

Dipl.-Ing. Jakob Hermann,
Oberweikertshofen

**Anregungsmechanismen
und aktive Dämpfung
(AIC) selbsterregter
Verbrennungsschwingungen
in Flüssigkraftstoffsystemen**

Reihe **6**: Energietechnik

Nr. **364**

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand der Technik - Ziele der Arbeit	3
2.1 Verschiedene Anregungsmechanismen	4
2.1.1 Akustisch rückgekoppelte Schwingungen	4
2.1.2 Strukturbedingte Schwingungen	5
2.1.3 Wirbelablösungen	5
2.2 Stabilitätsmodelle	6
2.3 Möglichkeiten zur Unterdrückung von Verbrennungsschwingungen	8
2.3.1 Passive Methoden	8
2.3.2 Aktive Methoden	9
2.4 Ziele der Arbeit	12
3. Theoretische Grundlagen	14
3.1 Grundlagen der Akustik	14
3.1.1 Wellengleichung	15
3.1.2 Schallreflexion bei senkrechtem Einfall	19
3.1.3 Beschreibung einer ebenen, stehenden Welle	20
3.1.4 Einfache Berechnung der Rohrresonanzen	21
3.2 Das Rayleigh-Kriterium - ein wichtiges Stabilitätskriterium für selbsterregte Verbrennungsschwingungen	23
4. Versuchsaufbau	26
4.1 Luft- und Kraftstoffversorgung	27
4.2 Versuchsbrenner	28
4.2.1 Auswahl der endgültigen Versuchsbrennergeometrie	32
4.3 Abgasabzug mit Schalldämpfer	33
5. Beschreibung der verwendeten Meßtechnik, Signalverarbeitung und Meßmethoden	34
5.1 Meßtechnik	34
5.1.1 Messung des Schalldrucks	34
5.1.1.1 Kondensatormikrofon	34
5.1.1.2 Kondensatormikrofon mit Sondenrohr	36
5.1.1.3 Quarzkristall-Druckaufnehmer	40
5.1.2 Messung der instationären Strömungsgeschwindigkeit bzw. Schallschnelle mittels Laser-Doppler-Anemometrie	40
5.1.3 Messung der instationären thermischen Leistungsfreisetzung der Flamme	44

5.1.3.1	Photomultiplier	45
5.1.3.2	Bildverstärkte CCD-Kamera	47
5.1.4	Zusammenhang zwischen OH-Emission und thermischer Verbrennungsleistung	49
5.2	Signalverarbeitung	52
5.2.1	Meßwerterfassung	52
5.2.2	Diskrete Fourier-Transformation	54
5.2.3	Nicht-äquidistante Fourier-Transformation	56
5.2.4	Korrelationsmeßtechnik	58
5.2.4.1	Kreuzleistungsdichtespektrum	60
5.2.4.2	Kreuzkorrelationsfunktion	61
5.2.4.3	Kohärenzfunktion	62
5.2.4.4	Übertragungsfunktion	63
5.3	Meßmethoden	67
5.3.1	Breitbandige Bestimmung des komplexen Reflexionsfaktors	67

6. Berechnung der akustischen Eigenfrequenzen des Versuchsbrenners mit Hilfe der Modalanalyse und deren meßtechnische Überprüfung.....73

6.1	Grundlagen der Modalanalyse	73
6.2	Anwendung der Modalanalyse auf den Versuchsbrenner	76
6.2.1	Diskretisierung der Geometrie und Bestimmung der Elementdaten	76
6.2.2	Bestimmung der Randbedingung - breitbandige Messung des komplexen Reflexionsfaktors am Auslaß des Versuchsbrenners	78
6.2.3	Ergebnis der Modalanalyse	82
6.3	Überprüfung der Berechnung durch Messung des angeregten, akustischen Eigenmodes (stehende Schallwelle) im Versuchsbrenner	88
6.4	Berechnung der Schallschnelle aus den Schalldruckmessungen	89

7. Untersuchung der Anregungsmechanismen für die selbsterregte Verbrennungsschwingung93

7.1	Phasenbezogene Messung der verschiedenen Schwankungsgrößen der selbsterregten Verbrennungsschwingung	93
7.1.1	Schalldruckmessung in der Mittelachse des Versuchsbrenners	93
7.1.2	Untersuchung der Strömungsschwankung im Zustrom zur Flamme mittels LDA	98
7.1.3	Visualisierung der schwingenden Flamme	104
7.1.4	Darstellung der gemessenen Schwankungsgrößen bei verschiedenen Phasenwinkeln	106
7.2	Schlußfolgerungen zum grundlegenden Anregungsmechanismus der selbsterregten Verbrennungsschwingung	106

7.3	Bestimmung und Diskussion der für die Entstehung der Verbrennungsschwingung erforderlichen Verzugszeiten	113
7.4	Einfluß der Strömungsschwankung auf die Verbrennungszone	116
7.4.1	Untersuchung einzelner Verbrennungszonen	117
7.4.2	Untersuchung der gesamten Verbrennungszone.....	121
7.5	Untersuchung des Kopplungsmechanismus zwischen thermischer Leistungs- und Schalldruckschwingung anhand des zweidimensionalen Rayleigh-Indexes	123
7.6	Passive Maßnahmen zur Vermeidung der Verbrennungsschwingung	125
8.	Piezoaktuator für die aktive Unterdrückung von Verbrennungsschwingungen.....	128
8.1	Design	128
8.2	Übertragungsverhalten des Piezoaktuators.....	129
8.3	Abschätzung der akustischen Resonanzfrequenz in der Rohrleitung.....	134
8.4	Optimierung der Einbaugegebenheiten und -lage für den Piezoaktuator	136
8.4.1	Möglichkeiten der Reflexionsoptimierung - Vermeidung von Druckschwingungen an der Kraftstoffpumpe	141
8.4.2	Wesen der Schallfeldanregung durch den Aktuator - bevorzugte Einbaulage.....	143
8.5	Auswirkungen der modulierten Brennstoffeinspritzung auf die Verbrennung.....	146
8.6	Verzugszeitverhalten der modulierten Brennstoffeinspritzung.....	149
9.	Aktive Unterdrückung der selbsterregten Verbrennungsschwingung.....	151
9.1	Aufbau der aktiven Instabilitätskontrolle	151
9.2	Experimente und Ergebnisse.....	152
10.	Zusammenfassung	157
Anhang A	Temperaturprofile in der Brennkammer bei verschiedenen Luftzahlen	161
Anhang B	Bestimmung der Schallgeschwindigkeit von Heizöl EL	164
Anhang C	Literaturverzeichnis.....	167