

HOCHFREQUENTE VERBRENNUNGSINSTABILITÄTEN IN RAKETENBRENNKAMMERN MIT LOX / CH₄ SPRAYVERBRENNUNG

M. Sliphorst, B. Knapp, M. Oschwald
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Raumfahrtantriebe, Langer Grund, 74239 Hardthausen

ABSTRACT

Die Wechselwirkung zwischen akustischer Anregung und einem brennenden LOx/CH₄ Spray wird in einer Modellbrennkammer untersucht. Über eine Sirene werden Druckschwankungen in den Brennraum eingekoppelt, die die Verbrennung akustisch anregen. Da jeder Versuch sowohl mit als auch ohne diese Sirene, aber sonst bei gleichen Betriebsbedingungen durchgeführt wurde, ist es möglich den Einfluss von akustischer Anregung auf die Verbrennung festzustellen. Der Vergleich zwischen Versuchen mit und ohne externe Anregung wird über den dynamischen Druck im Brennraum und die mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnete OH-Flammenemission vorgenommen. Durch die zeitlich korrespondierende Messung von Druck und Flammenemission lässt sich ein Responsefaktor, das Verhältnis zwischen Emission- und Druckschwankung, bestimmen. Da die Lage der Eigenmoden durch die asymmetrische Geometrie der Brennkammer bei externer Anregung festgelegt ist, ermöglicht der Responsefaktor Schlussfolgerungen zu ziehen, ob die Wechselwirkung eher über den Druck oder über die Geschwindigkeit stattfindet.

1. EINLEITUNG

Seit den Anfängen der Raumfahrt und den entsprechenden Entwicklungen von Raketentriebwerken beschäftigen Verbrennungsinstabilitäten die Forschung. Während der letzten 60 Jahre ist es nicht gelungen eine fundamentale Lösung zur Vermeidung von Instabilitäten zu finden. Nach wie vor zählen Instabilitäten zu den schwierigsten Problemen bei der Brennkammerentwicklung und gehören deshalb auch zu einem der gefährlichsten Phänomene in Raketebrennkammern. Die durch Verbrennungsinstabilitäten zerstörte thermische Grenzschicht schützt die heißgasseitige Brennkammerwand nicht mehr ausreichend, was einen erhöhten Wärmeübergang zu Folge hat und dementsprechend das Risiko stark erhöht, eine ganze Mission zu verlieren.

Bis jetzt wurden geeignete Maßnahmen (Baffles, Absorber, usw.) eingesetzt um Instabilitäten zu dämpfen, bzw. zu vermeiden. Solche Lösungen konnten allerdings nur auf empirischem Wege gefunden werden, und sind deshalb auch nur für das betreffende Triebwerk gültig und ausreichend wirksam. Trotz aller Anstrengungen war es in der Vergangenheit nicht möglich die Brennkammerprozesse experimentell zu identifizieren, die für die Wechselwirkung zwischen Akustik und Verbrennung verantwortlich sind. Dies ist ein wichtiger Grund, warum im DLR Lampoldshausen hochfrequente Verbrennungsinstabilitäten experimentell untersucht werden. Durch tiefgehende Parameterstudien werden die verschiedenen Brennkammerprozesse bei der LOx/CH₄ Sprayverbrennung und deren Einfluss auf die Wechselwirkung untersucht.

2. PROBLEMBESCHREIBUNG

Verbrennungsinstabilitäten treten immer dann auf, wenn die bereits erwähnte Wechselwirkung zwischen Akustik und Verbrennung sich selbst verstärkt. Diese sogenannte Feedbackschleife tritt auf, wenn das akustische Feld in einem System die Wärmefreisetzung moduliert und das System dadurch instabil wird. Dieses Prinzip ist schon sehr lange bekannt, und wurde erstmals von Sir Lord

J.W.S. Rayleigh formuliert [1]. Rayleigh hat festgestellt, dass zur Anregung einer akustischen Instabilität einem Gas zum Zeitpunkt der größten Verdichtung Wärme zugeführt werden muss. Seine Formulierung wurde in verallgemeinerter Form bekannt als Rayleigh Kriterium (1). Von Putnam [2] wird die mathematische Beschreibung dieses Kriteriums als notwendige aber nicht als hinreichende Bedingung gesehen. Sie lautet

$$(1) \quad \iiint_0^{2\pi} p'q' dt dV > 0 \quad (\text{Rayleigh Kriterium}).$$

In dieser Formulierung symbolisieren p' und q' die Schwankungen von Druck und Wärmefreisetzung. Über eine Periode der akustischen Anregung wird das Produkt von p' und q' integriert. Wenn das Ergebnis größer Null ist, tritt eine selbsterregte Instabilität auf. Dieses Integral wird nur dann positiv, wenn der Phasenunterschied zwischen Druckschwankung und Wärmefreisetzung kleiner als ± 90 Grad ist. In einer Brennkammer führt nun die Verbrennung dem akustischen System Energie zu. Wird die soeben erwähnte Phasenbedingung dann eingehalten, verstärkt sich die Instabilität, bzw. wird die akustische Schwingung durch die Verbrennung verstärkt. Falls nicht, wird sie gedämpft.

Dieses Kriterium ist nicht hinreichend weil es zusätzlich eine weitere Art von Dämpfung gibt. Und zwar durch „natürliche“ Energieverluste wie z.B. Turbulenzen, Schalldämpfung, Strahlung, usw. Das heißt, um Instabilitäten anzuregen, muss außer der eingehaltenen Phasenbedingung auch mehr Energie zugeführt werden als auf natürlichen Weg vernichtet wird.

Die Wärmefreisetzung findet bei der chemischen Reaktion zwischen LOx und CH₄ statt. Diese ist der letzte Schritt in einer Reihe von Teilprozessen. Diese Teilprozesse (Einspritzung, Zerstäubung, Verdampfung, Mischung und Verbrennung) werden alle durch eine akustische Anregung auf irgendeine Art beeinflusst. Eine akustische Welle wird von zwei physikalischen Größen definiert: Druck und Geschwindigkeit. Die Teilprozesse können deshalb grundsätzlich von diesen beiden Parametern beeinflusst werden. Bei einer Druckkopplung

(Einfluss von Druckschwingungen) werden Einspritzrate, Verdampfungsrate und Reaktionsrate beeinflusst. Zerstäubung, Verdampfung und Mischung werden hingegen eher durch eine Geschwindigkeitskopplung beeinflusst. Die Wärmefreisetzungsrate hängt also von den eben genannten Mechanismen ab. Es ist deshalb wichtig zu verstehen, welcher dieser Mechanismen eine dominante Rolle bei der Erregung von Verbrennungsinstabilitäten spielt.

3. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

3.1. Akustik

In einem akustischen Feld wird nach Landau, Lifschitz [3] die Druckänderung durch die folgende, partielle Differentialgleichung (2) beschrieben.

$$(2) \quad \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - c^2 \Delta p' = 0$$

Es wird angenommen, dass die Druckvariation durch eine zeitabhängige harmonische Schwingung beschrieben werden kann (siehe Gleichung (3)).

$$(3) \quad p'(t) \propto \sin(\omega \cdot t)$$

Hiermit vereinfacht sich Gleichung (2) zu einem Eigenwertproblem (4)

$$(4) \quad \Delta p' + k \cdot p' = 0,$$

wobei $k = \omega^2/c^2$ das Quadrat des Verhältnisses von Kreisfrequenz zu Schallgeschwindigkeit darstellt.

Für einen zylindrischen Resonator wie die vorliegende Forschungsbrennkammer (CRC) kann diese Gleichung analytisch gelöst werden. In Gleichung (5) folgt die Lösung für die Druckverteilung in Zylinderkoordinaten (r, φ, z). Hierbei ist J_n die Besselfunktion der Ordnung n mit den Koeffizienten α_{nm} .

$$(5) \quad p'(r, \varphi, z, t) = \sin(\omega t) \cos\left(l\pi \frac{z}{L}\right) \cos(n\varphi) J_n\left(\alpha_{nm} \frac{r}{R}\right).$$

Die Symmetrie der Eigenmoden wird von den Koeffizienten l, n und α_{nm} bestimmt, und ist für die ersten drei Moden in BILD 1 in der Reihenfolge 1T, 2T und 1R dargestellt.

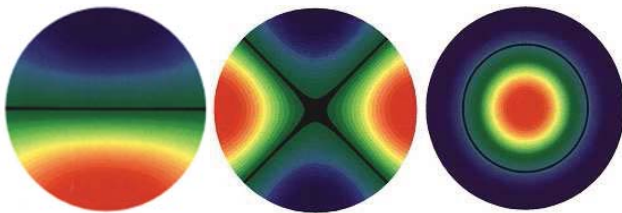


BILD 1. Kreiszyklindermoden

Da ein Kreiszyylinder rotationsymmetrisch ist, ergibt das Eigenwertproblem für Tangentialmoden immer eine doppelte Lösung, bzw. jeder Eigenwert ist doppelwertig. Das heißt, für jeden Eigenwert gibt es zwei mögliche Lösungen, für welche es keine eindeutig festlegende Randbedingung gibt. Die zweite Orientierung liegt dann um $90^\circ/n$ versetzt, wobei n die Ordnung der Tangentialmoden wiedergibt, siehe dazu auch TAB 1.

3.2. Eigenfrequenzen

Es gibt zwei Arten von Eigenmoden, und zwar longitudinale und transversale Moden, deren Frequenzen f_l (longitudinal) bzw. f_{nm} (transversal) über die Gleichungen (6) und (7) nach Harje & Reardon [4] bestimmt werden.

$$(6) \quad f_l = \frac{lc}{2L}$$

$$(7) \quad f_{nm} = \frac{\alpha_{nm} c}{2\pi R}$$

Es wird nun angenommen, dass sich in der Modellbrennkammer (Länge von $L=0,04m$ und Radius von $R=0,1m$) nach der Verbrennung ein Heißgasgemisch mit einer ungefähren Temperatur von $T=2.800K$ und bei einer Schallgeschwindigkeit c_s von ca. $1000m/s$ befindet. Damit können die Eigenfrequenzen der Brennkammer berechnet werden (vgl. TAB 1).

Mode	l	m	n	α_{nm}	f_{lmn} (Hz)
1T	0	1	1	1,841	2930
2T	0	1	2	3,054	4861
1R	0	2	0	3,832	6099
3T	0	1	3	4,201	6686
4T	0	1	4	5,318	8464
1T1R	0	2	1	5,331	8485
5T	0	1	5	6,416	10211
2T1R	0	2	2	6,706	10673
2R	0	3	0	7,016	11166
1L	1	0	0	1	12500

TAB 1. Eigenfrequenzen der Brennkammer.

4. EXPERIMENT

4.1. Testeinrichtung

Für die Untersuchungen von hochfrequenten Verbrennungsinstabilitäten wurde im DLR Lampoldshausen ein spezieller Prüfstand aufgebaut, welcher es erlaubt, eine Forschungsbrennkammer mit den erforderlichen Medien bei unterschiedlichsten Betriebsbedingungen zu versorgen. So kann an diesem Prüfstand z.B. flüssiger Sauerstoff bis 77 K mit bis zu 40 bar Versorgungsdruck bereitgestellt und zugeführt werden. Ebenso können verschiedene Brennstoffe wie Methan (CH_4), Wasserstoff (H_2) oder auch Ethanol und weitere Gase, etwa zur Bedrückung oder zum Spülen, bereitgestellt werden. BILD 2 zeigt im Vordergrund die zylindrische Brennkammer sowie die Sirene zur Anregung von Schwingungen. Auf der rechten Bildhälfte ist der Behälter für flüssigen Stickstoff aufgebaut. Zu Beginn einer Versuchsreihe wird dieser Behälter mit flüssigem Stickstoff (LN_2) gefüllt. Die Temperatur von LN_2 beträgt 77K. Der Sauerstofftank und die Versorgungsleitungen mit dem kryogenen Oxidator LOx (flüssiger Sauerstoff) liegen in diesem Behälter und sind vollständig von LN_2 bedeckt. Nun wird gasförmiger Sauerstoff in den im LN_2 -Bad liegenden Tank gefüllt. Dabei kondensiert der Sauerstoff aufgrund der niedrigen Temperatur von LN_2 in den Tank und wird flüssig.

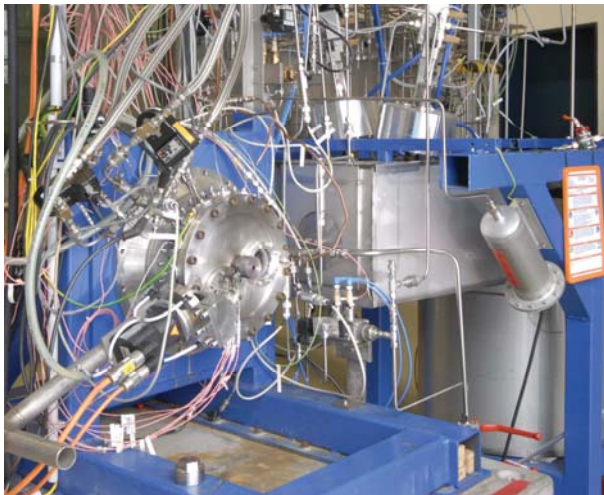


BILD 2. HF-Prüfstand mit Forschungsbrennkammer

4.2. Brennkammer

Für die Versuche wurde eine spezielle Forschungsbrennkammer (CRC) entwickelt (vgl. BILD 3), deren zylindrisches Volumen eine Länge besitzt, die fünfmal kleiner als der Durchmesser ist. Die Geometrie wurde deshalb so gewählt, um longitudinale Moden hin zu hohen Frequenzen zu verschieben (siehe TAB 1) und damit die transversalen Moden besser identifizieren zu können. Eine Beeinflussung von longitudinalen Moden und transverse Moden wird dadurch minimiert.

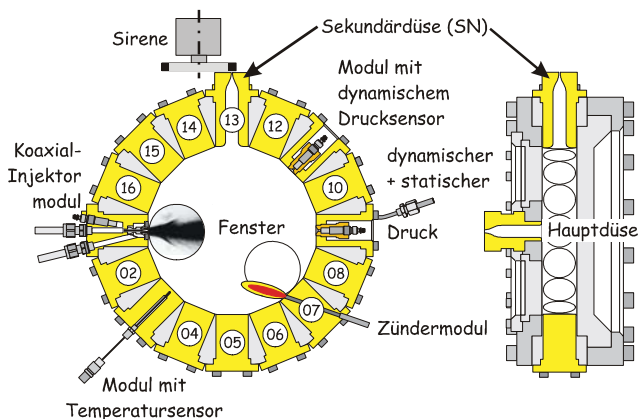


BILD 3. Schnittbild durch die HF-Brennkammer

Um ein höchstmögliches Maß an Flexibilität während der Instabilitätsuntersuchungen zu gewährleisten, können an 16 Positionen, gleichmäßig über den Umfang verteilt, spezielle Module eingebaut werden, in welchen z.B. neben dem Injektor, dem Zünder oder einer zusätzlichen Auslassdüse auch verschiedenste Sensorik eingebaut werden können. Zusätzlich ist die Brennkammer mit Fenstern versehen, durch die ein optischer Zugang in das Brennraumvolumen ermöglicht wird. Die Position dieser Fenster ist ebenfalls variierbar.

Injektormodul: Wesentliches Bauteil ist der Koaxialinjektor zur Einspritzung von LO_x und gasförmigem Methan (GCH_4). Um verschiedene Einspritzbedingungen untersuchen zu können, werden mehrere unterschiedliche Injektoren eingesetzt. Zusätzlich befindet sich in jedem der beiden Treibstoffdome ein dynamischer Drucksensor.

Sensormodule: In diesen Modulen sind wahlweise Druck- oder Temperatursensoren eingebaut, die eine Messung an unterschiedlichen Positionen am Umfang der Brennkammer zulassen.

Sekundärdüse: Diese zusätzliche Düse ist essentieller Bestandteil bei den Untersuchungen. Ihre Position gegenüber dem Injektor ist in Schritten von $22,5^\circ$ variierbar und legt die Symmetrielinie der transversalen Schwingungen fest. Die Austrittsöffnung der Sekundärdüse wird durch eine Sirene kontinuierlich geöffnet und verschlossen. Damit lassen sich gezielt Druckschwingungen in die Brennkammer einkoppeln.

4.3. Sirene

Wie bereits erwähnt wird zur Anregung von akustischen Schwingungen in der Brennkammer die Austrittsöffnung der Sekundärdüse periodisch verschlossen und geöffnet. Im nachfolgenden BILD 4 ist die Öffnung der Sekundärdüse und die mit Zähnen versehene Stahlscheibe zu sehen, die bei Rotation den Auslass in wohl definierten Zeitabständen blockiert.

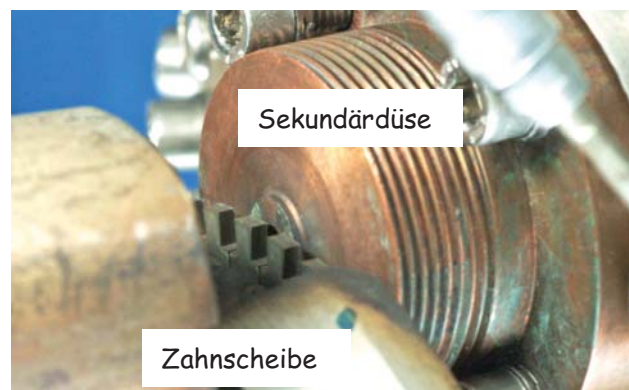


BILD 4. Sirene zur externen Anregung

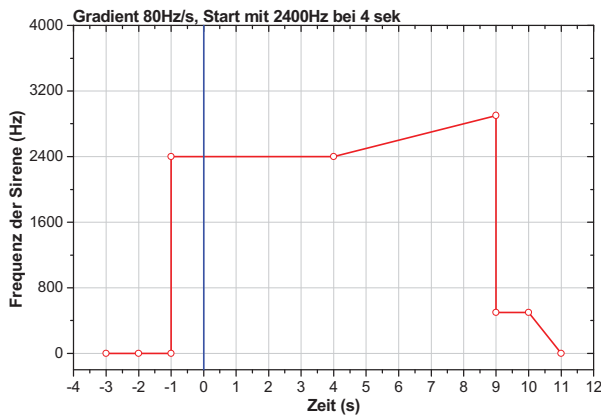
Blockiert die Zahnscheibe nun die Öffnung der Auslassdüse, baut sich kurzzeitig ein Druck in der Brennkammer auf. Im nächsten Schritt wird die Öffnung wieder freigegeben, und es kommt zu einer Druckentlastung. Durch diesen periodischen Vorgang wird eine Druckschwingung in der Sekundärdüse erzeugt und in die Brennkammer eingekoppelt.

Die Sirene wird von einem Elektromotor angetrieben, dessen Drehzahl frei einstellbar ist. Nach Gleichung (8) lässt sich über die maximale Drehzahl von $n = 6000 \text{ U/min}$ und die Anzahl der Zähne z der Zahnscheibe die maximale Frequenz berechnen, mit der die Düse verschlossen bzw. die Verbrennung angeregt werden kann

$$(8) \quad f = z \cdot n$$

Bei Einsatz einer Zahnscheibe mit 60 Zähnen lässt sich damit eine maximale Frequenz von 6000 Hz erzielen, die ausreichend ist, um mindestens die ersten beiden tangentialen Eigenmoden 1T und 2T anzuregen.

Wird nun während eines Versuchs die Anregungsfrequenz der Sirene zum Beispiel mit einer linearen „Rampe“ kontinuierlich durchgestimmt (vgl. BILD 5), lässt sich damit das Spektrum der Eigenschwingungen der Brennkammer ermitteln.

BILD 5. Lineare Frequenzrampe zwischen $t = 4 \dots 9$ s

4.3.1. Einfluss der Sirenenanregungsdauer

Allerdings wurde in sogenannten Kaltversuchen, bei denen die Brennkammer wahlweise mit Stickstoff oder Helium bedrückt wurde und das Gas über die Sekundärdüse ausströmen konnte, festgestellt, dass die Verweilzeit der Sirene bei einer bestimmten Frequenz einen Einfluss auf die Höhe der in der Brennkammer auftretenden Druckamplitude hat. Dazu wurde die Anregung mit der Sirene vorgenommen. Die Position der Sekundärdüse, die Anregungsdauer, das heißt der Gradient der Rampe, sowie der „Brennkammerdruck“ wurden variiert. Bei kleinen Rampengradienten (z.B. 20 Hz/s) koppelt die Sirene dann zeitlich gesehen länger eine Druckschwankung in einem Frequenzintervall in die Brennkammer ein, als wenn die Sirene z.B. mit 400 Hz/s betrieben wird.

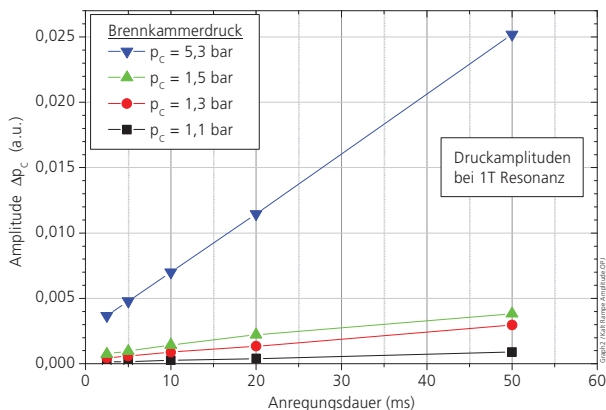


BILD 6. Amplitude als Funktion der Anregungsdauer

Wie BILD 6 zu entnehmen ist, gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen der Dauer der Anregung und der Schwingungsamplitude der Brennkammerantwort. Anders ausgedrückt heißt dies, dass die Amplitude des akustischen Drucks umso höher wird, je länger Energie mit einer bestimmten Frequenz in das System eingekoppelt wird. Zusätzlich kann in BILD 6 abgelesen werden, dass die Schwingungsamplitude mit steigendem Brennkammerdruck zunimmt. Aus diesem Grunde wurde für die im Folgenden beschriebenen Versuche ein Rampengradient von 80 Hz/s gewählt.

Wird nun die Verbrennung über die Sekundärdüse z.B. über eine Rampe angeregt, so tauchen anstelle des berechneten Amplitudenmaximums bei der Eigenfrequenz

der 1T-Mode (vgl. TAB 1) plötzlich zwei Eigenfrequenzen auf. Die eine Frequenz erscheint jetzt knapp unterhalb der berechneten 1T-Frequenz, während die zweite Resonanz knapp oberhalb dieser Frequenz auftaucht. Dieser Beobachtung soll nun im Folgenden Betrachtung geschenkt werden.

4.4. Einfluss von Resonatoren auf die Akustik

Durch den Einbau der Sekundärdüse in einen Schacht am Umfang der Brennkammer (siehe BILD 3) wird der Resonanzraum der Brennkammer verändert. Anstatt eines zylindrischen Resonators befindet sich jetzt ein zusätzlicher, ebenfalls zylindrischer, Resonator an der Brennkammer, der mit dem Brennraumvolumen gekoppelt ist und damit wechselwirkt.

Bisher wurde davon ausgegangen (siehe Abschnitt 3.1), dass nur die Brennkammer als Resonator wirkt. Dadurch konnte diese einfache Geometrie analytisch untersucht werden. Der Einbau der zusätzlichen Düse stellt jedoch einen zusätzlichen Resonator dar, und damit werden die Randbedingungen des durch Gl. (4) angegebenen Eigenwertproblems stark verändert. In diesem Falle ist eine einfache analytische Lösung nicht mehr möglich. Hier hilft nur noch eine numerische Lösung der Wellengleichung.

Zum besseren Verständnis wird nun dieser bereits in [5] beschriebene Zusammenhang nochmals ausführlich veranschaulicht. Wie dort erwähnt führt der Einbau der sekundären Auslassdüse zu einer Störung der Rotationssymmetrie des Brennraumvolumens und hebt damit die Entartung der Tangentialmoden auf. Als Folge teilen sich die ursprünglichen Tangentialmoden auf, und es gibt nun zwei ausgezeichnete Orientierungen der Moden. Im einen Fall befindet sich am Eingang der Sekundärdüse (Cavity) ein Druckbauch (BILD 7a). Im anderen Fall liegt dort ein Druckknoten, das heißt, die Knotenlinie, also die Linie, auf der die Druckschwankung gleich Null ist, steht parallel zur Längsachse der Auslassdüse (BILD 7b).

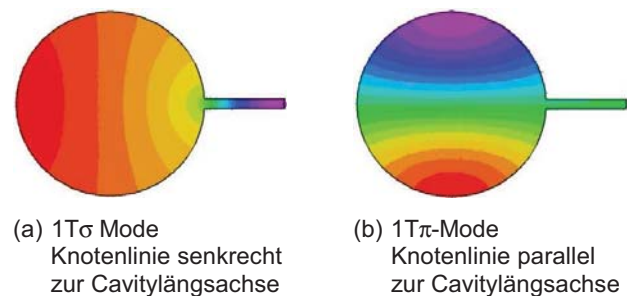


BILD 7. Druckfeld der ersten beiden Eigenmoden eines Kreiszylinders mit Cavity

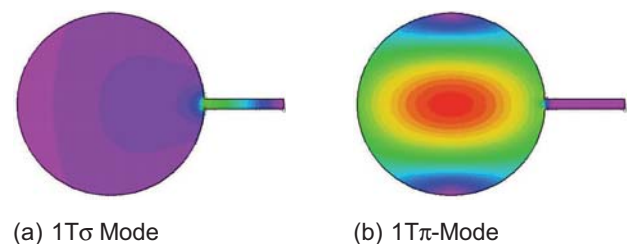


BILD 8. Geschwindigkeitsfelder der 1Tσ und 1Tπ-Mode eines Kreiszylinders mit Cavity

BILD 8 ist das Geschwindigkeitsfeld dieser ersten beiden Eigenmoden zu entnehmen, welches sich immer senkrecht zur Knotenlinie der Druckverteilung ausrichtet. Der Vektor der Geschwindigkeit zeigt immer vom höheren zum niedrigeren Druckniveau.

Entsprechend werden die beiden Komponenten der Tangentialmoden als σ - bzw. π -Moden bezeichnet. Außerdem ist die Knotenlinie bei bestimmten Moden, etwa der $1T\sigma$ -Mode, leicht gekrümmt. Es wurde weiterhin festgestellt, dass sich mit zunehmender Cavitylänge die Eigenfrequenz der σ -Komponente ändert, während die Frequenz der π -Komponente annähernd konstant bleibt, wie BILD 9 zu entnehmen ist.

Wie BILD 9 weiterhin zu entnehmen ist (siehe Kreis), treten bei einem gekoppelten akustischen System von Sekundärdüse und Brennkammer in einem bestimmten Bereich des Längen-/ Durchmesserungsverhältnisses drei Resonanzen in der Nähe der $1T$ Mode auf. Da in den Experimenten in der Regel aufgrund der Anregungsgeometrie keine Anregung der π -Mode möglich ist, werden nur die zwei benachbarten Resonanzen, nämlich die $1T\sigma$ - und die $2T\sigma$ -Mode beobachtet.

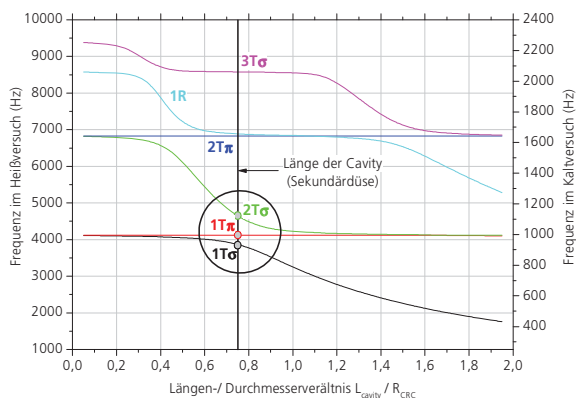


BILD 9. Einfluss Cavitylänge auf Eigenfrequenzen

4.5. Optische Messtechnik

Um die Brennkammerprozesse Einspritzung und Verbrennung während einer Verbrennungsinstabilität visuell zugänglich zu machen, befinden sich Fenster in der Brennkammer, durch die mittels Hochgeschwindigkeitskameras Videoaufnahmen gemacht wurden. Für die Sprayaufnahmen wurde eine Photron Ultima 1024 PCI (12500 Bilder/s, Auflösung 256x256 pixel) eingesetzt, während mit einer Photron APX (12.500 Bilder/s, Auflösung 256x256 pixel) das OH-Eigenleuchten der Flamme aufgenommen wurde.

Nun entstehen bei der Verbrennung von Methan und Sauerstoff als Zwischenprodukte OH-Radikale. Diese treten vor allem in der Reaktionszone der Flamme auf und spiegeln den Bereich von erhöhtem Stoffumsatz wider. Gerade in diesem Bereich kommt es zu Temperaturänderungen, sodass über das OH-Eigenleuchten auf die Wärmefreisetzung in der Flamme rückgeschlossen werden kann. Da sich das OH-Leuchten nicht mit herkömmlichen Objektiven aufnehmen lässt, wurde die Kamera mit einem UV-Objektiv und zusätzlich mit einem Interferenzfilter versehen, welcher nur für die ultraviolette Strahlung der OH-Radikale im Bereich von ca. 307nm durchlässig ist. Der Aufbau von OH-Kamera

und Spraykamera sind BILD 10 zu entnehmen.

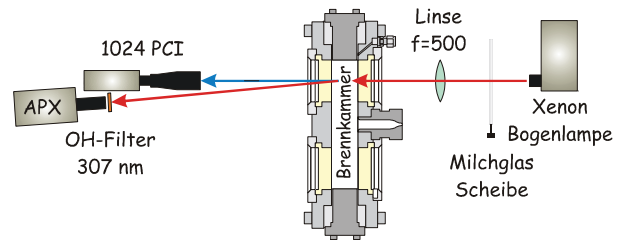


BILD 10. Versuchsaufbau Hochgeschwindigkeitskameras

4.5.1. Bildauswertung

Die Hochgeschwindigkeitsbilder liegen als Grauwertbilder mit einem Dynamikbereich zwischen 0 ... 2^{16} Graustufen vor. Die Graustufe 0 bedeutet dabei die Farbe schwarz, während 65536 den Wert weiß repräsentiert.

Zunächst wird aus jedem Bild ein mittlerer Grauwert ermittelt, um eine Angabe über die mittlere Helligkeit bzw. die mittlere OH-Intensität der Flamme zu erhalten. Anschließend wird jedes Bild in eine definierte Anzahl von quadratischen Bereichen unterteilt (vgl. BILD 11), um so eine orts aufgelöste Information der OH-Intensität zu erhalten. Auch hier lässt sich orts aufgelöst eine mittlere Helligkeit ermitteln. Damit lassen sich lokal wie auch global Intensitätsschwankungen der Flamme ermitteln. Die Größe der Felder wurde so optimiert, dass das Signal-Rauschverhältnis relativ niedrig gehalten wurde.

Damit lässt sich die Wärmefreisetzung zum Beispiel als Funktion des Abstands zum Injektor bestimmen. Das Frequenzspektrum der Intensität wird über eine FFT-Analyse ermittelt.

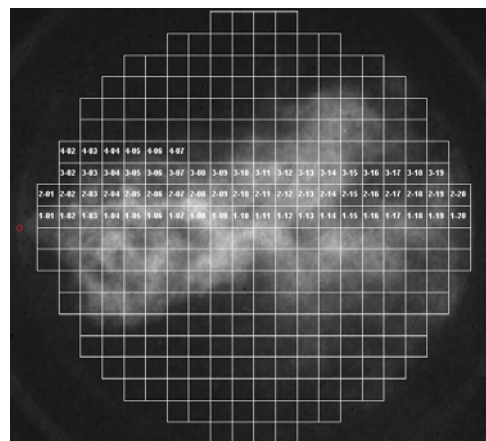


BILD 11. Auswertung der OH-Intensität

4.6. Testmatrix

Bisher wurden nur wenige experimentelle Untersuchungen mit dem Stoffpaar LOx / CH₄ und dem wissenschaftlichen Ziel „Untersuchung von Verbrennungsinstabilitäten“ durchgeführt. Deshalb wurde eine zweiteilige Testmatrix entworfen, wobei der maximal mögliche Bereich der Betriebsparameter durchfahren werden kann. Der erste Teil umfasst die Betriebspunkte ohne externe Anregung, das heißt ohne Einsatz der Sirene, um zunächst die Basisprozesse der Sprayverbrennung ohne externe Einflüsse zu studieren.

Gleichzeitig wird damit auch ein Bezugssystem festgelegt, mit dem die möglichen Parametervariationen verglichen werden können. Im zweiten Teil der Testmatrix werden dann ausgesuchte Betriebspunkte des ersten Teils wiederholt, allerdings jetzt mit externer Anregung. Diese Vorgehensweise erlaubt es, eindeutige Aussagen bezüglich des Einflusses von externer Anregung auf die Brennkammerprozesse und der Wechselwirkung zwischen einer akustischen Anregung und einem brennenden Spray zu machen. In TAB 2 ist die Testmatrix dargestellt.

		Hauptdüse								
		5 mm			7,2 mm			10,2 mm		
ROF		2,33	3,44	4,0	2,33	3,44	4,0	2,33	3,44	4,0
Gesamtmassenstrom	4,4	4,4	4,1	4						
	7,4	7,4	7	6,8	3,5	3,3	3,2			
	9,0	9	8,5	8,3	4,4	4,1	4	2,1	2	1,9
	15,0				7,3	7	6,8	3,6	3,4	3,3
	18,7				9	8,5	8,3	4,5	4,2	4

TAB 2. Testmatrix

Um verschiedene Brennkammerdrücke einzustellen, wurden die drei Parameter Hauptdüsendurchmesser, Mischungsverhältnis und Gesamtmassenstrom variiert. Die rot umkreisten Betriebspunkte wurden auch mit Anregung gefahren.

5. VERSUCHSERGEBNISSE

5.1. LOx/CH₄-Sprayverbrennung in der CRC

Die Testmatrix umfasst, wie TAB 2 entnommen werden kann, 30 Betriebspunkte ohne externe Anregung. Um eine gute Statistik zu garantieren, wurden deshalb alle Betriebspunkte zweifach wiederholt. Das Hauptziel der Versuche ohne Anregung war es, fundamentale Korrelationen zu bilden, die einen Einblick gewähren, welche Prozesse beim Entstehen von Instabilitäten eine große Rolle spielen. Diese Korrelationen sollen dann eine Beziehung zwischen den physikalischen Größen, die den Brennkammerprozessen entsprechen, den variierten Betriebsbedingungen und den gemessenen Druckschwankungen oder der Flammenphänomenologie herstellen.

Da Verbrennungsinstabilitäten mit steigendem Energieinhalt der Druckschwingung gefährlicher werden, wird aus den gemessenen dynamischen Drücken der Energieinhalt der ersten Eigenmode berechnet. Dazu wird die spektrale Leistungsdichte (Power Spectral Density, PSD [bar²/Hz]) berechnet. Diese PSD wird dann über das Resonanzgebiet integriert (IPSD [bar²]), um die totale Energie z.B. der 1T-Mode zu bestimmen. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, wird dann die Quadratwurzel der IPSD gezogen, und damit wird das Ergebnis auf den Brennkammerdruck normalisiert. Diese Rechenoperation führt zu einem dimensionslosen Wert (NPSD [-]).

In BILD 12 ist die berechnete NPSD gegen die Weberzahl aufgetragen. Betriebspunkte mit gleichem Gesamtmassenstrom haben dieselbe Farbe und dasselbe Zeichen. Wie unschwer zu erkennen ist, liegen die fett umkreisten Daten eindeutig außerhalb der Korrelation, der

die übrigen Datenpunkte folgen. In der Literatur wurde bereits von Cheuret [6] darauf hingewiesen, dass ein solches Verhalten dadurch verursacht werden kann, dass eine Flamme nicht mehr am Injektor verankert ist, sondern als abgehoben bezeichnet wird. Auch dies ist im vorliegenden Falle möglich, die Auswertung bezüglich dieses Verhaltens läuft momentan noch.

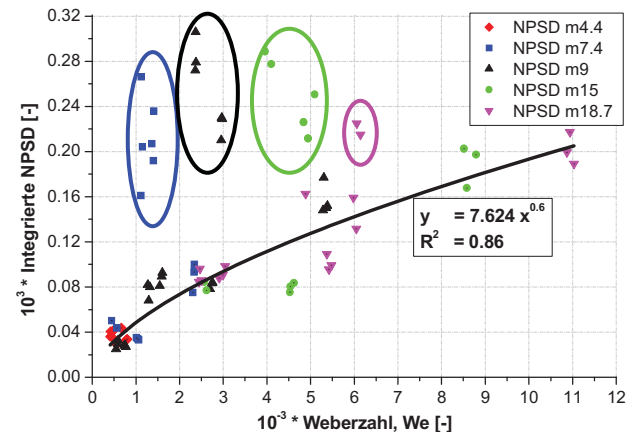
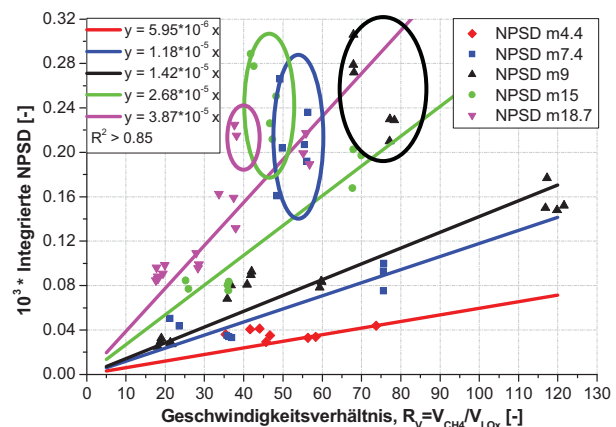


BILD 12. Korrelation PSD und Weberzahl

Da je Betriebspunkt jeweils drei Versuche gefahren wurden, gilt sowohl für die umkreisten Messpunkte als auch für die der Kurve folgenden Punkte gleicher Farbe, dass drei zusammen liegende Punkte auch die Reproduzierbarkeit des entsprechenden Betriebspunktes bestätigt, also auch die „Ausreißerpunkte“ reproduzierbar sind. Werden die umkreisten Daten ignoriert, ergibt sich eine sehr gute Korrelation, wobei die Leistung der Schwankung eine Potenzabhängigkeit von der Weberzahl zeigt. Eine höhere Weberzahl entspricht kleineren Tropfen. Das heißt, eine Druckschwankung nimmt mehr Energie auf, bzw. die Verbrennung überträgt mehr Energie ins akustische Feld, wenn die Tropfen kleiner sind. Die Brennkammer wechselwirkt mit dem akustischen Feld umso empfindlicher, je höher die Weberzahl ist.

Werden die umkreisten Betriebspunkte aus BILD 12 bei einer Darstellung über dem Geschwindigkeitsverhältnis R_V ignoriert, so ist unschwer eine lineare Korrelation festzustellen, wie aus BILD 13 zu entnehmen ist. Auch in dieser Darstellung ist zu sehen, dass die umkreisten Punkte doch recht weit außerhalb der von den anderen Punkten gezeigten Tendenz liegen. Die Korrelationen sind ohne Ausnahme sehr gut, und laufen auch alle durch den Ursprung.

BILD 13. Korrelation PSD und R_V

Physikalisch bedeutet das, dass bei steigendem Geschwindigkeitsverhältnis auch die Leistung der Druckschwingung steigt. Bei größerem Geschwindigkeitsverhältnis wird die Relativgeschwindigkeit des Gases CH_4 größer. Dadurch wird der LOx-Spray schneller zerrissen und die Tropfen werden besser in die Brennkammer verteilt. Die dadurch etwas homogenere Verteilung ermöglicht eine stärkere Wechselwirkung zwischen dem brennenden CH_4/LOx -Spray und dem akustischen Feld.

Während der Versuchsdurchführung wurde nun festgestellt, dass die Verteilung der Eigenmoden nicht immer der vorhergesagten Verteilung entspricht. In BILD 14 ist zu sehen, dass die Eigenmoden sich gegenüber den vorhergesagten Eigenmoden (gefärbt dargestellt) verschoben haben.

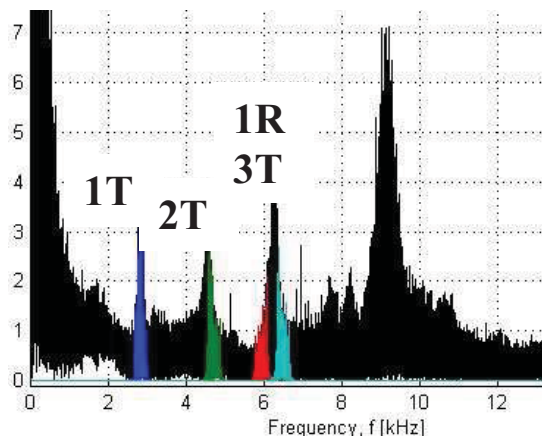


BILD 14. Verteilung der Eigenmoden

Es wurde auch festgestellt, dass der Schallgeschwindigkeitsgradient (bzw. die Temperatur) einen großen Einfluss auf die Frequenzverteilung hat, wie in BILD 15 schematisch wiedergegeben ist, wobei der Gradient simuliert wurde.

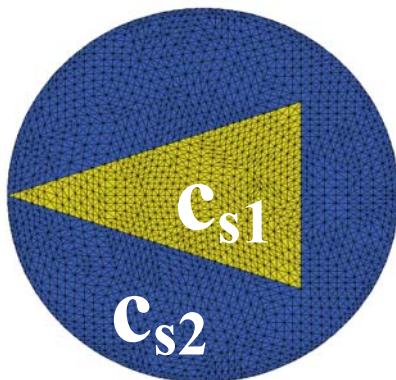


BILD 15. Simulierter gradient der Schallgeschwindigkeit

In TAB 3 ist dieser Einfluss zahlenmäßig wiedergegeben. Ein Temperaturgradient hat einen ähnlichen Einfluss wie eine Sekundärdüse. Es tritt eine Aufspaltung der Tangentialmoden auf. Der Unterschied zwischen den zwei resultierenden Moden wird größer mit steigendem Gradient. Gleichzeitig wird die Frequenz der Tangentialmoden generell niedriger. Ein dritter Effekt ist, dass auch die Frequenz der Radialmoden steigt. Es kann sogar sein, dass bei sehr starken Gradienten die radiale Mode 1R, also die dritte Mode sich so weit nach rechts verschiebt, dass die vierte (normalerweise tangential) Mode 3T zur dritten Mode wird.

$c_{s1} = 1100$	1T	2T	1R	3T
$c_{s2} = 1100$				
f	3223	5347	6708	7355
Ratio, f/f_{1T}	1	1,66	2,08	2,28
$c_{s1} = 1200$	1T	2T	1R	3T
$c_{s2} = 1069$				
f_{σ}	3152	5224	6931	7165
f_{π}	3185	5237		7192
Ratio, f/f_{1T}	1	1,65	2,19	2,27
$c_{s1} = 1300$	1T	2T	1R	3T
$c_{s2} = 1037$				
f_{σ}	3071	5087	7068	6963
f_{π}	3129	5109		7008
Ratio, f/f_{1T}	1	1,64	2,28	2,25

TAB 3. Einfluss des Temperaturgradienten auf die Verteilung der Eigenfrequenzen

5.2. Auswertung der Flammenemission

Bei der visuellen Aufzeichnung der Flammenemission entsteht die Schwierigkeit, dass die OH-Emission stark mit dem Brennkammerdruck skaliert. Aus dem Grund wurde die Empfindlichkeit der intensivierten Hochgeschwindigkeitskamera erhöht, damit die Flamme auch bei niedrigen Drücken trotz niedriger Intensität sichtbar gemacht werden konnte. Damit dieser Effekt die Ergebnisse nicht verfälscht, wurde auch die Intensität normalisiert. Da die Flammenemissionsbilder bei den Versuchen ohne externe Anregung bezüglich der Eigenmoden ein sehr schwaches Signal zeigen, können keine Aussagen über einen Zusammenhang zwischen Druck- und Intensitätsschwankung gemacht werden.

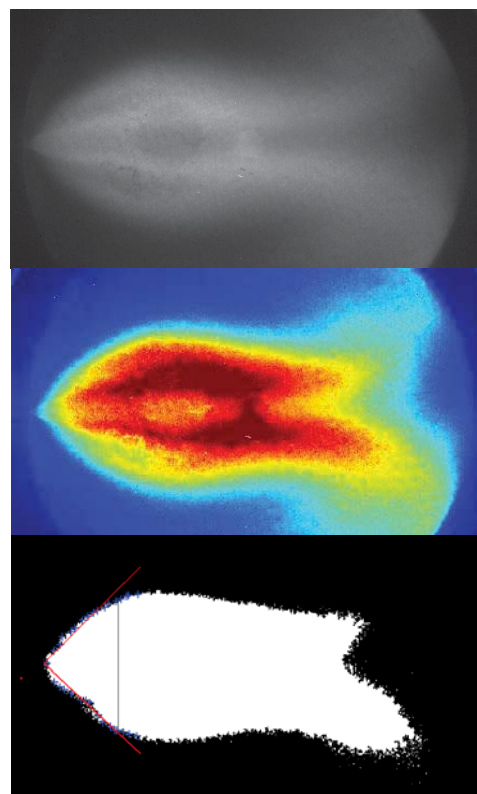


BILD 16. OH-Intensität

Die Flammenphänomenologie bzw. der Öffnungswinkel der Flamme wurde folgendermaßen bestimmt: Zunächst werden alle aufgenommenen Bilder summiert und daraus ein Mittelwertbild gebildet. Im Anschluss daran wird dieses Mittelwertbild binarisiert. Die Bildreihe der OH-Emission in BILD 16 zeigt ein Intensitätsbild und zwar das Original als Mittelwert (oben), im mittleren Bild eine Berechnung in Falschfarben, und im unteren Bild die binarisierte Information. Zum Binarisieren wurde ein Verfahren der Entropieklasse (siehe [7]) verwendet. Der Öffnungswinkel der Flamme ist definiert als der Winkel zwischen der oberen und unteren Flammenfront, welche durch Mittelwerte mit zwei geraden Linien (dargestellt im Binärbild) abgeschätzt wurde.

In BILD 17 wird der Öffnungswinkel gegen die Weberzahl aufgetragen. Hier sind alle Betriebspunkte mit gleichem Massenstrom aufgetragen, wobei zwischen den Hauptdüsendurchmessern (HD), also Brennkammerdrücken unterschieden wird.

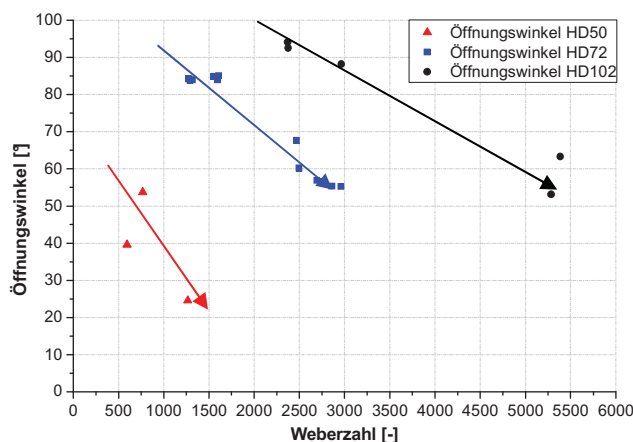


BILD 17. Öffnungswinkel gegen Weberzahl in Abhängigkeit des Hauptdüsendurchmessers

Wie physikalisch gut erklärt werden kann, wird der Öffnungswinkel kleiner mit steigenden Weberzahlen. Die Tropfen sind kleiner und sie verdampfen deshalb schneller, werden dementsprechend schneller, bzw. verbrennen näher beim LOx-Spray, was den kleineren Öffnungswinkel erklärt. Ein höheres Impulsflussverhältnis hat eine ähnliche Auswirkung auf den Flammenwinkel (siehe BILD 18).

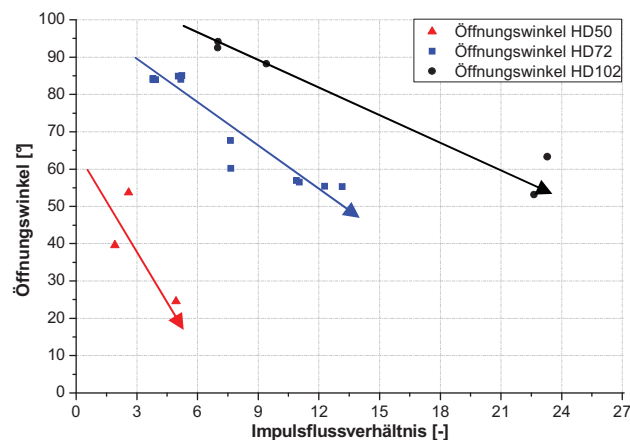


BILD 18. Öffnungswinkel gegen Impulsflussverhältnis

Bei steigendem Impulsflussverhältnis werden die abgerissenen Tropfen weiter in die Brennkammer hineingetragen, bevor sie verbrennen. Da der radiale Abstand zum Spray jedoch gleich bleibt, ergibt sich ein kleinerer Flammenwinkel.

5.2.1. Versuche mit externer Anregung

Das Hauptziel des zweiten Teils der Versuchsdurchführung ist den Einfluss einer externen Anregung auf die Brennkammerprozesse zu verstehen. Aus dem Grunde wurden viele Betriebspunkte der ersten Versuchsreihe wiederholt, um die Ergebnisse eindeutig vergleichen zu können. Die in TAB 2 rot umkreisten Betriebspunkte wurden nun mit externer Anregung ausgeführt. Da bei den Versuchen mit Sirenenanregung auch die Anregungsposition am Umfang der Brennkammer variiert werden sollte, wurden deshalb weniger Betriebspunkte gewählt. So wurde jeweils ein Betriebspunkt mit vier verschiedenen Anregungspositionen gefahren. Auch hier wurden alle Betriebspunkte zweifach wiederholt.

Wie bereits im Abschnitt 4.3.1 beschrieben wurde, hat die Anregungsdauer einen starken Einfluss auf die Druckamplitude. Für die Untersuchungen der Verbrennungsinstabilitäten bei LOx/CH₄ Sprayverbrennung sind hohe Amplituden erwünscht, um ein besseres Signal bzw. eine deutlichere Tendenz sehen zu können. Deshalb wurde für die Heißversuche die Anregungsdauer längstmöglich bzw. die Steigung der Rampe niedrigstmöglich gewählt, und zwar so, dass genau das komplette Resonanzgebiet der ersten Eigenmode (1T) durchfahren wird. In BILD 19 wird ein Spektrogramm mit dem dazu gehörenden Druckspektrum eines ausgewählten Versuchs gezeigt. Die Versuchsdauer beträgt zehn Sekunden, und deutlich zu erkennen ist, dass die Sirene bei einer Anfahrffrequenz von 2500 Hz beginnt. Bei quasi-stationären Bedingungen in der Brennkammer beschleunigt die Sirene (nach 4 Sekunden) mit 80Hz/s bis auf 2900Hz nach neun Sekunden. Nach zehn Sekunden wird die Sirene heruntergebrems auf 100Hz.

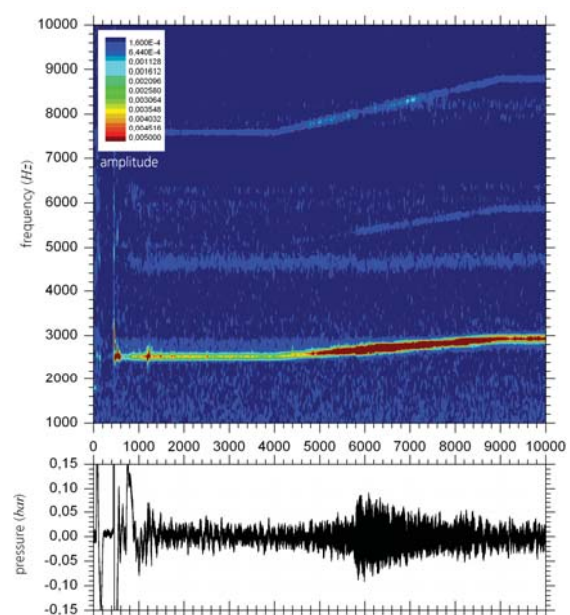


BILD 19. Spektrogramm und Druckverlauf

Durch die Art der Anregung sind die eingekoppelten Druckschwingungen jedoch nicht harmonisch. Es entstehen deshalb Obertöne, die im Spektrogramm auch gut zu sehen sind. Die Form der dynamischen Druckwelle ist abhängig von der geöffneten bzw. geschlossenen Fläche der Sekundärdüse. Die Entwicklung der Fläche während der Anregung ist in BILD 20 für drei unterschiedliche Sekundärdüsendurchmesser aufgetragen.

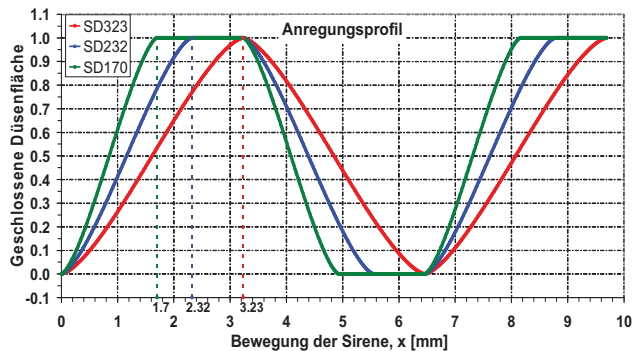


BILD 20. Anregungsprofil

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Kurvenverlauf für kleinere Düsen weniger harmonisch wird. Das kommt daher, dass für jeden Sekundärdüsenaustrittsdurchmesser immer dieselbe Zahnscheibe eingesetzt wurde, also die Zähne der Sirene immer die gleiche Breite haben. Die Zahnscheibe wurde auf den größten Austrittsdurchmesser ausgelegt. Bei Versuchen mit kleineren Düsen erscheinen deshalb bis zu 12 Oberschwingungen im Spektrum des Signals.

In BILD 21 ist das Spektrum eines Versuchs mit kleiner Sekundärdüse abgebildet. Die Obertöne sind gut zu erkennen. Angeregt wurde bei ungefähr 2430 Hz, und bis zur zehnten Oberschwingung ist ein Peak sichtbar.

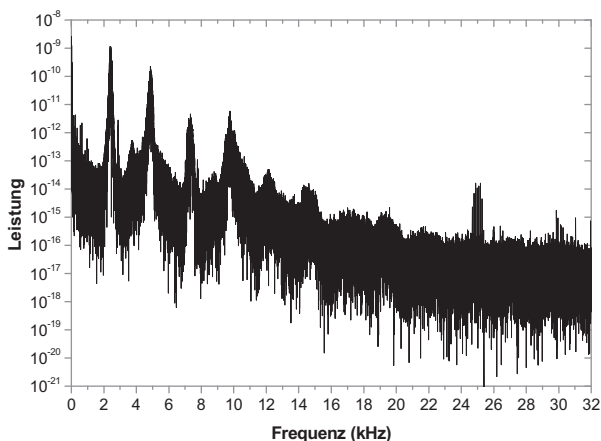


BILD 21. Frequenzspektrum mit harmonischen Oberschwingungen

In BILD 22 ist der Energieinhalt der 1T-Mode gegen die Weberzahl aufgetragen. Deutlich ist zu sehen, dass die Streuung der Messdaten viel größer ist als bei den Versuchen ohne Anregung (vgl. BILD 12). Es war bisher noch nicht möglich, eine Korrelation zu bilden, und derzeit laufen Untersuchungen, aus welchem Grund die Streuung so groß ist. So könnte es z.B. sein, dass - ähnlich zu den nicht angeregten Versuchen - die Flamme manchmal

nicht verankert ist, und sie deshalb viel empfindlicher auf Druckschwankungen reagiert. Eine externe Anregung erschwert möglicherweise die Verankerung der Flamme am Injektor.

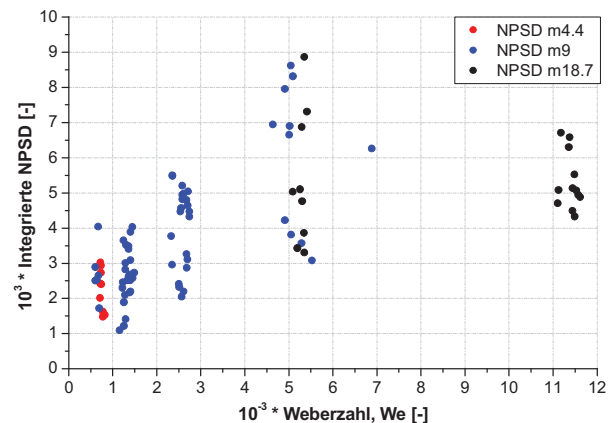


BILD 22. NPSD 1T-Mode gegen Weberzahl, mit Anregung

Werden BILD 12 und BILD 22 miteinander verglichen, so wird der Einfluss der Anregung auf den dynamischen Druck besonders klar. Außer der größeren Streuung der Messpunkte bei externer Anregung fällt vor allem auf, dass der Energieinhalt der angeregten Mode um einen Faktor 10^3 höher ist.

Alle Betriebspunkte wurden mit verschiedenen Anregungspositionen durchgeführt. In BILD 3 wurde bereits die Geometrie der Brennkammer vorgestellt. Die Anregung erfolgte also von den Positionen 05, 09, 11 und 13, wobei beide Positionen 05 und 13 einem Winkel von 90° gegenüber dem LOx-Spray entsprechen.

Der Winkel zwischen der Position der Sekundärdüse und der Strahlachse des LOx-Sprays bzw. dem Injektor ist in BILD 23 wiederum gegen die PSD (Energieinhalt der 1T-Mode) aufgetragen.

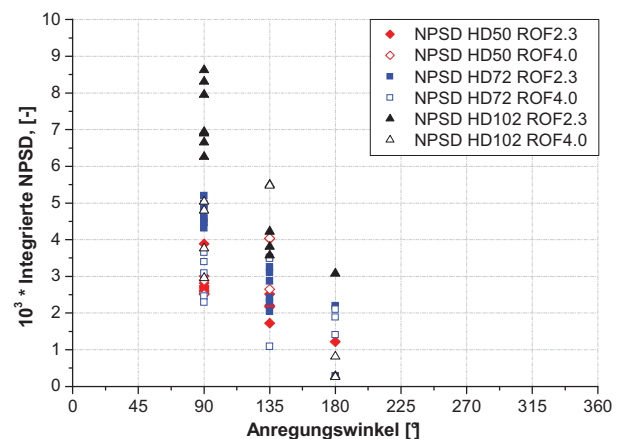


BILD 23. Abhängigkeit PSD der Anregungsposition

In diesem Bild werden, um eine Betriebspunktabhängigkeit auszuschließen, nur Betriebspunkte mit gleichem Massenstrom dargestellt. Zwischen dem Mischungsverhältnis und dem Brennkammerdruck wird durch Farben und Zeichen unterschieden. Die Abhängigkeit des Energieinhaltes von der Anregungsposition ist eindeutig: Wenn die Anregung der Brennkammer im Winkel von 90° zur Strahlachse

erfolgt, ist die Energie viel höher als bei einer Anregung von 180° . Dieser Effekt ist ein Indiz dafür, dass eine Kopplung der Verbrennung mit der Brennraumakustik über die Geschwindigkeit stattfinden könnte, da bei einer 90° -Anregung die Geschwindigkeit ein Maximum dort hat, wo die Verbrennung stattfindet.

Auf die Flammenemission hat eine externe Anregung ebenfalls einen starken Einfluss. Die Frequenzspektren werden in BILD 24 verglichen. In dieser Darstellung ist dem oberen Teil der Graphik zu entnehmen, dass ohne Anregung nichts im OH-Intensitätsfrequenzspektrum zu sehen ist. Die Peaks, die hier zu sehen sind, sind kamerabedingte Störungen bzw. Artefakte, die durch die Elektronik der intensivierten CCD-Hochgeschwindigkeitskamera verursacht werden.

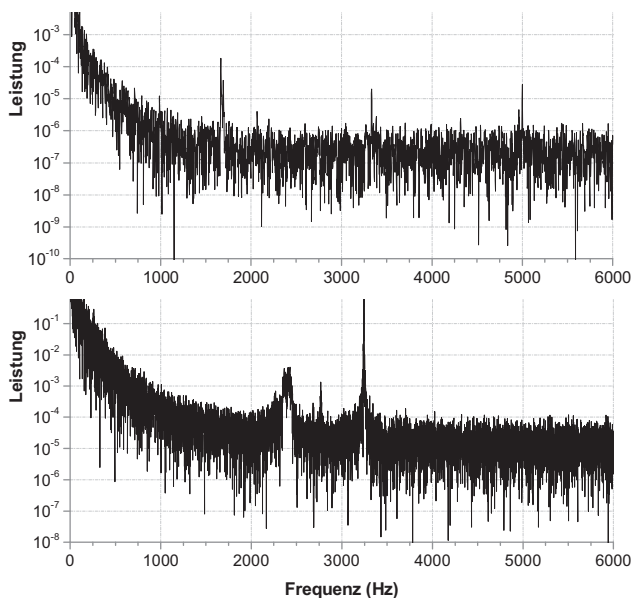


BILD 24. Spektrum der Flammenemission

Im unteren Teil von BILD 24 (mit Anregung) ist aber sehr deutlich die angeregte Mode zu sehen. Die Intensität wurde so ausgewertet, dass über jedes Bild ein Gitter aufgelegt wurde (vgl. BILD 11), und dann von jedem Gitterabschnitt ein Mittelwert bestimmt wurde. Für die globale Intensität (Emission der ganzen Flamme) wurden selbstverständlich alle Gitterbereiche aufsummiert und daraus der Mittelwert bestimmt.

Die lokale Intensität der angeregten und nicht angeregten Versuche wird derzeit noch ausgewertet. In BILD 25 ist exemplarisch das Intensitätsprofil (entlang der Strahlachse) einer unter 90° angeregten Flamme, dargestellt.

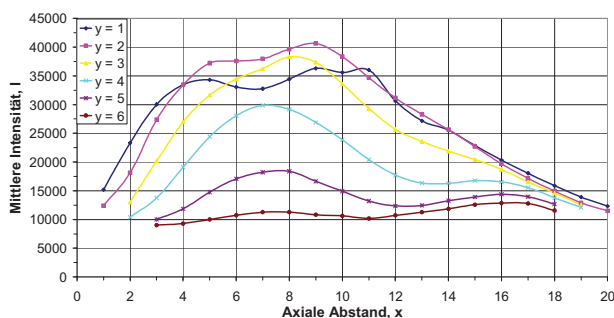


BILD 25. Lokale OH-Intensität

Wie physikalisch zu erwarten war, ist in der Mitte der Flamme (dunkelblaue Linie) die Intensität niedriger als in größerer Entfernung von der Strahlachse. In diesem Bereich steht nämlich durch Anwesenheit des LOx-Sprays weniger CH_4 -Gas für die Verbrennung zur Verfügung.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde eine große Anzahl von Versuchen ohne und mit akustischer Anregung durch eine Sirene durchgeführt, wobei der gesamte Betriebsbereich der Modellbrennkammer durchfahren wurde. Dabei stellte sich heraus, dass die Energie der Druckschwankungen (PSD) generell mit steigender Weberzahl ansteigt.

Bei Versuchen ohne akustische Anregung lässt sich eine eindeutige Korrelation zwischen PSD und der Weberzahl aufstellen. Eine Teilmenge von Ergebnissen liegt signifikant außerhalb dieser Korrelation. Warum diese Versuche ignoriert werden dürfen, wird derzeit untersucht. Zusätzlich wurde bei Versuchen mit gleichem Massenstrom ein linearer Zusammenhang zwischen dem Energieinhalt und dem Einspritzgeschwindigkeitsverhältnis gefunden.

Bezüglich der Flammenphänomenologie wurde festgestellt, dass der Flammenöffnungswinkel kleiner wird bei steigender Weberzahl und steigendem Impulsflussverhältnis.

Bei den Versuchen mit externer Anregung wurde festgestellt, dass die Anregungsposition einen starken Einfluss auf den Energieinhalt der 1T-Mode hat und zwar so, dass sie auf Geschwindigkeitskopplung hinweist. Dies wird unterstützt von der bis jetzt noch exemplarischen Auswertung der relativen Intensitätsschwankung. Damit ein Responsefaktor bestimmt werden kann, ist es notwendig, die relative Intensitätsschwankung und ihre Beziehung zu den Druckschwankungen näher zu untersuchen.

7. LITERATUR

- [1] J.W.S. Rayleigh, The theory of sound, volume I and II, Dover Publications, New York, 1894.
- [2] A. A. Putnam, Combustion-Driven Oscillations in Industrie, American Elsevier Publishing Company, Inc., New York, 1971, S. 3-4
- [3] L.D. Landau, E.M. Lifschitz, Hydrodynamik, Lehrbuch der theoretischen Physik, Band VI, 5. Auflage 1991, Akademie Verlag, S. 317 ff.
- [4] D.T. Harrje, F.H. Reardon (Eds.), Liquid Propellant Rocket Combustion Instability, Chapter 3, Dynamics of Combustion and Flow Processes, NASA SP-194, 1992, S. 143
- [5] B. Knapp, M. Oschwald, S. Anders, Untersuchung der tangentialen Moden von hochfrequenten Verbrennungsinstabilitäten in Raketenbrennkammern, DGLR - JT2005 – 189, 2005
- [6] F. Cheuret, Instabilités thermo-acoustiques de combustion haute-fréquence dans les moteurs fusées, Thèse, IRPhE, Marseille, 2005
- [7] Prasanna K. Sahoo, et. al., A thresholding method based on two-dimensional Renyi's entropy, Pattern Recognition 37 (1149-1161), 2004