem Prinzip von Venturi. Der schnell strömende heiße Abgasstrahl erzeugt nach Verlassen der Primärdüse über viskose Kräfte einen Unterdruck. Durch diesen wird aus der Umgebung Sekundärströmung in das Ejektorrohr eingesaugt und mit dem Abgas vermischt. Mit dem um die Sekundärströmung vergrößerten Massenstrom kann die Strömungsenergie effizienter in Schub umgesetzt und der Gesamtvortrieb erhöht werden. Ferner kann durch die Einmischung von Umgebungsluft die Abgastemperatur gesenkt werden.

Das Konzept der Ejektordüse kann auch zur Reduktion oder Veränderung der Lärmemission genutzt werden. Am Institut Aeronautical Engineering der Universität der Bundeswehr München wurden bereits unterschiedliche Ejektordüsen entwickelt und getestet. Diese erreichten eine Schubverstärkung von bis zu 10% und eine Halbierung der Abgastemperatur [1]. Die im Folgenden vorgestellten experimentellen Untersuchungen soll die Auswirkung auf die Lärmemission zeigen.

2. DÜSEN ZUR LÄRMREDUKTION

Die Lärmemission durch die Strahlmischung ist proportional zur achten bzw. sechsten Potenz der Strahlgeschwindigkeit. Entsprechend ist die Reduktion der Strahlgeschwindigkeit eine wirksame Methode zur Lärmreduktion. Außerdem wird durch große Düsendurchmesser und niedrige Geschwindigkeiten die emittierte Schallfrequenz verringert. Niedrige Frequenzen werden durch den Menschen weniger stark wahrgenommen. Dies kann durch die Verrechnung mit dem so genannten A-Filter bewertet werden. Eine weitere Methode zur Lärmreduktion ist die Intensivierung der Strahlmischung. Dadurch wird der Breitbandstoßlärm gesenkt. [2]

2.1. Ejektordüsen zur Lärmreduktion

In einem Bericht der NACA von 1955 [3] wurden Ergebnisse zur Vermessung der Lärmemission eines

Turbojet-Triebwerks in Kombination mit einer kompakten Ejektordüse veröffentlicht. Dazu wurde das Abstrahlprofil und das Frequenzband aus dem Betrieb ohne und mit Ejektordüse untersucht. Das Triebwerk besaß eine konvergente Primärdüse mit kreisförmigem Austrittsquerschnitt. Außerdem wurden zwei unterschiedliche Durchmesser und Längen des Ejektorrohrs miteinbezogen. Eine relevante Lärmreduktion konnte nicht festgestellt werden, obwohl durch die Ejektordüse schallintensive Anteile der Lärmemission zu einem niedrigeren Frequenzband verschoben wurden. Man kam zu der Schlussfolgerung, dass das Triebwerk grundsätzlich intensive Lärmemissionen im niedrigen Frequenzband abstrahlt und somit keine Wirkung erreicht werden konnte. Ferner stelle man ein Resonanzphänomen fest. Bei einem bestimmten Längenverhältnis L/D trat eine Intensitätsspitze (Peak) auf, dessen Pegelstärke deutlich über der vorherigen maximalen Pegelstärke lag.

In einer weiteren Untersuchung von 1958 [4] wurden auch blütenförmige Primärdüsen mit einbezogen. Diese wurden im Verbund mit kompakten Ejektordüsen mit unterschiedlichem Durchmesser und Länge untersucht. Mit einer blütenförmigen Primärdüse mit 12 Lobes in Kombination mit der Ejektordüse wurde eine Lärmpegelreduktion von 13 bis 23 dB in einem Frequenzband von 200 bis 5000 Hz erreicht (BILD 2).

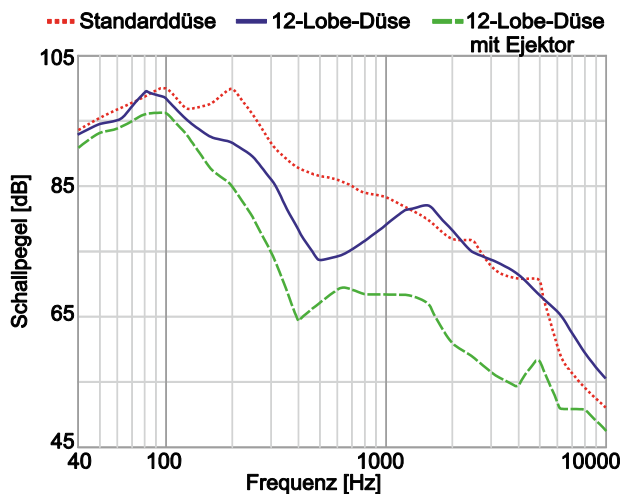


BILD 2: Lärmreduktion durch Ejektordüse mit blütenförmiger Mischerdüse 150° Position (modifiziert von [4])

Die blütenförmige Primärdüse zeigte auch ohne Ejektordüse eine erhebliche Lärmreduktion. Durch die Ejektordüse konnte aber auch der Schubverlust ausgeglichen werden. Eine Erhöhung des Flächenverhältnisses α führt zu einer leichten Lärmreduktion. Das Längenverhältnis der Ejektordüse L/D soll mindesten den Wert von zweimal dem Primärdüsendurchmesser betragen [4]. Das X/D -Verhältnis hat vor allem Einfluss auf die Schubverstärkung, nicht aber auf die Lärmreduktion. Die blütenförmige Primärdüse mit 8 Lobes erreichte in allen Bereichen weniger Lärmreduktion und Schubverstärkung. Dies hängt mit dem geringeren Ausmischungsgrad am Ende der Ejektordüse zusammen.

In der Schlussfolgerung wurde festgehalten, dass Schubverstärkung und Lärmreduktion proportional zum sekundären Massenstrom und Mischungsgrad am Ejektoraustritt sind.

Die Entwicklung wurde zur Reduktion des Überfluglärms zum Beispiel in Form der Daisy-Nozzle (BILD 3) am Flugzeug Douglas DC-8 genutzt [5].

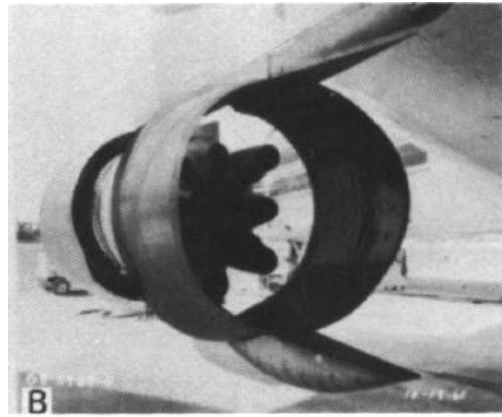


BILD 3: „Daisy Nozzle“ mit Ejektordüse an einer DC-8

Die „Daisy Nozzle“ konnte effektiv gegen tieffrequenten Lärm bei Start und Steigflug eingesetzt werden. Die Schubverstärkung der Ejektordüse kompensierte den Schubverlust der blütenförmigen Primärdüse. Im Flug wurde der Ejektor eingezogen. Das System verursachte jedoch zusätzliche hochfrequente Lärmemission. Letztlich wurde die Turbojet-Ejektor Kombination durch die ersten Low-Bypass-Turbofans abgelöst.

Eine detaillierte Untersuchung der NASA [6] von Mischer-Ejektordüsen ergab ein Lärmreduktionspotential von 10 dB. Dabei wurden verschiedene Primärdüsen, Ejektordurchmesser und Ejektorlängen untersucht. Außerdem wurden verschiedene Techniken erprobt, den Lärm durch Dämmmaterial auf der Ejektordüse zu verringern. Hier konnte weiteres Potenzial für 5 bis 8 dB ermittelt werden.

Die Ejektordüsenteknik wurde später auch an Businessjet-Triebwerken mit kleinem Nebenstromverhältnis angewandt. Die Entwicklung einer schubverstärkenden Ejektordüse für das Triebwerk JT8D-17 [7] brachte eine Lärmreduktion von 3,8 dB und eine Schubverstärkung von 5%. Das System wurde letztlich an einer Gulfstream GII erfolgreich getestet [8]. Dabei wurden bis zu 7% Schubverstärkung nachgewiesen. Außerdem waren die Widerstandsverluste durch die Ejektordüse während des Reiseflugs kleiner 1%. Die seitliche Lärmabstrahlung konnte um 3 dB reduziert werden.

3. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Die Ejektordüse hat in der Vergangenheit bei Turbojet-Triebwerken und Low-Bypass-Turbofans Vorteile bezüglich der Lärmemission erbracht. Kleine Flugtriebwerke bis 1000 N stehen technologisch auf einem mit damals vergleichbarem Level. Vorangegangene Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass aufgrund der Miniaturisierung teilweise andere Randbedingungen gelten und die Technologien nicht direkt übernommen werden können. Entsprechend wird das Potenzial zur Lärmreduktion für kleine Turbojet-Triebwerke untersucht.

3.1. Prüfstand zur Lärmmessung

Da das Triebwerk nicht in einem Luftfahrzeug eingebaut ist, wurde für die Untersuchung die DIN 45643 zur Messung und Beurteilung von Flugzeuggeräuschen nicht herangezogen. Ferner wird nur eine experimentelle Untersuchung

zur Klärung der grundlegenden Verhältnisse bei den kleinen Turbojet-Triebwerken durchgeführt. Ziel der Untersuchung war es die Veränderung des Lärmemissionsverhaltens der am Institut entwickelten Düsen zu beurteilen und zu vergleichen.

Die Untersuchung der Lärmemission soll im Freifeld durchgeführt werden, um Verfälschung durch Reflexion an Hindernissen zu vermeiden. Es wurde ein mobiler Prüfstand (BILD 4) gebaut, auf dem ein 200 N Turbojet-Triebwerk montiert wird. Der Prüfstand verfügt über Ausleger, auf denen Mikrofone auf Stativen platziert werden konnten. Für die akustische Vermessung wurden Richtmikrofone von Sennheiser mit einer Supernierencharakteristik genutzt. Die Empfindlichkeit beträgt 21 mV/Pa. Der zulässige Frequenzbereich ist 40-20000 Hz, wobei unterhalb von 100 Hz und oberhalb von 15 kHz eine Dämpfung auftritt. Die Mikrofone konnten an verschiedenen Winkelpositionen von 25° bis 155° relativ zum Triebwerkseinlauf montiert werden. Die Mikrofone wurden in einem Abstand von 970 mm von der Lärmquelle aufgestellt. Im vorderen Bereich ist dies der Radialverdichter, an der Seite wird das Gehäuse referenziert. Im hinteren Bereich wird die Düsenkante als Maßreferenz genutzt. In den Versuchen wurden vier Mikrofone an den Positionen 25°, 90°, 135° 155° positioniert.

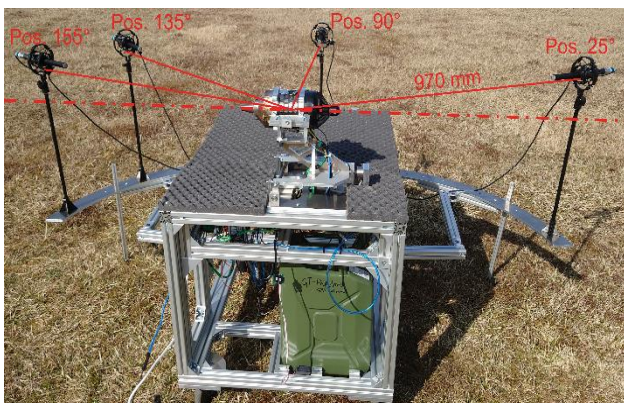


BILD 4: Lärmprüfstand für kleine Turbojet Triebwerke

Die Mikrofone werden über ein Audio-USB Interface mit einem Laptop verbunden. Die Audiodaten werden von einem LabView-Programm verarbeitet und eine Fourier-Analyse mit 1/24 Oktavschritten Auflösung durchgeführt. Darüber hinaus verfügt der Prüfstand über weitere Messtechnik. Damit werden Triebwerksleistungsdaten über Schubkraft, Drehzahl, Brennkammerdruck und Turbinenaustrittstemperatur per USB an das LabView-Programm weitergegeben. Außerdem wurden Umgebungsdaten zu Temperatur und Luftdruck aufgezeichnet.

Da einige Messeinrichtungen zur Leistungsbestimmung des Triebwerks die Lärmmessung beeinflussen würden (z.B. Normeinlauf zur Luftmassenstrommessung) werden diese Daten mit Werten von einem Leistungsprüfstand verglichen, um den genauen Lastzustand nachvollziehen zu können.

3.2. Düsenkonfiguration für das kleine Turbojet-Triebwerk

Das 200N-Turbojet Triebwerk konnte mit fünf verschiedenen Primärdüsen ausgestattet werden. Ferner konnten alle fünf Primärdüsen mit einer Ejektordüse kombiniert werden.

3.2.1. Primärdüsen

Die Standarddüse SN ist eine klassisch konvergente Schubdüse mit ringförmigem Austrittsquerschnitt. Da diese einfache Bauform an vielen kleinen Turbojet-Triebwerken verbaut ist, wird diese als Referenz genutzt. Die beiden Chevrontüsen CVN unterschieden sich durch eine unterschiedliche Anzahl von 7 und 9 Zacken. Die Zacken sind in neutraler Position, also weder nach innen oder außen geknickt. Die Triebwerke werden mit Chevrontdüse vom Hersteller vertrieben. Am Institut wurden zwei blütenförmige Primärdüsen LMN ausgelegt und mittels 3D-Druck hergestellt. Beide haben acht Lobes, wobei eine, LMN-Sc, über zusätzlich Ausschnitte in den Blütenflanken verfügt, um die Mischgeschwindigkeit zu erhöhen.

3.2.2. Ejektordüse

Die verwendete Ejektordüse hat ein Flächenverhältnis α von 1,77 und ein L/D-Verhältnis von 1,0. Die Ejektordüse besteht aus gerolltem 1 mm Edelstahlblech. Es wurde keinerlei Dämpfungsmaterial an der Ejektordüse angebracht.

Bei Tests auf dem Leistungsprüfstand konnte die Kombination von LMN und Ejektordüse eine Schubverstärkung von 10% [1] bei einem sekundären Massenstromverhältnis SMR von etwas über 1,0. Die LMN-Sc erreicht nur 8,5% Schuberrhöhung, zeigte aber bei Auswertung der Temperaturprofile am Austritt des Ejektors deutlich bessere Durchmischung. Da alle Untersuchungen zum Thema Lärmreduktion durch eine Ejektordüse zu dem Schluss kommen, dass diese abhängig von Sekundärmassestrom und Durchmischungsgrad ist, wird von diesen Varianten eine verbesserte Wirkung erwartet.

3.2.3. Test Prozedere

Die Tests wurden auf einem Flugfeld durchgeführt. Innerhalb eines Radius von 30 m befanden sich keine Objekte. Von Gebäuden wurde ein Abstand von 50 m eingehalten. Das Triebwerk wurde zuerst nur mit den Primärdüsen getestet. Nach jedem Test wurde die Ejektordüse montiert. Vor und nach jedem Versuchslauf wurde eine Messung der Umgebungsgeräusche durchgeführt, um relevante Störungen zu identifizieren. Der Test selbst beinhaltete jeweils zwei Messungen bei Triebwerk im Leerlauf, im Teillast bei 80% Drehzahl und bei Volllast. Je eine Messung wurde im Hoch- und Herunterfahrzyklus gemacht. Die Messzeit betrug je 10 s.

4. ERGEBNISSE EXPERIMENTELLE VERMESSUNG

Da die höchsten Lärmemissionen erwartungsgemäß bei Volllast auftraten, konzentriert sich die Analyse primär auf diesen Betriebspunkt.

4.1. Standarddüse SN

Das Diagramm in BILD 5 zeigt das Lärmfrequenzspektrum der Standarddüse SN aus allen vier Umfangspositionen. Die grünen Linien markieren die Drehfrequenz der Welle und deren Vielfache. Das Spektrum an der 25° Position zeigt einen deutlichen Pegelpeak bei 14,3 kHz mit 120 dB. Dieser Peak tritt in der Position 90° in abgeschwächter Form ebenfalls auf. Die Frequenz liegt genau auf der 7-fachen Wellendrehfrequenz und passt damit zur Blattfrequenz des Radialverdichters. Aus den beiden hinteren Positionen 135° und 155° sind die Pegelpeaks nur noch in Andeutung zu erkennen. Das Spektrum an diesen Positionen hat eine hohe Bandbreite mit Spitzenwerten um 105 dB. Dieser Breitbandstoßlärm wird durch die Strahlmischung am Austritt der Düse verursacht.

Die Abbildung (BILD 6) zeigt die Emissionsspektren der Standarddüse SN mit Ejektordüse an der hinteren Position

155°. Die Ejektordüse wirkt sich hauptsächlich auf das Abstrahlspektrum der Düse aus, entsprechend sollte hier der Effekt aus der Position 155° gut erkennbar sein. Die jeweils hellere Linie stellt das Spektrum mit A-Filterung dar. Dies berücksichtigt die Wahrnehmung des menschlichen Gehörs und wertet tiefe und hohe Frequenzen ab.

Das Spektrum der Düsenkonfiguration SN-EJ zeigt einen zusätzlichen Schallpegelpeak mit 126 dB bei 5,5 kHz. Dieser überschattet das komplette Spektrum. Als Ursache wird ein Resonanzphänomen zwischen Düsenaustrittskante, Abgasstrahl und Ejektorrohr vermutet. Die Frequenz im gut wahrnehmbaren Bereich zusammen mit dem hohen Pegel wurde von dem während des Tests anwesenden Personen als extrem unangenehm empfunden, trotz Gehörschutz. Der Peak aus allen Richtungen wahrnehmbar, allerdings aus Position 155° am lautesten. Die Lärmemission der Standarddüse hat sich durch die Ejektordüse deutlich verstärkt.

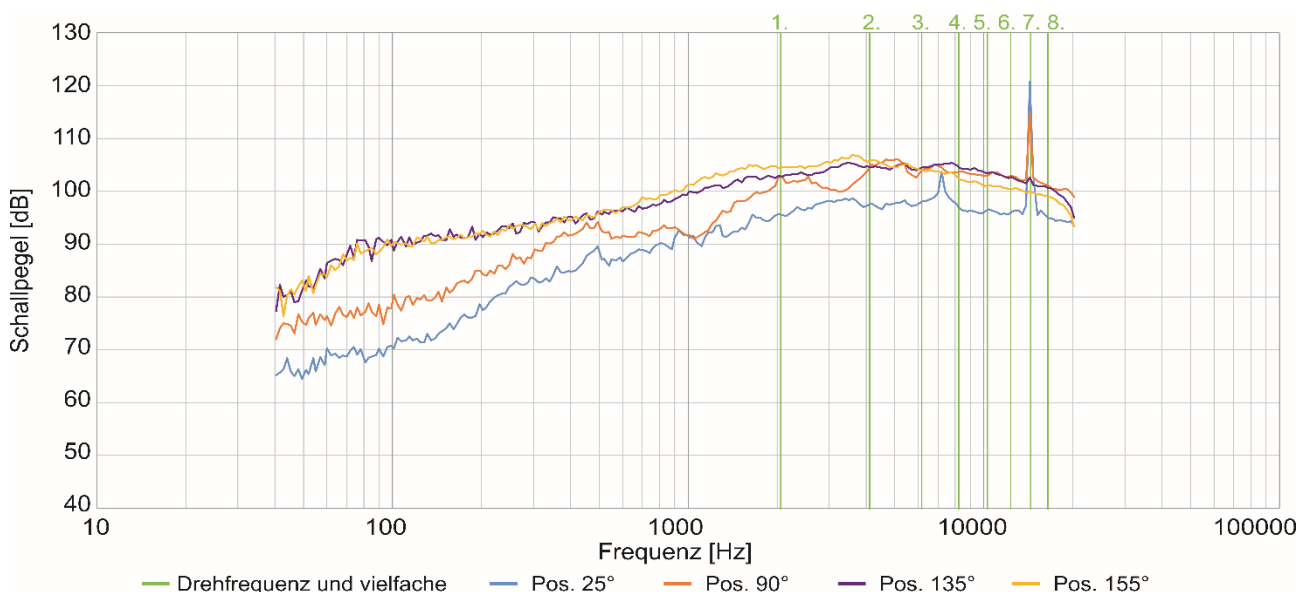


BILD 5: Frequenzspektrum Standarddüse SN an den Positionen 25°, 90°, 135° und 155°

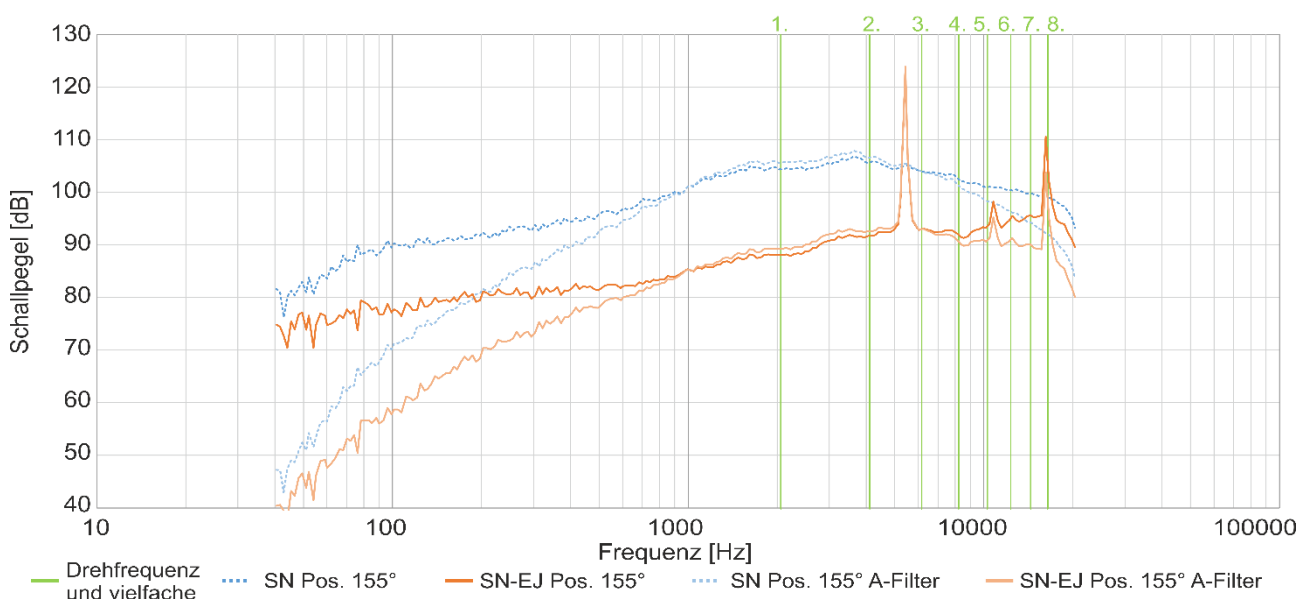


BILD 6: Frequenzspektrum Standarddüse mit Ejektordüse SN-EJ an Position 155° und A-Filterung

4.2. Chevrontüsen CVN

Das Diagramm in BILD 7 zeigt einen Vergleich des Lärmspektrums der Chevrontüse CVN7 mit der Standardtüse SN. Zur besseren Übersicht sind nur die Positionen 25° und 155° eingetragen. Die blaue und die graue Linie zeigen das Spektrum aus der Position 25°, während die orangene und die rote Linie das Spektrum aus der Position 155° im hinteren Bereich beinhaltet.

Der Vergleich der Spektren aus 25° zeigt kaum Unterschiede zwischen CVN7 und SN. Der maximale Pegel tritt wieder mit 120 dB bei 14,3 Hz auf und entspricht der Blattfrequenz des Verdichters. Im hinteren Bereich bei 155° kann nur eine kleine Verschiebung ausgemacht werden. Dabei wurde ein Teil des hochfrequenten Lärms zwischen 3 und 8 kHz zu niedrigen Frequenzen unter 1000 Hz verschoben. Diese ist für die Gesamtbewertung jedoch

unerheblich. Die Auswertung des Spektrums der CVN9 mit 9 Zacken kommt zu einem fast identischen Bild. Die Chevrontüse kann hier keine Lärmreduktion im Vergleich zur Standardtüse bewirken.

Abbildung BILD 8 enthält das Lärmspektrum der Kombination aus Chevrontüse CVN7 und Ejektortüse, gemessen im hinteren Bereich bei 155°. Die jeweils hellere Linie zeigt das mit dem A-Filter verrechnete Spektrum. Wieder wird ein deutlicher Peak bei 5,5 kHz mit 110 dB festgestellt. Das Resonanzphänomen tritt auch hier auf, wenn auch sehr viel schwächer. Darüber hinaus scheint die Ejektortüse kaum einen Effekt auf das Frequenzspektrum zu haben. Die Bewertung der Lärmemission ergibt erneut eine Verschlechterung der Lärmemission durch das Resonanzphänomen. Die Analyse des Lärmspektrums der CVN9-EJ ergibt lediglich eine weitere Abschwächung des Resonanzpeaks.

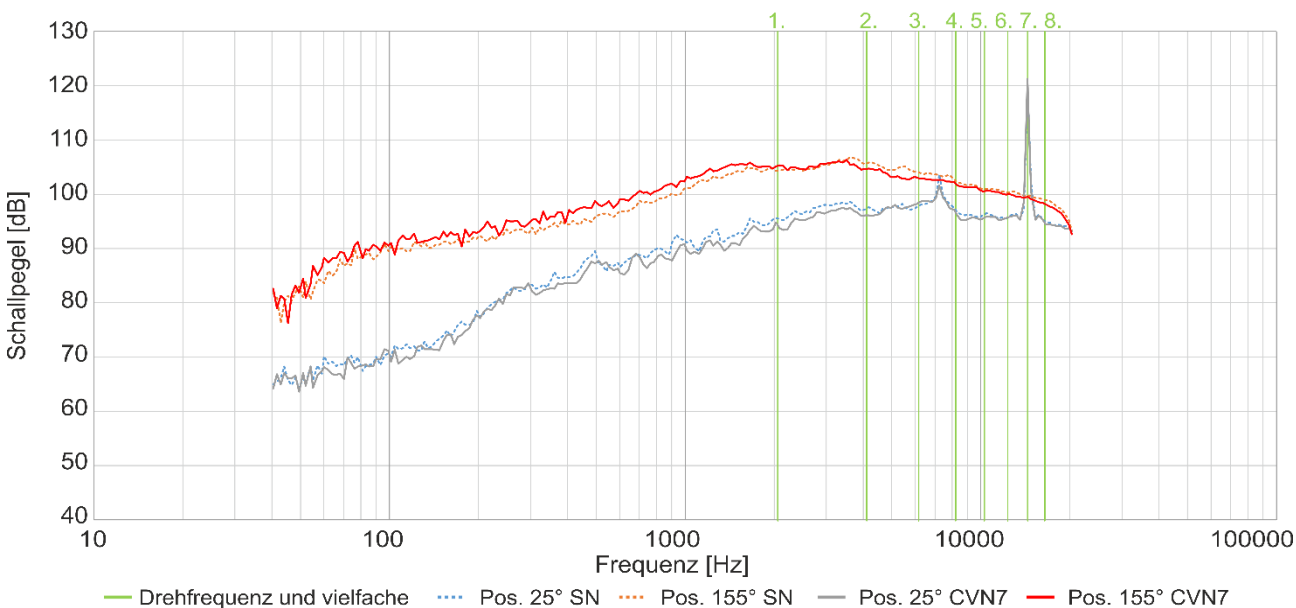


BILD 7: Frequenzspektrum Chevrontüse CVN7 vs. SN an den Positionen 25° und 155°

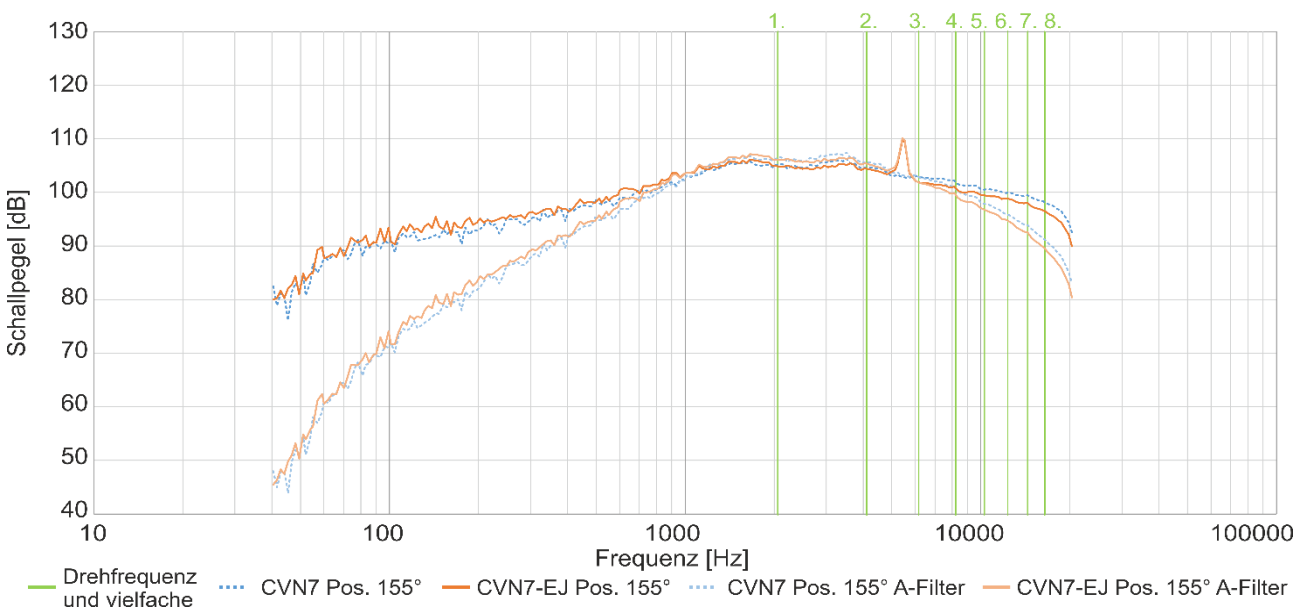


BILD 8: Frequenzspektrum Chevrontüse mit Ejektortüse CVN7-EJ an Position 155° und A-Filterung

4.3. Blütenförmige Primärdüsen LMN

Das Diagramm in BILD 9 vergleicht das Frequenzspektrum der blütenförmigen Primärdüse mit Ausschnitten LMN-Sc mit der Standarddüse SN. Im vorderen Bereich (blaue und graue Linie) wurde keine Veränderung festgestellt. Die maximale Schallemission beträgt bei 14,3 kHz ca. 120 dB. Das Spektrum der LMN-Sc bei 155° (rote Linie) zeigt hingegen einige Frequenzverschiebungen. Im Bereich zwischen 1,5 und 7 kHz wurde der Pegel um bis zu 5 dB gesenkt. Dieser Frequenzbereich ist besonders sensibel und eine Reduktion besonders wirkungsvoll, da der Mensch diesen Lärm stärker und somit über dem physikalischen Pegel wahrnimmt. Die Schalleistung wurde jedoch nur verschoben, in diesem Fall auf unterhalb und oberhalb des sensiblen Bereiches. Bei diesen Frequenzen wird die Pegelintensität daher durch den A-Filter abgewertet und ist

weniger relevant für die Lärmwahrnehmung. Die blütenförmige Primärdüse LMN zeigt ein ähnliches Bild, die Reduktion fällt mit maximal 3 dB geringer aus. Die blütenförmigen Primärdüsen reduzieren erfolgreich die Lärmabstrahlung im hinteren Bereich.

Das Spektrum der LMN-Sc mit und ohne Ejektor wird in BILD 10 dargestellt. Die jeweils helleren Linien beziehen wieder die A-Filterung mit ein. Das Resonanzphänomen tritt bei beiden blütenförmigen Primärdüsen nicht mehr auf. Das Frequenzspektrum bei 155° mit Ejektordüse zeigt eine Abschwächung der Lärmemission mit Frequenzen über 6 kHz. Dafür wird die Lärmemission unter 6 kHz verstärkt. Wegen der intensiveren Wahrnehmung durch den Menschen verschlechtert sich damit die Gesamtbewertung der Lärmemission. Die Variante mit LMN-EJ zeigt ein gleiches Verhalten.

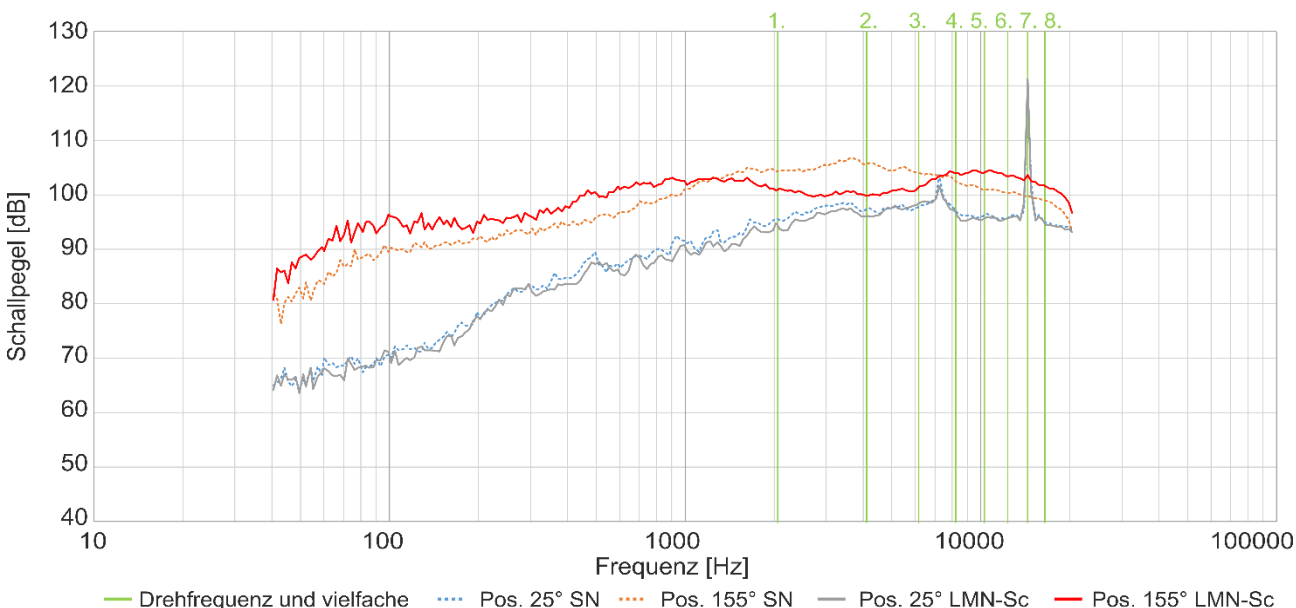


BILD 9: Frequenzspektrum blütenförmige Primärdüse LMN-Sc vs. SN an den Positionen 25° und 155°

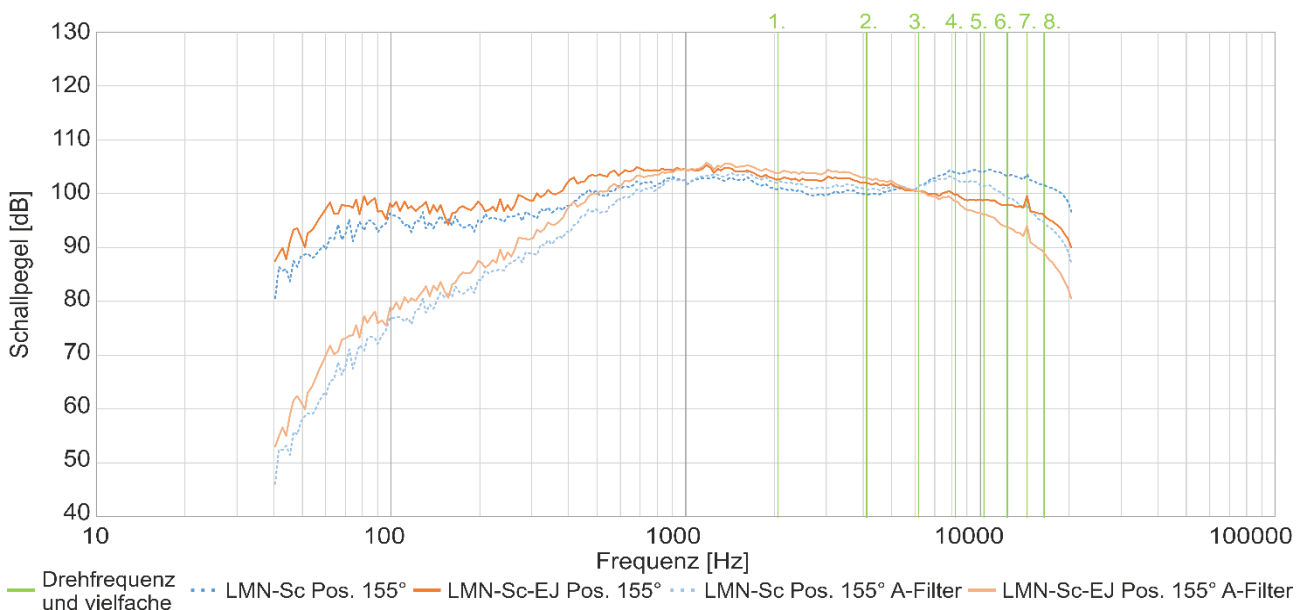


BILD 10: Spektrum blütenförmige Primärdüse mit Ejektordüse LMN-Sc-EJ an Position 155° und A-Filterung

5. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

In der Gesamtbewertung zeigt sich, dass die Standarddüse und die Chevrandüse sehr ähnliche Lärmspektren aufweisen. Im vorderen und seitlichen Bereich dominiert der Verdichterlärm. Dieser liegt unabhängig von der Düse und reproduzierbar bei etwas über 120 dB bei einer Frequenz von etwa 14 kHz. Die Ursache hierfür liegt in der Blattfrequenz des Radialverdichters (Tabelle 1).

Tabelle 1: Positionsabhängige Schallpegel und emittierte Frequenzen Primärdüsen SN und CVN

Düse	Position [°]	Max. Schallpegel [dB]	Frequenzbereich [Hz]	
SN	25	120,8	14300	
	90	114,7	14300	
	135	105,4	2270	10700
	155	106,9	1610	5500
CVN7	25	121,3	14300	
	90	113,3	14300	
	135	106	2410	8300
	155	106,4	1210	4530
CVN9	25	122	14300	
	90	113,9	14300	
	135	105,9	2410	9000
	155	106,6	1390	5200

Die Standarddüse emittiert im Düsenbereich breitbandigen Lärm bei 2 kHz bis 10 kHz mit etwa 105 dB. Die Chevrandüse mit 7 Zacken liegt etwa auf gleichem Pegelniveau, emittiert den Lärm aber tendenziell mit niedrigeren Frequenzen. Die Chevrandüse mit 9 Zacken strahlt in ähnlichem Frequenzbereich ab, wie die CVN7.

Die Kombinationen mit Ejektordüse (Tabelle 2) führten sowohl bei der Standarddüse, als auch bei den Chevrandüsen zu Resonanzerscheinungen. Bei der Standarddüse fielen diese mit 126 dB bei 5,5 kHz besonders unangenehm aus. Bei der CVN9 ist diese nur noch sehr schwach.

Tabelle 2: Positionsabhängige Schallpegel und emittierte Frequenzen Ejektordüsen SN-EJ, CVN-EJ

Düse	Position [°]	Max. Schallpegel [dB]	Frequenzbereich [Hz]	
SN-EJ	25	123,9	5400	
	90	121,4	5400	
	135	120,9	5400	
	155	126	5400	
CVN7-EJ	25	115,6	14300	
	90	113,7	5400	5500
	135	109,6	5400	5500
	155	109,8	5400	5500
CVN9-EJ	25	119	14300	
	90	113,3	14300	
	135	106,8	3030	7800
	155	107,1	1170	5500

Ein weiteres Phänomen in Zusammenhang mit der Resonanz zeigt sich beim Vergleich der Schallpegelpeaks, die durch die Blattfrequenz verursacht wurden. Bei der Variante Standarddüse mit Ejektor ist kein Ausschlag bei einer Frequenz von 14 kHz zu erkennen. Die Variante mit der CVN7-EJ zeigt die niedrigste Spitzenlärmemission

insgesamt bei 14 kHz. Die CVN9-EJ, bei welcher die Resonanz nur noch geringfügig auftritt, zeigt wieder eine höhere Spitzenlärmemission bei 14 kHz. Die Ursache kann eine Interferenz zwischen der Ejektorresonanz und dem Verdichterlärm sein. Der genaue Zusammenhang ist unbekannt.

Insgesamt konnte weder durch die Chevrandüse noch durch die Kombination mit Ejektordüse eine relevante Lärmreduktion erreicht werden.

Ein anderes Bild ergibt sich bei den blütenförmigen Primärdüsen (Tabelle 3). Im vorderen Bereich bleibt alles unverändert, aber im direkten Abstrahlbereich der Düse wurde das Spektrum deutlich verändert. Es ergeben sich bei beiden Primärdüsen nun zwei Frequenzbereiche, in der die höchsten Schallpegel emittiert werden. Bei der LMN wird im tiefen Frequenzband von 800 bis 2000 Hz und im hohen Frequenzband von 6 bis 15 kHz Lärm emittiert, allerdings nur noch mit maximal 104 dB. Die Düse mit Ausschnitten LMN-Sc schafft den Pegel im unteren Frequenzband zu noch niedrigeren Frequenzen zu verschieben, sodass der Lärm in den Bereich kommt, wo er weniger wahrgenommen wird.

Tabelle 3: Positionsabhängige Schallpegel und emittierte Frequenzen Primärdüsen LMN, LMN-Sc

Düse	Position [°]	Max. Schallpegel [dB]	Frequenzbereich [Hz]	
LMN	25	121,5	14300	
	90	114,7	14300	
	135	106,9	6600	14300
	155	104,3	850	2340
			6400	15200
LMN-Sc	25	121,1	14300	
	90	113,6	14300	
	135	107,6	7200	11700
	155	104,6	850	1650
			6800	14700

Durch die Kombination mit der Ejektordüse (Tabelle 4) wird Lärm im oberen Frequenzband stark unterdrückt. Bei der Ejektordüse mit LMN geht dies zu Lasten eines verbreiterten unteren Frequenzbands von 600 bis 4000 Hz.

Tabelle 4: Positionsabhängige Schallpegel und emittierte Frequenzen Ejektordüsen LMN-EJ, LMN-Sc-EJ

Düse	Position [°]	Max. Schallpegel [dB]	Frequenzbereich [Hz]	
LMN-EJ	25	119,2	14300	
	90	115,8	14300	
	135	105,9	3030	9300
			14300	
	155	105,4	600	3700
LMN-Sc-EJ	25	119,5	14300	
	90	116,3	14300	
	135	106,1	3030	6800
			14300	
	155	105,4	466	1860

Die Ejektordüse mit der LMN-Sc hingegen bildet ein schmaleres tiefes Frequenzband von 500 bis 2000 Hz aus. Im Abstrahlwinkel 135° wird durch die Dämpfung des Lärms

durch Strahlmischung der Schallpegelpeak durch die Blattfrequenz des Verdichters wieder detektierbar. Die Ejektordüse schafft es jedoch nicht das Level der Lärmemission zu reduzieren.

6. SCHLUSSFOLGERUNG

Abschließend lässt sich festhalten, dass die höchsten Lärmemissionen von über 120 dB durch die Blattfrequenz des Verdichters verursacht werden. Der Peak ist jedoch sehr isoliert und drehzahlabhängig und liegt bei Volllast konstant bei 14 kHz. Durch die Erhöhung der Blattzahl könnte die Frequenz soweit erhöht werden, dass diese nicht mehr wahrnehmbar ist. Schallabsorbierendes Material im Bereich des Einlaufs sowie besondere Konstruktionsweisen könnten weitere Optionen zur Lärmreduktion sein.

Die Lärmemission durch die Düse ist dagegen mit etwa 105 bis 110 dB deutlich niedriger. Das breite Frequenzband im Bereich von 1 kHz bis 10 kHz wird jedoch vom Menschen besonders gut wahrgenommen. Das Frequenzspektrum der kleinen Turbojet Triebwerke hat einen deutlich stärkeren Anteil im hochfrequenten Bereich als von großen Triebwerken bekannt.

Die Chevrongdüsen konnten keine relevante Veränderung bringen. Die blütenförmigen Primärdüsen konnten Anteile des Spektrums zwischen 1 kHz und 10 kHz zu niedrigen bzw. höheren Frequenzen verschieben. Im Ergebnis war dadurch die Lärmemission unter Einbeziehung der A-Filterung im hinteren Bereich um bis zu 4 dB niedriger.

Die Untersuchung der Ejektordüsen zeigte das Problem von auftretender Resonanz zwischen Abgasstrahl und Ejektorrohr. Das Phänomen wurde auch in [3] beschrieben. Die Resonanz ist bei der Kombination aus Standarddüse und Ejektor über alle Abstrahlwinkel dominant und liegt mit 126 dB Spitze deutlich über dem normalen Lärmpeak. Die Kombinationen mit Chevrongdüsen zeigten schwächere, aber im hinteren Bereich immer noch dominante Resonanzerscheinungen. Die Kombinationen mit den blütenförmigen Primärdüsen zeigten keine Resonanz mehr. Diese waren die leisesten Ejektordüsen im Test, konnten aber was die Lärmemission betrifft keinen Vorteil zur Primärdüse ohne Ejektor bringen.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die alleinige Verwendung einer Ejektordüse die Lärmemission des Triebwerks nicht reduziert werden konnte. Der Mechanismus, hohe Frequenzen nach unten zu verschieben, konnte wie aus den Untersuchungen an großen Turbojet Triebwerken bereits bekannt bestätigt werden. Allerdings emittieren große Triebwerke auch die größten Schallpegel in einem niedrigeren Frequenzbereich (vgl. BILD 2). Durch die Verschiebung zu tieferen Frequenzen wird der Lärm für Menschen weniger wahrnehmbar. Kleine Turbojet Triebwerke besitzen ein hochfrequenten Lärm-Spektrum. Die Frequenzbandverschiebung zu niedrigeren Frequenzen führt zu einer Pegelverstärkung im für den Menschen besonders gut wahrnehmbaren Bereich zwischen 1 kHz und 10 kHz. Die blütenförmigen Düsen alleine zeigen hier ein vielversprechenderes Verhalten, indem der mittelfrequente Lärm nach unten bzw. nach oben verschoben wird. Im untersuchten Triebwerk werden jedoch die höchsten Lärmpegel vom Verdichter emittiert, eine effektive Lärmreduktion erfordert daher vor allem auch Maßnahmen am Verdichter.

Danksagung

Wir möchten uns bei der HTM Helicopter Travel Munich GmbH für die Zurverfügungstellung des Flugfeldes für die Lärmmessungen bedanken.

Literaturverzeichnis

- [1] Schmidt, R., Hupfer, A. Design and numerical simulation of ejector nozzles for very small turbojet engines. CEAS Aeronaut J (2021). <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00537-3>.
- [2] Müller, G.; Möser, M.: Taschenbuch der technischen Akustik. Springer-Verlag, 2013.
- [3] North, W., Coles, W.: Effect of exhaust-nozzle ejectors on turbojet noise generation. NACA-TN-3573, 1955.
- [4] Coles, W.; Mihalow, J.; Callaghan, E.: Turbojet Engine Noise Reduction with Mixing Nozzle-ejector Combinations. NACA-TN-4317, 1958.
- [5] McPike, A.L.: The Generation and Suppression of Aircraft Noise. SAE International <https://www.jstor.org/stable/44737826>, 1971.
- [6] Schweiger, P., Barber, T., Salikuddin, M.: Results of Aero/Acoustic Tests and Analytical Studies of a Two-Dimensional Eight-Lobe Mixer-Ejector Exhaust Nozzle at Takeoff Conditions. NASA/CR—2005-213324, 2005.
- [7] Presz Jr. W. :Mixer/Ejector Noise Suppressors. 27th Joint Propulsion Conference, 1991, Sacramento.
- [8] Presz, Jr. W., Reynolds, G., Hunter, C.: Thrust Augmentation with Mixer/Ejector Systems. 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 2002, Reno.