

SCHALLREDUKTION AM DLR PRÜFSTAND P8

P. Kallina, G. Krühsel, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,
Institut für Raumfahrtantriebe, 74239 Hardthausen, Deutschland

Zusammenfassung

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. führt am Standort Lampoldshausen am Prüfstand P8 bei Raketentriebwerktests Schallreduktionsmaßnahmen durch Wassereinspritzung in die Strömung des Triebwerksstrahls durch. Hierzu kommt ein Leitrohr als Lärminderungssystem zum Einsatz.

Die Testreihe beinhaltet eine erste Parameterstudie mit zugehörigen akustischen Messungen des zeitlich- und frequenzabhängigen Schalldruckpegels. Sie umfasst fünf Versuche von denen vier mit dem Leitrohrsystem und einer als Referenzversuch ohne Leitrohr gefahren worden sind. Als veränderliche Parameter werden der Vergleich mit und ohne Leitrohr, der Wassermassenstrom, der Abstand des Leitrohrs zur Brennkammer und das ROF Verhältnis untersucht. Der Schalldruckpegel wurde bei jedem Versuch an zwei Messpositionen simultan erfasst.

1. ABKÜRZUNGEN

D_E :	Düsenaustrittsdurchmesser
DLR:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
ER:	Einspritzring
H0:	Zeitpunkt der Zündung
LA:	Lampoldshausen
L_{Aeq} :	A-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel [dB(A)]
L_{Ceq} :	C-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel [dB(C)]
\dot{m}_{H_2O} :	Massenstrom Wasser
\dot{m}_{H_2} :	Massenstrom Wasserstoff
\dot{m}_{O_2} :	Massenstrom Sauerstoff
P8:	Prüfstand P8 auf dem Versuchsgelände des DLR in LA
p_{cc} :	Brennkammerdruck
ROF:	Massenverhältnis Sauerstoff zu Brennstoff
X_D :	Abstand Düsenaustritt zu Leitrohreintritt [mm]

2. EINLEITUNG

Das Institut für Raumfahrtantriebe des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Lampoldshausen befasst sich mit Forschungsarbeiten, Tests von Raketentriebwerken und der Entwicklung und dem Betrieb von Prüfständen. Die Triebwerke können je nach Anforderung in horizontaler oder vertikaler Position, im Vakuum oder unter Umgebungsdruck getestet werden.

Der Prüfstand P8 des DLR ist einer der sieben derzeit zur Verfügung stehenden Prüfstände und dient zur Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserstoff-Sauerstoff-Hochdruckverbrennung. Er befindet sich auf erhöhter Position im Versuchsgelände, wodurch es bei Versuchen mit hohen Massendurchsätzen und großem Brennkammerdruck zu erhöhten Schallimmissionspegeln im nahe gelegenen Umfeld des DLR kommen kann [1].

Das DLR verfügt über ein Umweltmanagementsystem mit Umweltzertifizierung. Diese Zertifizierung beinhaltet auch die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte der technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm [2] beim Betrieb der Prüfstände. In dem

Managementsystem wird ein Programm für Umweltziele und Umweltpolitik aufgestellt. Lärminderungsmaßnahmen am Prüfstand P8 sind ein Teil der Verbesserungsmaßnahmen mit dem Ziel, den Betrieb des P8 auch in Zukunft umweltverträglich durchführen zu können. Die Einführung von schallmindernden Maßnahmen am P8 kann darüber hinaus erste wichtige Hinweise für Lärminderungsmaßnahmen an größeren Prüfständen liefern (Sub-Scale Charakter). Zu diesem Zweck legte das DLR ein mit Wasser betriebenes Leitrohrsystem als Schallreduktionseinrichtung am P8 aus.

Die bei Raketentriebwerktests auftretende Schallemission ist die akustische Strahlung eines Freistrahls. Diese setzt sich aus verschiedenen Lärmquellen zusammen [3]. Für Unterschallstrahlen wird der Lärm von kleinen Wirbeln, Turbulenzen und größeren geordneten Turbulenzstrukturen produziert. Für Überschallstrahlen kommen zu diesen Schallquellen noch Schock- und Verdichtungswellen, Mach'sche Wellenstrahlung und die turbulente Mischzone von Freistrah mit umgebenden Medium hinzu.

Die Vorhersage von den zu erwartenden Schallpegeln von Freistrahlen hatte ihren Beginn in Lighthills Skalierungsgesetz [4]

$$(1) \quad I \propto \rho_1^2 \cdot D_E^2 \cdot u^8,$$

das sich auf Unterschallstrahlen bezieht. Es besagt, dass die akustische Intensität I insbesondere zur 8. Potenz der Austrittsgeschwindigkeit u des Triebwerkstrahls ist. Ebenso ist sie proportional sowohl zum Quadrat der Dichte ρ_1 als auch zum Quadrat des Austrittsdurchmessers D_E des Strahls. Für Machzahlen größer als 1,5 zeigten Ffowcs-Williams [5] und Tam [6] eine u^3 -Abhängigkeit für die zu erwartende Schalleistung. Ausgehend von dieser Abhängigkeit des emittierten Schallpegels von der Austrittsgeschwindigkeit entwickelten sich erste Vorschläge und Ansätze zur Schallreduzierung mittels Modifizierung des Geschwindigkeitsprofils [7], das heißt durch Reduzierung der Geschwindigkeit. Es ist erkenntlich, dass durch die Verringerung der Austrittsgeschwindigkeit die Schalleistung und damit auch

die Schallemissionen abnehmen. Diesbezüglich gab es in den vergangenen 50 Jahren im Bereich der Strömungsakustik verschiedenste Versuche, den Düsenlärm eines Triebwerks durch Einspritzung einer Masse (z.B. Wasser, Luft, Stickstoff, Schaum, langkettige Polymere) in die Strömung des Triebwerkstrahls zu mindern [8].

Die Schallreduktion des Lärminderungssystems Leitrohr P8 basiert auf der Wassereinspritzung in die Strömung des Triebwerkstrahls. Die Wassereinspritzung führt zu einem Impuls-, Massen- und Wärmeaustausch der Wassertropfen mit dem Heißgasstrahl des horizontal montierten Triebwerks. Sowohl die kinetische, als auch die thermische Energie des Heißgasstrahls werden gesenkt. Zusätzlich zur Schallminderung durch Wassereinspritzung wird der Triebwerkstrahl durch das Leitrohr räumlich begrenzt. Durch Reflektionen im Leitrohr wird der emittierte Schall mehrmals mit Wasser behandelt.

Das Leitrohr P8 wurde im September 2011 zum ersten Mal in einer Kampagne mit einem Heißlauf einer DLR eigenen Raketenbrennkammer in Betrieb genommen. Dieser Artikel gibt die daraus erzielten Erkenntnisse und Ergebnisse der akustischen Messungen, die im Rahmen der Abnahmeversuche gewonnen wurden, wieder.



BILD 1. Leitrohr P8 in Parkposition. Vorne ist der 1. Einspritzring mit einem Durchmesser von 1,09m mit Verteilerrohr zu sehen. An der linken Seite sind die Wasserzuführungen der Einspritzringe 2-5, die symmetrisch hierzu auf der rechten Seite zu finden sind.

3. EXPERIMENTELLER AUFBAU

Der experimentelle Aufbau der Versuchsreihe besteht aus vier Teilen: Dem Leitrohr P8, einer experimentellen Raketenbrennkammer, der Wasserversorgung für das Leitrohr und den eingesetzten Messinstrumenten.

3.1. Leitrohr P8

Das 6t schwere aus Kesselblech gefertigte Leitrohr P8 (BILD 1 und BILD 2) hat einen Rohrdurchmesser von 1,5m. Die Wandstärke beträgt 9mm. Der gerade Rohrabchnitt bis zur 90° Umlenkung ist 9m lang. Das Leitrohr besitzt fünf Wassereinspritzringe.

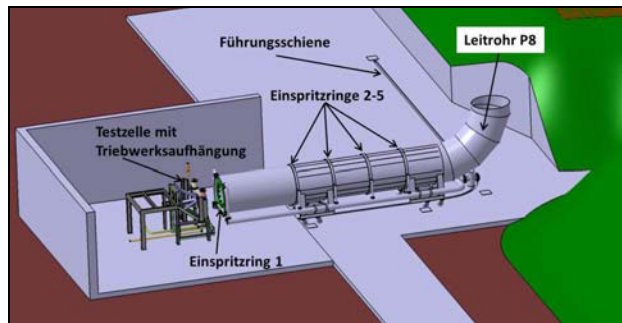


BILD 2. Schematischer Aufbau: Mit Hilfe der Führungsschiene kann das Leitrohr von der Parkposition in die hier dargestellte Versuchsposition gefahren werden.

Der 1. Einspritzring dient der Abgasstrahlbehandlung zum Zwecke der Schallreduktion:

- 16 Düsen mit 15° Öffnungswinkel
- 16 Adapter mit 60° Anstellung gegen Leitrohrachse

Die Einspritzringe 2-5 dienen zur Aufbringung der Filmkühlung an die Leitrohrwand:

- Je 18 Schlick-Fächerdüsen

Das Leitrohr ist ausgelegt für einen gesamten Heißgasmassenstrom von 15kg/s und einer Versuchsdauer von 60s bei möglichen 4 Tests pro Tag. Im Rahmen der Auslegung wurden CFD-Simulationen [9] durchgeführt, die verschiedene Parameter berücksichtigten, wie zum Beispiel die Nachverbrennung von unverbranntem Wasserstoff im Leitrohr, der Wassermassenstrom und die Winkelstellung der Düsen am 1. Einspritzring. Die Simulationen zielten auf die Erkenntnisse über die Menge der während des Betriebs angesaugten Luft, über die Geschwindigkeiten im und am Ende des Leitrohrs. Wesentlicher Untersuchungsgegenstand war der Wärmetransport in der Leitrohrwand unter Berücksichtigung der Wandfilmkühlung. Exemplarisch hierzu ist in BILD 3 ein Ergebnis der Wärmetransportsimulation abgebildet. Hier wird sowohl die angesaugte Luftmenge, deren Nachverbrennung und die Kühlfilmwirkung berücksichtigt.

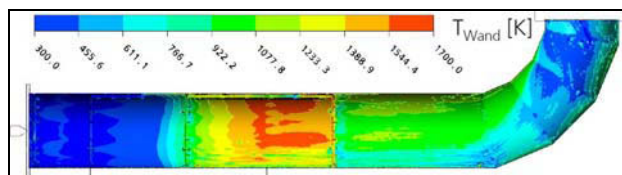


BILD 3. CFD-Simulation der Wärmeverteilung im Leitrohr

3.2. Raketenbrennkammer

Die in den Versuchen als Schallemissionsquelle eingesetzte Raketenbrennkammer hat einen Halsdurchmesser von 33mm und einen Austrittsdurchmesser D_E von 73,8mm. Das Expansionsverhältnis ist 5. Der Brennkammerdruck liegt im Bereich 40-150bar. Der Gesamtmassenstrom beträgt 1,3-4,8kg/s.

3.3. Wasserversorgung

Die am Prüfstand P8 vorhandene Wasserversorgungspumpe ist für einen Versorgungsdruck von 10bar und einem maximalen Wasserdurchsatz von 200kg/s ausgelegt.

3.4. Messung

Die verwendeten versuchsrelevanten Messinstrumente sind:

- Zwei auf jeweils einem Stativ in 1,2m Höhe befestigte Schallanalysatoren der Marke Brüel & Kjær Typ 2250 mit eingebautem Freifeldmikrofon Typ 4189 (Messpositionen siehe BILD 4)
- Wasserdrucksensoren an den 5 Einspritzringen und Durchflussmesser der Wasserversorgung

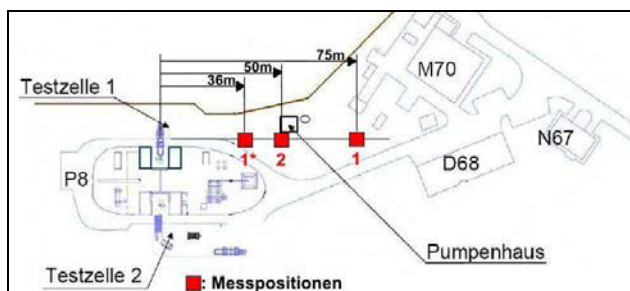


BILD 4. Messpositionen der Schalldruckmessung. Das Testobjekt befindet sich in Testzelle 1 des Prüfstands P8. Im letzten Versuch wurde die Messstelle 1 auf 1* vorgesetzt.

Für die Entfernung der einzelnen Messpositionen zu der Brennkammer gilt:

- Messstelle 1: 75m
- Messstelle 2: 50m
- Messstelle 1*: 36m

Die Abstrahlcharakteristik eines Raketentriebwerkstrahls liegt im Bereich von 50°-60° [10] [11]. Die in dieser Testreihe durchgeführten akustischen Messungen sind wie in BILD 4 angedeutet in etwa 90° zum Testobjekt angeordnet. Die Untersuchung der Abstrahlcharakteristik war nicht Teil dieser Kampagne. Die Versuchskampagne beschreibt eine erste Testreihe zur Abnahme des Lärminderungssystems Leitrohr P8 mit Schalldruckmessungen an den hierzu hinreichenden Messstellen.

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND KONFIGURATION

4.1. Versuchsdurchführung

Die Versuchskampagne umfasste 5 erfolgreiche Versuche. Hierbei diente der Versuch 02 Run2 als Referenzversuch der Schallmessung, d.h. bei diesem Versuch wurde das Leitrohr nicht verwendet und der Schallruckpegel des Freistrahls gemessen. Bei allen anderen Versuchen wurde das Leitrohr eingesetzt und die jeweils erzielte Schallreduktion ermittelt. Das Leitrohr lässt sich vor jedem Versuch durch einen

hydraulisch-elektrischen Verfahrenmechanismus in einem beliebigen Abstand X_D vor der Brennkammer positionieren (vgl. BILD 5). Hierbei ist es wichtig, dass das Leitrohr möglichst im Abstand $0 \cdot D_E$ positioniert wird, da sich die hochfrequenten Lärmquellen in der turbulenten Mischzone auf den ersten 1 bis 5 Düsendurchmessern bilden und senkrecht zur Strahlachse abstrahlen [12]. Die niederfrequenten Lärmquellen bilden sich bei 4 bis 10 Düsendurchmessern und strahlen spitzwinklig zur Strahlachse ab.

Die genauen Konfigurationen der fünf Versuche werden in Abschnitt 4.2 aufgelistet.

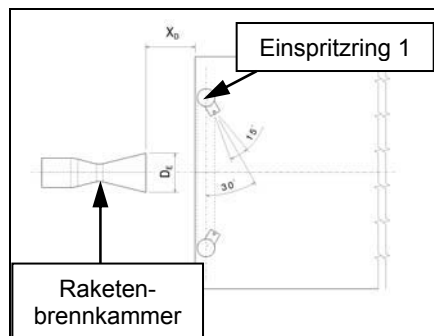


BILD 5. Das Leitrohr wird im Abstand X_D von der Brennkammer platziert. Die Düsen des ER1 sind ebenfalls skizziert.

4.2. Versuchskonfigurationen

Während der Versuchskampagne wurden folgende Konfigurationen untersucht:

Versuch	X_D	\dot{m}_{H_2O} (gesamt) [l/s]	Distanz Messstelle		
			1 [m]	1* [m]	2 [m]
Versuch-01-Run3	$0 \cdot D_E$	70	75	-	50
Versuch-02-Run2	-	-	75	-	50
Versuch-03-Run1	$0 \cdot D_E$	70	75	-	50
Versuch-04-Run1	$0 \cdot D_E$	55	75	-	50
Versuch-04-Run2	$3 \cdot D_E$	55	-	36	50

TAB 1. Versuchskonfigurationen Teil 1

Versuch	ROF	\dot{m}_{H_2} [kg/s]	\dot{m}_{O_2} [kg/s]	p_{cc} [bar]
Versuch-01-Run3	6	0,598	3,587	115
Versuch-02-Run2	6	0,598	3,587	115
Versuch-03-Run1	6	0,598	3,587	115
Versuch-04-Run1	bis H0+40s: 6	0,598	3,587	115
	ab H0+40s: 5	0,679	3,396	115
Versuch-04-Run2	bis H0+40s: 6	0,598	3,587	115
	ab H0+40s: 5	0,679	3,396	115

TAB 2. Versuchskonfigurationen Teil 2

Versuch	Wassermassenstrom [l/s]				
	ER1	ER2	ER3	ER4	ER5
Versuch-01-Run3	50	0	0	10	10
Versuch-02-Run2	---	---	---	---	---
Versuch-03-Run1	50	0	0	10	10
Versuch-04-Run1	35	0	0	10	10
Versuch-04-Run2	35	0	0	10	10

TAB 3. Versuchskonfigurationen Teil 3. Der gesamte Wassermassenstrom des Leitrohrs verteilt sich wie aufgelistet auf die einzelnen Einspritzringe.

5. ERGEBNISSE

Im Folgenden werden die Ergebnisse der akustischen Messungen der Parametervariationen aller Versuche vorgestellt. Diese umfassen sowohl den zeitlichen Verlauf als auch die Frequenzabhängigkeit des Schalldruckpegels.

In den Schalldruckpegel-Diagrammen ist der A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel L_{Aeq} über die Versuchszeit aufgetragen. L_{Aeq} wird als konstanter Schallpegel mit demselben Energiegehalt wie das gemessene schwankende Signal berechnet. Für die Frequenzspektren ist der C-bewertete äquivalente Dauerschallpegel L_{Ceq} über den Frequenzbereich von 20Hz bis 20kHz aufgetragen. Durch die C-Bewertung wird der Energiegehalt bei tiefen Frequenzen besser berücksichtigt.

Explizit werden nur die Messergebnisse an Messstelle 2 aufgeführt, da sie sich in Bezug auf die anderen Messstellen 1 und 1* nicht in ihrer Art, sondern nur in der Höhe des Schalldruckpegels aufgrund ihrer unterschiedlichen Entfernung zur Brennkammer unterscheiden.

5.1. Versuch mit und ohne Leitrohr

In BILD 6 wird der Schalldruckpegel von den Versuchen 02 Run 2 (ohne Leitrohr) mit den Versuchen 01 Run 3 und 03 Run 1 (jeweils mit Leitrohr und denselben Betriebspunkten) verglichen. Nach der etwa 5s dauernden Anfahrzeit der Wasserversorgung senkt sich der Schalldruckpegel um ca. 22dB(A). Die Differenz der Versuche ist zur besseren Veranschaulichung ebenfalls eingetragen. Der minimale Unterschied des Schalldruckpegels der beiden Versuche mit Leitrohr ist trotz der gleichen Betriebspunkte der Messungenauigkeit aufgrund zweier verschiedener Versuche geschuldet.

BILD 7 zeigt das Frequenzspektrum des Referenzversuchs 02 Run 2 ohne Leitrohr im Vergleich zu Versuch 03 Run 1 mit Leitrohr. Alle anderen Betriebspunkte wurden beibehalten.

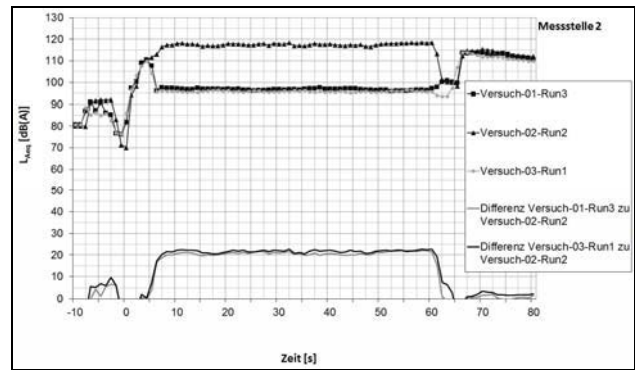


BILD 6. Vergleich des Schalldruckpegels bei den Versuchen mit und ohne Leitrohr an Messposition 2

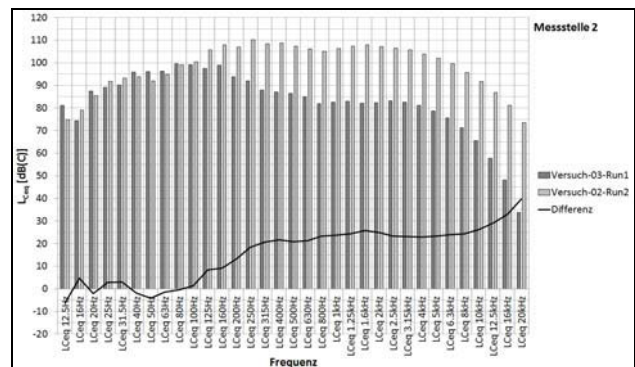


BILD 7. Vergleich des Frequenzspektrums von 20Hz bis 20kHz der Versuche mit und ohne Leitrohr an Messposition 2; aufgenommen bei Versuchszeit t=30s

Im tieffrequenten Bereich bis 100Hz zeigt sich kein wesentlicher Unterschied der Schalldruckpegel beider Versuche. Zwischen 100Hz und 400Hz steigt die Schallpegelreduktion an, um sich zwischen 400Hz und 8kHz auf einem relativ konstanten Wert zwischen 20 und 25dB(C) zu halten. Im Frequenzbereich größer als 8kHz steigt die Reduzierung des Schallpegels nochmals an, was auf einen erhöhten Absorptionskoeffizienten der Luft zurückzuführen ist.

Die Reduzierung des Schallpegels ist immer ein Zusammenspiel zwischen Einkesselung des Strahls des Heißgasgenerators einerseits durch das Leitrohr und andererseits durch die sich bildende Wasserdampfsäule am Ausgang des Leitrohrs, Umlenkung des Strahls durch die Krümmung des Leitrohrs vertikal nach oben und der Behandlung des Abgasstrahls mit Wasser. Tiefe Frequenzen haben eine zu große Wellenlänge, um eine Absorption durch den Wasserdampf oder der Luft zu erfahren. Ebenso beugen sie sich am Ausgang des Leitrohrs stärker. Dies hat zur Folge, dass im Frequenzbereich kleiner 100Hz keine Reduzierung des Schalldruckpegels stattfindet. Der Anstieg der Schallreduzierung im Frequenzbereich größer 100Hz erfolgt durch die Umwandlung der Schallenergie in thermische Energie, einerseits durch die Wassereinspritzung und andererseits durch die Interaktion mit der sich am Ausgang des Leitrohrs bildenden Wasserdampfsäule. Desweiteren kommt es durch die räumliche Eingrenzung durch das Leitrohr zu zwingenden Reflektionen des emittierten Schalls, der dadurch eine

Mehrfachbehandlung mit Wasser erhält. Der tendenzielle Verlauf des Frequenzspektrums ist von der Art her derselbe.

5.2. Vergleich bei verändertem Wassermassenstrom

In BILD 8 werden die Versuche 03 Run 1 und 04 Run 1 miteinander verglichen. Der Unterschied in den Betriebspunkten liegt darin, dass bei letzterem Versuch der Wassermassenstrom von 70l/s auf 55l/s bzw. am ersten Einspritzring von 50l/s auf 35l/s gesenkt wurde. Der tendenzielle Verlauf beider Schalldruckkurven ist derselbe. Die Reduzierung des Wassermassenstroms hat eine Erhöhung des Schalldruckpegels um ca. 4,5dB(A) zur Folge.

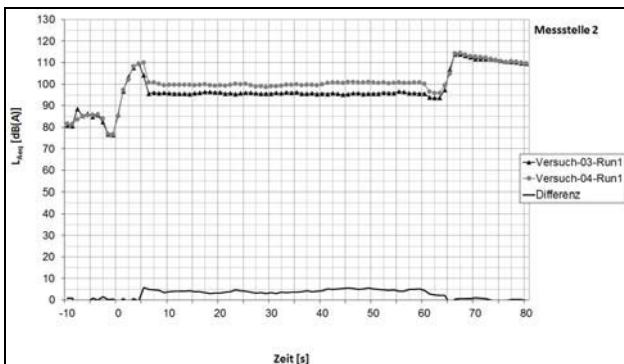


BILD 8. Vergleich des Schalldruckpegels an Messposition 2 bei verändertem Wassermassenstrom

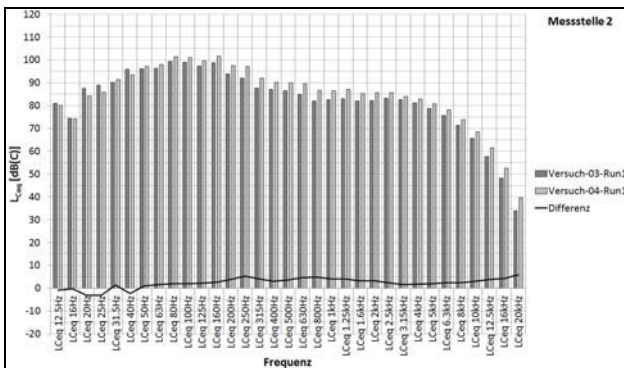


BILD 9. Vergleich des Frequenzspektrums an Messposition 2 bei verändertem Wassermassenstrom; aufgenommen bei Versuchszeit t=30s

Die entsprechenden Frequenzspektren dieser beiden Versuche sind in BILD 9 dargestellt. Die gemessene Schalldruckpegelreduzierung von ca. 4,5dB(C) für den Versuch 03 Run 1 mit höherem Gesamtwassermassenstrom von 70l/s findet ab einer Frequenz größer 50Hz statt. Bis auf die Höhe des Schalldruckpegelwertes zeigen die Frequenzspektren denselben Verlauf.

5.3. Vergleich bei verändertem Abstand Leitrohr-Brennkammer

BILD 11 zeigt den zeitlichen Verlauf des Schalldruckpegels der Versuche 04 Run 1 und 04 Run 2. Die Betriebspunkte beider Versuche sind dieselben, jedoch wurde der Abstand des Leitrohrs zur Brennkammer in Versuch 04 Run 2 von 0·D_E auf 3·D_E vergrößert. Durch die Vergrößerung wird der aus der Brennkammer austretende Massenstrom erst später mit Wasser behandelt. Dies hat zur Folge, dass sich der Schalldruckpegel um ca. 2dB(A) erhöht.

Die zugehörigen Frequenzspektren sind in BILD 10 zu sehen. Wird der Abstand des Leitrohrs zur Brennkammer von 0·D_E auf 3·D_E erhöht, erhöht sich der Schalldruckpegel bei einer Frequenz größer als 1kHz um ca. 4dB(C). Es kann somit mehr unbehandelter hochfrequenter Schall entweichen, bevor der Abgasstrahl in das Leitrohr eintritt.

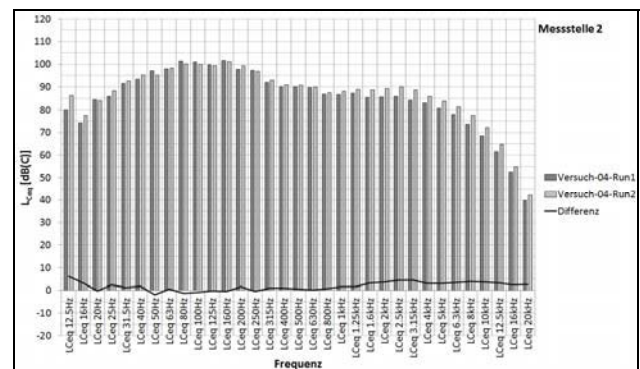


BILD 10. Vergleich des Frequenzspektrums an Messposition 2 bei verändertem Abstand des Leitrohrs zur Brennkammer; aufgenommen bei Versuchszeit t=30s

5.4. Vergleich bei verändertem ROF-Wert

Der Unterschied des an Messstelle 2 gemessenen Schalldruckpegels bei verändertem ROF ist in BILD 11 erkenntlich. In beiden Versuchen (04 Run 1 und 04 Run 2) wurde das Mischungsverhältnis von Sauerstoff zu Wasserstoff nach der Zeit t=40s jeweils von ROF 6 zu ROF 5 verändert. Dieser Betriebspunktwechsel ist in der Abbildung durch den Pfeil markiert. Die Schalldruckpegel beider Versuche zeigen eine kleine Erhöhung, die zwischen 0,5dB(A) und 1dB(A) liegt.

In BILD 12 sind die Frequenzspektren des Versuchs 04 Run 1, aufgeteilt in die beiden Betriebspunkte mit dem Mischungsverhältnis ROF 6 und ROF 5, abgebildet. Ebenso wie bei der Betrachtung des Schalldruckpegels zeigt sich eine minimale Erhöhung bei niedrigerem ROF-Wert. Die Reduzierung findet im kompletten Frequenzbereich statt.

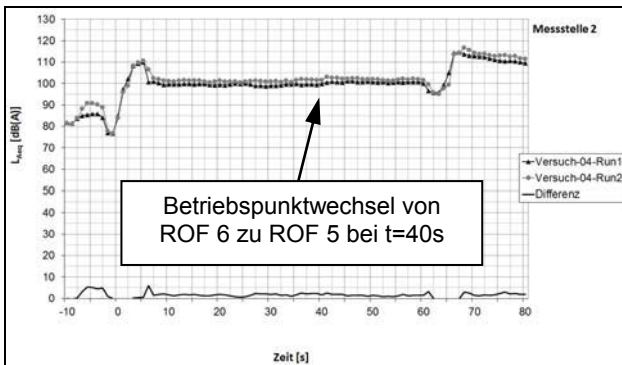


BILD 11. Vergleich des Schalldruckpegels an Messposition 2 bei verändertem Abstand des Leitrohrs zur Brennkammer und bei einem ROF-Betriebspunktwechsel von ROF 6 auf ROF 5

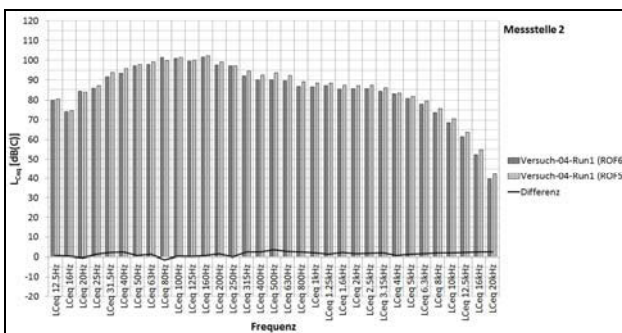


BILD 12. Vergleich des Frequenzspektrums an Messposition 2 bei einem Betriebspunktwechsel von ROF6 zu ROF5; aufgenommen bei Versuchszeit t=30 (ROF 6) und t=50s (ROF 5)

6. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Bericht wurden die Schallpegelmessungen beim Einsatz eines schallmindernden Leitrohrs am Prüfstand P8 des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Lampoldshausen vorgestellt. Im Rahmen der Abnahmeversuche wurden hierzu fünf verschiedene Versuche mit unterschiedlichen Parametern gefahren. Grundsätzlich konnte die lärmindernde Wirkung des Leitrohrsystems mit Wassereinspritzung nachgewiesen werden. Während der Einfluss des gefahrenen Treibstoffmischungsverhältnisses eher gering war, zeigte es sich, dass sowohl die Menge des eingespritzten Wassers als auch der Abstands des Leitrohrs zur Brennkammer Einfluss auf die Schallreduktion hat. Die maximal gemessene Reduktion des Schalldruckpegels ergab sich zu 22dB(A). Diese Lärminderung ist durch Dämpfungseffekte bei Frequenzen >100Hz herbeigeführt. Ein Grund für diese große Reduzierung ist in dem hohen Verhältnis von am ersten Einspritzring eingespritzten Wasser zum Heißgasmassenstrom zu sehen. Das Verhältnis liegt bei ca. 12:1 für 50l/s Wasser am ersten Einspritzring bzw. entsprechend bei ca. 8,5:1 für 35l/s Wasser und ist so groß, da der gesamte Heißgasmassenstrom der verwendeten herunterskalierten Brennkammer lediglich 4,185kg/s (für ROF 6) bzw.

4,075kg/s (für ROF 5) beträgt. Für leistungsstärkere Triebwerke mit größeren gesamten Massenströmen am Prüfstand P8 und vor allem für die Großprüfstände bei Triebwerken mit 140t Schub ist dieses Verhältnis aufgrund der dann benötigten Menge an Wasser nicht realistisch. Hier können typischerweise Verhältnisse von Wasser zu Treibstoff von ca. maximal 3:1 realisiert werden. Um für solche Betriebsverhältnisse Aussagen über Lärminderung machen zu können, sind weitere Versuche am P8 mit höheren Massenströmen der eingesetzten Raketenbrennkammer erforderlich. Die nächsten akustischen Versuche werden dazu mit ca. 12-14kg/s Treibstoffmassenstrom am P8 durchgeführt.

7. REFERENZEN

- [1] DLR-LA-P8-TB-036; *Evaluation of noise emission measurements during P8 tests*; 2007
- [2] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm); 1998
- [3] C. K. W. Tam; *Jet Noise: Since 1952* ; Theoret. Comput. Fluid Dynamics; vol. 10; pp. 393-405; 1998
- [4] J. Lighthill; *On sound generated aerodynamically* ; Proc. Roy. Soc.; vol. 211; pp. 564-587; 1952
- [5] J. E. Ffowcs-Williams; *The Noise from Turbulence Convected at High Speed* ; Phil. Trans. Roy. Soc. London; vol. 255; pp. 469-503; 1963
- [6] C. K. W. Tam; *On the noise of a nearly ideally expanded supersonic jet*; J. Fluid. Mech.; vol. 51; pp. 69-95; 1972
- [7] A. Powell; *The influence of the exit velocity profile on the noise of a jet*; Aero. Quart. IV; pp.341-360; 1954
- [8] B. Henderson; *Fifty years of fluidic injection for jet noise reduction*; International Journal of Aeroacoustics, vol. 9, pp. 91-122; 2010
- [9] DLR-LA-EG-TB-029; *CFD Simulation of the P8 guiding tube*; 2008
- [10] S. McInerny; *Rocket Noise – A Review*; AIAA 13th Aeroacoustics Conference; AIAA-90-3981; 1990
- [11] K. M. Eldred; *Acoustic loads generated by the propulsion system*; NASA SP-8072; 1971
- [12] H. Dahlen; *Schalldämpfung von Forschungs- und Entwicklungsanlagen für Strahltriebwerke*; DFL Bericht-112; pp. 117-123; 1959