

**Projektarbeit**

# **Raketenbrennkammer Prüfstand**

„Exegi monumentum aere perennius“

## **Vorversuche**

Verfasser: G. Ermini

Swiss Propulsion Laboratory  
Weststrasse 69  
CH-4900 Langenthal

## Zusammenfassung

Im Rahmen des ersten Arbeitsschrittes wurde das Grobkonzept für den Bau eines Schalldämpfers für den Raketentriebwerksprüfstand erarbeitet und durch Versuche mit einem Modell die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen untersucht.

Die in diesem Arbeitsabschnitt gewonnenen Erkenntnisse sehen wie folgt aus:

1. Mit den uns zur Verfügung stehenden Mitteln und Möglichkeiten kann ein wirkungsvoller Schalldämpfer gebaut werden.
2. Um die Lüftung sicherzustellen genügt es, einen relativ schwachen Ventilator auf der Druckseite zu verwenden. Nach der Zündung erzeugt der Abgasstrahl eines Raketentriebwerks genügend Pumpwirkung um alle vorgesehenen Strömungstechnischen Hindernisse sicher zu überwinden.
3. Alle Elemente des Schalldämpfers müssen dicht ausgeführt werden. Selbst kleinste Öffnungen können wirkungsvolle Schallbrücken sein.
4. Der entscheidende Clou ist der Einsatz von viel Wasser am richtigen Ort. Die Wassereinspritzung sollte möglichst nahe beim Triebwerk beginnen und „Sprühwände“ normal zur Strömung bilden. Nach Ende des sichtbaren Strahles müssen keine Einspritzdüsen mehr eingebaut werden, aber es sollte gewährleistet sein, dass sich noch eine hohe Tröpfchendichte in der Strömung befindet. Kurz vor dem Austritt sollte noch eine Kondensationskammer eingebaut werden.
5. Ein- und Auslass des Schalldämpfers sollten sich möglichst nahe am Boden befinden und schallabsorbierend ausgeführt sein.

Der nächste Bericht wird sich mit der praktischen Ausführung des Projekts befassen.

Langenthal, den 24. März 2004,  
Dipl. Ing. FH Gianni Ermini



---

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	3
Formelverzeichnis	3
1 Einleitung	4
2 Pflichtenheft	5
3 Der Entwurf	6
3.1 Gegeben	6
4 Die Konstruktion	8
4.1 Vorversuche	9
4.2 Resultate der Versuche	13
4.3 Empfehlungen für den Bau des Schalldämpfers.	16
5 Literaturverzeichnis	17
6 Programmverzeichnis	18

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 :isometrische Ansicht des Entwurfs .....	6
Abbildung 2 :Grundriss des Entwurfs .....	6
Abbildung 3 :Container .....	6
Abbildung 4 : Konzept des Modellprüfstandes .....	9
Abbildung 5 : Zusatzelemente des Modellprüfstandes .....	13
Abbildung 6 : Triebwerk im Modellprüfstand .....	15

## Formelverzeichnis

Formel 1 : Grenzfrequenz .....	8
Formel 2 : Schalleistung .....	8
Formel 3 : Antriebsleistung .....	8
Formel 4 : Schallpegel.....	8
Formel 5 : Massenstrom .....	8
Formel 6 : Volumenstrom.....	8
Formel 7 : Antriebsleistung Ventilatorantrieb .....	9
Formel 8 : Kernlänge des Freistrahles.....	9
Formel 9 : Durchmesser der Eintrittsblende .....	10
Formel 10 : Mittengeschwindigkeit.....	10
Formel 11 : Freistrahlwinkel .....	10
Formel 12 : Volumen des Modells .....	10
Formel 13 : l/d Verhältnis .....	10
Formel 14 : Durchmesser des Modellrohres.....	10
Formel 15 : mittlere Strömungsgeschwindigkeit .....	10
Formel 16 : dynamischer Druck .....	10



## **1 Einleitung**

Aufgrund der auftretenden Lärmemissionen und um den gelegentlichen Besuchen von Polizei und erbosten Nachbarn entgegenzuwirken, wurde beschlossen, einen Prüfstand mit Schalldämpfer für Raketentriebwerke zu entwickeln und zu bauen.

Zur Verfügung stehen dazu zwei 40-Fuss Frachtcontainer und fünf zwei Meter lange Stahlrohre mit dem Aussendurchmesser von 1.75 Meter, sowie ein erprobter und bewährter Prüfstand mit Peripherie.

In der ersten Phase soll das Konzept erstellt und die Notwendigen Grundlagen erarbeitet werden.

## 2 Pflichtenheft

### Ziele:

Das Ziel dieses Projektes ist es, einen geschlossenen Prüfstand mit Schalldämpfer für Raketenbrennkammern bis etwa 30kN Schub zu konstruieren. Darin Inbegriffen ist auch die notwendige Infrastruktur wie etwa Messsysteme, eine ausreichende Wasser- und Stromversorgung, Treibstoffsysteme und Lüftung.

Für die Konstruktion stehen ein normalhoher, 40-Fuss langer Container, ein extrahoher 40-Fuss Container, sowie fünf 1.75x2.00m grosse Stahlrohrsegmente zur Verfügung. Der eigentliche Prüfstand ist bereits aufgebaut und getestet worden.

Die bestehende Tankanlage für Flüssigtreibstoffe und -oxidatoren soll weiterverwendet werden. Im Falle einer Explosion oder eines Feuers muss gewährleistet sein, dass die benachbarten Gebäude nicht Feuer fangen oder zerstört werden.

Die Wände sollen doppelt ausgeführt und der Zwischenraum mit Sand gefüllt werden.

Die Auslegung der ersten Phase muss es ermöglichen, ein 10kN Triebwerk zu Testen.

Dieser Prüfstand wird im Rahmen der Basisentwicklung von regenerativ gekühlten Triebwerken aufgebaut.

### 3 Der Entwurf

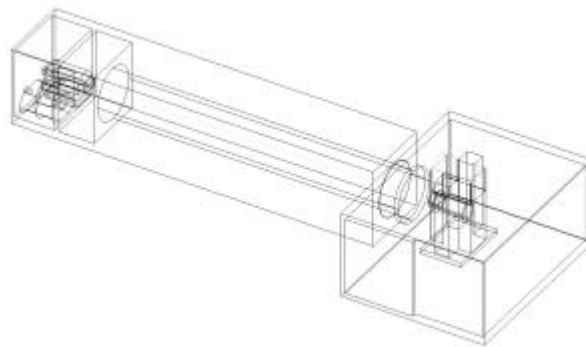


Abbildung 1 :isometrische Ansicht des Entwurfs

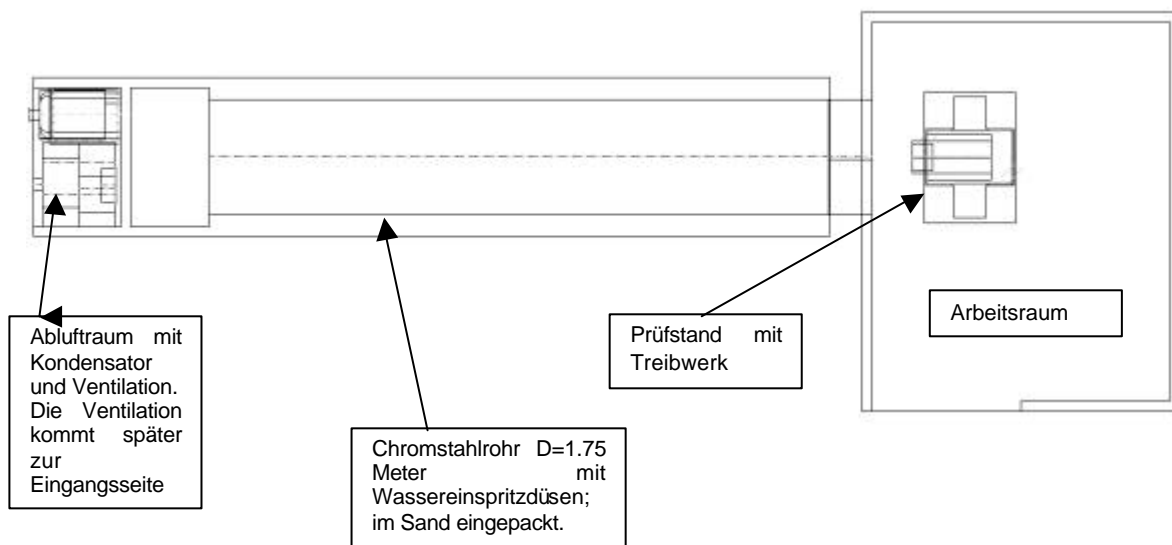


Abbildung 2 :Grundriss des Entwurfs

#### 3.1 Gegeben

Der Standort für den Prüfstand befindet sich auf dem Werksareal der Firma ARO-Technologies in Langenthal. Der Grundstücksabschnitt bietet ausreichend Platz für die Container und lässt noch genügend Platz, um einen Camion passieren zu lassen.

Als „Gebäude“ stehen zwei 40“ Container bereit. Einer in der 2.6m hohen Variante für das Rohr und einer in der höheren 2.9m Variante, der, halbiert und seitlich zusammengeschweisst, das Prüfstandgebäude wird.

#### 40" Container Höhe 8'6" und 9'6"



Abbildung 3 :Container

	Aussen	Innen
Länge	12192	11978
Breite	2428	2352



---

<b>Höhe 8'6"</b>	2591	2352
<b>Höhe 9'6"</b>	2896	2697
<b>Gewicht</b>	3850 kg	

Die Rohre bestehen aus 4103 Rostfreiem Stahl. Sie wurden aus 2mm dicken Blechplatten zu 2m langen und im Durchmesser 1.75m grossen Röhren gewalzt und zusammengesweisst. Um Formtreu zu bleiben, müssen sie noch mit Flanschen und Rippen versehen werden.

Der eigentliche Prüfstand, der in den Schalldämpfer eingebaut wird, existiert bereits und hat seine Tauglichkeit schon mehrfach unter Beweis gestellt. Die Struktur ist auf 100kN ausgelegt und auf einem 2.5 Tonnen schweren Betonblock montiert. Er ist mit diversen Montagemöglichkeiten für Triebwerke, Hilfsaggregate, Messsysteme, Treibstoffversorgung, u.v.m ausgestattet.

Das Tanksystem besteht aus zwei Chromstahl tanks, welche auf Drücke von etwa 40 Bar ausgelegt sind. Das Tanksystem inklusive seiner Steuerung wurde bereits erfolgreich getestet.

## 4 Die Konstruktion

Berechnungen der zu erwartenden Lärmemissionen bei 10kN Schub Alkohol/LOX (Luftscha) in 100m Abstand bei verschiedenen Dämmvolumen.

Als Helmholtzresonator betrachtet, ergibt sich eine Grenzfrequenz von:

$$f_g = \frac{a}{2 * p} * \sqrt{\frac{A}{V * L}} \approx 6Hz$$

Formel 1 : Grenzfrequenz

Gemäss AIAA-90-3981 beträgt die Schalleistung an der Emissionsquelle (kurz nach dem Düsenaustritt):

$$P_{Sound} = h_{akustisch} * P_{Mech}$$

Formel 2 : Schalleistung

mit  $h_{akustisch} = 0.005$  und

$$P_{Mech} = 0.5 * F_{Schub} * c_{Austritt}$$

Formel 3 : Antriebsleistung

mit der Annahme, die Austrittsgeschwindigkeit betrage 3000 m/s ergibt sich:

$$P_{Sound} = 75kW$$

Im Innern des Prüfstands herrscht demnach, unter der Annahme das Schallfeld sei diffus, ein Schallpegel von etwa:

$$L = 10 * \log\left(\frac{P_{Sound}}{P_0}\right) = 168.75dB$$

Formel 4 : Schallpegel

mit der Bezugsschalleistung  $P_0 = 10^{-12}$  Watt.

Die Abschätzung des Massen- und des Volumenstroms ergibt für 10kN:

$$\dot{m} = \frac{F_{Schub}}{c_{Austritt}} = 3.33 \frac{kg}{s}$$

Formel 5 : Massenstrom

Wiederum mit der Annahme, die Austrittsgeschwindigkeit sei 3000 m/s.

$$\dot{V}_{Abgas} = \frac{\dot{m}_{Abgas} * \frac{R}{M_{Abgas}} * T_{Abgas}}{P_{Umgebung}} = \frac{3.33 \frac{kg}{s} * \frac{8315 \frac{J}{kmol * K}}{24 \frac{kg}{kmol}} * 1000K}{100000 \frac{kg}{m * s^2}} = 11.56 \frac{m^3}{s}$$

Formel 6 : Volumenstrom

Der Abluftventilator vom Typ MV70TV ist für  $4.16 \text{ m}^3/\text{s}$  bei einer Drehzahl von  $3200 \text{ min}^{-1}$  und einem Differenzdruck von  $6242.6 \text{ Pa}$  (710mm Wassersäule) ausgelegt. Bei einem Wirkungsgrad von 78% für den Ventilator und 85% für den Drehstromantriebsmotor ergibt sich eine benötigte Leistung von:

$$P_{mot} = \frac{P_{venti}}{h_{mech}} = \frac{\dot{V}_{Luft} * \Delta p_{venti}}{h_{mech} * h_{venti}} = 39.2 \text{ kW}$$

Formel 7 : Antriebsleistung Ventilatorantrieb

für  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  werden dann bereits  $55.6 \text{ kW}$  benötigt.

Da das Absaugen der Abgas mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich ist, soll das Gebläse auf der Druckseite verwendet und die Energie des Abgasstrahles zur Unterstützung der Pumpwirkung eingesetzt werden. Die Möglichkeiten und Grenzen dieser Methode werden im Rahmen von Vorversuchen ermittelt.

## 4.1 Vorversuche

Um die Berechnungen zu bestätigen und zu verfeinern werden Vorversuche unternommen. Zuerst werden das Pumpverhalten des Triebwerksstrahls und die Auswirkungen von Blenden an beiden Rohrenden untersucht. Dazu wird verkleinertes Modell der Abgasröhre gebaut und mit einem kleinen 20N Triebwerk getestet.

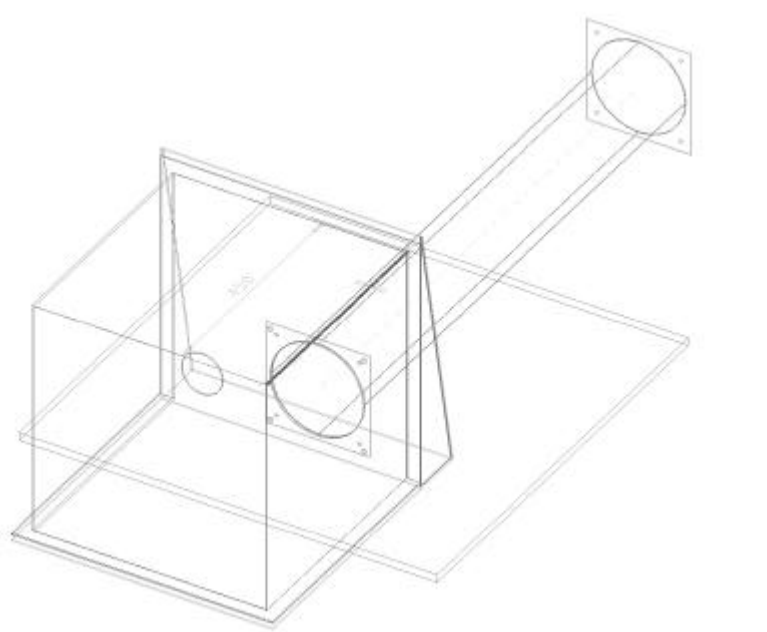


Abbildung 4 : Konzept des Modellprüfstandes

Dazu wird der Abgasstrahl nach dem Modell des isothermen<sup>1</sup> Freistrahles berechnet:

$$x_0 = \frac{d_0}{m} = 0.125 \text{ m}$$

Formel 8 : Kernlänge des Freistrahles

<sup>1</sup> Natürlich ist der Strahl anisotherm, doch da der Strahl nach der Einlassblende in einem relativ engen, waagrechten Rohr verläuft, werden die thermischen Auftriebskräfte vernachlässigt.

wobei  $x_0$  die Kernlänge ist,  $d_0$  der Düsenaustrittsdurchmesser (hier 0.02m) und  $m$  die Mischzahl (Richtwerte: 0.1(laminar)...0.3(turbulent)). Die Austrittsöffnung des Triebwerks wird in diesem Abstand vom Rohr aufgestellt. Die im Dubbel aufgeführten Relationen besagen, dass bei der Länge  $x_0$  der Düsenstrahl etwa den doppelten Volumenstrom mitzureissen vermag, was bedeutet dass 0.21m<sup>3</sup>/s durch das Rohr geführt werden. Bei  $x_0$  beträgt der Öffnungswinkel Gamma des Freistrahles etwa 16°, während der Abgasstrahl noch weitgehend parallel verläuft (näherungsweise...). Der notwendige Mindestdurchmesser für die Eintrittsblende berechnet sich dann wie folgt:

$$x_0 * \sin(\gamma) + d_0 = 0.075m$$

**Formel 9 : Durchmesser der Eintrittsblende**

Wird ein anderer Abstand als  $x_0$  verwendet, ändert sich auch der Öffnungswinkel des Strahles. Winkel ab einer dreifachen Länge von  $x_0$  zu berechnen macht kaum einen Sinn, da der grösste Teil des Strahles bereits zu stark verwirbelt ist. Anhand der Geschwindigkeit am Ausbreitungsrand  $v_x$  (Richtwert: 0.5\*v<sub>m</sub>) und der Mittengeschwindigkeit

$$v_m = v_0 * \frac{x_0}{x}$$

**Formel 10 : Mittengeschwindigkeit**

Lässt sich der lokale Öffnungswinkel des Freistrahles berechnen:

$$\frac{\gamma}{2} = \arctan\left(0.707 * m * \sqrt{\ln\left(\frac{v_m}{v_x}\right)}\right)$$

**Formel 11 : Freistrahwinkel**

Das benötigte Rohrvolumen wird in Abhängigkeit des Treibstoffmassenstromes berechnet:

$$V_{klein} = \frac{\dot{m}_{20N}}{\dot{m}_{10kN}} * V_{gross} = 0.1444m^3$$

**Formel 12 : Volumen des Modells**

Aus den Längen-/Volumenverhältnissen lässt sich der Durchmesser berechnen:

$$\frac{l_{gross}}{d_{gross}} = \frac{l_{klein}}{d_{klein}} \rightarrow l_{klein} = 5.7143 * d_{klein}$$

**Formel 13 : l/d Verhältnis**

$$d_{klein} = \sqrt[3]{\frac{V_{klein}}{1.43 * p}} = 0.321m$$

**Formel 14 : Durchmesser des Modellrohres**

und ebenfalls die Länge:  $l_{klein} = 1.84m$

Aus der Geometrie und dem Volumenstrom berechnet sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit:

$$\bar{c}_{strömung} = \frac{\dot{V}}{A_{Rohr}} = 2.6 \frac{m}{s}$$

**Formel 15 : mittlere Strömungsgeschwindigkeit**

und der dynamische Druck:

$$p_{kin} = \frac{\bar{c}_{strömung}^2 * \rho_{Luft}}{2} = 4.3Pa$$

**Formel 16 : dynamischer Druck**

Die Austrittsblende darf keinen Rückstau verursachen, daher sollte die Widerstandszahl kleiner oder gleich eins sein. Um dies zu erreichen, muss das Flächenverhältnis gleich 0.2 sein; das ergibt einen Austrittsdurchmesser von 0.065m.

Aus Zeit- und Kostengründen wurde für die Konstruktion bereits vorhandenes Material verwendet. Das zur Verfügung stehende Rohr hat die Abmessungen:

- $D_a=180\text{mm}$
- $D_i=178\text{mm}$
- $l=1020\text{mm}$
- $V=0.0254\text{m}^3$

Aus dem Verhältnis:  $\frac{V_{kl}}{V_{gr}} * \dot{m}_{10kN} = 0.0035 \frac{kg}{s}$  wird der Berechnungsmassenstrom ermittelt. Da

zuerst das kleinere Starttriebwerk verwendet wird ändert sich  $x_0$  zu: 0.04375m, der Durchmesser der Eintrittsblende auf 20mm und der Austritt auf 36mm.

Das heisst die Volumenströme reduzieren sich zu:

- $V_{\text{Triebwerk}}=0.01212\text{m}^3/\text{s}$
- $V_{\text{gesamt}}=0.0364\text{m}^3/\text{s}$

die Strömungsgeschwindigkeit zu: 1.46m/s und der Austrittsdurchmesser auf 35mm. Das Modell der Prüfstandbox sollte demnach ein Volumen von  $V_{\text{Box}} = 3.6 * V_{\text{Rohr}} = 0.09144\text{m}^3$  (Würfel mit 45cm Kantenlänge) und eine Ansaugöffnung von  $A_{\text{Einlass}} = 1.04 * 10^{-2} * A_{\text{Venti\_aus}} = 0.00133\text{m}^2$  haben (äquivalenter Durchmesser 40mm).

Bei den ersten Versuchen ist aufgefallen, dass die Austrittsblende aus Sicherheitsgründen anders gestaltet werden muss. Statt einem zentralen Loch sollen oben und unten zwei widerstandsgleiche Kreissegmente oder ein widerstandsgleicher Lochkreis an der Peripherie eingesetzt werden. Nötig wird diese Massnahme, da sich bei der anfänglichen Konfiguration brennbare Gemische im oberen und unteren Teil der Röhre sammeln könnten und dadurch die Möglichkeiten für Gasexplosionen gegeben sind.

Des Weiteren haben die Versuche gezeigt, dass das Rechenmodell der Ein- und Austritts Löcher ungenügend ist. Durch Hörtests konnten erste qualitative Ergebnisse des Dämmvermögens der Apparatur erhalten werden. Obwohl das Geräusch bereits bedeutend leiser wurde und die aggressive Note fehlte, ist der entstehende Ton immer noch unangenehm und hat einen relativ hohen Pegel. Das Rohr erwärmt sich sehr schnell, obwohl die eingesetzten Leistungen auch im Verhältnis zum Modell recht bescheiden sind. Dies hat gezeigt, dass eine Wassereinspritzung in jedem Fall unumgänglich ist. Bei Versuchen ohne vordere Platte war eine akustische und strömungstechnische Verbesserung zu beobachten. Aus sicherheitstechnischen Gründen und, damit sich die Box nicht durch das verwendete Wasser füllt, wird diese aber weiterverwendet.

Änderungen nach den ersten, rein qualitativen Versuchen:

1. Um den Ventilatorvolumenstrom und um die Sichtbarkeit des Abgasstrahles zu verbessern, wird eine neue Frontplatte eingesetzt. Eine grössere Öffnung soll auch die entstehenden Strömungsgeräusche etwas mildern.

Um der späteren Realität Rechnung zu tragen, sollte der Durchmesser der vorderen Platte auf 80mm erweitert werden, doch bei der Demontage der Platten waren die Spuren heftiger Rückströmungen sichtbar; die Spuren auf der Rückseite der vorderen Platte zeigten, dass ein Loch mit etwa 40mm Durchmesser den Gegebenheiten am ehesten gerecht wird. Auf die Geräuschentwicklung sollte diese Massnahme keinen Einfluss haben, als Geräuschquelle ist eindeutig der Austritt geortet werden. Für den Einlass wird neu die ehemalige Austrittsplatte mit einem 36mm Loch verwendet. Nach einem kurzen Versuch hat sich

gezeigt, dass diese tatsächlich sehr gut geeignet ist. Der kleinere Durchmesser mindert auch die Auswirkungen von Verpuffungen im Rohr zur Triebwerksseite hin.

2. Ins Rohr werden bei  $l=0.33\text{m}$  Wasserdüsen, die, als Löcher in einem Silikonschlauch, zur Mitte der Strömung zielen, eingebaut. Beobachtungen und Nachrechnung haben gezeigt, dass der heiße Strömungskegel des Freistrahles etwa in der Mitte des Rohrs auf die Wand trifft. Die Strahlabreitung kann unabhängig vom Volumenstrom berechnet werden:

$$d_{\text{Strahl}} = 2 * m * \sqrt{0.5 * \ln(2) * x}$$

Auf diesem Kegel wird Strömungsgeschwindigkeit mit der Hälfte der Kerngeschwindigkeit des Strahls veranschlagt, bei Raketentriebwerken die Geschwindigkeit der subsonischen Grenzschicht. Um die Rohrwand sicher vor dem Strahl zu schützen und um einen leichten Druckabfall in der Strömung zu erzeugen, wurde die Annahme getroffen, es sei von Vorteil etwas vor dieser Stelle Wasser einzuspritzen.

3. Zum Erreichen der angesprochenen Sicherheit wird eine neue Endplatte gebaut. Sie wird oben und unten mit Kreissegmentförmigen Öffnungen versehen und sie erhält in der Mitte eine rechteckige Berstscheibe aus Aluminiumfolie. Die Berechnung des Auslassquerschnittes wird nun wie folgt vorgenommen (da ist mir weiter oben ein kleiner Fehler unterlaufen):

$$\sqrt{0.2 * d_{\text{Rohr}}^2} = d_{\text{äquivalent}}$$

Damit lassen sich nun die Kreissegmente berechnen:

$$A_{\text{Segment}} = \frac{\left[ r_{\text{Rohr}}^2 * \arccos\left(\frac{r_{\text{Rohr}} - h_{\text{Segment}}}{r_{\text{Rohr}}}\right) - \sqrt{2 * h_{\text{Segment}} * r_{\text{Rohr}} - h_{\text{Segment}}^2} * (r_{\text{Rohr}} - h_{\text{Segment}}) \right]}{2}$$

Damit die Strömungsverhältnisse stimmen muss der hydraulische Durchmesser gleich sein:

$$d_{\text{äquivalent}} = \frac{4 * A_{\text{gesamt}}}{U_{\text{gesamt}}} = \frac{8 * A_{\text{Segment}}}{2 * \left( r_{\text{Rohr}} * \arccos\left(\frac{r_{\text{Rohr}} - h}{r_{\text{Rohr}}}\right) + 2 * \sqrt{2 * h_{\text{Segment}} * r_{\text{Rohr}} - h_{\text{Segment}}^2} \right)}$$

Somit werden die Segmente 37.3mm hoch. Die Aluminiumfolie widerstand den bei der Zündung entstehenden Druckwellen lediglich drei Versuche lang und wurde durch eine 0.05mm dicke Edelstahlfolie ersetzt.

4. Zusätzlich wird das Endvolumen simuliert. Es hat sich bei den ersten Testläufen gezeigt, dass eine Schallabsorption am Auslass unumgänglich ist.

Das Endvolumen wird zu:

$$\frac{V_{\text{Rohr}}}{V_{\text{Endvolumen}}} = \frac{24.0528\text{m}^3}{13.7081\text{m}^3} = 1.755 \text{ und damit: } \frac{V_{\text{Rohr\_klein}}}{1.755} = \frac{0.025382\text{m}^3}{1.755} = 0.01447\text{m}^3$$

Die Masse werden auf den Flansch angepasst, was die Masse 250x250x231mm ergibt.

Das Endvolumen erhält zusätzlich auf der Oberseite einen Anschluss für Absorptionsdämmelemente und einen Abfluss.

Weitere Probeläufe mit dem Modell haben gezeigt, dass Box, Rohr und die beiden Blenden die Lärmemissionen von 124 auf 112 dB(A) reduzieren. Weiter wurde beobachtet, dass das Rohr durch den Abgasstrahl selbst zum Schwingen angeregt wird. Es wird sich in weiteren Versuchen zeigen, ob es möglich ist, diese noch einzig durch Massnahmen im Endvolumen zu dämpfen, oder ob man das Rohr selbst noch anders gestalten muss.



Abbildung 5 : Zusatzelemente des Modellprüfstandes

Kommentar zu Abbildung 4: im Uhrzeigersinn von oben: Absorptionskamin, Endvolumenbox, Triebwerksbox, Deckel Endvolumen und Rohrdämmelemente.

Um den Ablauf in Ruhe betrachten zu können werden zwei Druckmesssonden und ein Schallpegelmessgerät mit einem Mess-PC verbunden. Ein weiteres Schalpegelmessgerät mit Speicherfunktion misst den Spitzenwert des Schallpegels.

## 4.2 Resultate der Versuche

Hier sind die Resultate der 70 Versuche in tabellarischer Form zusammengefasst.

Versuch Nr.	$L_{\max}$ [dB]	$L_{\text{mittel}}$ [dB]	$P_c$ [Bar]	$P_d$ (B:U) [Pa]	$P_d$ (B:R) [Pa]	Bemerkungen
1	~126	118.5	6.59	-	-	Freies Triebwerk
2	-	107.9	6.8	-	-	Mit Box & Rohr
3	-	107.2	6.62	-	-	Mit Box, Rohr, Endvolumen (=EV) & Absorberelement am Austritt (=Kamin)
4	123	118	15.62	-	-	Mit Rohr & höhere Treibstoffdrücke
5	107.5	106.9	8.01	-	-	Mit Box, Rohr, Endvolumen, Kamin & Sprühwasser
6	106.5	106.7	7.54	-	-	Dito, Temperaturmessung am Rohr ohne Wasser: $T=35^{\circ}\text{C}$
7	106	106.7	7.28	-	-	Dito mit Wasser $T=28^{\circ}\text{C}$
8	-	106.7	7.25	-	-	Fehlerhafter Versuch
9	109	107	7.31	-	-	Dito, zus. EV-Dämmung, $T=33^{\circ}\text{C}$
10	109	106.9	7.31	-	-	Wie 9, zus. Wasser
11	99	105.4	7.26	-	-	Wie 10, zus. Box Dämmung
12	101.5	97.8	7.46	-	-	Wie 11, ohne Kamin
13	-	-	-	-	-	Fehlerhafter Versuch; keine Zündung
14	121	117.7	8.36	-	-	Neue Referenz, nur mit Rohr
15	98.5	96.56	7.63	-	-	Mit Box, Rohr, Endvolumen, Kamin,



						Sprühnebel, EV- & Box-Dämmung
16	121	118	6.75	-1.3	413	Mit Rohr, EV, Wasser, Kamin & EV-Dämmung
17	121	117.3	7.07	-0.6	481	Wie 16, zus. Einlaufstutzen
18	120	116.9	7.23	-2.5	514	Wie 17, zus. Absorptionsbox um das Triebwerk (=TAB)
19	112	115.7	7.39	-7.4	525	Wie 18, zus. Dämmung der TAB
20	97.5	96.2	7.07	-110	396	Wie 19, aber mit Box & Box-Dämmung
21	101.5	97.2	7.34	-111	415	Wie 20, ohne Kamin
22	101.5	97.2	7.29	-97	-215	Wie 21, Druckmesser am Rohraustritt
23	96.5	96.2	7.27	-94	-230	Wie 22, ohne Ventilator
24	120.5	117.3	7.45	-1.2	-35	Probelauf ohne Box & EV
25	96.5	96	7.46	-97.3	-228	Ausgangswerte festlegen; wie 23
26	101	97	7.49	-93.8	-210	Wie 25 ohne Kamin
27	110	106	7.43	-110	-150	Wie 26 zus. Ohne EV
28	108	105.7	7.29	-95	-125	Wie 27 mit dreifacher Wassermenge
29	108	97.2	7.48	-99	-154	Wie 27 ohne Wasser; Leitungen noch voll.
30	111	105.9	7.31	-74	-146	Wie 29, aber mit leeren Leitung & trocken
31	-	-	-	-	-	Ungültiger Versuch
32	108.5	111.6	7.75	-3.3	-144	Mit allem ausser Box
33	104.5	109.2	7.67	-4.2	-132	Wie 32; zus. Partielles hinteres Dämmelement der Triebwerksabsorptionsbox
34	96	88.2	7.76	-89	-214	Wie 32; zus. Vollständiges hinteres Dämmelement der Triebwerksabsorptionsbox
35	93.5	87.5	7.81	-129	-255	Mit allem + Ventilatorabdeckung (=VA)
36	93.5	87.5	7.71	-124	-269	Dito
37	93.5	87.8	7.72	-107	-239	Mit allem, ohne VA, mit verbesserter Dichtheit
38	94	87.2	7.74	-128	-256	Wie 37, vollständige Dichtheit
39	90.5	86.9	7.74	-166	-286	Wie 38 + VA
40	90.5	86.7	7.75	-174	-302	Dito
41	89	86.7	7.74	-184	-285	Wie 39 mit zusätzlicher Dämmung/Absorption Kaminaustritt (Verlängerung)
42	91.5	86.6	7.77	-173	-279	Wie 41 mit dreifacher Sprühwassermenge
43	87.5	86.5	7.77	-91	-218	Wie 42 mit Ventilator
44	121.5	117.2	8.5	-8.2	-44.3	Referenz für den Testtag
45	122.5	117.6	10.3	-6.9	-87.8	Offen mit O <sub>2</sub> =19bar, HC=16.5bar
46	121.5	117.8	18.6	-7.8	12	Offen mit O <sub>2</sub> =26bar, HC=24bar
47	121.5	116.6	>22.5	-8	6	Offen mit O <sub>2</sub> =33bar, HC=32bar
48	123.5	116.6	>22.5	-12.7	17.3	Offen mit O <sub>2</sub> =40bar, HC=40bar
49	122	116	>22.5	5.5	-95.5	Dito
50	102.5	96.84	11.68	-44.6	-322	Geschlossen (wie 43) mit O <sub>2</sub> =19bar, HC=16.5bar, ohne Kamin
51	95	87.9	11.84	-69.2	-291	Geschlossen (wie 43) mit O <sub>2</sub> =19bar, HC=16.5bar, mit Kamin
52	93.5	87.4	17.96	-117	-383	Geschlossen (wie 43) mit O <sub>2</sub> =26bar, HC=24bar
53	92.5	87.8	>22.5	-187	-588	Geschlossen (wie 43) mit O <sub>2</sub> =33bar, HC=32bar
54	104	88.4	>22.5	-253	-708	Geschlossen (wie 43) mit O <sub>2</sub> =40bar, HC=40bar
55	121.5	114.8	17.56	-4592	11	Referenz für den Testtag (offen)

56	118	114.6	17.64	1149	0	Offen, ohne Pumpe ( $m=0.1255\text{kg/s}$ )
57	118.5	114.4	17.63	1138	-65	Offen, mit Pumpe ( $m=0.1755\text{kg/s}$ )
58	104.5	104.2	17.23	925	-186	Geschlossen, ohne Pumpe ( $m=0.1255\text{kg/s}$ ), ohne Kamin
59	102.5	94.5	17.56	973	-185	Geschlossen, mit Pumpe ( $m=0.1755\text{kg/s}$ ), ohne Kamin
60	108	94.4	17.58	896	-222	Geschlossen, mit Pumpe ( $m=0.1755\text{kg/s}$ ), ohne Kamin, Messung $L_{\max}$ am Austritt
61	111	104.4	17.51	886	-215	Geschlossen, mit Pumpe ( $m=0.1755\text{kg/s}$ ), ohne Kamin, Wasseraustritt 25cm weiter hinten
62	108.5	104.6	17.55	866	-248	Geschlossen, mit Pumpe ( $m=0.1755\text{kg/s}$ ), ohne Kamin, Messung $L_{\max}$ am Austritt
63	105.5	-	$\sim 17.5$	-	-	Mit Auslass Richtung Boden
64	104.5	94.8	17.53	912	-202	Geschlossen, mit Pumpe ( $m=0.1755\text{kg/s}$ ), Auslass Richtung Boden, EV dicht
65	102	94.4	17.54	1017	-160	Geschlossen, mit Pumpe ( $m=0.1755\text{kg/s}$ ), mit Kamin
66	86	94.5	17.85	944	-215	Geschlossen, mit Pumpe ( $m=0.1755\text{kg/s}$ ), mit Kamin, Messung $L_{\max}$ in 8m Entfernung
67	101	94.6	18.17	1058	-179	Wie 65, mit EV Sprühvorrichtung
68	103	94.6	17.94	1028	-192	Wie 65, ohne EV Sprühvorrichtung
69	99	94.6	17.86	494	-156	Wie 68, halber Querschnitt Ende Rohr
70	97.5	94.4	18.42	599	-126	Dito, besser abgedichtet

Der Einfluss des Kammerdrucks auf den Lärmpegel ist bei geschlossenem Prüfstand sehr gering. Bei den Versuchen mit Kammerdrücken von etwa 6 bis 30 Bar traten Pegelunterschiede von maximal 2 dB(A) auf. Diese können ebenso gut von Ungenauigkeiten des Versuchsaufbaus wie auch von der Abweichung des Messgerätes herrühren.

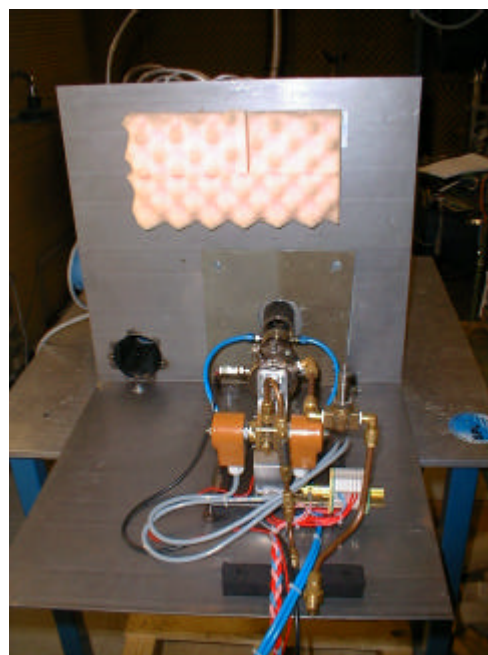


Abbildung 6 : Triebwerk im Modellprüfstand

In der Auswertung verwendete Linearisierungen:

Pegeladdition des Schalldruckmessgerätes:

$$L_{\text{eff}} = L_{\text{Bereich}} + 4.8 * (U_{\text{effektiv}} - U_{\text{Offset}}) - 6 \text{ dB}$$

100Bar/4...20mA Druckmesssonde:

$$p_{\text{Brennkammer}} = 6.25 * (U_{\text{gemessen}} - U_{\text{Offset}}) - 25$$

60Bar/4...20mA Druckmesssonde:

$$p_{\text{Brennkammer}} = 3.75 * (U_{\text{gemessen}} - U_{\text{Offset}}) - 15$$

Auf die Messungen mit der ersten Differenzdruckmesssonde für die Verhältnisse in der Box und im Rohr (Huba-Control) wird nicht mehr eingegangen; die so aufgezeichneten Werte besitzen allenfalls qualitativen Charakter.

Die nachher verwendeten Piezoelektrischen Elemente wurden so eingestellt, dass 1mV einem Pascal entsprach.

### 4.3 Empfehlungen für den Bau des Schalldämpfers.

Folgende Erkenntnisse ergaben sich aus den Vorversuchen:

1. Alle Elemente müssen dicht sein. Selbst kleinste Spalte und Löcher übertragen Lärm nach draussen.
2. Damit die Box mit einem vernünftigen Aufwand realisiert werden kann, sollte diese ein zusätzliches Dämmgehäuse um das Triebwerk herum besitzen. Mehrere ineinander geschachtelte Volumen haben ein besseres Dämmverhalten als eines mit grosser Wandstärke.
3. Der Ventilator muss lediglich die Lüftung während den Vorbereitungsarbeiten gewährleisten. Es traten nie Probleme mit Rückstau oder mangelhafter Entlüftung von irgendwelchen Volumen auf.
4. Wasser. Im Rohr müssen Sprühdüsen und Sprühringe so angebracht werden, dass sie einerseits eine hohe Sprühnebelichte verursachen und andererseits „Wasserwände“ senkrecht zur Rohrachse bilden. Pro Kammer zwischen zwei Wasserwänden kann eine Lärmreduktion von etwa 2-3 dB erwartet werden. Die ersten Wassereinspritzvorrichtungen müssen möglichst nahe am Strahl und am Rohreingang platziert werden. Im Endvolumen sollte eine Berieselungsanlage sein, welche einerseits einen grossen Teil des im Rohr entstandenen Dampfes wieder kondensiert und andererseits als Absorptionselement fungiert. Es lohnt sich, mit Wasser nicht zu sparen.
5. Luft Zu- und Abfuhr sollten sich möglichst nahe am Boden befinden und mit Absorbern versehen sein. Auf der Abluftseite muss das Absorberelement Wasser- und Kraftstofffest sein und möglichst in sich geschlossene Elemente verwenden, um ein Vollsaugen mit Wasser zu vermeiden.
6. Für den Fall einer Explosion oder Verpuffung im Innern der Container muss eine Vorrichtung vorgesehen werden, die einen raschen Druckabbau ermöglicht und trotzdem den Dämmverbund nicht unterbricht. Der Ansatz besteht darin, aus sprödem Material, wie z.B. Gips oder Glasschaum, Berstscheiben zu bauen, welche im Falle einer Explosion buchstäblich pulverisiert werden.

## 5 Literaturverzeichnis

1. Sutton, George P.: Rocket Propulsion Elements, John Wiley & Sons, Inc., New York, 6. Auflage, 1992, ISBN 0-471-52938-9
2. Apel, Uwe: Vorlesungsskript „Raketenstrahltriebwerke“, Hochschule Bremen, Bremen, 2000
3. Huzel, Dieter K.; Huang, David H.: Design of Liquid Propellant Liquid Engines, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, 2. Auflage, 1971
4. Beitz, Wolfgang (Hrsg.); Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.): Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 19. Auflage, 1997
5. von Böckh, Peter: Vorlesungsskript „Strömungslehre“, Fachhochschule beider Basel, Muttenz, 2000
6. Bopp, Urs: Vorlesungsskript „Akustik“, Fachhochschule beider Basel, Muttenz; 2001
7. Sutherland, Louis C.: AIAA-93-4383 “Progress and Problems in Rocket Noise Prediction for Ground Facilities”, 15<sup>th</sup> Aeroacoustics Conference, Long Beach CA, 1993
8. McInerny, S.: AIAA-90-3981 „Rocket Noise – A Review“, 13th Aeroacoustics Conference, Tallahassee FL, 1990

## 6 Programmverzeichnis

1. Microsoft Word 2002
2. Microsoft Excel 2002
3. SDRC I-DEAS MS8