

BERNHARD WAGNER

Anpassung von Messmethoden an die stationäre und instationäre Verbrennung

Diplomarbeit

Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

Studienzweig Verkehrstechnik

Vefasst am
Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik
Technische Universität Graz
unter Anleitung von

Dipl.Ing.Dr.tech.Fabrice Giuliani

Graz, Oktober 2005

Ich versichere, diese Arbeit selbständig verfasst, andere als angegebene Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient zu haben.

Bernhard Wagner

Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Zeitraum von Jänner bis November 2005 am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik der TU-Graz. Ich möchte folgenden Personen danken, ohne die dies nicht, oder nur sehr schwer, möglich gewesen wäre:

Hr. Univ.Prof. Dr. Franz Heitmeir für die Ermöglichung dieser Arbeit.

Hr. Dr. Fabrice Giuliani für die intensive Betreuung, die Einbindung in seine Projekte und seinen unerschütterlichen Enthusiasmus über die gesamte Dauer unserer Zusammenarbeit.

Hr. Univ.Prof. Dr. Jakob Woisetschläger für seine Unterstützung im Aufbau und Einsatz der optischen Messmethoden.

Frau Cornelia Santner für die gute Zusammenarbeit während ihres Praktikums und allen Mitarbeitern des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik, die immer mit Rat und Tat zur Seite standen, wenn es Fragen oder Schwierigkeiten gab.

Weiterer Dank gebührt auch Hr. Dipl.Ing. Bernhard Schweighofer vom Institut für Elektrische Messtechnik und Meßsignalverarbeitung für die Hilfe am SPS-System.

Hr. FOL Ferdinand Schuster von der BULME Graz für die Unterstützung bei der Fertigung der Dralldüse.

Den Herrn. Dipl.Ing. Stefan Sollerer und Dipl.Ing. Manfred Madritsch für den gemeinsamen Kampf gegen ein sich manchmal sträubendes L^AT_EX und Gentoo - Linux .

Abschliessend möchte ich noch meiner Familie - insbesondere meinen Eltern - danken, die mich über meine gesamte Studienzeit unterstützt hat und mir ein grosser Rückhalt war.

Graz, am 21.11.2005

Bernhard Wagner

Kurzzusammenfassung

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es, eine Versuchsflamme mit mehreren optischen Messverfahren zu untersuchen und daraus sowohl eine Charakteristik der Flamme als auch die Tauglichkeit bzw. Möglichkeiten der einzelnen Messverfahren im Bereich der Erkennung von Verbrennungsinstabilitäten abzuleiten.

Zu diesem Zweck wird zuerst ein atmosphärischer Versuchsbrenner auf Gasbasis mit der Möglichkeit zur pulsierten Luftzufuhr konstruiert. An diesen Brenner ist eine einfach zu entfernende Brennkammer anzuschließen. Mit diesen Aufgaben beschäftigt sich der erste Teil der Diplomarbeit.

Der zweite Teil widmet sich der verwendeten Messtechnik. Zum Einsatz kommen phasen aufgelöste Visualisierungen per CCD-Kamera, High-Speed-Schlieren Visualisierungen und ein Scan der Flamme nach dem Prinzip der Duo-Laser-Vibrometrie. Diese Verfahren werden jeweils nach Prinzip, Aufbau und Auswertung vorgestellt.

Im dritten Teil erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse aller verwendeten Methoden bei drei charakteristischen Betriebspunkten des Brenners.

Abschliessend wird noch ein Ausblick auf Möglichkeiten, das beobachtete System weiter zu untersuchen bzw. in anderem Rahmen weiterzuverwenden gegeben.

Abstract

Objective of this work is the analysis of a test-flame using several optical measuring-methodes to investigate simulated combustion instabilities. Usability and possibilities of each of these methods shall be discussed.

First part of the diploma-thesis deals with the construction of the atmospheric, natural-gas-fuelled test burner. The possibilities to pulsate the incoming air as well as a connection to a simple combustion chamber are taken into consideration.

The second part introduces the employed measuring methods. These tools are: phase-locked visualisation using a CCD-camera, a high-speed-Schlieren-measurement technique and a scan of the flame using dual-laser-vibrometry used in this field for the first time. These measurement methods are explicated with corresponding displays.

The third part compares the results of the methods mentioned above using three distinctive working points of the test-burner.

Concluding a resumé of the work is given an the future fields of use of the investigation methods as well as the test rig are discussed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Hintergrund der Arbeit	11
1.1.1	Das Entstehungsprinzip von Brennkammerschwingungen	12
1.1.2	Beispiele für CDOs in technischen Anwendungen	13
1.2	Aufgabe und Vorgehensweise	14
1.2.1	Ableitung der Aufgabe aus den Forschungsschwerpunkten des ITTM	14
1.2.2	Aufbau der Arbeit	14
2	Konstruktion des Versuchsbrenners	17
2.1	Der Brenner	17
2.1.1	Verwendete Grundlagen	17
2.1.2	Aufbau	21
2.2	Die Brennkammer	29
2.2.1	Brennkammer \leftrightarrow Free-Jet allgemein	29
2.2.2	Wahl des Prinzips	30
2.2.3	Konstruktion	31
2.3	Der Pulsator	34
2.3.1	Funktion und Aufbau	34
2.3.2	Integration in den Testbrenner	36
2.4	Sensorik+Steuerung	38
2.4.1	Sensorik	39
2.4.2	SPS-Hardware	42
2.4.3	Steuerprogramm	43
2.4.4	Aktorik (Ventile)	45
2.4.5	Erweiterungsvorschläge	47
2.5	Zusammenfassung der technischen Daten	49
2.5.1	Allgemeines	49
2.5.2	Kurven für Brennstoffeinsatz und Ausströmgeschwindigkeit	50
3	Die Messverfahren	53
3.1	Visualisierung mithilfe einer CCD - Kamera	53
3.1.1	Grundbegriffe zur CCD - Untersuchung	53
3.1.2	Aufbau	55

3.1.3	Durchführung	55
3.1.4	Analyse	57
3.2	Schlierenvisualisierung der pulsierenden Verbrennung	60
3.2.1	Grundlagen Schlierentechnik	60
3.2.2	Aufbau	62
3.2.3	Durchführung und Auswertung	63
3.3	Vibrometrische Untersuchungen	63
3.3.1	Das Prinzip des Vibrometers	63
3.3.2	Aufbau und Durchführung	65
3.3.3	Aufbereitung der Daten	70
4	Diskussion der Ergebnisse	73
4.1	Diskussion der Ergebnisse	73
4.1.1	Einzel Erläuterungen	73
4.1.2	Gegenüberstellungen	81
4.1.3	Diskussion der Methoden	93
5	Zusammenfassung	95
5.1	Zusammenfassung und Ausblick	95
5.1.1	Zusammenfassung	95
5.1.2	Zukunft und Weiterentwicklung des behandelten Themas	96
A	Ergänzende Ergebnisse	99
B	Datenblätter verwendeter Komponenten	103
C	Das STEP 7 - Lite Steuerprogramm	113
D	Technische Zeichnungen	119
E	Veröffentlichung in diesem Bereich	161
F	Nomenklatur	171
F.1	Formelzeichen	171
F.2	Abkürzungen	173

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prinzipieller Aufbau des Rijke-Rohres	12
2.1	Reaktionsberechnung unter GASEQ	19
2.2	Veranschaulichung Venturi-Effekt	20
2.3	Swirl Ranking	21
2.4	Komponenten des Brenners	22
2.5	Dralldüse mit Wechselspitze	22
2.6	Prototyp ohne Drallerzeugung	25
2.7	Rezirkulation an der Düsenspitze	25
2.8	Gaszufuhr	26
2.9	Düsenaufnahme	27
2.10	Anschlussrohr	27
2.11	Kopfplatte	28
2.12	Strömungseffekte in einer Ringbrennkammer	29
2.13	Schemata Brennkammerformen	30
2.14	Swirl Skizze	31
2.15	Ein-/Zweischalen-Bauweise	31
2.16	Komponenten der Brennkammer	32
2.17	Zündkerze und Zündbox	33
2.18	Der ONERA-Pulsator	35
2.19	Position des optischen Sensors	36
2.20	Im Rohr angeregte Moden	38
2.21	Prinzipskizze der SPS-Steuerung	39
2.22	Verwendete analoge Sensoren	39
2.23	Massenstrommessung nach dem Differenzdruckprinzip	40
2.24	Prinzip der V-Cone Differenzdruckmessung	41
2.25	Komponenten des Flammenwächters	42
2.26	Aufbau der S7-300	43
2.27	STEP7-Lite Hauptfenster	44
2.28	Vergleich KOP, FUP, AWL	45
2.29	UND - Beziehung	45
2.30	Magnetventil 3963	46
2.31	Anordnung der Ventile	46

2.32	Leitungsspirale	47
2.33	Instrumentierungsvorschlag	48
2.34	Allgemeine Leistungsdaten	49
2.35	Austrittsgeschwindigkeit über Sirenevordruck	51
2.36	Massenströme über Sirenevordruck	52
3.1	Triggersignal↔ Ausgangssignal	54
3.2	CCD-Aufbau	55
3.3	Konfigurationstabelle	56
3.4	Zwei Beispielmatrizen als Ausgangswert	57
3.5	Ergebnismatrix der MAX-Funktion	57
3.6	Ergebnis der MIN-Funktion	58
3.7	Mittelwertsmatrix der beiden Startmatrizen	58
3.8	Farbcodierte Integralbilder	59
3.9	Prinzip der Schlierenentstehung	61
3.10	Schlieren - Aufbau	62
3.11	Beispielbild der Schlierenaufnahme	64
3.12	Prinzip des Vibrometers	64
3.13	Eignungstest-Aufbau	66
3.14	3 untersuchte Positionen	67
3.15	Aufbau und Messraster	69
3.16	Messung der Peakhöhe	71
3.17	Beispiel Waterfall-Plot	72
4.1	Beispiel CCD-Analyse	74
4.2	Flammenform	75
4.3	Vergleich der Flammenstruktur	75
4.4	Zeitaufgelöste Reihe	77
4.5	Beispiel Folge von Schlierenaufnahmen	78
4.6	Beispiel graphischer Output	80
4.7	Statistische Bilder 25 Hz	83
4.8	Folge von Schlierenaufnahmen der Pulsation bei 25 Hz	84
4.9	Vibrometrische Analyse bei 25 Hz	85
4.10	Zonen der Flamme	86
4.11	Schlierenaufnahmen der Pulsation bei 175 Hz	87
4.12	Vibrometrische Analyse bei 175 Hz	88
4.13	CCD-Analyse nicht-pulsiert	90
4.14	Schlierenaufnahmen der Flamme ohne Pulsation	91
4.15	Vibrometrische Analyse ungepulst	92
A.1	Vibrometrie in der Brennkammer bei 175 Hz	101

Kapitel 1

Einleitung

In dieser Arbeit wird der Einsatz optischer Messmethoden zur Detektion von Verbrennungsinstabilitäten untersucht. Diese sind eine der grossen Herausforderungen im modernen Brennkammerbau, da sie im Extremfall schwere Schäden hervorrufen können. Den Hintergrund dieser Störungen sowie den Weg, der zur Anpassung der Messmethoden eingeschlagen wurde, beschreibt dieses erste Kapitel.

1.1 Hintergrund der Arbeit

Moderne Gasturbinen, sowohl stationär als auch im Flugbetrieb, müssen unter sehr engen Betriebsbedingungen arbeiten, um die Vorgaben von Leistung, Effizienz, Lärm und Emission erfüllen zu können. Bezogen auf die Brennkammer liegen diese Bedingungen im deutlich mageren Bereich; das heisst bei hohem Luftüberschuss.

Eines der Systeme, das oben genannte Forderungen - vor allem in Hinsicht auf Effizienz und NO_x - Emission - sehr gut erfüllt, ist das System der LPP - Verbrennung*. Bei diesem System erfolgt die Einspritzung des 2-Phasen-Gemisches in ein Mischrohr charakteristischer Länge, das optimale Verdampfung und Vermischung ermöglicht. Die dabei entstehenden hohen Arbeitsdrücke und -temperaturen fördern allerdings das Auftreten von verbrennungsindizierten Brennkammerschwingungen (CDO ... „Combustion Driven Oscillations“). Diese können zu schweren Komplikationen im Verbrennungsablauf - von Flammenauslöschung bis hin zur Zerstörung von Bauteilen - führen. Aufgrund dieser Brisanz sind das Erkennen und die Verhinderung von CDOs heute mehr denn je zentrale Aufgaben in der Konstruktion und im Betrieb von Brennkammern.

Der erste grosse Schritt in diese Richtung gelang Mitte des letzten Jahrhunderts mit der Identifizierung des zugrunde liegenden physikalischen Vorgangs. Dieser war vom Prinzip her schon länger bekannt, wurde bis zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht mit oben genannten, technischen Problemen in Verbindung gebracht:

*LPP...“Lean Prevaporized Premixed ...“mager, vorverdampft, vorgemischt“ (vgl [1])

1.1.1 Das Entstehungsprinzip von Brennkammerschwingungen am Beispiel des Rijke-Rohres

Verbrennungsinduzierte Brennkammerschwingungen beruhen auf einem zyklischen Energieaustausch von Schalldruck, Schallgeschwindigkeit und instationärem Wärmefluss. Da sich eine Änderung des Schalldruckes als Schallwelle äussert, können sich diese - an sich geringen - Energiemengen in einem Resonator (Rohr, Brennkammer,...) deutlich verstärken. Dieser Effekt wurde zum ersten Mal 1848 von P.L.Rijke experimentell untersucht. Der von ihm verwendete Versuchsaufbau umfasste ein an beiden Enden offenes, senkrechtes Rohr, in dem ein verschiebbares Metallgitter von einer Flamme bis zu Rotglut erhitzt wurde (siehe Abbildung 1.1).

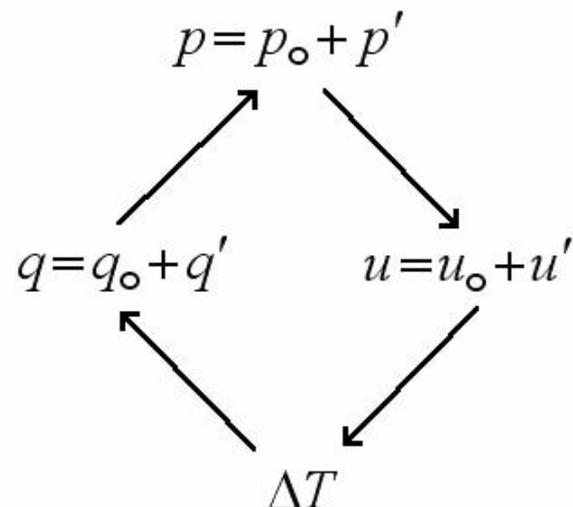
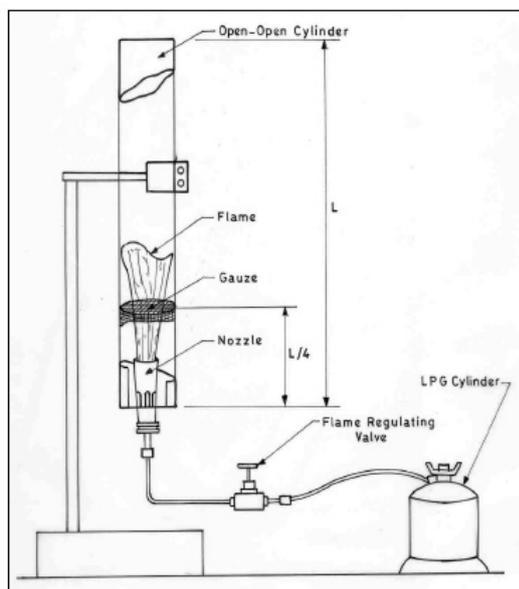


Abbildung 1.1: Links: Prinzipieller Aufbau des Rijke-Rohres (hier gasgefeuert); Quelle: [27]; Rechts: Schema des Energietransfers; Quelle: [14]

War das Gitter am Ende des unteren Rohrviertels platziert, konnte kurz nach Entfernen der Flamme ein deutlicher Ton wahrgenommen werden. Rijke entdeckte weiters, dass er diesen Ton konstant erzeugen konnte, wenn er das Gitter elektrisch beheizte. 1859 veröffentlichte er seine Beobachtungen in den "Annalen der Physik" unter dem Titel "Notiz über eine neue Art, die Luft in einer an beiden Enden offenen Röhre in Schwingungen zu versetzen". Er war allerdings noch nicht in der Lage, diesen Effekt vollständig zu erklären. Da er ausserdem hauptsächlich nach neuen Musikinstrumenten suchte und die Klangqualität dieses Rohres ungenügend war, setzte er die Untersuchungen nicht fort.

Die vollständige, physikalische und mathematische Erklärung dieses thermo-akustischen

Phänomens erreichte um 1878 Lord Rayleigh*. Er erkannte die Tonerzeugung als Energieaustausch zwischen Wärmefluss, Schalldruck und Schallgeschwindigkeit und postulierte darauf das nach ihm benannte Rayleigh-Kriterium in seiner Arbeit "Theory of Sound". Dabei wies er nach, dass eine stehende akustische Welle dann weiterhin erhalten wird, wenn im ersten Teil der Schwingung eine instationäre Wärmezufuhr, oder im zweiten Teil eine ebensolche Wärmeabfuhr stattfindet (vgl. [27]).

Mathematisch einfach wurde dieser Zusammenhang 1953 von Putnam et al. (vgl. [1]) in einem einzigen Integral dargestellt:

$$I = \frac{1}{\tau} \oint p' \cdot q' \cdot dt \quad (1.1)$$

τ ist hierbei die Periodendauer der Schwingung, p' der Schalldruck, q' der instationäre Anteil des Wärmeflusses und t die Zeit.

Diese Gleichung kann für drei Fälle gedeutet werden:

Wenn $I < 0$: Die akustischen Schwingungen werden gedämpft und klingen mit der Zeit ab.

Wenn $I > 0$: Die Schwingungen werden verstärkt und wachsen mit der Zeit.

Bei $I = 0$: Die Schwingungen werden weder gedämpft noch verstärkt.

Für eine exakte Ableitung des Energieaustausches, bzw. des Rayleigh-Kriteriums soll hier auf die in [2] angegebene Sekundärliteratur verwiesen werden.

1.1.2 Beispiele für verbrennungsinduzierte Brennkammerschwingungen in technischen Anwendungen

Das Auftreten von CDOs in Verbrennungsturbinen wurde bereits in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts beobachtet und - etwas abgewandelt - teilweise auch genutzt.

Bekanntestes Beispiel für die Nutzung des Resonanzeffektes stellt das Argus-Schmidt-Rohr dar. In diesem Fall lieferte der zyklische Ablauf von Verbrennung und Druckstoss die Antriebsenergie für die deutsche Flugbombe V-1 („Pulsotriebwerk“).

Im unerwünschten Fall können diese Schwingungen aber teils schwere Komplikationen hervorrufen. Ein Beispiel dafür stammt aus der jüngeren Vergangenheit:

Der Fall der Alstom GT26 Gasturbine

Die ABB (heute Alstom) GT24/26 ist eine Turbinenreihe für den Betrieb mit Erdgas oder Diesel mit einer Nennleistung von bis zu 400 MW bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz. Sie gehört der „F“ - Generation von Gasturbinen an und ist seit 1993 am Markt erhältlich. Diese neue Reihe von Gasturbinen (inkludiert auch Konkurrenz-Modelle wie unter anderem die Westinghouse 501-F etc.) verspricht höhere Leistung bei vermindertem Brennstoffverbrauch und gesenkten Emissionen im Vergleich zu älteren Modellen. Einer

*John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh; englischer Mathematiker und Physiker 1842 - 1919

der entscheidenden Faktoren, um diese Ziele zu erreichen, war der Wechsel von einfachen, stabilen Diffusionsbrennkammern hin zu gestufter $Low - NO_x$ Verbrennung [11].

Bis zum Jahr 2003 hatte die ABB POWER-AG (im Jahre 2000 im Zuge eines Joint-Ventures mit ALSTOM fusioniert) 76 Einheiten des GT26 Modelles installiert, als plötzlich Risse in mehreren Teilen der Brennkammer und der Turbine, lange vor dem Erreichen der errechneten Lebensdauer (teilweise schon nach 50 Betriebsstunden), auftraten. Die enormen Regress- und Reparaturforderungen der Kunden in der Höhe von etwa vier Milliarden Euro führten zum finanziellen Ruin des französischen Paradekonzerns. Erst ein Eingreifen des Staates verhinderte den Konkurs des Unternehmens mit 25.000 Mitarbeitern [16].

Wie sich durch spätere Untersuchungen herausstellte, waren Schwingungen in den neuartigen Brennkammern einer der Hauptgründe für das Versagen der Turbinenteile. Erst durch eine aufwendige Kooperation mit internationalen Partnern konnten die Schwierigkeiten behoben werden. Die prognostizierte Leistung von 400 MW über eine Betriebsdauer von 30.000 h wird allerdings bis heute nicht vollkommen erreicht.

Dieses Beispiel soll zeigen, dass trotz der eingehenden Untersuchungen von CDOs in den letzten zwei Jahrzehnten (vgl. [8]) und den beachtlichen Fortschritten bei passiver und aktiver Kontrolle ([12, 2]) ein hoher Bedarf zur schnellen und zuverlässigen Detektion von Brennkammerschwingungen gegeben ist.

1.2 Aufgabe und Vorgehensweise

1.2.1 Ableitung der Aufgabe aus den Forschungsschwerpunkten des ITTM

Aufgabe dieser Diplomarbeit ist es, mehrere bereits bestehende und am Institut vorhandenen Beobachtungs- und Messmethoden an einem Testbrenner einzusetzen, der CDO-ähnliche Zustände durch gepulste Zufuhr des Gemisches simuliert. Dabei wird die Tauglichkeit bzw. die Möglichkeiten der einzelnen Methoden festgehalten und verglichen. Diese Erkenntnisse sollen in Zukunft bei weiteren Brennkammer-Projekten am Institut für Thermische Turbomaschinen der TU-Graz (TOSCA*, ReADy2FIGHT†,...) die Auswahl der Messverfahren erleichtern. Weiters besteht die Möglichkeit, den modularen Aufbau des Brenners etwa im Rahmen von Laborübungen o.Ä. zu Ausbildungszwecken zu verwenden.

1.2.2 Aufbau der Arbeit

Der erste Schritt dazu ist die Konstruktion des Brenners. Dieser wird in die Module

- Brenner

*Technology for Oscillating and Steady-state Combustion Analysis

†Reliable Activation of combustion Dynamics to control Flame Instabilities at High Temperature and pressure conditions

- Brennkammer
- Luft-Pulsator
- Sensorik und Steuerung

aufgeteilt. Für jedes Modul werden die Anforderungen ermittelt, ausgewählte Prinzipien diskutiert und daraus die Konstruktion / Auslegung abgeleitet. Ein wichtiger Aspekt, der dabei immer wieder zu beachten ist, ist die Positionierung im Low-Cost-Bereich, da das gesamte System auch in diesem Punkt hohe Effizienz aufweisen soll. Abschliessend erfolgt eine Zusammenfassung der konstruktiven Leistungsdaten.

Diese oben erwähnten Punkte umfasst Teil eins der Diplomarbeit.

Der zweite Teil behandelt die eingesetzten Messmethoden. Dabei wird in folgender Reihenfolge vorgegangen:

1. Zeit- und phasenaufgelöste Visualisierung per getriggertem CCD-Kamera am Free-Jet
Dieser Punkt dient der Lokalisierung der Flamme, sowie der Bestimmung derer Intensität unter variierenden Betriebsbedingungen.
2. Hochgeschwindigkeits - Schlieren - Aufnahmen
Hier werden die Amplitude der Pulsation sowie die Entstehung und Verteilung der primären Wirbelzonen beobachtet.
3. Einsatz der Vibrometrie
 - (a) Untersuchung des Vibrometerverhaltens
Mithilfe eines einfachen Aufbaues soll die grundsätzliche Eignung der Vibrometrie an Flammen geklärt werden.
 - (b) Dual-Laser Vibrometrie
Bei positivem Ergebnis von Punkt 3) werden mithilfe eines beweglichen Mess- und eines fixen Referenzvibrometers die Möglichkeiten der Vibrometrie untersucht.
4. Auswertung und Vergleich der Ergebnisse
Die oben gewonnenen Erkenntnisse werden noch einmal zusammengefasst und gegenübergestellt. Der optimale Einsatzbereich für jede der verwendeten Methoden wird definiert. Weiters findet eine Überprüfung der Ergebnisse auf Korrelationen statt. Aus den Erkenntnissen der ersten beiden Punkte wird dann auf Möglichkeiten der Kombination beziehungsweise auf eine geeignete Einsatz-Reihenfolge geschlossen.
5. Rückschlüsse und Ausblick
Abschliessend soll die durchgeführte Arbeit kurz bewertet werden. Weitere Möglichkeiten werden diskutiert und Verbesserungsvorschläge gemacht.

Kapitel 2

Konstruktion des Versuchsbrenners

2.1 Der Brenner

Die erste Konstruktionsaufgabe bestand in der Auslegung und Gestaltung des Brennermoduls. Folgende Forderungen sollen erfüllt werden:

- atmosphärischer Betrieb
- keine zusätzliche Kühlung
- Beschränkung auf primäre Verbrennung
- Brennstoff: Butan, Propan oder Erdgas (zu einem Grossteil CH_4)
- Leistung bis 100-500 kW; mittlere Leistung von 250 kW ist anzustreben
- Stabilisierung der Flamme durch Drall + Venturi-Effekt
- Sicherung gegen Rückschlag der Flamme
- Anschluss für eine Brennkammer

Auf die Berücksichtigung der einzelnen Anforderungen wird im Laufe des Kapitels eingegangen.

2.1.1 Verwendete Grundlagen

Vor den konstruktiven Details sollen noch einige Grundlagen und Begriffe, die zur Dimensionierung und Grobauslegung verwendet wurden, erwähnt werden:

Ableitung der Massenströme und Leistungsabschätzung mit GASEQ

Wie oben erwähnt, besteht eine Forderung in einem Leistungsbereich des Brenners zwischen 100 und 500 kW. Dabei sprechen wirtschaftliche und sicherheitstechnische Gründe für eine grösstmögliche Annäherung an die untere Grenze. Die Fertigung und vor allem die Kompatibilität zu bestehenden Komponenten (ONERA Sirene; siehe Kapitel 2.3) geben allerdings Mindestgrössen vor.

Den Ausgangspunkt der Auslegung stellt der Luftmassenstrom durch das System dar. Untere Grenze ist hier der Minstdurchsatz, der zur Funktion der Sirene notwendig ist. Dieser beträgt bei einer Lufttemperatur von 500K und kritischem Druckverhältnis (ca. 2 bar) in etwa 35 g/s*. Da die Luftzufuhr zunächst atmosphärisch erfolgen soll, und das Druckverhältnis weit unter dem kritischen Bereich liegt, können 15 g/s als Ausgangswert gewählt werden.

Der nächste Schritt ist die Bestimmung der erforderlichen Menge an Brennstoff für ein gewünschtes Luftverhältnis. Dabei ist auf die Zündgrenzen des Brennstoffes zu achten. In diesem Fall liegen sie bei 4 - 17 Vol.% Methan im Luftstrom bei Raumtemperatur. Die Mengenrechnung kann sehr schnell mit dem Programm GASEQ ([20]) durchgeführt werden. Dieses Programm liefert die Zusammensetzung von Ausgangs- und Endprodukten in Massenanteilen. Die Umrechnung in Volumenanteile erfolgt nach folgender Beziehung:

$$\mu_i = \frac{m_i}{m_{ges}} = \frac{n_i \cdot M_i}{n_{ges} \cdot M_{ges}} = \nu_i \cdot \frac{M_i}{M_{ges}} \quad (2.1)$$

Der Grossteil der Versuche wird, der Zielsetzung entsprechend, im mageren Bereich durchgeführt. Für eine Verbrennung mit den Ausgangsprodukten Luft (O_2, N_2, Ar) und CH_4 und einem gewählten Luftverhältnis von $\lambda = 1,3$ ($\phi = 0,769$) ergibt sich also

$$\begin{aligned} \nu_{CH_4} &= \mu_{CH_4} \cdot \frac{M_{ges}}{M_{CH_4}} = \mu_{CH_4} \cdot \frac{\sum \mu_i \cdot R_i}{M_{CH_4}} \\ &= 0,04271 \cdot \frac{8314}{294,634} \\ \nu_{CH_4} &\approx 0,0751 \end{aligned}$$

ein benötigter Volumsanteil von $\nu_{CH_4} = 7,5$ Vol.% (unter Normalbedingungen). Dies liegt innerhalb der oben angegebenen Zündgrenzen und entspricht einem Massenstrom von ca. 0,7 g/s.

Auch der Punkt der Leistungsabschätzung wird durch GASEQ erleichtert. Als Mass für die abgegebene Energie wird die freigesetzte Gibb'sche Reaktionsenthalpie ($\Delta G''$) herangezogen. Diese ergibt sich aus der Energiedifferenz der Endprodukte (Index ") und der Anfangskomponenten (Index ')

$$\Delta G = G'' - G' \quad (2.2)$$

*vgl. [9]]

Die Anfangs- und Endwerte liefert Gaseq automatisch (vgl. Abbildung 2.1 unterer Bereich). Somit ergibt sich für die Verbrennung unter obigen Bedingungen:

$$\Delta G = -18734,95 + 2350,31 \text{ kJ/kg} \quad (2.3)$$

$$\Delta G = -16384,64 \text{ kJ/kg}$$

Multipliziert mit dem Massenstrom der gesamten Verbrennungsprodukte ergibt sich die Wärmeleistung der Flamme.

$$P = \Delta G \cdot \dot{m} \quad (2.4)$$

$$P \approx 240 \text{ kW}$$

The screenshot shows the Gaseq software interface. The 'Problem Type' is set to 'Adiabatic T and composition at const P'. The 'Reactants' table lists N2, O2, AR, and CH4 with their respective masses and mass fractions. The 'Products' table lists various species including AR, N2, H2O, CO2, CO, O2, OH, H, O, H2, NO, HCO, CH2O, CH4, CH3, HO2, NO2, NH3, NH2, N, HCN, CN, N2O, C2, and CH, along with their masses and mass fractions. A central table provides detailed properties for both reactants and products, such as temperature (298 K for reactants, 1949.2 K for products), pressure (1.0 atm), volume, moles, enthalpy, entropy, and free energy.

Species	Mass	MassFrac	K
N2	21.8780	0.72306	
O2	6.70370	0.22156	
AR	0.38346	0.01267	
CH4	1.29228	0.04271	

Species	Mass	MassFrac	K
AR	0.38346	0.01267	
N2	21.8317	0.72153	
H2O	2.88662	0.09540	
CO2	3.53075	0.11669	
CO	0.00912	3.02e-04	
O2	1.49022	0.04925	
OH	0.02435	8.05e-04	
H	1.451e-05	4.80e-07	
O	0.00159	5.27e-05	
H2	3.007e-04	9.94e-06	
NO	0.09919	3.28e-03	
HCO	4.915e-11	1.62e-12	
CH2O	8.957e-13	2.96e-14	
CH4	6.086e-21	2.01e-22	
CH3	1.358e-20	4.49e-22	
HO2	3.500e-05	1.16e-06	
NO2	1.215e-04	4.01e-06	
NH3	5.752e-10	1.90e-11	
NH2	1.488e-10	4.92e-12	
N	5.432e-09	1.80e-10	
HCN	1.425e-13	4.71e-15	
CN	3.811e-16	1.26e-17	
N2O	7.053e-06	2.33e-07	
C2	1.890e-32	6.25e-34	
CH	5.382e-22	1.78e-23	

Property	Reactants	Products
Temperature, K	298	1949.2
Pressure, atm	1.0	1.0
Volume Products/Reactants		6,5448
Moles Products/Reactants		1,00061
H0, kJ/mol	-5,587	-5,583
S0, J/mol/K	199,938	264,981
Cp, J/mol/K	29,496	39,854
Gamma, Cp/Cv	1,393	1,264
Mean Molecular Weight, g	28,00	27,98
Density, kg/m3	1,1451	0,17496
Sound speed, m/s	350,9	855,2
Enthalpy, H, kJ/kg	-199,51	-199,51
Entropy, S, J/kg/K	7140,24	9468,81
Intern Energy, U, kJ/kg	-287,99	-778,61
Free Energy, G, kJ/kg	-2327,30	-18655,76
Cp, J/kg/K	1053,35	1424,14
Volume, m3	24,4537	159,947
Molecules/cc	2,46E+19	3,77E+18
Moles/cc	4,09E-05	6,25E-06
Viscosity, kg/m/s	1,77E-05	6,53E-05
KinematicVisc, m2/s	1,55E-05	3,73E-04
ThermCond, J/m/K/s	2,42E-02	1,22E-01
ThDiffusivity, m2/s	2,01E-05	4,89E-04

Abbildung 2.1: Screenshot der Reaktionsberechnung unter GASEQ

Die Leistungswerte liegen im geforderten Bereich. Es empfiehlt sich allerdings aufgrund

der Nähe zur unteren Zündgrenze eine Senkung des Luftverhältnisses auf etwa 1,2 um eine Auslöschung der Flamme zu vermeiden. Weiter soll darauf hingewiesen werden, dass die Leistungsberechnung durch GASEQ auf adiabaten Bedingungen beruht. Die effektiv abgegebene Flammenleistung beträgt etwa ein Viertel des errechneten Wertes. Das Verhältnis von Betriebsdruck zu einzusetzendem Kraftstoff und der effektive Betriebsbereich des Brenners sind in den Grafiken in Kapitel 2.5.2 aufgeführt.

Venturi-Effekt

Der italienische Physiker Giovanni Battista Venturi (1746-1822) entdeckte das antiproportionale Verhalten von Geschwindigkeit zu Rohrdurchmesser in einer inkompressiblen Strömung ohne Reibung. An der engsten Stelle des Rohres ist die Geschwindigkeit am höchsten.



Abbildung 2.2: Veranschaulichung Venturi-Effekt

Diese Beziehung ergibt sich auch aus der Kontinuitätsgleichung:

$$\vec{m}_l = \rho_l \cdot \vec{v} \cdot A = \text{const.} \quad (2.5)$$

(mit : $\vec{v} = \vec{v}(u, v, w)$)

Da die Dichte ρ bei Flüssigkeiten annähernd konstant ist und der Massenstrom in einem Rohr konstant bleiben muss, kommt man auf die Beziehung:

$$\vec{v}_1 \cdot A_1 = \vec{v}_2 \cdot A_2 \quad (2.6)$$

In der hier beschriebenen Arbeit wird zwar mit Luft und Gas gearbeitet, die Strömungsbedingungen (atmosphärisch, $v_{Gem} < 100m/s$) lassen aber eine Auslegung nach inkompressiblem, isothermen Verhalten und somit eine Verwendung von Gleichung 2.6 zu. Für die Düse wird ein Verhältnis $A_1/A_2 = 2$ gewählt. Dieser Wert ist oft in der Literatur und auch in technischen Anwendungen zu finden. Zusätzlich erleichtert er durch seine Geradzahligkeit den Modellierungsaspekt.

Swirl-Number

Die Swirl-Number gibt das Verhältnis zwischen tangentialen und axialem Massenstrom einer Strömung an und kann somit als Grad für die Rotation gesehen werden. Eine rein

axiale Strömung hat eine Swirl Number von $S = 0$

Die integrale Form wurde von J.M.Beér und N.A.Chigier ([6]) für atmosphärische Bedingungen folgendermassen definiert:

$$S = \frac{2 \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{max}} \rho u V_{\Theta} r^2 dr d\Theta}{D \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{max}} \rho u^2 r dr d\Theta} \quad (2.7)$$

Da in der hier beschriebenen Anwendung sowohl die Dichte als auch die Fläche oberhalb und unterhalb des Bruchstriches gleich sind, kann für eine lokale Abschätzung um die Symmetrieachse folgende vereinfachte Form verwendet werden:

$$S_{\text{lokal-Zentrum}} = \frac{V_{\Theta}}{u} \quad (2.8)$$

Wobei V_{Θ} die tangentielle und u die axiale Geschwindigkeit der Strömung angibt.

Besonders auffällig ist die Abhängigkeit der entstehenden Rezirkulationszonen von der Swirl Number. Einen qualitativen Vergleich liefert Bild 2.3.

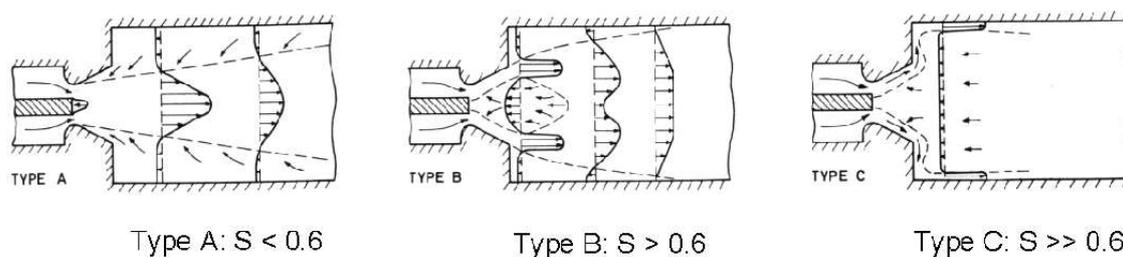


Abbildung 2.3: Geschwindigkeitsprofile in der Brennkammer abhängig von der Swirl Number; Quelle: [6]

Vergleiche mit den Ergebnissen von Giuliani et al. ([9]) lassen für den verwendeten Brenner bei Einsatz einer Dralldüse mit 45° Steigung eine Swirl-Number im Bereich von 0.8 erwarten. Diese Annahme muss noch messtechnisch bestätigt werden, was aber nicht Gegenstand dieser Arbeit ist.

2.1.2 Aufbau

Der Brenner besteht aus vier Hauptkomponenten. Abbildung 2.4 zeigt sie in folgender Reihenfolge von links nach rechts:

1. Anschlussrohr
2. Dralldüse mit Wechselspitze
3. Düsenaufnahme
4. Kopfplatte

Der Verbindungsflansch zwischen Düsenaufnahme und Anschlussrohr wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit ausgeblendet. Diese Teile sollen nun in Aufbau und Funktion genauer erklärt werden. Die exakten Konstruktionszeichnungen entnehmen Sie bitte Anhang D.

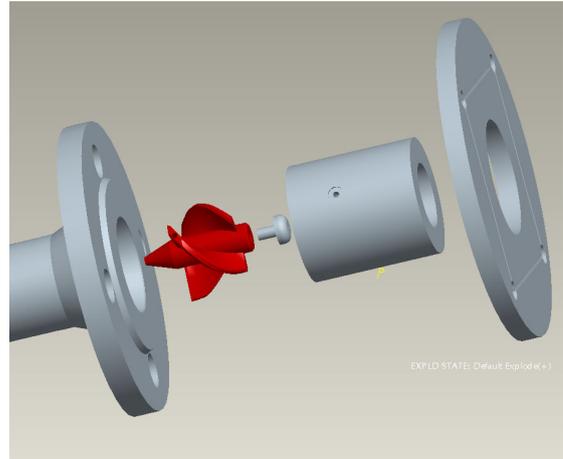


Abbildung 2.4: Die vier Hauptkomponenten des Brennermoduls

Die Düse

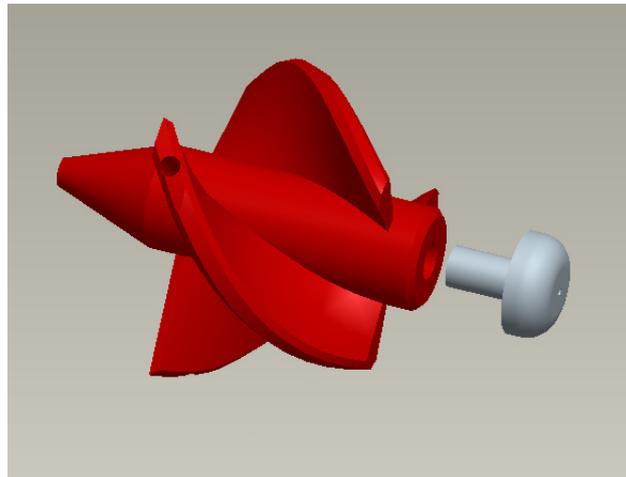


Abbildung 2.5: Dralldüse mit Wechselspitze

Die Düse ist das Herzstück des Brenners. Ihre Aufgaben liegen in einer möglichst optimalen Gemischbildung, der Erzeugung von Austrittsgeschwindigkeit um ein Rückschlagen

der Flamme zu verhindern und - ab dem zweiten Modell - in der Erzeugung eines Dralles zur Stabilisierung der Flamme.

Diese Aufgaben werden zunächst noch einmal kurz diskutiert, anschliessend erfolgt eine Beschreibung der verwendeten Varianten:

Gemischbildung: Ähnlich wie im Kolbenmotor ist auch hier eine Wahl zwischen vorgemischter und getrennter Durchströmung der Düse zu treffen. Besonderes Augenmerk soll dabei auf die Homogenisierungsstrecke, die Sicherheit und den Fertigungsaufwand gelegt werden.

Bei *vorgemischter Durchströmung* wird der Brennstoff - in diesem Fall zuerst ein Gemisch aus Propan und Butan, später CH_4 - noch vor der Düse dem Luftstrom beigemischt. Dies hat den Vorteil, dass die Strecke zur Homogenisierung des Gemisches den gesamten Abstand von Gaszufuhr bis Düsenende beträgt. Weiters erlaubt die Vormischung eine konstruktive Trennung von Brennstoffzufuhr und Düse, was eine klare Vereinfachung der Komponenten und so eine deutliche Kostenersparnis darstellt. Nachteilig ist anzumerken, dass bereits vor der Düse zündfähiges Gemisch entstehen kann. Bei plötzlichem Einbrechen des Luftmassenstroms besteht die Möglichkeit einer Rückzündung der Flamme. Aus Sicherheitsgründen sollte die Brennstoffzufuhr deshalb auf jeden Fall mit einem Rückschlagventil ausgestattet werden, auch wenn das allgemeine Risiko durch die atmosphärischen Strömungsbedingungen und die niedere Temperatur im Mischrohr als nieder eingestuft werden kann.

Unter *getrennter Zufuhr* wird hier die Einbringung des Brennstoffes in den Luftstrom erst innerhalb der Düse verstanden (etwa durch radiale Bohrungen oder Schlitze bei Gaszufuhr vom Düsenzentrum aus). Das heisst, dass Luft- und Brennstoffstrom im Anschlussrohr separat geführt werden. Der Vorteil dieser Auslegung besteht darin, dass die Flamme auch bei niedriger Geschwindigkeit des Luftstroms nicht zurückschlagen kann, da die Gaskonzentration innerhalb der Düse weit über der Zündgrenze liegt und eine Rückströmung durch den Venturi-Effekt nicht möglich ist. Allerdings verringert sich die Homogenisierungsstrecke des Gemisches dadurch auf einen Bruchteil der Düsenlänge.

Erzeugung von Geschwindigkeit: Das Prinzip der Geschwindigkeitsveränderung durch Querschnittsverengung wurde bereits in Kapitel 2.1.1 erläutert.

Drallerzeugung: Die Aufbringung eines erzwungenen Dralls im Luftstrom bzw. in der Flamme ist eine der Grundforderungen für die Konstruktion. Die Funktion besteht einerseits in einer verbesserten Gemischbildung durch die Verlängerung des Ausströmweges und andererseits in einer radialen Aufweitung der Flamme. Letzteres ermöglicht nicht nur eine bessere Ausnutzung des Brennraumes bei kompakterer Bauweise sondern sorgt auch für eine gleichmässige Verbrennung durch Erhöhung der Turbulenz. Konstruktiv werden drei Möglichkeiten zur diskutiert:

- Die erste Möglichkeit ist die Führung der Medien durch *schräg zur Strömungsrichtung stehende Bohrungen*. Auf diese Weise wird pro Bohrung eine tangentiale Geschwindigkeitskomponente erzeugt, die eine Drallbewegung hervorruft. Voraussetzung für diese Variante ist die Führung zumindest eines Teils der Strömung vom Düsenkern nach aussen.
Vorteil: kompakt
Nachteile: hoher Aufwand zur Berechnung und Fertigung der Bohrungen; sehr inhomogener Strahl am Düsenaustritt
- Der zweite Konstruktionsvorschlag besteht in der *Führung durch radiale Leitschaufeln*. Diese Möglichkeit ist bereits vielfach erprobt und dokumentiert (z. Bsp: [9]).
Vorteile: Einfache Anpassung des Dralles durch Austausch oder Verformung der Schaufeln; Gute Vormischung durch hohe Turbulenz.
Nachteile: Erhöhte Komplexität der Düse durch die zusätzlichen Komponenten. Große Druckdifferenz vor und nach den Schaufeln aufgrund der hohen Intrusion in die Strömung
- Die dritte Ausführung stellt gewissermassen den Mittelweg zwischen den beiden ersten dar. Beim *Formkegel* sorgen eingefräste Drallnuten für die rotatorische Beschleunigung. Die axiale Beschleunigung des Luftstromes wird dadurch erreicht, dass die Nuten parallel zur Drehachse des Kegels gefräst werden. So entsteht ein sich in Strömungsrichtung kontinuierlich verjüngender Nutquerschnitt, was einer Unterschalldüse entspricht. Diese Formgebung - vergleichbar mit einem Fräskopf - weist vor allem den Vorteil auf, dass die gesamte Düse aus einem Teil besteht ohne einen zu grossen Fertigungsaufwand hervorzurufen. Zusätzlich ermöglicht die einfache Geometrie einen guten Zugang für optische Messverfahren und auch für numerische Kontrolle und Optimierung. Dem gegenüber steht der Nachteil der Unveränderbarkeit der *swirl ratio* (siehe Kap. 2.1.1). Eine Änderung der Auslegung erfordert die Fertigung eines kompletten, neuen Teiles.
Vorteile: geringer Druckverlust entlang der Düse; hohe akustische Transparenz; einfache Geometrie
Nachteile: Unveränderbarkeit der Flankensteigung; Axisymmetrie durch Fertigungstoleranzen praktisch nicht erreichbar.

Aus fertigungstechnischer Sicht und zur Vereinfachung des Designs fällt die Wahl auf einen dreinutigen Formkegel mit vorgemischter Gaszufuhr (siehe Abbildung 2.5). Zur Grobdimensionierung und Überprüfung von Gemischzufuhr und Geschwindigkeitserzeugung wird zuerst ein geschweisster Prototyp ohne Drall gefertigt (siehe Abbildung 2.6):

Deutlich zu erkennen sind die nicht abgerundeten Flügel dieser Vorversion.

Düsenspitze Die austauschbare Düsenspitze wurde bereits bei diesem Modell eingeführt, um die Wirkung verschiedener Spitzenformen auf die Stabilität und den Brennbeginn der Flamme zu beobachten. Das gezeigte Modell mit einem Drittel horizontaler Führung und

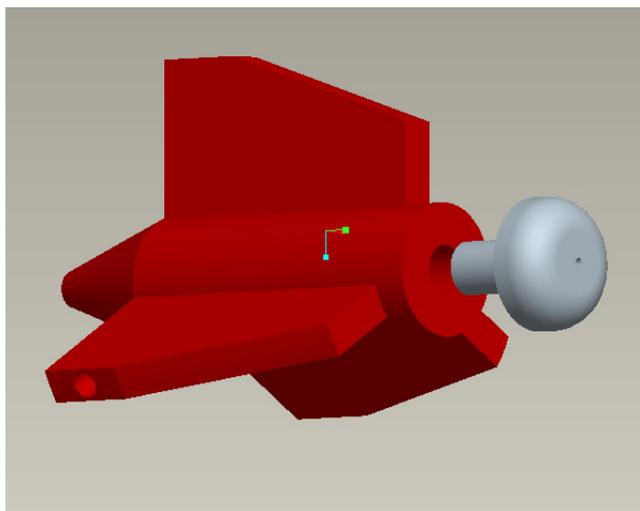


Abbildung 2.6: Prototyp ohne Drallerzeugung

zwei Drittel Abrundung (Werte empirisch und aus früheren Arbeiten zum Thema abgeleitet; vgl. [9]) konnte sich gegenüber einer scharfen bzw. abgeschraubter Spitze in Punkto Flammenstabilität und Verschleiss durchsetzen. Die Bohrung an der Stirnseite der Spitze dient zur Störung der inneren Zirkulation an dieser Stelle (siehe Abbildung 2.7). Dies verhindert die Entstehung eines Staupunktes, hält dadurch die Flamme vom Material fern und erhöht so dessen Lebensdauer. Die Ansaugung aus dem Hauptstrom ist in der Abbildung durch eine radiale Bohrung gegeben. In der Praxis kann dieser Effekt auch dadurch erreicht werden, dass die Spitze nur locker an die Düse angeschraubt wird. Der dadurch entstehende leichte Spalt im Gewinde ersetzt die zusätzliche Bohrung.

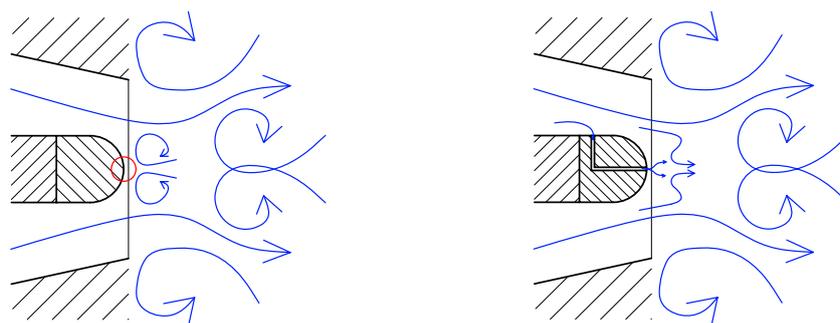


Abbildung 2.7: Störung der Rezirkulation durch Bohrung in der Spitze: links: ohne Bohrung(rot:entstehender Staupunkt); rechts: mit Bohrung;

Beide Modelle - Prototyp und Endversion - werden aus Gründen der Bearbeitbarkeit und der geringen mechanischen und thermischen Belastung aus S235JR [St37-2] gefertigt.

Für die Spitze wird aufgrund der etwas höheren Temperaturen S355JR [St52-3] verwendet.

Wie bereits erwähnt, findet in diesem Brenner eine Vormischung Anwendung. Abbildung 2.1.2 zeigt die Komponenten:

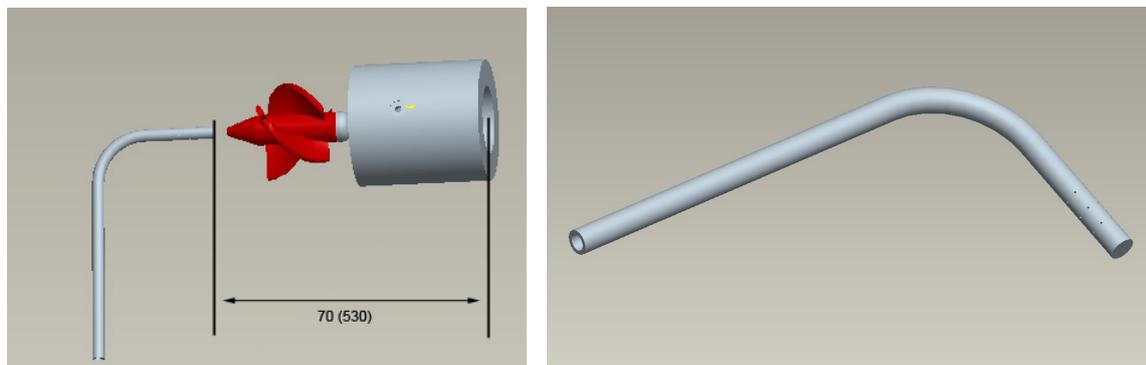


Abbildung 2.8: Getrennte Gaszufuhr. (a) Position vor der Düse; (b) Detailansicht

Wie in Abbildung 2.8(b) ersichtlich, besteht die Gaszufuhr aus einem einseitig verschlossenen Stahlrohr mit radialen Bohrungen am geschlossenen Ende. Diese Bohrungen werden in mehreren Reihen gleichmässig über den Umfang verteilt. Gemeinsam mit dem geringen Durchmesser von 0,5 mm gewährleistet dies eine gute Verteilung im Luftstrom vor der Düse sowie eine Sicherheit gegen Rückschlag der Flamme in die Leitung. Geführt und befestigt wird das Stahlrohr durch eine Schneidringverschraubung am Anschlussrohr. Zu beachten ist eine Ausrichtung exakt in der Zentralachse des Rohres um eine gleichmässige Durchströmung aller drei Düsenkanäle zu garantieren.

Die Aufnahme

Die Aufnahme dient zur Fixierung und Ausrichtung des Drallerzeugers. Gleichzeitig stellt sie die äussere Begrenzung der Düse und das Verbindungsglied zwischen Anschlussrohr und Brennkammer dar. Zu diesem Zweck wurde als Form ein Drehteil mit kegeliger Bohrung gewählt. Als Werkstoff dient wiederum S235JR [St37-2]. Dieser gewährleistet eine gute Bearbeitbarkeit der Konturen sowie Schweissbarkeit für die Verbindungsflansche. Die Befestigung und Ausrichtung des Zentralkörpers wird durch den sich verjüngenden Kegel(radial) und drei radiale Verschraubungen M3 im Winkel von 120° (axial) sichergestellt.

Das Anschlussrohr

Das Anschlussrohr hat die Aufgabe dem Brenner die Betriebsmittel zuzuführen. Aus diesem Grund wurden Anschlüsse zur Einbringung von Brennstoff sowie von Seeding-Partikeln für Teilchenfolge - Untersuchungen angebracht. Die Länge wurde mit 590 mm (inklusive Flansche) relativ gross gewählt, so dass in der Zukunft noch eventuell weitere benötigte

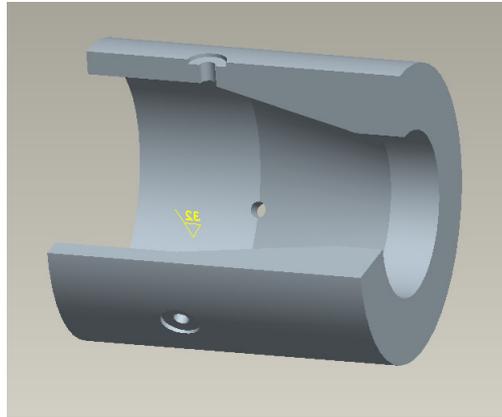


Abbildung 2.9: Geschnittene Ansicht der Aufnahme mit sichtbarer Venturi-Kontraktion

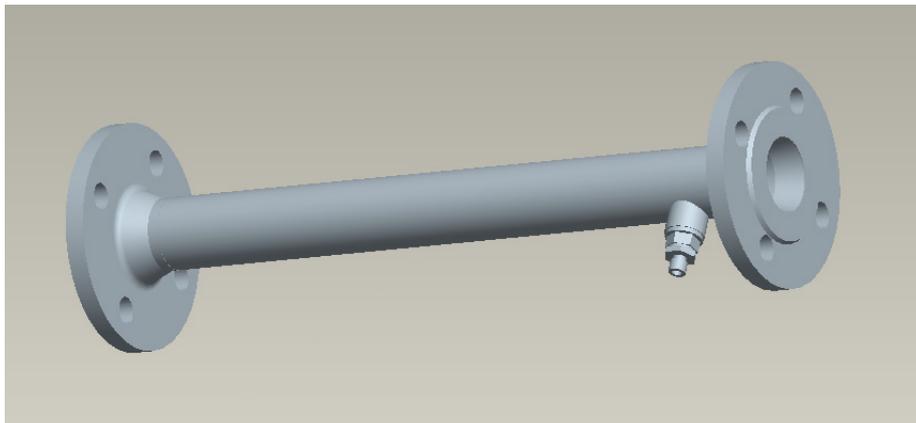


Abbildung 2.10: Anschlussrohr mit Schneidringverschraubung für Gaszufuhr

Anschlüsse Platz finden. Zusätzlich ergibt sich so die Möglichkeit einer bedeutend größeren Gas-Homogenisierstrecke (584 anstatt 124 mm *) durch Einbau des Rohres um 180° verdreht. Diese Variante wird allerdings nicht weiter verfolgt, da das Gemisch auch beim geringeren Abstand gut homogenisiert. Da die Grundform des Rohres aus Lagerbeständen stammt, ist der mit dem Werkstoff ein nichtrostender Stahl des Typs CH-471224 vorgegeben.

Die Kopfplatte

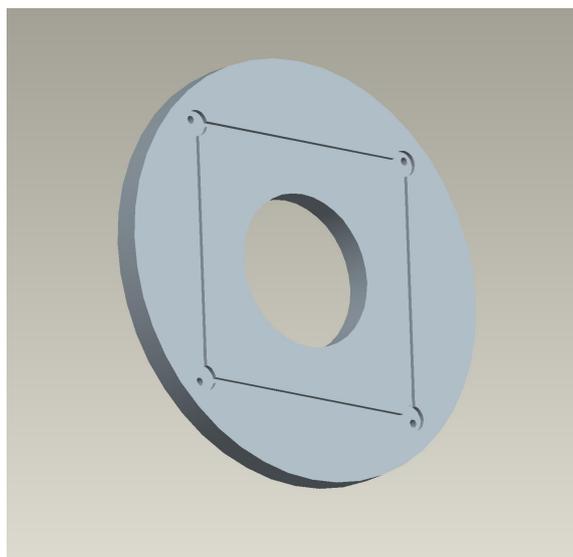


Abbildung 2.11: Kopfplatte

Die auf der Aussenseite der Aufnahme aufgeschweisste Kopfplatte stellt gleichzeitig mit dem Abschluss des Brenners die vordere Wand der Brennkammer dar. Zu diesem Zweck wird eine symmetrische Anordnung aus 4 rechteckigen und 4 kreisförmigen Nuten eingefräst. Diese dienen zur Positionierung der Brennkammerwände und Spannstangen. Zur Fixierung der Stangen sind Durchgangslöcher für Schrauben vom Durchmesser M3 vorhanden. Näheres zum Aufbau der Brennkammer siehe Kapitel 2.2.

Geplant ist noch eine weitere Aufgabe der Kopfplatte als Aufnahme eines Thermoelementes. Die Einführung eines solchen durch eine leicht geneigte, radiale Bohrung in die Mitte der Platte hätte den Vorteil eines gleichmäßigen Temperaturprofils am Düsenaustritt ohne Störung durch die Strömung. Dieses Vorhaben ist aber noch nicht ausgeführt.

Als Werkstoff wurde abermals S235JR [St37-2] verwendet um eine gute Verschweissung mit der Aufnahme sicherzustellen.

*Werte für den Gasströmungsweg: Abstände laut Abbildung 2.1.2 um die durchströmte Schraublinie korrigiert. Bsp: 70 mm (Abstand)+54 mm (Mehrweg durch Schraubung) = 124 mm

2.2 Die Brennkammer

2.2.1 Brennkammer \leftrightarrow Free-Jet allgemein

Die Anschlussmöglichkeit für eine Brennkammer ist eine der grundlegenden Konstruktionsaufgaben. Wieso aber überhaupt Untersuchungen an einer einfachen Brennkammer und am Free-Jet? Welche Überlegungen stehen hinter diesen beiden Methoden?

Wie jeder einfache Versuchsaufbau stellt diese Konstruktion nur eine Vereinfachung für die Untersuchung prinzipieller Vorgänge in einem weit komplizierteren Systemen der Realität dar. In diesem Fall ist das zu simulierende Objekt ein Kreissegment in der Primärzone einer modernen Ringbrennkammer .

Ein grosser Unterschied zwischen diesem Originalsystem mit mehreren Einspritzdüsen und einem einfachen Brenner sind die strömungstechnischen Randbedingungen für die Flamme. Zwischen den einzelnen Düsen ist natürlich eine Ansaugung bzw. Ausdehnung in Umfangsrichtung möglich. Dadurch kommt es zu komplexen Interaktionen Flamme \leftrightarrow Wand und auch Flamme \leftrightarrow Flamme.

Diesen Freiheitsgrad in tangentialer Richtung würde eine Untersuchung am Free-Jet erfüllen. Allerdings fehlt dann wieder die Beschränkung in radialer und axialer Richtung.

Eine Lösung dieses Problems bietet eben die anfangs erwähnte Kombination aus Untersuchungen am Free-Jet UND an der einfachen Brennkammer. Letztere kann dabei als Längsschnitt durch die Ringbrennkammer gesehen werden. Den fehlenden Einfluss durch tangentiale Strömungen liefern Untersuchungen am Free-Jet. Abbildung 2.12 skizziert eine Ringbrennkammer in zwei Ansichten und verdeutlicht die Effekte der seitlichen Ansaugung, sowie des beschränkten Bereiches.

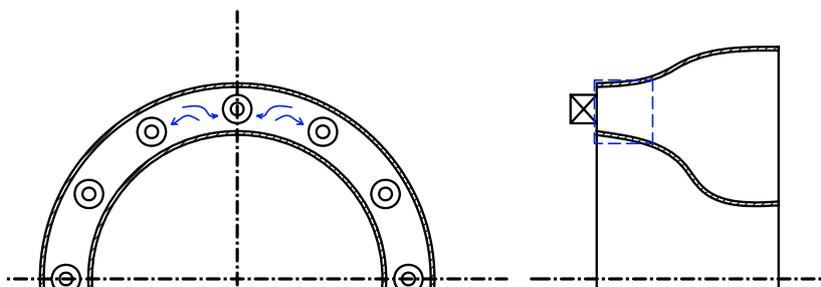


Abbildung 2.12: Effekte in einer Ringbrennkammer, die durch Free-Jet bzw. einfache Brennkammer simuliert werden: links:seitliche Ansaugung; rechts:durch die Brennkammer abgedecktes Gebiet in Längsrichtung

Diese Art der „Superpositionierung“ der Flamme wird zwar nicht das exakte Verhalten der Ringbrennkammer widerspiegeln, gerade für Untersuchungen knapp nach Düsenaustritt, wie sie hier durchgeführt werden sollen, stellt sie aber eine hinreichende Annäherung dar.

2.2.2 Wahl des Prinzips

Die Brennkammer wird für atmosphärischen Betrieb auf 3 Kriterien hin optimiert:

- optischer Zugang
- Gewicht
- Vereinfachte Konstruktion im Sinne des „Fast Prototyping“

Daraus resultiert die Auslegung als sogenannter „dump combustor“ ; d.h. als eine quadratische sprunghafte Erweiterung nach Ausgang aus der Düse. In diesem Fall beträgt die Querschnittsfläche rund 8700 mm^2 was in etwa einer Erweiterung zur Düse mit dem Faktor 11 entspricht. Gemeinsam mit der relativ geringen Länge von 120 mm ergibt dies ein klar begrenztes Volumen für eine Flamme der geforderten Leistung.

Diese Bauform der Erweiterung ist typisch für Forschungsbrennkammern und gut dokumentiert (vgl. [15, 4]). Sie unterscheidet sich stark von industriell verwendeten Ausführungen (siehe Skizze Abbildung 2.13).

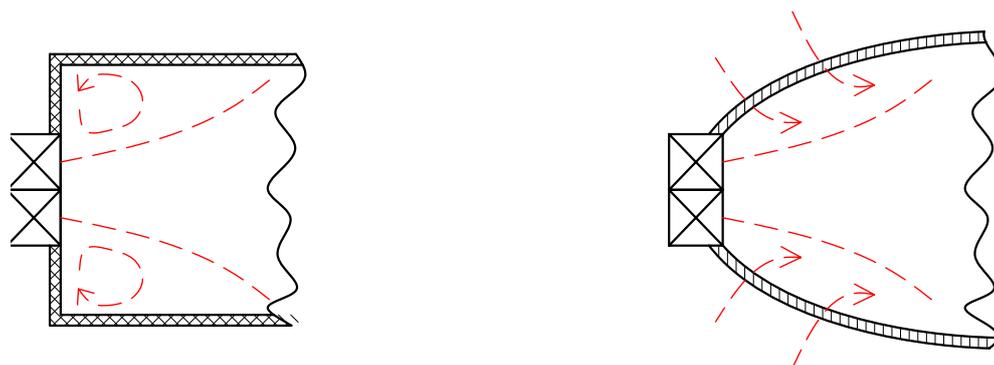


Abbildung 2.13: Schemata von forschungsorientierten und industriellen Brennkammerformen; Links: Forschung, Rechts: Industrie

Während letztere auf Effizienz im Betrieb optimiert sind und dadurch zum Teil äusserst komplex durchströmt werden, dient das hier verwendete Prinzip hauptsächlich zur grundlagenorientierten Beobachtung auftretender Phänomene. Daraus ergibt sich ein Fokus auf guten messtechnischen Zugang und einfache Bauweise (\rightarrow viele ebene Flächen).

Auch das unterschiedliche Strömungsverhalten im Vergleich zum Free-Jet wird so noch klarer erkennbar. Abbildung 2.14 zeigt eine Skizze der unterschiedlichen Wirbelausbildungen bei Free-Jet und Brennkammer:

Die Bedingung „atmosphärischer Betrieb“ mit Druckgleichgewicht zwischen Innen- und Aussenseite der Brennkammer vereinfacht die Konstruktion insofern deutlich, dass dadurch eine einschalige Bauweise verwendet werden kann. Diese einschalige Bauweise spart nicht nur Gewicht und Bauaufwand, sie erlaubt auch den Verzicht auf ein eigenes Kühlmedium und vermindert bei kleiner Wandstärke den Verzug aufgrund ungleichmässiger Erwärmung

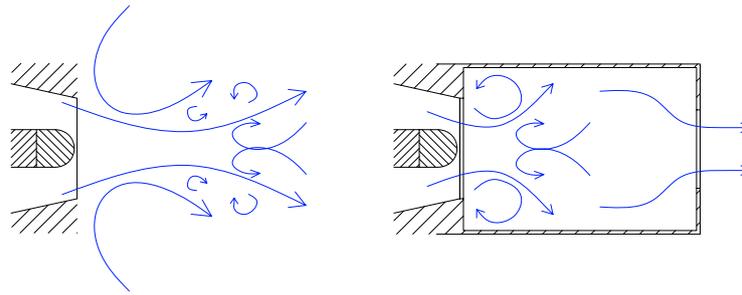


Abbildung 2.14: Skizze der Wirbelstrukturen bei Free-Jet und Brennkammer

der Kammer. Abbildung 2.15 zeigt den Prinzip-Unterschied von Ein- und Zweischalenbauweise.

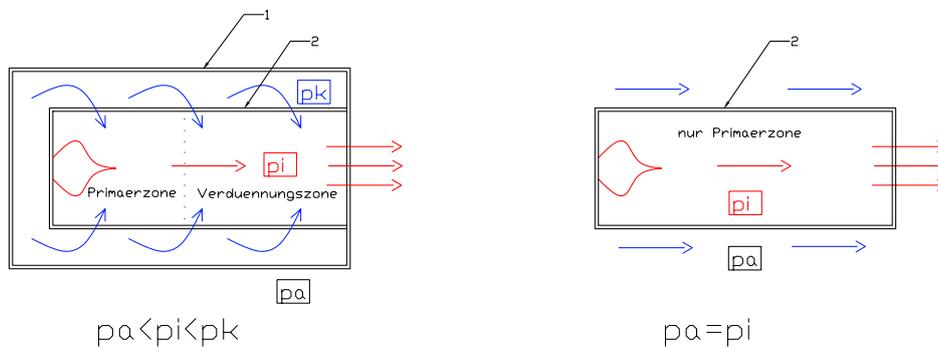


Abbildung 2.15: Links: 2-Schalen-Prinzip; Rechts: 1-Schalen-Prinzip; Kühlmedium Luft; (1)..Druckschale (2)..Temperaturschale

2.2.3 Konstruktion

In diesem Abschnitt soll kurz der konkrete Aufbau der Brennkammer erläutert werden. Das Grundprinzip besteht aus vier ebenen Wänden die über geschlitzte Spannstangen von zwei Platten fixiert werden. Diese Konfiguration vereint eine einfache und leichte Konstruktion mit grösstmöglicher Flexibilität bei der Auswahl und Kombination dieser Wände. Durch den Verzicht auf einen separaten geschlossenen Rahmen ist bei Verwendung von Glas eine Beobachtung im gesamten Innenraum möglich. Vorgesehen ist die Kombination aus zwei Quarzglasscheiben zur Anwendung laseroptischer Messverfahren und eines Bodens sowie einer Decke mit Zündkerzenaufnahme aus Stahl.

Gleichzeitig liefern die Stangen und die Platten ein stabiles Gerüst, sodass hinsichtlich der Wärmedehnung ein „lockerer“ Einbau der Seitenwände möglich ist. Thermisch bedingte Verspannungen, die insbesondere zum Bruch der verwendeten Scheiben führen könnten, sind somit weitgehend ausgeschlossen.

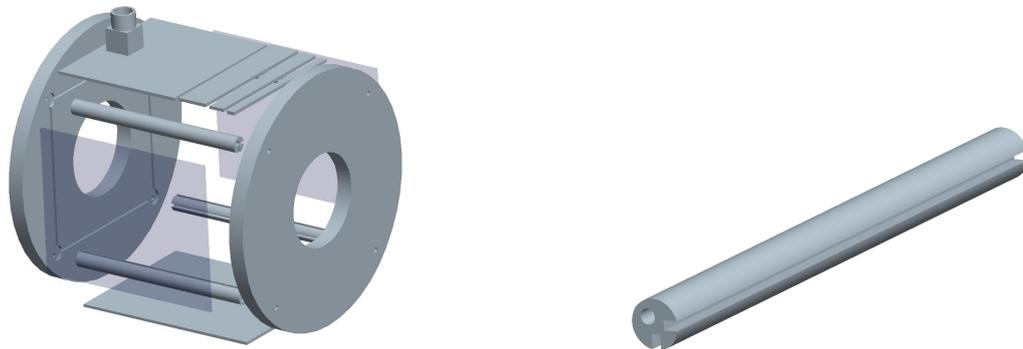


Abbildung 2.16: Komponenten der Brennkammer. Links: Explosionsansicht ohne Zündkerze. Rechts: Geschlitzte Spannstange im Detail

Platten Die beiden Platten sind aus Gründen der einfacheren Fertigung identisch und entsprechen der im Kapitel 2.1.2 besprochenen „Kopfplatte“.

Spannstangen Die Spannstangen sind der zentrale Teil der Brennkammer. Sie müssen einerseits das Gewicht der gesamten Kammer bei hohen Temperaturen mit äusserst geringer Verformung (\rightarrow Glasbruch!!) tragen, sollen andererseits aber möglichst wenig der Brennkammer verdecken.

Gewählt wird eine möglichst einfache Bauweise in Form eines Zylinderstabes mit zwei Schlitzten und azentrischer Bohrung (siehe Abbildung 2.16(b)). Die Schlitzte besitzen mit 2 mm Breite im Vergleich zu den Wänden (1,8 mm) ausreichend Übermaß um sowohl Wärme-dehnung als auch wärmebedingten Verzug ausgleichen zu können. Die azentrische Bohrung ermöglicht einerseits einen dünneren Durchmesser des Stabes und vermindert ausserdem die auf Scheiben und Wände zwangsläufig aufgebrauchten Spannungen beim Festschrauben an den Platten.

Zündkerze Die Aufnahme für die Zündkerze vom Typ „BERU HK 18/110-2.11“ besteht aus einem aufgeschweissten Stumpf mit Schneidringkupplung. Der Schneidring selbst wurde geschlitzt, um in der Anfangsphase des Betriebs noch eine vertikale Verstellmöglichkeit der Kerze zu ermöglichen. Positioniert ist die Zündkerze im vorderen Drittel der Brennkammer. Dies gewährleistet eine Zündung des Gemisches knapp nach Austritt aus der Düse. Detonationen durch Gemischansammlungen vor dem Zündpunkt kann somit vorgebeugt werden. Zusätzlich wird durch diese Position, die noch in der Rezirkulationszone der ausgebildeten Verbrennung liegt, ein direkter Kontakt der Zündkerze mit der Flamme vermieden. Die Lebensdauer der Kerze kann somit deutlich erhöht werden. Zur Feststellung der optimalen Zündkerzenposition wird die Deckplatte zuerst in Segmenten unterschiedlicher Länge ausgeführt (vgl. Abbildung 2.16(a)). Durch verschiedene Kombination der Segmente können mehrere Positionen erprobt werden. Für den Dauerbetrieb ist dann eine einzelne Platte

mit der Kerzenaufnahme in der optimalen Lage vorgesehen.

Versorgt wird die Kerze durch 24 V Gleichstrom bei einem Leistungsfluss von 6 Ws. Die Auslösung erfolgt händisch über einen 2-Knopf-Sicherheitsschalter. Abbildung 2.17 zeigt die verwendete Zündkerze und -box.



Abbildung 2.17: Zündkerze und Zündbox. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde das Zündkabel entfernt.

Die anfangs gehegten Befürchtungen, der Einsatz einer Zündkerze könnte aufgrund der explosionsartigen Zündung des Gemisches in der Brennkammer die Seitenscheiben in Mitleidenschaft ziehen, stellen sich im Laufe der Versuche als unbegründet heraus. Diese Methode der Zündung ist also aus Sicherheitsgründen einer manuell eingeführten Zündflamme vorzuziehen.

Materialwahl

Aufgrund der kompakten und leichten Bauweise der Brennkammer können die mechanischen Belastungen durch Eigengewicht und Schwingungen in geringem Ausmaß gehalten werden. Ausschlaggebend für die Materialwahl ist somit hauptsächlich die Beständigkeit gegenüber den grossen Temperaturschwankungen zwischen Betrieb und Ruhezeiten.

In den ersten Versuchen werden Platten, Stangen und Wände aufgrund der sofortigen Verfügbarkeit und der guten Verarbeitungs- und Schweisseignung aus S355JR [St52-3](Wände) bzw. S235JR [St37-2] gefertigt. Testläufe zeigen eine unerwartet gute Beständigkeit der Bauteile auch bei Dauerbetrieb. Erst nach mehreren Versuchsreihen ist ein leichtes Abplatzen der obersten Schicht des Bodens und der Decke in der höchstbeanspruchten Zone zu beobachten. Ein Wechsel auf höherbeanspruchbares Material ist deshalb nicht nötig.

Für den optischen Zugang werden polierte Scheiben aus Quarzglas in der Stärke von 1,8 mm verwendet. Dieses Material hat gegenüber herkömmlichen Fensterglas wesentliche Vorteile:

	Fensterglas(Sodakalkglas ^a)	Quarzglas (SQ 1) ^b
Dichte [kg/dm^3]	2.5	2.203
Druckfestigkeit [N/mm^2]	900	1150
Biegefestigkeit [N/mm^2]	30	67
E-Modul [N/mm^2]	$7 \cdot 10^4$	$8.2 \cdot 10^{4c}$
Temperaturbeständigkeit ^d [$^{\circ}C$]	300	< 1500 -1670
Wärmeleitkoeffizient [$W/m \cdot K$]	0.81	1.84^e
Durchlässigkeit [nm]	350-2800	240 - >3000

^aQuelle: [5, 29]

^bQuelle: [24]

^cbei 1100°C; 7.25 bei 20°C

^dErweichungspunkt

^ebei 400°C; für höhere Temperaturen steigend

Für diese Anwendung sind vor allem die deutlich höhere Temperaturbeständigkeit und die Durchlässigkeit im UV-Bereich von Bedeutung. Die geringere Dichte bedeutet geringeres Gewicht; der höhere Wärmeleitkoeffizient reduziert thermische Spannungen innerhalb der Scheibe.

2.3 Der Pulsator

Das dritte bedeutende Modul der Brenneinheit ist der Pulsator. Es sollen nun Funktion und Aufbau, sowie die Anbindung an Brenner und Brennkammer kurz erläutert werden. Für Details, die über den Rahmen dieses Kapitels hinausgehen wird auf Quelle [9] verwiesen.

2.3.1 Funktion und Aufbau

Die Funktion des Pulsators besteht darin, den oszillierenden Effekt des sich bei einer CDO periodisch ändernden Schalldruckes auf den Einlass zu simulieren. Daraus lassen sich folgende Anforderungen ableiten:

- regelmäßige Pulsation
- innerhalb eines Frequenzbereiches regelbar
- Pulsation muss noch in der Brennkammer deutlich detektierbar sein

Aus Gründen der bewiesenen Tauglichkeit und der schnellen Verfügbarkeit wurde dazu eine von Giuliani et. al. [9] konstruierte „Sirene“ mit kritischer Durchströmung angepasst.

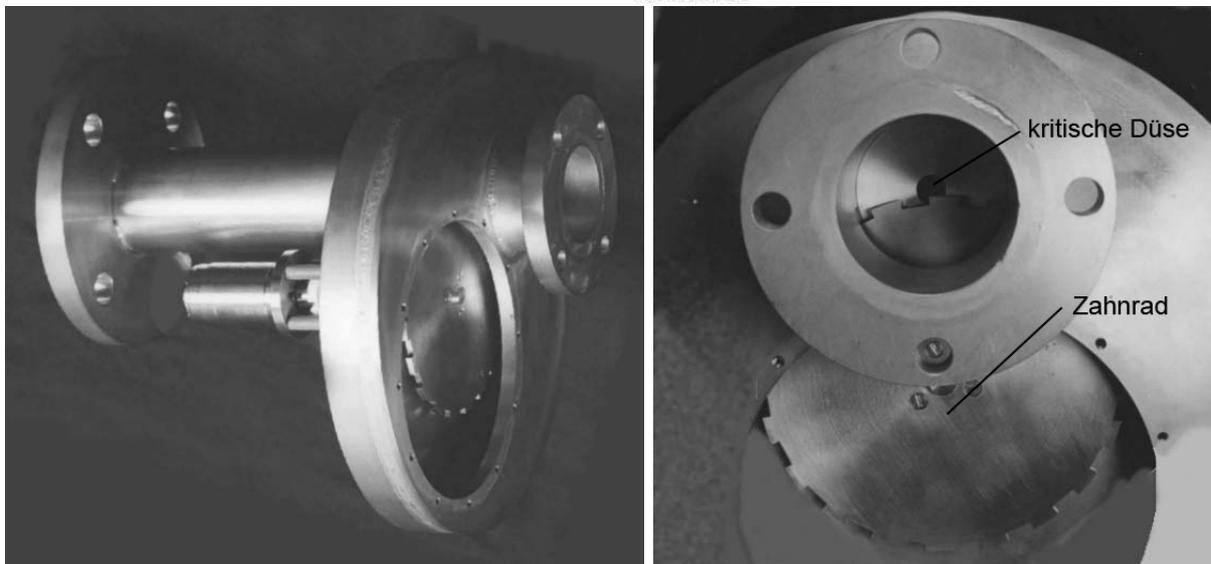
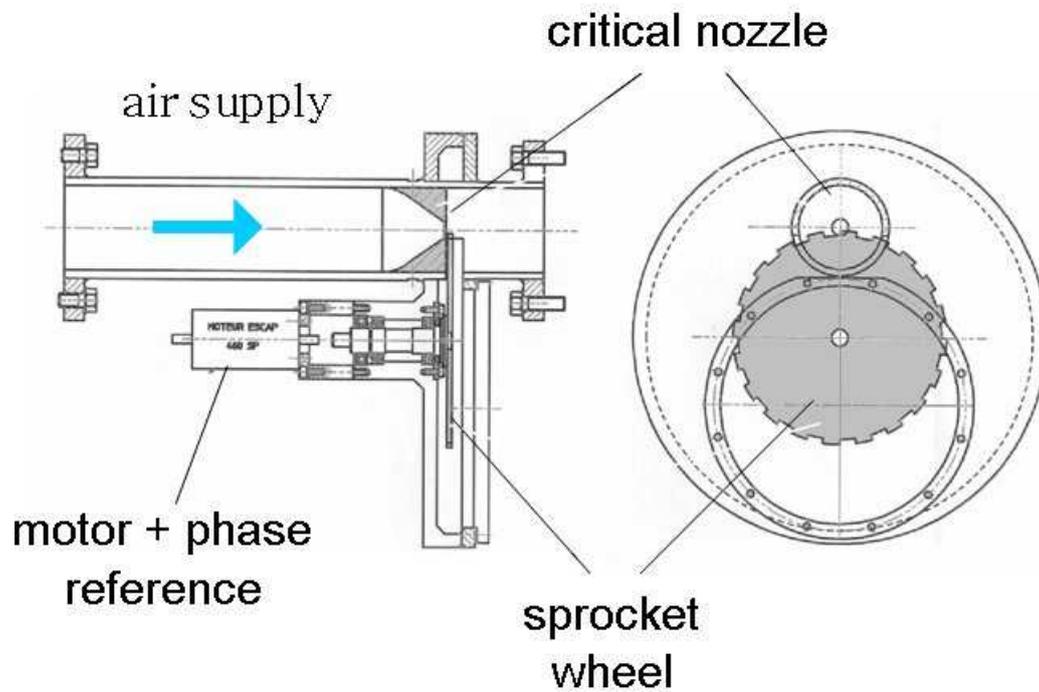


Abbildung 2.18: Oben: Technische Zeichnung des Pulsators. Unten: Den Zeichnungen entsprechende Fotografien; Quelle:[10]

Wie in Abbildung 2.18 ersichtlich, sind die drei Hauptkomponenten des Pulsators eine kritische Düse, ein die kritische Öffnung durchwanderndes Zahnrad und dessen Antriebsmotor. Das Zahnrad besitzt 20 Zähne, die periodisch 15% des kritischen Düsenquerschnitts verdecken. Angetrieben wird es von einem Elektromotor des Typs ESCAP 460 SC. Dieser Motor ist spannungsgesteuert und garantiert laut Herstellerangaben eine exakt regelbare Pulsationsfrequenz von 5 Hz bis 1 kHz. Höhere Frequenzen bis 1,7 kHz sind zwar auch möglich, aber aufgrund der starken Instabilität der Frequenz sowie der Gefahr einer Motorüberhitzung bei Dauerbetrieb nicht ratsam.

Wie schon von Giuliani et. al. ([9]) beschrieben, stellt die Stabilität des Motors allgemein ein Problem dar. Es ist eine empfindliche Reaktion auf Wicklungstemperatur und leichte Spannungsschwankungen zu beobachten. Um trotzdem die Phase und Umdrehungszahl (damit die Frequenz der Sirene) bestimmen zu können, sind auf der Motorrückseite ein Lochrad und ein optischer Sensor angebracht.

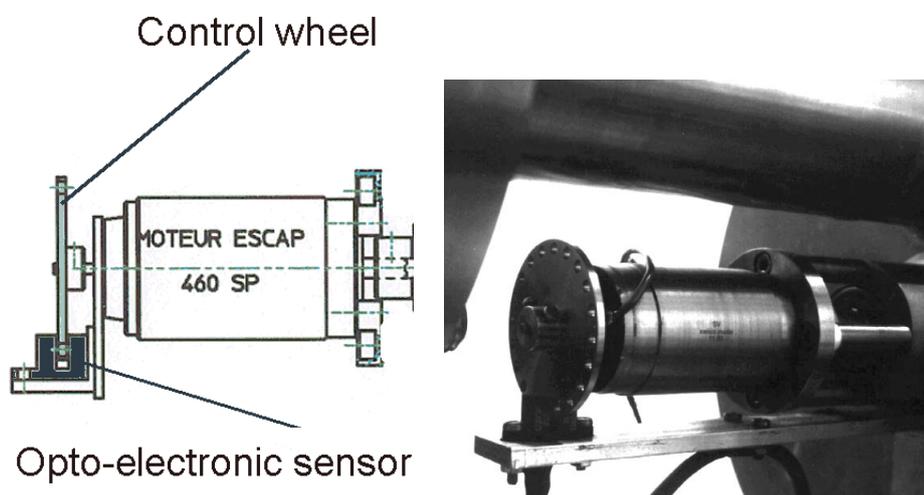


Abbildung 2.19: Position und Prinzip des optischen Sensors. Links: technische Zeichnung; Rechts: Fotografie des eingebauten Systems

Abbildung 2.19(a) zeigt den Aufbau und die Position der Meßeinheit. Die Bohrungen im Lochrad sind mit den Zähnen des Zahnrades in Anzahl und Position ident. Das heißt, jede aufsteigende Flanke des vom Sensor abgegebenen TTL-Signals kann mit dem Eingriffsbeginn eines Zahnes in den Luftmassenstrom gleichgesetzt werden.

2.3.2 Integration in den Testbrenner

Bei der Positionierung im Gesamtaufbau sind zwei Anforderungen zu erfüllen:

- Strömungsgünstige Einbindung in den Luftstrom
Diese Bedingung konnte durch die Anfertigung zweier Adapterstücke erfüllt werden. Diese Adapter (siehe Anhang D) ermöglichen einen kontinuierlichen Übergang zwischen den Rohrweiten deutscher und französischer Normung bei minimalem Einfluss auf die Strömung.
- Möglichst geringe Beeinflussung durch andere Elemente in der Strömung
Um dieser Forderung gerecht zu werden, sind vor und nach dem Pulsator* gewisse Beruhigungsstrecken vorzusehen.

Die Beruhigungsstrecke vor der kritischen Düse kann dabei relativ kurz sein, sie wurde mit 60 cm gewählt.

Bedeutung der Resonatorlänge

Der Strecke nach der Öffnung, also der Bereich bereits pulsierender Luftsäule, wird hingegen länger ausgeführt um einen Resonanzkörper für die Pulsation zu erhalten.

Die Resonanz entsteht nach dem selben Prinzip wie in einer gedackten (verschlossenen) Orgelpfeife (siehe [7]). Diese Pfeifen haben die Eigenschaft, dass der Grundton bereits bei einer Rohrlänge von einem Viertel der Wellenlänge dieses Tons angeregt wird („ $\lambda/4$ - Resonator“). Der Nachteil ist, dass weiters nur ungerade Vielfache dieses Grundtons in Resonanz kommen. Die Länge des verwendeten Resonators - gemessen von kritischem Querschnitt der Düse bis hin zur Kopfplatte - beträgt 308 cm. Unter Zuhilfenahme der einfachen Beziehung zwischen Schallgeschwindigkeit (c), Wellenlänge (λ) und Frequenz (f) kann die Grundfrequenz des Rohres abgeschätzt werden:[†]

$$c = f \cdot \lambda \quad (2.9)$$

$$f_{Rohr} = \frac{c_{293[K]}}{3,08m}$$

$$f_{Rohr} \approx 95Hz \quad (2.10)$$

Abbildung 2.20 gibt einen Überblick über die beobachteten Resonanzen und die dabei entstehenden Wellenformen des eingebauten Rohres.

Wie in Kapitel 1.1 erläutert, ist die optimale Entfernung zum Rohrende für den Energieaustausch zwischen Schalldruck, Schallgeschwindigkeit und Wärmefreisetzung bei $\lambda/4$. Das heisst, in der Flamme sollten besonders die ungeraden Vielfachen dieser Grundfrequenz von $\lambda_{Rohr}/4$, also Vielfache von etwa 25 Hz verstärkt zu beobachten sein.

*Die Begriffe „vor“ und „nach“ beziehen sich immer auf die Strömungsrichtung des Luftmassenstroms, sind also mit „stromauf“ und „stromab“ gleichzusetzen.

[†]vgl. Argus-Schmidt-Rohr; [1]

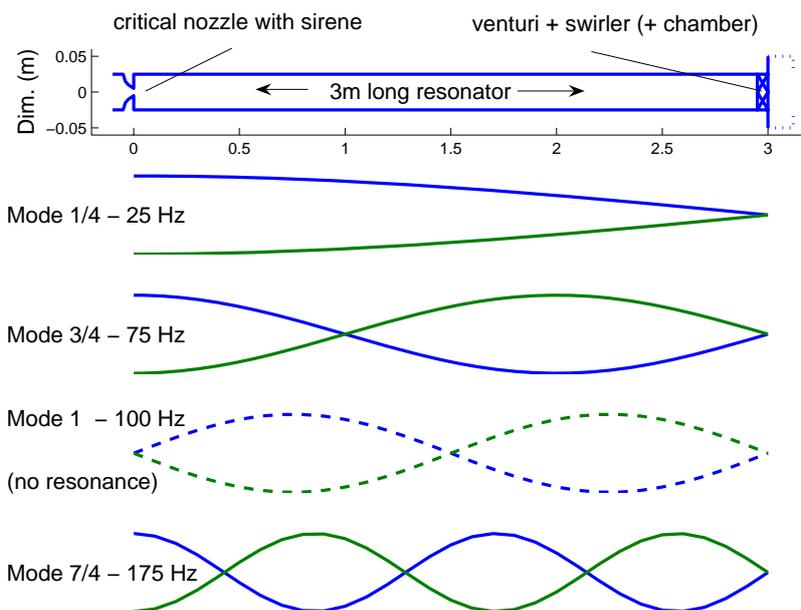


Abbildung 2.20: im Rohr angeregte Moden und die entsprechenden Wellenformen

2.4 Sensorik + Steuerung

Die Motivation, den Versuchsstand mit einer halbautomatischen Steuerung auszurüsten, liegt einerseits in der Vereinfachung des Versuchsbetriebes und andererseits - als gewichtigeres Argument - in der deutlichen Erhöhung der Betriebssicherheit.

Da die Gaszufuhr sicher den risikoreichsten Teil der Anlage darstellt, wird das Steuerprogramm auf diese Komponente hin ausgerichtet.

Das gesamte Steuersystem kann in vier Blöcke unterteilt werden:

- Sensorik
- SPS-Hardware*
- Steuerprogramm
- Aktorik

Abbildung 2.4 veranschaulicht das Zusammenspiel der Komponenten:

Diese Teilbereiche werden nun etwas genauer betrachtet. Dabei soll darauf hingewiesen werden, dass der beschriebene Umfang nur eine Minimalkonfiguration zur Einführung und zum Test des Systems darstellt. Vorschläge zur Erweiterung sind am Ende des Kapitels zu finden.

*SPS ... SpeicherProgrammierbare Steuerung

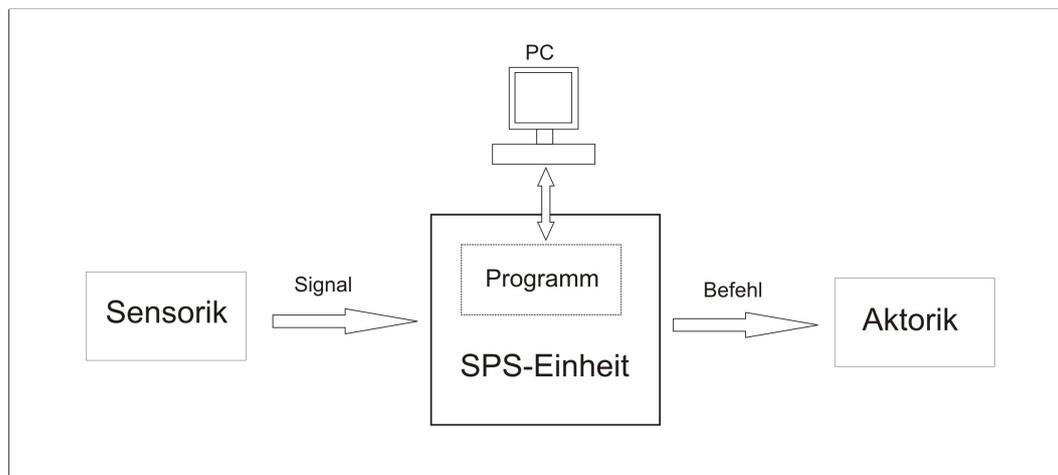


Abbildung 2.21: Prinzipskizze der SPS-Steuerung

2.4.1 Sensorik

Aufgabe der Sensorik ist es, physikalische Größen wie Druck oder Temperatur zu messen, diese in ein elektrisches Signal umzuwandeln und an die Steuereinheit weiterzugeben. Die erste Testkonfiguration umfasst mit Drucksensor, Durchflussmesser und Flammenwächter zwei analoge und einen digitalen Sensor.



Abbildung 2.22: Eingesetzte Analoge Sensoren. Links: Drucksensor (Quelle: SAMSON); Rechts: Differentialdrucksensor zur Massenstrombestimmung (Quelle: ABB GmbH)

Drucksensor

Verwendet wird ein elektrischer Messumformer von Typ SAMSOMATIC 6051 (siehe Abbildung 2.4.1 links). Als Sensor i.e.S dient ein kapazitiver keramischer Druckaufnehmer mit einer Messspanne von 0,04 - 70 bar_{abs} . Dieser Messbereich wird vom Umformer in ein Gleichstromsignal von 4 - 20 mA umgewandelt. Um auch in Medien mit mehr als 70 °C messen zu können, wurde das verwendete Exemplar mit einer Temperaturentkopplung vom Typ SAMSOMATIC A200 (bis 250 °C) geliefert. Für das vollständige Typenblatt siehe Anhang B.

Durchflussmesser

Der verwendete Durchflussmesser arbeitet nach dem Differenzdruckprinzip und besteht aus zwei Hauptkomponenten:

- Differenzdruckerzeugung
- Differenzdruckmessung und Umformung

Das Differenzdruckprinzip beruht auf der Verbindung des Ausdrucks für den dynamischen Druck nach D.Bernoulli * und der Kontinuitätsgleichung:

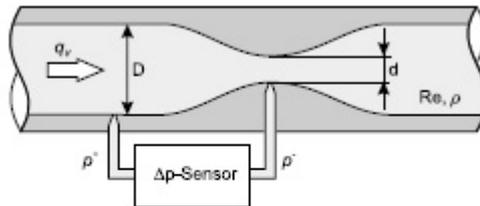


Abbildung 2.23: Massenstrommessung nach dem Differenzdruckprinzip; Quelle: [28]

$$p_{dyn} = \frac{\rho c^2}{2} \quad (2.11)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot c \cdot A \quad (2.12)$$

$$\rightarrow \dot{m} = \underbrace{C_{(Re)}}_{\text{Konstante}} \cdot \underbrace{\frac{D^2}{\sqrt{D^2 - d^2}} \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4}}_{\text{Querschnittsänderung}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (2.13)$$

*Daniel Bernoulli, schweizer Physiker und Mathematiker (1700-1782)

bzw.:

$$\dot{m} = K_{(Re)} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (2.14)$$

$K_{(Re)}$... Korrekturfaktor, von der Reynoldszahl und der Geometrie abhängig

Der Massenstrom \dot{m} ist also proportional der Quadratwurzel der Druckdifferenz Δp in der Strömung. Kann nun in einer Strömung möglichst verlustfrei eine Druckdifferenz erzeugt - etwa mithilfe des Venturi-Effektes - und gemessen werden, ist es relativ einfach, den Massenstrom zu bestimmen.

Diese Technik garantiert eine genaue Messung auch bei suboptimaler Strömungsverhältnissen und mit geringem Platzbedarf.

Differenzdruckerzeugung: In diesem Fall wird die Differenzdruckerzeugung von einem $\sqrt{-CONE}$ der Firma McCROMETER übernommen. Die Druckdifferenz wird durch einen zentral im Rohrstück positionierten Konus erzeugt. Durch die Querschnittsverengung tritt der in Kapitel 2.1.1 beschriebene Venturi-Effekt ein. Abbildung 2.24 zeigt eine Querschnittsskizze durch ein Rohr mit eingebautem Konus. Gut zu erkennen ist die dadurch entstehende Querschnittsverengung, sowie die Position der beiden Druckniveaus.

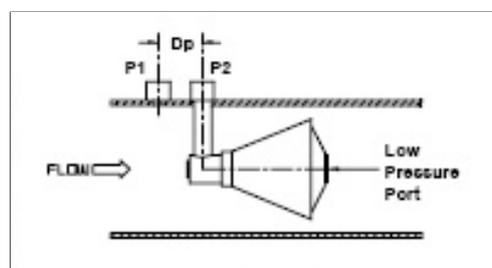


Abbildung 2.24: Prinzip der V-Cone Differenzdruckmessung. Quelle: McCrometer

Das verwendete Modell ist auf einen Messbereich der Druckdifferenz von 1,704 bis 248,43 mbar und einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 12,42 m/s geeicht. Dies ergibt einen maximalen Massenstrom von 0,385 kg/s (vgl. [25]).

Messumformung: Die Messumformung erfolgt durch einen Druckmessumformer ABB Reihe 2600T Typ262 DS (siehe Abbildung 2.4.1 rechts). 'DS' steht hierbei für die Ausführung als Differenzdruckmesser mit einem Messbereich von $\pm 0.4 - 40$ mbar Druckdifferenz bei einem Nenndruck von bis zu 21 bar. Dieser Messbereich wird wiederum in ein Gleichstromsignal von 4 - 20 mA umgewandelt. Eine Temperaturentkopplung ist bei diesem Gerät aufgrund der üblicherweise langen Steuerleitung zwischen V-Cone und Sensor nicht vorgesehen.

Auf den Anhang eines vollständigen Datenblattes wird wegen der vielen Bauvarianten verzichtet. Für nähere Informationen soll auf die Homepage des Herstellers verwiesen werden [22].

Flammenwächter

Die Aufgabe des Flammenwächters ist die Überwachung des Brennraums. Je nach Anwendung wird ein digitales Signal bei Erscheinen oder Verlöschen einer Flamme an die Kon-

trolleinheit abgegeben. Zur Flammendetektion sind mehrere Verfahren im Einsatz (Photosensor, Ionisation, UV-Sonde,..). In Anbetracht der relativ geringen Flammenleistung und der bläulich,transparenten Flamme bei der Verbrennung von Methan fällt die Wahl auf ein Gerät auf UV-Basis.

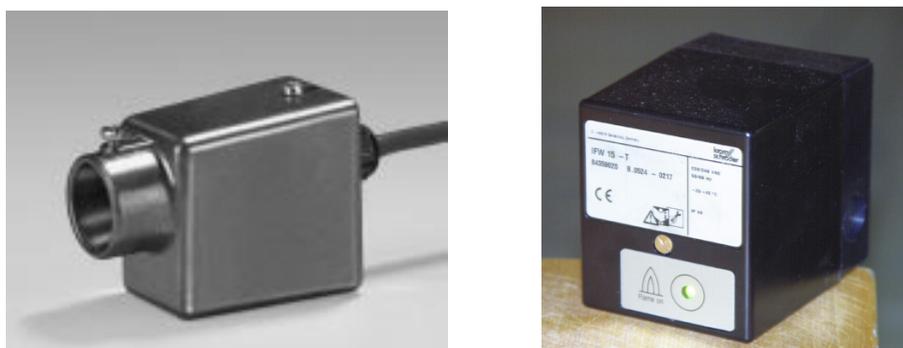


Abbildung 2.25: Die Komponenten des Flammenwächters; Links: UVS-1; Rechts: IFW 15T

Der verwendete Flammenwächter der Firma KROMSCHROEDER besteht aus zwei Komponenten: Der UV-Sonde UVS-1 (Abb.2.4.1) und dem Flammenwächter i.e.S. IFW 15T (Abb.2.4.1).

Die Sonde besitzt einen im UV-Bereich empfindlichen Photosensor, der durch ein Quarzglasfenster als Wärmeschutz auf die Brennkammer ausgerichtet ist. Wird eine Flamme detektiert, gibt eine Verstärkerelektronik ein Signal an den Flammenwächter weiter.

Dieser wandelt das erhaltene Signal in einen Digitalimpuls um. Es kann dabei frei gewählt werden, ob das Signal der Sonde im Wächter als Schliesser (Ausgangsimpuls bei Flamme =1) oder als Öffner (Ausgangsimpuls=0) betrachtet wird. Aus Sicherheitsgründen (Stromausfall!) ist erstere Variante vorzuziehen, da ein Abbruch des Sondersignals dann gleichzeitig zum Abbruch der Brennstoffzufuhr genutzt werden kann.

Allerdings ist bei der Programmierung darauf zu achten, dass der Flammenwächter zur Selbstanalyse einmal pro Minute für kurze Zeit das Signal selbständig wechselt. Es ist also eine Prozedur vorzusehen, die diese Selbstkontrolle von einer wirklichen Änderung des Sondersignals unterscheiden kann. Die einfachste Möglichkeit dafür ist eine Auslöseverzögerung der Ventilabschaltung, die etwas über der Selbstkontrollzeit liegt, und bei normalem Betrieb wieder rückgesetzt wird.

2.4.2 SPS-Hardware

Das Kernstück der Hardware ist eine Siemens S7-317-DP2 CPU. Diese wurde mit Schnittstellen zur analogen und digitalen Ein- und Ausgabe, sowie einem USB-Adapter zur Kommunikation mit einem PC ausgerüstet. Abbildung 2.4.2 zeigt den Aufbau des Systems: Als Speicher für Hardwarekonfiguration und Steuerprogramm steht der CPU ausschlies-

CPU-317-2 DP						4 mal: 331-7HF01-0AB0	
317-2AJ10-0AB0	322-1BL00-0AA0	332-5HF000AB0	321-1BL00-0AA0	331-7KF02-0AB0			
CPU	Dig.-Ausgabe	Anal.-Ausgabe	Dig.-Eingabe		Analog -Eingabe		



Abbildung 2.26: Aufbau der S7-300 Einheit; Oben:Blockdiagramm, Unten: Einbauzustand

slich eine Speicherkarte vom Siemens-eigenen MMC-Format zur Verfügung. Bei jedem Start wird der Inhalt dieser Karte ins ROM der CPU eingelesen und verarbeitet. Konfigurationsänderungen während des Betriebs sind daher nicht möglich. Die Speicherkarte kann zwar online neu beschrieben werden, die Änderungen werden aber erst nach einem Neustart der gesamten Hardware wirksam.

2.4.3 Steuerprogramm

Das Steuerprogramm wird mit dem Siemens-Softwarepaket *STEP7 Lite* erstellt. Diese Software ist modular aufgebaut und erlaubt eine komplette Projektentwicklung von der Konfiguration neuer Hardware bis hin zu Mehrsystem-Steueraufgaben. Abbildung 2.27 zeigt die Abschnitte des Hauptfensters:

Wie oben am linken Panel zu erkennen, ist während des Programmiervorganges jederzeit ein Anhalten bzw. Anfahren des Systems möglich. Bei laufendem System werden automatisch die gerade programmierten Offline-Inhalte mit den aktuell in der CPU-gespeicherten verglichen. Übereinstimmung oder Differenz werden durch einfache Symbole neben den Projektelementen angezeigt. Das vordere Kästchen symbolisiert den Offline- das hintere den CPU-Zustand. Werden beide grün dargestellt, sind die Elemente an PC(PG)* und CPU ident.

***Programmier- Gerät ...** von Siemens vertriebene, mobile Geräte zur PC-unabhängigen Neuprogrammierung und Wartung von SPS-Anlagen

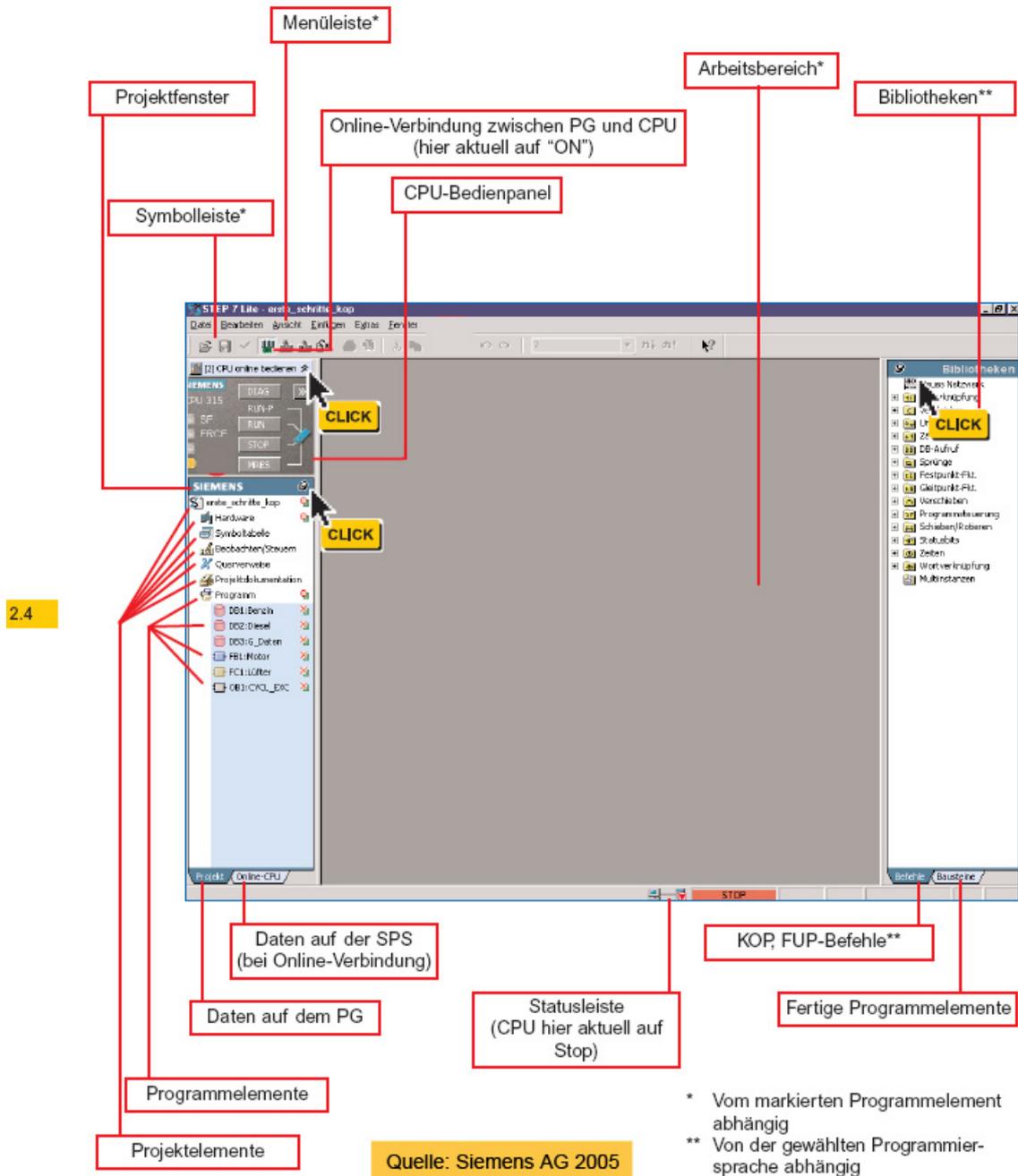


Abbildung 2.27: STEP7-Lite Hauptfenster; Quelle: Siemens AG

STEP7 Lite liefert die Möglichkeit in drei Sprachen zu programmieren: KOP (Kopplungsplan), FUP (Funktionsplan) und AWL (Anweisungsliste). Abbildung 2.28 zeigt eine einfache „UND“-Beziehung in den drei Ausführungen.

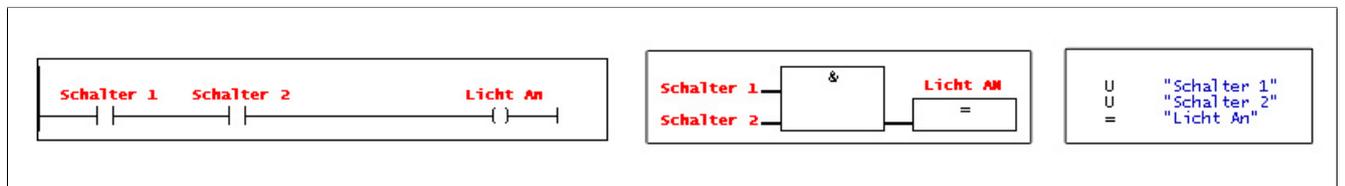


Abbildung 2.28: UND-Beziehung in KOP,FUP und AWL (von links nach rechts)

Für diese Arbeit wurde aus Übersichtlichkeitsgründen AWL gewählt. Diese Sprache beruht auf einfachen Anweisungen, die direkt Schaltungsbits setzen oder auslesen. Ein zusätzlicher Compiler ist also nicht notwendig. Symbolische Bezeichnungen wie „Schalter“ oder „Lampe“ werden rein aus Gründen der Lesbarkeit im Modul „Zeichentabelle“ definiert. Das Beispiel aus Abbildung 2.28 kann auch nicht-symbolisch programmiert werden. Es stellt sich dann in folgendermassen dar:

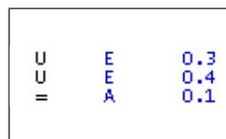


Abbildung 2.29: „Und“-Beziehung in AWL nicht symbolisch. Die Bits für Eingänge (E) und Ausgang (A) wurden willkürlich numeriert.

Das gesamte Programm ist dokumentiert in Anhang C aufgeführt.

2.4.4 Aktorik (Ventile)

Bisher sind als Aktoren lediglich drei Magnetventile des Typs SAMSOMATIC Modell 3963 in Verwendung. Ihre Aufgabe ist die schnelle, automatische Zu- oder Abschaltung der Gaszufuhr. Die Ventile arbeiten nach dem Differenzdruckprinzip ohne mechanische Verstärkung*. Um nun gegen den Widerstand einer unter Druck stehenden Leitung schalten zu können, ist Betriebsluft notwendig. Der Hersteller empfiehlt etwa 2 bis 2,4 bar.

Die Zufuhr dieser Betriebsluft kann auf 2 Arten erfolgen: Intern, durch Abspaltung vom Hauptluftstrom oder durch externe Zufuhr. Der gewünschte Modus ist mit wenigen Handgriffen, nur durch Verdrehen einer eingebauten Flachdichtung, einzustellen.

Die interne Abspaltung findet hauptsächlich bei Abblaseventilen Verwendung, da ja zumindest ein Teil des Mediums dann direkt an die Umgebung abgegeben wird. Soll das

*Prinzipskizze und Datenblatt siehe Anhang B)



Abbildung 2.30: Magnetventil des Typs SAMSOMATIC 3963

Arbeitsmedium aber von der Umgebung getrennt bleiben, ist die externe Zufuhr vorzusehen. Da in diesem Fall Gas geregelt werden soll, wird die letztere Methode verwendet.

Einbau

Im behandelten System dienen zwei der oben erwähnten Ventile als Schaltventile für Methan(CH_4) und Helium(He) während das dritte als 3-Wege-Ventil zwischen den beiden ersteren eingesetzt wird. Abbildung 2.31 zeigt eine Skizze der Anordnung:

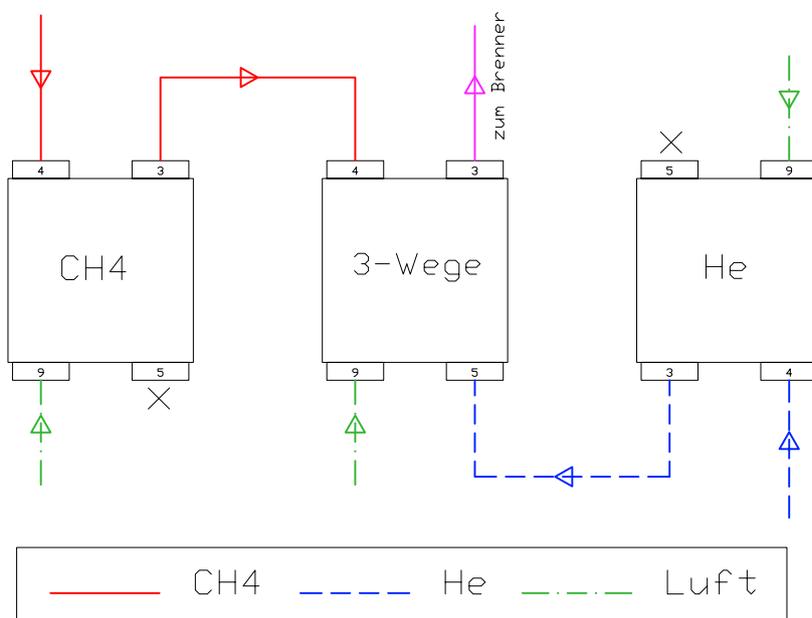


Abbildung 2.31: Anordnung der 3 Magnetventile: Ein „X“ kennzeichnet einen durch eine Pfropfen verschlossenen Ausgang.

Es ist erkennbar, dass Anschluss 4 und 5 als Eingänge, Anschluss 3 als Ausgang und Anschluss 9 für die externe Steuerluft vordefiniert sind. Alle Ventile sind aus Sicherheitsgründen so angeschlossen, dass im Falle eines Stromausfalles die Verbindung 3-5 geschaltet ist. Dies bietet eine zusätzliche Sicherheit gegen den Austritt von CH_4 .

Das Helium hat die Funktion eines inerten Spülgases im Falle einer Selbstausslöschung der Flamme. Durch die automatische Umschaltung auf dieses Medium wird sowohl die Brennkammer als auch die Zuleitung von CH_4 befreit. Diese Massnahme ist bei diesem Aufbau nicht zwingend notwendig, dient aber als Vorbereitung auf den Einsatz einer Druckbrennkammer. Bei dieser wird das Helium dann auch durch Stickstoff (N_2) zu ersetzen sein.

Ein Problem, das noch berücksichtigt werden muss, ist ein eventuelles Einfrieren der Ventile durch das schnell aus der Flasche ausströmende Gas. Um diesen Effekt zu verhindern, wird vor den beiden äusseren Ventilen jeweils ein einfacher Wärmetauscher in Form einer Leitungsspirale (Abbildung 2.32) eingebaut.

Der Nachteil der Verlängerung des bei Abschaltung gasgefüllten Leitungsteiles muss dabei in Kauf genommen werden.



Abbildung 2.32: Zum Wärmetausch verwendete Leitungsspirale

2.4.5 Erweiterungsvorschläge

Wie bereits erwähnt, stellt die derzeit verwendete Sensorik und Aktorik nur ein äusserstes Minimalkonzept dar. Um eine exaktere, wissenschaftlichere Beobachtung und Steuerung der Verbrennungsvorgänge vornehmen zu können, sind noch deutliche Erweiterungen notwendig.

Sensoren: Abbildung 2.33 zeigt einen Vorschlag zur Instrumentierung des gesamten Systems. Dabei sind bestehende und geplante Geräte farblich kenntlich gemacht:

Aktoren: Gemeinsam mit der Sensorik ist auch eine Erweiterung der Aktorik - wenn auch in geringerem Umfang - wünschenswert. Konkret wären dabei elektronisch gesteuerte Regelventile bei der Betriebsmittelzufuhr (Gas, Luft) von Vorteil. Momentan werden

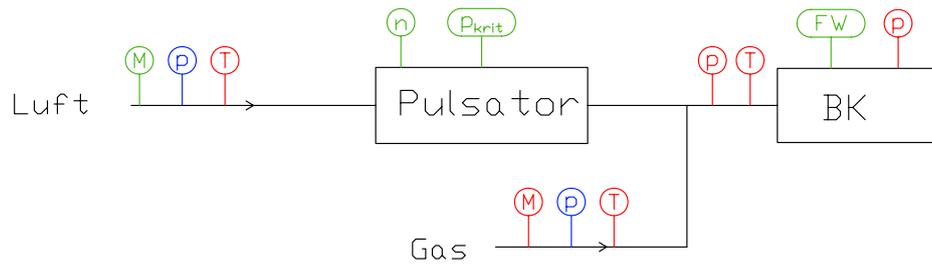


Abbildung 2.33: Instrumentierungsvorschlag des gesamten Systems. BK=Brennkammer, FW=Flammenwächter; p..Druck, M.. Massenstrom, T..Temperatur; n..Drehzahl; Grün: bestehend ,Blau: manuell fixiert, Rot:geplant

diese Massenströme manuell eingestellt. Eine Kombination aus oben erwähnten Sensoren für Massenstrom, Druck und Temperatur von Regelventilen und einer angepassten SPS-Steuerung wäre deutlich besser in der Lage, ein gewünschtes Luftverhältnis zu halten bzw. dies während des Betriebs zu verändern.

2.5 Zusammenfassung der technischen Daten

Dieses Kapitel gibt - als Abschluss des konstruktiven Teiles der Arbeit - einen kurzen Überblick über die Leistungsdaten und den Betriebsbereich des Testbrenners:

2.5.1 Allgemeines

Gesamtsystem	
Länge [cm]	445
Höhe [cm]	98 - 115 (ohne Messaufbauten)
Gewicht [kg]	ca. 50
Brenner	
Bedingungen	atmosphärisch
Brennstoff	Methan
mittlere Leistung [kW]	250
einges. Düse(n)	3-strahlig gerade 4-strahlig gerade 3-strahlig 45° Flankenwinkel (Endversion)
Brennstoffzufuhr	vorgemischt durch Multidüsen - Rohr
Venturi-Verhältnis [-]	2
Werkstoffe	S235JR S355JR
Brennkammer	
Bauweise	dump combustor
Werkstoffe	modular S235JR
Anschlüsse	SQ1 Zündkerze Drucksensor
Sensorik	
Eingesetzte Sensoren	Massenstrom (1x) Absolutdruck (1x) Drehzahl (1x) Flammenwächter (1x)
Steuerung	SPS (Siemens S7-300 mit STEP7-Lite)
Sicherheitsabschaltung	Ja

Abbildung 2.34: Überblick über allgemeine Leistungsdaten des Testsystems

2.5.2 Kurven für Brennstoffeinsatz und Ausströmgeschwindigkeit

Die aufgeführten Diagramme geben jeweils den Betriebsbereich des Brenners im atmosphärischen Betrieb ohne Kühlung an. Auffällig ist die gute Linearität des Brenners über einen weiten Bereich. Nur die unteren und oberen Betriebsgrenzen verursachen ein Abweichen von dieser Geraden.

Die Berechnung des im zweiten Diagramm aufgeführten Massenstromes erfolgte nach der Beziehung für den kritischen Durchsatz durch eine kritische Düse bei Normalbedingungen:

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \frac{0,685}{\sqrt{R_L \cdot T_0}} \cdot p_0 \cdot \pi \cdot r_{krit}^2 \\ \dot{m} &= \frac{0,685}{\sqrt{287 \cdot 298,15}} \cdot p_0 \cdot \pi \cdot r_{krit}^2\end{aligned}\tag{2.15}$$

Als sich ändernde Parameter sind der Sirenevordruck (p_0) und der Radius der kritischen Düse (r_{krit}) aufgetragen.

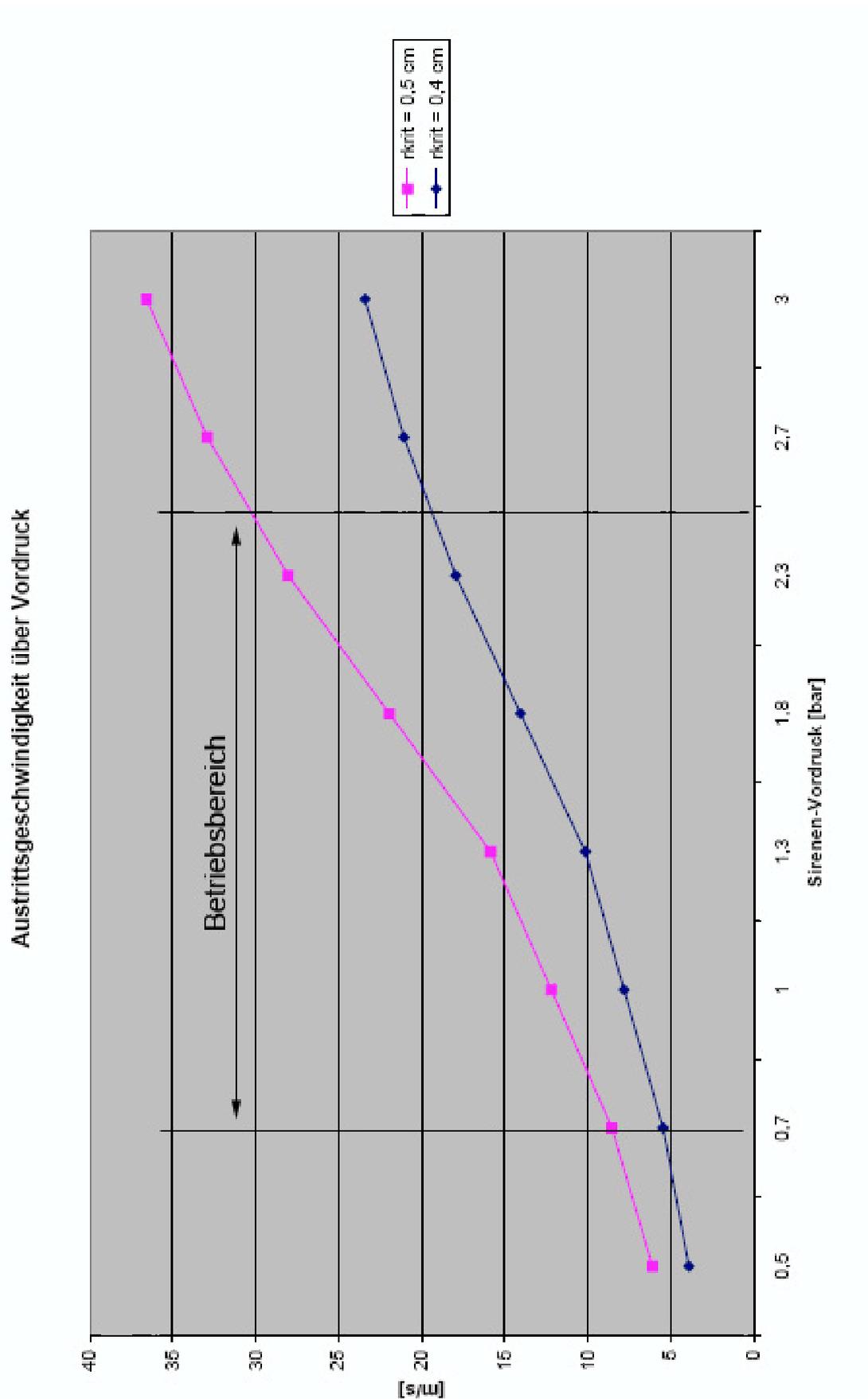


Abbildung 2.35: Austrittsgeschwindigkeit über Sirenenvordruck

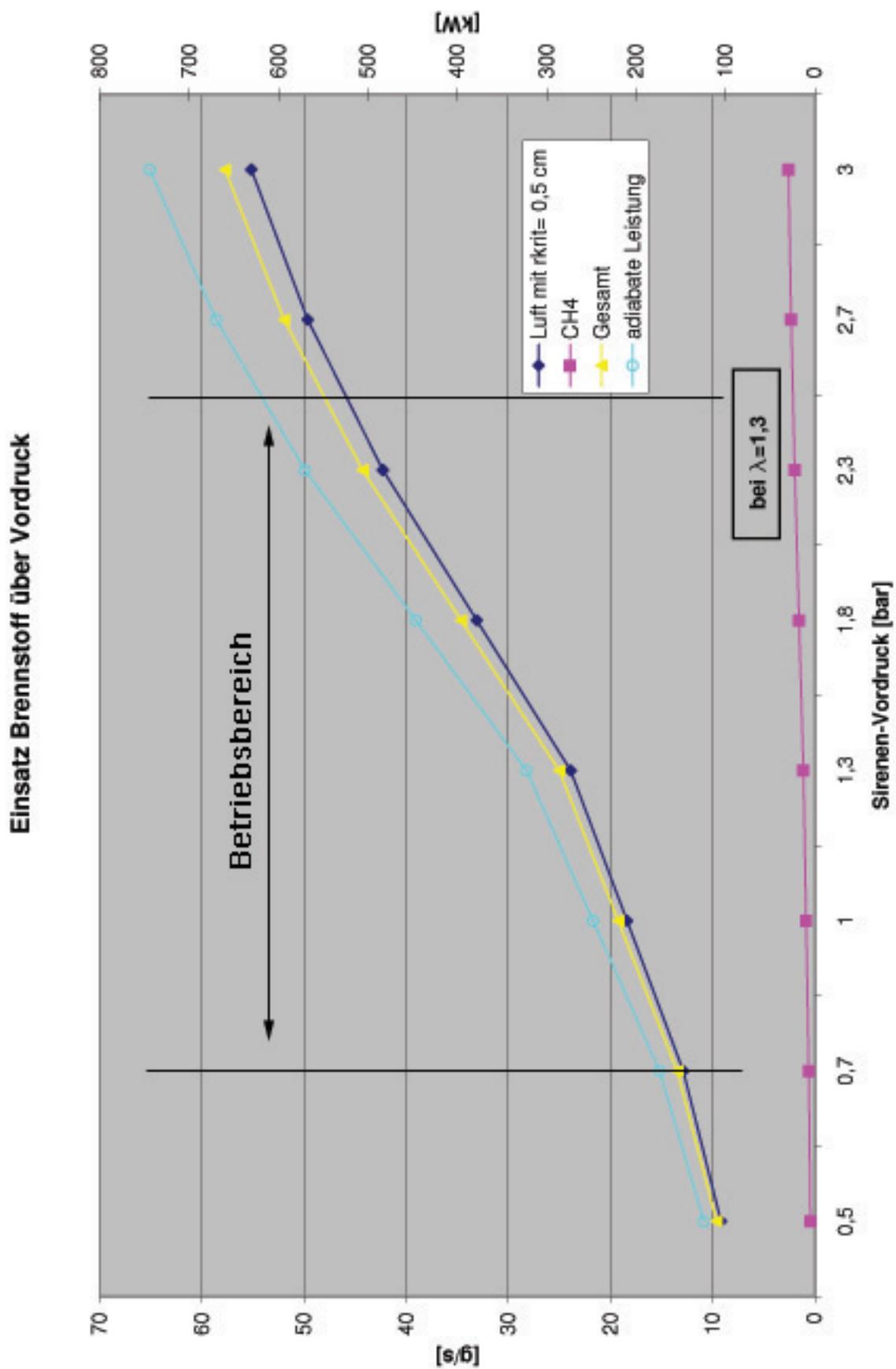


Abbildung 2.36: Massenströme über Sirenevordruck

Kapitel 3

Die Messverfahren

3.1 Visualisierung mithilfe einer CCD - Kamera

Zur ersten Grobanalyse der Flamme wurde eine phasenaufgelöste Betrachtung unter Zuhilfenahme einer getriggerten CCD - Kamera durchgeführt. Ziel dieser Untersuchung war es, einen ersten Eindruck von der Flamme hinsichtlich Austritt aus der Dralldüse, Reaktion auf die Pulsierung sowie dem Verhalten bei der Änderung von relevanten Parametern (Luft-/Gasmenge, Pulsationsfrequenz) zu bekommen.

3.1.1 Grundbegriffe zur CCD - Untersuchung

Bevor auf den verwendeten Aufbau und die Durchführung der Versuche eingegangen wird, sollen noch die Begriffe „*CCD-Kamera*“ und „*phasenaufgelöste Betrachtung*“ genauer erläutert werden.

CCD-Kamera

„CCD“ steht für „*Charge Coupled Device*“ (übersetzbar mit: „ladungsgekoppeltes Bauelement“) und bezeichnet eine hochauflösende Art digitaler Fotografie.

Das Kernstück dieser Technologie ist der *CCD-Chip*, der die Funktion des fotografischen Films einer analogen Kamera übernimmt. Er besteht aus einem Gitter von lichtempfindlichen Elementen (Pixel), die je nach der Menge auftreffender Photonen über den Photoeffekt elektrisch geladen werden. Diese Ladungsverteilung wird anschliessend ausgelesen und als Zahlenformat gespeichert. Bei der Bildausgabe wird dann jedem Zahlenwert ein Helligkeitswert zugeordnet.

Da diese Methode rein auf der Intensität des pro Pixel einfallenden Lichtes beruht, liefert die einfache CCD-Kamera nur Bilder in Graustufen. Farbige Bilder erreicht man durch drei mögliche Techniken:

- Einsatz von Farbfiltern
- 1-Chip Farb-CCD Technik

- 3-Chip CCD Technik

Für nähere Informationen bezüglich Ladungstransfer, Bilderzeugung und Farbtechniken möchte ich auf die Literaturangaben [18, 17, 26] verweisen.

Was sind jetzt die Vorteile einer CCD-Kamera, warum wird in diesem Versuch trotz der Beschränkung auf Schwarz-Weiss diese Bauform verwendet?

Die klassischen Vorteile des Systems - digitales Format der Bilder, lineare Empfindlichkeit, sofortige Überprüfbarkeit der Bilder - treten bei der zunehmenden Verbreitung von digitalen Kameras immer mehr in den Hintergrund. Ausschlaggebend sind die hohe Empfindlichkeit des CCD-Chips (bis zu 40.000 ASA), welche Aufnahmen bei extrem kurzen Belichtungszeiten ermöglicht, und die gute Auslösbarkeit per Trigger. Ein weiterer Beweggrund, dieses System zu verwenden, ist auch die reichhaltige gute Erfahrung, welche am Institut damit bereits gesammelt wurde.

Phasenaufgelöste Betrachtung

Der Begriff „phasenaufgelöste Betrachtung“ steht - im Gegensatz zur kontinuierlichen Betrachtung - für ein durch ein Referenzsignal zeitlich exakt definiertes Aufnahmezeitfenster der Kamera. Bei der Betrachtung eines periodischen Vorganges kann nun entweder bei wechselnder Frequenz immer derselbe Abschnitt des Signals betrachtet, oder durch Zwischenschalten einer Verzögerung (Delay) das gesamte Signal systematisch durchfahren werden.

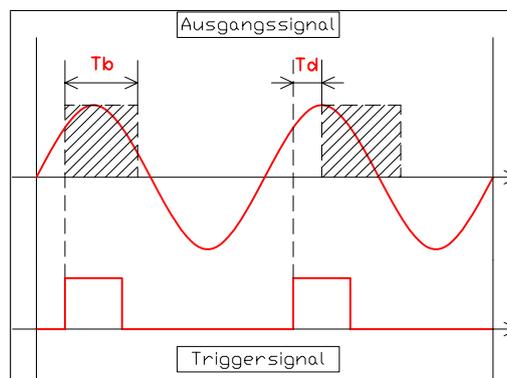


Abbildung 3.1: Triggergesteuerte Aufnahme des Ausgangssignals. Der schraffierte Bereich stellt den aktiven Aufnahmezeitraum dar. T_b ... Belichtungszeit; T_d ... Delay

Abbildung 3.1 zeigt links eine direkte Auslösung bei Triggerimpuls und rechts eine eingefügte Verzögerung. Diese kann natürlich nur positiv sein. Es ist auch deutlich zu erkennen, dass die maximale Auslösefrequenz von der minimalen Belichtungszeit abhängt. Phasenaufgelöste Betrachtung jeder Periode ist nur möglich, solange die Periodendauer deutlich grösser als die minimale Belichtungszeit ist. Bei höheren Frequenzen (= kürzere Periodendauer) kann softwaremässig geregelt werden, dass die Auslösung nur mehr jeden zweiten oder dritten Impuls stattfindet.

3.1.2 Aufbau



Abbildung 3.2: Verwendete Komponenten zur CCD-Untersuchung (Kabelverbindungen wurden aus Übersichtlichkeitsgründen entfernt).

Der Versuchsaufbau umfasst die in Abb. 3.2 dargestellten Komponenten: Eine hochauflösende, schnellauslösende *CCD-Kamera** (Pos 1), die *Steuereinheit* bestehend aus Kameracontroller (Pos 2) und Signalprozessor (Pos 3). Weiters am Bild zu sehen ist die *Trigger- bzw. Pulsationssteuerung* bestehend aus Signalaufbereitung (Pos 4), Frequenzdarstellung durch Zähler und Oszilloskop (Pos 5) und einer regelbaren Spannungsversorgung (Pos 6). Nicht dargestellt ist der über *LAN-verbundenen PC* mit Konfigurations- und Auswertungssoftware.

3.1.3 Durchführung

Das grösste Problem bei dieser Anordnung ist die relativ schwache Intensität der CH_4 Flamme im sichtbaren Bereich. Zusätzlich ist die Kamera in der Pulsationsfrequenz getriggert, was zwar phasenaufgelöste Betrachtung, aber nur eine kurze Belichtungszeit ermöglicht.

Um dieses Problem teilweise zu kompensieren wird die Kamera auf hohe Empfindlichkeit (min. Gain $\times 4$) geregelt und der Raum während der Aufnahmezeit komplett abgedunkelt. Die Triggerung erfolgt über die optische Drehzahlkontrolle an der ONERA - Sirene (siehe Kap 2.3.1). Der Photosensor liefert ein drehzahlabhängiges TTL - Signal, dessen aufsteigende Flanke vom Signalprozessor zur Auslösung der Kamera verwendet wird. Optional kann softwareseitig ein Auslösedelay eingefügt werden, um Zwischenpositionen innerhalb einer Pulsationsperiode zu beobachten.

Pro Konfiguration werden nun mehrere Bilder im Single-Frame-Modus aufgenommen. Tabelle 3.3 gibt eine Übersicht über die beobachteten Zustände:

*Kameratyp: DANTEC HiSense; Objektiv: NIKON AF MICRO NIKKOR, 60mm, 1:2,8 D

Pos.	Zündung	Frequenz [Hz]	Delay [ms]	Bilder
1	nein	0	0	65
2	ja	0	0	265
3	ja	25	0	265
4	ja	25	2,5	265
5	ja	25	5	265
6	ja	25	7,5	265
7	ja	25	10	265
8	ja	25	12,5	265
9	ja	25	15	265
10	ja	25	17,5	265
11	ja	100	0	265
12	ja	100	2,5	265
13	ja	100	5	265
14	ja	100	7,5	265
15	ja	100	10	265
16	ja	100	12,5	265
17	ja	100	15	265
18	ja	100	17,5	265
19	nein	0	0	65

Abbildung 3.3: Übersicht über die per CCD-Aufnahme untersuchten Zustände

Wie an Zeile 1 und 19 zu sehen ist, beginnt und endet jede Versuchsreihe mit Aufnahmen ohne Zündung. Dies sind die Bilderreihen für Normierung und Skalierung der Aufnahmen.

Die *Normierung* besteht aus Aufnahmen des Hintergrundes um daraus resultierende Störungen während der Auswertung eliminieren zu können (siehe Kapitel 3.1.4).

Bei der *Skalierung* wird in der Bildebene ein vordefiniertes Raster aufgenommen, um während der Auswertung Grössenangaben und Entzerrungen vornehmen zu können. In diesem Fall diente dazu ein Blatt kariertes Papier.

Auch die hohe Anzahl von Aufnahmen hat ihren Grund in der folgenden Analyse der Bilder. Die verwendeten Verfahren werden im folgenden Kapitel aufgeführt.

3.1.4 Analyse

Die Aufbereitung der gewonnenen Daten erfolgt zweistufig im Programm MatLAB[®].

Als erstes werden aus den zahlreichen Aufnahmen pro Einstellung für jeden Pixel des Bildes vier statistische Grundwerte ermittelt: Maximum, Minimum, Mittelwert und Standardabweichung. Die Operationen, die zu diesen Werten führen, sollen in einem Beispiel kurz erläutert werden: Ausgangspunkt sind zwei Messwerte, in Matrizenform gespeichert:

<u>Messung A</u>			<u>Messung B</u>		
3	1	2	7	3	4
1	6	5	5	2	9
8	4	0	2	4	6

Abbildung 3.4: Zwei Beispielmatrizen als Ausgangswert

- Der Bereich maximaler Intensität („Umriß“):
Diese Funktion nimmt von allen zu vergleichenden Werten den grössten. Bei den beiden Messungen A und B ergibt sich folgende Matrix:

7	3	4
5	6	9
8	4	6

Abbildung 3.5: Ergebnismatrix der MAX-Funktion

- Alle Bereiche minimal auftretender Intensität („Kern“):
Hier wird, genau gegensätzlich zum Maximum jeweils der kleinste Wert übernommen:

3	1	2
1	2	5
2	4	0

Abbildung 3.6: Ergebnis der MIN-Funktion

- Der statistische Mittelwert pro Pixel:
Der Mittelwert ergibt sich nach der Formel: $M_{(x)} = \frac{\sum x}{n_{(x)}}$.
x stellt den einzelnen Wert dar und n(x) die Anzahl der Werte. Zum Beispiel für Element x_{11} : $M_{11} = (3 + 7)/2 = 5$
Für die ganze Matrix:

5	2	3
3	4	7
5	4	3

Abbildung 3.7: Mittelwertsmatrix der beiden Startmatrizen

- Die statistische Standardabweichung pro Pixel:
Die statistische Standardabweichung gibt die Abweichung des Zellenwertes vom Mittelwert an. Um negative Abweichungen zu vermeiden, die sich beim Summieren gegenseitig aufheben würden, wird die Differenz quadriert. Den Einfluss der Anzahl der Messwerte berücksichtigt eine Division durch die Freiheitsgrade (= Messwerte - 1). Es ergibt sich also folgende allgemeine Formel für die Bestimmung der Standardabweichung: $S_{(x)} = \sqrt{\frac{\sum (x - M_{(x)})^2}{n_{(x)} - 1}}$

Die aus diesen Operationen resultierenden vier integralen Bilder können nun farbcodiert dargestellt werden (siehe Abbildung 3.8).

Im Fall der pulsierten Flamme lassen sich diese Bilder wie folgt deuten:

- Maximum → Raum, den die Flamme für jeden Punkt maximal einnimmt („Umriss“).
- Minimum → Zone, in der die Flamme dauerhaft (quasistationär) besteht („Kern“).

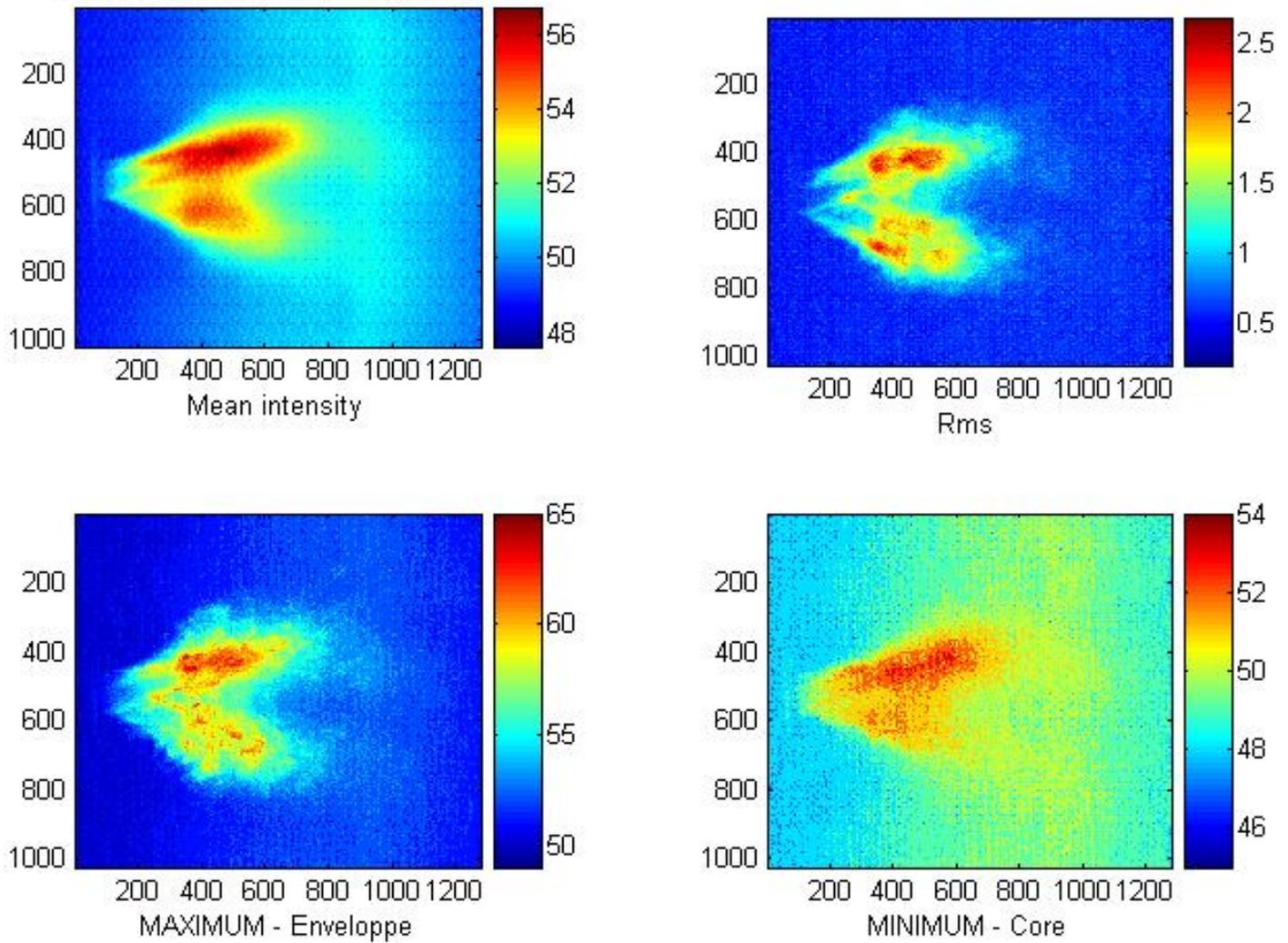


Abbildung 3.8: Farbcodierte Bilder der Integralwerte. Der Balken rechts zeigt die Intensitätsskala.

- RMS → hohe Intensität in dieser Darstellung ist mit hoher Turbulenz der Flamme gleichzusetzen.
- Mittelwert → Der Mittelwert gibt den Hintergrund unter der instationären Pulsation wider.

Durch Subtraktion der ebenfalls integrierten Hintergrundaufnahmen kann das Hintergrundrauschen des Bildes minimiert werden. Allerdings sinkt in diesem Fall hauptsächlich die absolute Intensität, so dass sich kein nennenswerter Vorteil für die Betrachtung ergibt.

3.2 High-Speed Schlierenvisualisierung der pulsierenden Verbrennung

Als zweites wird eine Wärmeschlieren - Visualisierung mit Hilfe einer High-Speed - Kamera durchgeführt. Ziel dieser Untersuchung ist die Beobachtung der Flammenwirbelstruktur sowie von Druckwellen resultierend aus der Wechselwirkung von gepulster Brennstoffzufuhr und Brennkammergeometrie.

3.2.1 Grundsätzliches zur Schlierenvisualisierung

„Als Schliere wird eine lokale Störung in einem transparenten Medium, die eine Ablenkung des Lichtes verursacht, bezeichnet.“* Die Entdeckung des Schlieren - Prinzips wird heute Leon Foucault im Jahre 1859 zugerechnet. Er benutzte das System, dessen hauptsächliche Komponente eine Messerschneide war, allerdings nur zur Qualitätsbestimmung von optischen Instrumenten. Der erste, der die vielen Möglichkeiten dieser Technik sah war August Töpler im Jahre 1864. Er prägte dafür den Namen „Messerschneiden-Methode“ und publizierte die ersten Visualisierungen von kompressiblen Strömungen. Seit damals ist für diese Art der Sichtbarmachung auch der Name „Töpler Methode“ gebräuchlich. Heutzutage stellt die Schlierenvisualisierung gemeinsam mit der Schattenmethode das klassische Verfahren zur qualitativen Darstellung von Dichtegradienten in Strömungen dar. Eine gute Übersicht über die Entstehung und Weiterentwicklung dieser beiden Techniken gibt Gary S.Settles in seiner Publikation „Schlieren and Shadowgraph Techniques“ [10](S.1-24)

Was ist nun das Grundprinzip hinter der Entstehung von Schlieren?

Sie beruhen auf der Änderung des Brechungsindex eines Mediums abhängig von der Dichte. Unterschiedliche Brechungsindizes bewirken die Änderung des Krümmungsradius eines durchlaufenden Lichtstrahls. Dieser Effekt kann durch folgende einfache Beziehung beschrieben werden:†

$$\frac{1}{r_k} = -\frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dr_k} = -\frac{1}{n} \cdot grad(n) \quad (3.1)$$

*frei übersetzt nach [10]; S.134

†vgl. [13]

bzw. in Koordinatenschreibweise (hier x-Richtung):

$$\left| \frac{d^2x}{dz^2} \right| = \frac{1}{n} \cdot \frac{\delta n(x, y, z)}{\delta x} \quad (3.2)$$

Hierbei steht „ r_k “ für den Krümmungsradius und „ n “ für den Brechungsindex.

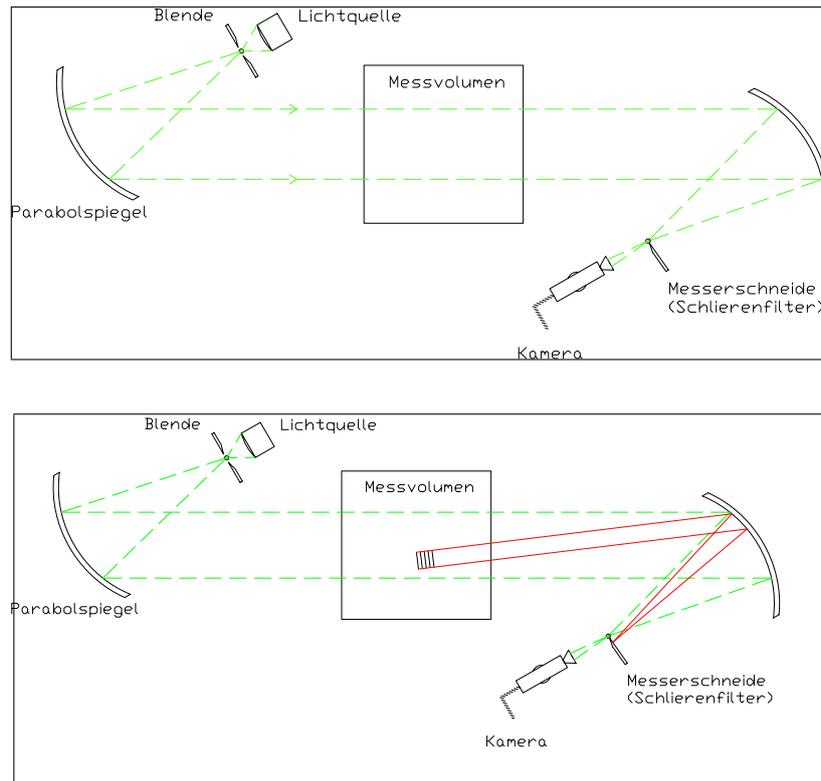


Abbildung 3.9: (a) Einfacher Schlieren-Aufbau; (b) abgelenkter Strahl

Der einfache Schlieren-Aufbau (Siehe Abb.3.9(a)) nützt diese Beugung und die daraus resultierende Verschiebung des Lichtstrahles folgendermassen: Mithilfe eines Parabolspiegels wird eine parallele Lichtwellenfront erzeugt, die die Messebene durchläuft. Hinter dem zu betrachtenden Bereich wird diese Front durch einen weiteren Parabolspiegel wieder auf einen Punkt fokussiert. In diesem Punkt befindet sich der Schlierenfilter, im einfachsten Fall als Messerschneide ausgeführt. Wird jetzt ein Lichtstrahl von einer Dichteschwankung abgelenkt, liegt sein Brennpunkt neben demjenigen des Parallelstrahls (Abb.3.9(b)). Dadurch kann er von der Messerschneide gefiltert werden: Bei der *Hellfeldmethode* erfolgt die Filterung so, dass die Schneide den Brennpunkt gerade nicht abdeckt. Der gebeugte Strahl wird also von der Schneide verdeckt. Es entsteht am Film eine dunkle Schliere vor hellem Hintergrund. Bei der *Dunkelfeldmethode* verdeckt die Schneide den gesamten Brennpunkt.

Somit trifft nur der gebeugte Strahl auf den dahinterliegenden Photo-Film bzw. die Kamera. Es entsteht eine helle Schliere vor dunklem Hintergrund. Um Abbildungsfehler durch ausseraxiale Strahlen zu vermeiden, sollte das Öffnungsverhältnis (freier Linsendurchmesser zu Brennweite) den Faktor 1 : 10 nicht unterschreiten.

3.2.2 Aufbau und verwendete Komponenten

Der hier verwendete Aufbau ist in Abbildung 3.10 zu sehen.

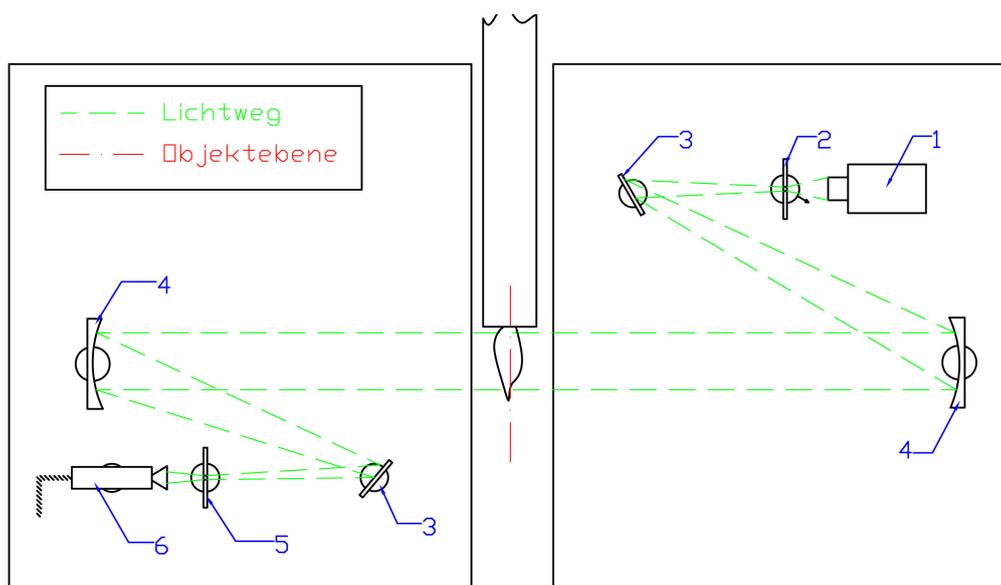


Abbildung 3.10: Verwendeter Aufbau zur Schlierenvisualisierung

Als Lichtquelle dient ein handelsüblicher *Dia-Projektor* (*Pos 1*). Er gewährleistet durch sein Linsensystem ausreichend die Anforderung einer punktförmigen Lichtquelle. Im Brennpunkt des abgegebenen Lichtstrahles befindet sich eine *regelbare Blende* (*Pos 2*). Diese regelt die Intensität des Lichts und so auch die Empfindlichkeit des ganzen Systems. Um die Anfangs erwähnte Bedingung des grossen Öffnungsverhältnisses einzuhalten, wird der Lichtweg auf beiden Seiten der Beobachtungsebene durch *Umlenkspiegel* (*Pos 3*) verlängert. Die Umwandlung Fokussierter Strahl \Leftrightarrow Parallelstrahl erfolgt durch 2 *Parabolspiegel* (*Pos 4*). Diese müssen sehr exakt ausgerichtet werden, da bereits eine leichte Verkippung aus der optimalen Achse zu einer deutlichen Intensitätsschwächung im Brennpunkt führt. Der *Schlierenfilter* (*Pos 5*) ist in diesem Fall als viereckige Öffnung mit Rasierklagen als Begrenzung ausgeführt. Dies ermöglicht eine Empfindlichkeit gegenüber der Strahlenlenkung sowohl horizontal als auch vertikal in beiden Richtungen. Als *Kamera* (*Pos 6*) kommt eine High-Speed Kamera zur Anwendung. Sie ermöglicht eine Aufnahme von maximal 10.000 Bildern pro Sekunde. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass der belichtbare

Bereich mit steigender Bildanzahl pro Sekunde stufenförmig abnimmt. Der Controller liefert die Möglichkeit eine Aufnahmeserie zwischenspeichern und stark verlangsamt (bis zu 1 Bild pro Sekunde Wiedergabe bei maximaler Aufnahme Frequenz) an analoge oder digitale Aufnahmegeräte weiterzugeben.

3.2.3 Durchführung und Auswertung

Die Visualisationen werden sowohl an der freien Flamme („Free Jet“) als auch bei montierter Brennkammer durchgeführt. Bei letzterem ersetzen transparente Scheiben (vorerst aus Polypropylen, später aus Quarzglas) die vertikalen Wände der Kammer. Die Versuchsreihen erstrecken sich bei konstant gehaltenem Massenstrom von Luft und CH_4 über wechselnde Pulsationsfrequenzen. Aufgrund der in der CCD-Analyse beobachteten Resonanz bei 50 Hz werden mehrere ganzzahlige Vielfache dieser Resonanzfrequenz ausgewählt.

Für die Beobachtung der Frequenzen 50 bis 400 Hz wird eine Aufnahme Frequenz von 1000 Bildern pro Sekunde gewählt. Diese Frequenz garantiert eine klare Auflösung der Strukturen bei ausreichend grossem Beobachtungsfenster und moderater Datengrösse. Ab Frequenzen über 400 Hz verwischen die Strukturen. Die Kamera wird deshalb auf 2000 Bilder pro Sekunde geregelt. Diese Einstellung liegt noch in derselben Grössenstufe des Beobachtungsbereiches. Allerdings ist nun darauf zu achten, die Aufnahmeserie im Bereich von 20 bis 30 Sekunden zu halten um noch alles im Controller zwischenspeichern zu können. Auch die Erwärmung der Kamera steigt merklich.

Zu Beginn jeder Aufnahmesequenz erfolgt - ähnlich wie bei der CCD-Analyse - eine Grössenskalierung durch ein transparentes Raster. In diesem Fall wurde ein quadratisches 5mm - Gitter auf eine Folie aufgebracht und durch einen Rahmen gespannt.

Die Auswertung der Aufnahmen erfolgt nur mit freiem Auge, da bei der Schlierenvisualisierung nur sehr schwer quantitative Daten gewonnen werden können. Qualitative Tendenzen sind allerdings sehr gut auszumachen. Abbildung 3.11 gibt ein Beispiel der gewonnenen Bilder:

3.3 Vibrometrische Untersuchungen

Die abschliessenden Versuche für diese Arbeit umfassen vibrometrische Untersuchungen der Flamme. Ziel ist es, die Eignung eines vibrometrischen Systems für Verbrennungsvorgänge zu untersuchen, sowie - bei Eignung - ein klareres Bild der auftretenden Wirbelstrukturen zu bekommen.

3.3.1 Das Prinzip des Laser-Doppler Vibrometers

Das Prinzip des Vibrometers beruht auf dem bekannten Mach-Zender-Interferometer wobei ein Zweig zum zu untersuchenden Objekt offen bleibt. Abbildung 3.12 erklärt dies genauer:

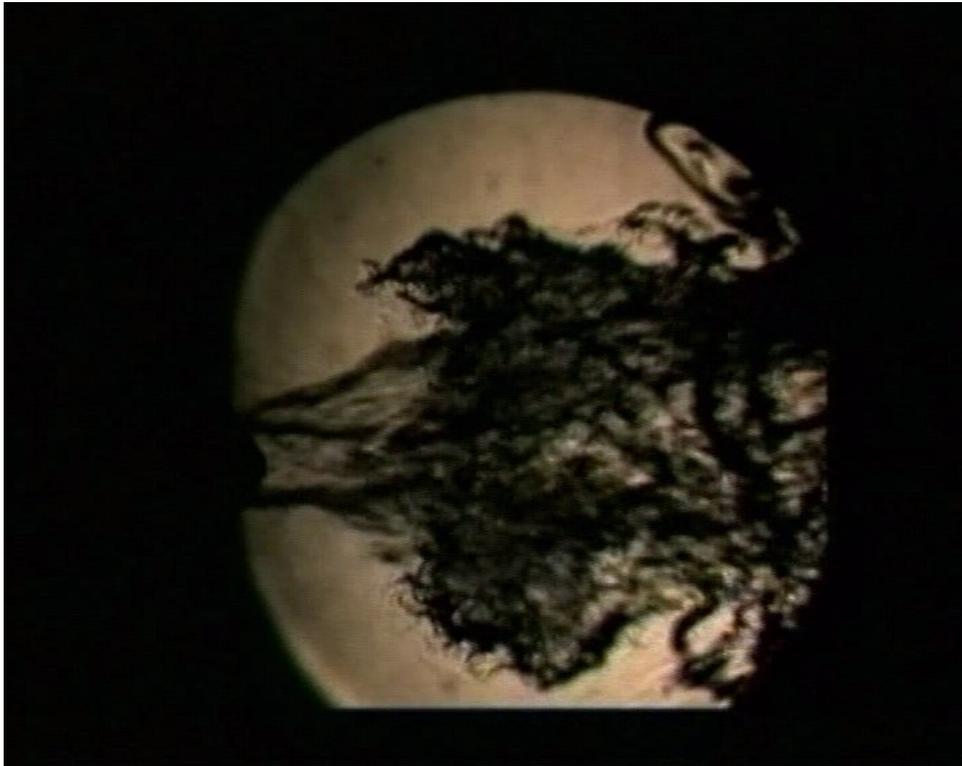


Abbildung 3.11: Beispielbild der Schlierenaufnahme

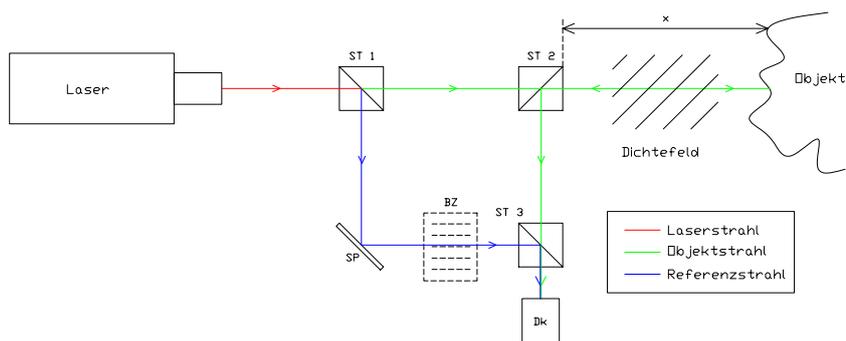


Abbildung 3.12: Prinzip-Aufbau eines Laser-Doppler Vibrometers: ST...Strahlteiler; Sp...Spiegel; Dk...Detektor

Nach Austritt aus dem Laser wird der Strahl in einen Objekt- (grün) und einen Referenzstrahl (blau) geteilt. Letzterer führt über den Spiegel und den Strahlteiler 3 direkt zum Detektor. Der Objektstrahl passiert zuerst Strahlteiler 2 und trifft im Abstand x auf das Objekt. Dort wird er reflektiert und von Strahlteiler 2 zum Detektor geführt. Bei Messungen an Fluiden wird das Objekt durch eine reflektierende Fläche ersetzt. Das Fluid befindet sich dann im Bereich des eingezeichneten Dichtefeldes.

Führt nun das Objekt eine Bewegung in der Strahlachse aus, bzw. kommt es zu Dichteänderungen im Dichtefeld, wird der optische Weg - und somit die Frequenz - des Objektstrahls nach der Beziehung

$$\frac{f_0}{f_{neu}} = \frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \quad (3.3)$$

verändert. Hierbei steht „v“ für die Relativ- und „c“ für die Lichtgeschwindigkeit.

Wird nun der modulierte Objektstrahl im Sensor mit dem Referenzstrahl zusammengeführt, entsteht ein für die Differenz charakteristisches Interferenzstreifenmuster.

Die eben beschriebene Anordnung hat den Nachteil, dass die Differenz zwischen den Frequenzen vom Nullpunkt aus gemessen wird. Dadurch kann zwar der Betrag, nicht aber die Richtung der Verschiebung ermittelt werden. Dieses Problem kann durch den Einbau einer Bragg-Zelle (in Abbildung 3.12 mit „BZ“ bezeichnet) gelöst werden. Durch die Bragg-Zelle wird dem Objektstrahl bereits eine gewisse Trägerfrequenz f_T aufmoduliert. Die Gesamtverschiebung aus Trägerfrequenz und Störung durch das Objekt, die am Detektor gemessen wird, ergibt sich dann nach:

$$\Delta f_{gesamt} = f_T \pm \Delta f_{Objekt} \quad (3.4)$$

Für eine Gesamtfrequenzverschiebung grösser als die durch die Braggzelle verursachte ergibt sich so eine Bewegung vom Sensor weg und umgekehrt. Die Richtung der Verschiebung ist eindeutig bestimmt.

3.3.2 Aufbau und Durchführung der Untersuchungen

Der prinzipielle Aufbau bei Verwendung eines Vibrometers wurde in Kapitel 3.3.1 behandelt. In den Untersuchungen werden aufgrund der Fragestellungen „prinzipielle Eignung“ und „Wirbelstrukturen“ zwei deutlich unterschiedliche Anordnungen verwendet:

Untersuchung zur prinzipiellen Eignung bei Flammen

Dieses grundlegende Experiment wird in der geschlossenen Brennkammer durchgeführt. Verwendet wird dazu ein Vibrometer der Firma Polytec bestehend aus einem Sensor-kopf des Typs OFV 303 und einem Controller des Typs OFV 3001. Da im Gegensatz zur

Oberflächen-Anwendung des Vibrometers die Flamme selbst den Laserstrahl nicht ausreichend reflektiert, ist noch ein Spiegel hinter der zu untersuchenden Ebene notwendig. Hier wird einer der beiden Parabolspiegel aus der Schlierenuntersuchung (siehe Kapitel 3.2.2) verwendet. Eine Skizze dieser Anordnung zeigt Abbildung 3.13.

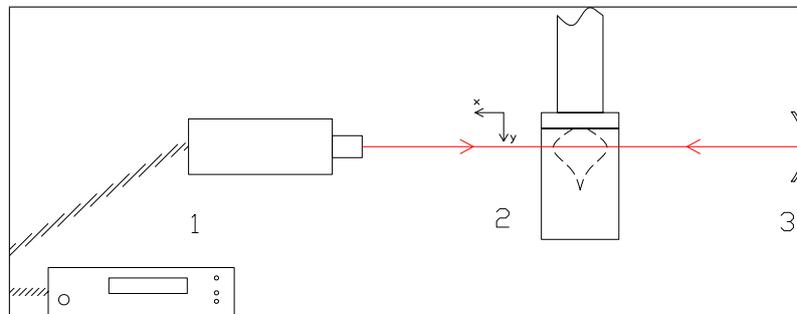


Abbildung 3.13: Testaufbau: (1)Vibrometer-System; (2)Brennkammer; (3)Parabolspiegel

Dieser erste Aufbau soll Antwort auf folgende Fragen geben:

- Ist das Vibrometer empfindlich genug für die minimalen Dichteschwankungen in der Flamme?
- Können diese Schwankungen von den Vibrationen des Brennraums und der Pulsation getrennt werden?
- Kann trotz der starken Streuung der beiden Scheiben ein genügend grosser Anteil des Meßstrahles wieder zurückreflektiert werden?
- Was sind brauchbare Grenzen bei den Parametern des Vibrometers?

aber auch:

- wie rasch folgt die Flamme der Pulsation? ← „Phasenlage“ der Flamme
- pulsiert die Flamme in der exakt selben Frequenz als die Sirene vorgibt? ← „Grundfrequenz“ der Flamme

Zur Beantwortung der oben erwähnten Probleme werden drei willkürliche Positionen in der Brennkammer gemessen.

In Abbildung 3.14 ist zu erkennen, dass Punkt (1) im Bereich der ersten grossen Wirbelstruktur, Punkt (2) knapp am Düsenaustritt und Punkt(3) in der Mitte der ausgebildeten Flamme gewählt ist. Dadurch soll überprüft werden, ob die Vibrometrie in allen Zonen der Flamme trotz der unterschiedlichen Strömungsverhältnisse anwendbar ist.

Diese Punkte werden nun unter verschiedenen Bedingungen bezüglich Pulsationsfrequenz und Brennstoffzufuhr untersucht. Dabei werden von jeder Konfiguration drei Messungen à 5 s in Serie durchgeführt. Damit sollen dann bei der Analyse der Daten Messunregelmäßigkeiten eliminiert werden. Mehr dazu in Kapitel 3.3.3.

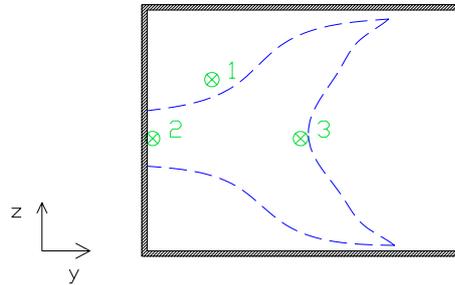


Abbildung 3.14: Die drei untersuchten Positionen in einer Seitenansicht der Brennkammer. Strichliert der prinzipielle Umriss der Flamme.

Untersuchungen an der Wirbelstruktur

Vorausgreifend zum nächsten Kapitel kann gesagt werden, dass die Untersuchungen in Abschnitt 3.3.2 zu einem positiven Ergebnis in fast allen Punkten geführt haben. Um die Empfindlichkeit der Messung bei der nun bevorstehenden Aufgabe zu erhöhen, werden diese Untersuchungen am Freistrah durchgeföhrt. Dadurch werden die oben erwöhnten Schwingungen der Seitenscheiben sowie ungewöhnte Reflexionen des Laserstrahles vermieden.

Die Lokalisierung der Wirbelstrukturen beruht auf der unterschiedlichen Richtung der Geschwindigkeitsvektoren von laminarer Strömung und Wirbel. Durch die Differenz der Geschwindigkeit in axialer Richtung ergibt sich eine zeitlich Phasenverschiebung in der Antwort auf die eingebrachte Pulsation. Wird die Flamme nun in einem Raster abgetastet, kann auf Position und Grösse der auftretenden Wirbel geschlossen werden.

Ausschlaggebend für eine experimentelle Bestätigung dieser Theorie sind folgende zwei Punkte:

- Die exakte Bestimmung des auftretenden Phasenunterschiedes
- Die Grösse des abgetasteten Rasters

Phasenunterschied: Bei den vorhergehenden Untersuchungen wurde die Antwort des Systems auf die Sirene direkt aus dem Vergleich der beiden Signale von Sirene und Vibrometer abgeleitet. Diese Methode ist für die Erkennung der Wirbelstrukturen aber nur bedingt geeignet, da die Variationen der Sirene annähernd rechtecksförmig sind, also stark von einer Sinusform abweichen. Ausserdem soll ja eigentlich die Differenz der Antwort zwischen annähernd laminarer Strömung und dem Wirbel gemessen werden. Aus diesen Gründen wird in der aktuellen Versuchsreihe noch ein weiteres Vibrometer als Referenz verwendet. Dieses misst kontinuierlich einen Punkt knapp nach Düsenaustritt, während das andere Vibrometer das Raster scannt. In dieser Position (siehe Abbildung 3.3.2) ist die Strömung noch annähernd wirbelfrei und deshalb als Referenz geeignet.

Die rechnerische Ermittlung des Phasenunterschiedes wird in Kapitel 3.3.3 genauer beschrieben.

Raster: Zur Bestimmung der Rastergrösse muss zuerst die Grösse der beiden Hauptwirbel (bei Punkt(1) von Abbildung 3.14) geschätzt werden. Die verwendete Abschätzung behandelt die Wirbel als Wellenstrukturen. Dadurch kann auf die bekannte Beziehung

$$c = f \cdot \lambda \quad (3.5)$$

zurückgegriffen werden. Für die Frequenz ν wird die Pulsationsfrequenz am Düsenaustritt eingesetzt. Um die Geschwindigkeit c einsetzen zu können ist eine weitere Annahme nötig: Diese grossen Wirbelstrukturen befinden sich in einer Grenzschicht zwischen zentraler Strömung (gemessene Austrittsgeschwindigkeit v_L) und der beruhigten Zone ($v = 0$) der Brennkammer / des Free-Jets. Für eine grobe Abschätzung kann dieses Geschwindigkeitsgefälle als linear angesehen werden. Für die Wirbelstrukturen wird also die halbe Austrittsgeschwindigkeit eingesetzt.

Zusammenfassend ergibt sich:

$$\lambda_{Wirbel} = \frac{c_{Wirbel}}{f_{Pulsation}} \quad (3.6)$$

mit:

$$\begin{aligned} c_{Wirbel} &\approx \frac{v_L}{2} = \frac{42}{2} = 21 \frac{m}{s} \\ f_{Pulsation} &= 50 \text{ Hz} \end{aligned}$$

für die „Wellenlänge“ der Wirbel:

$$\lambda_{Wirbel} = \frac{21 \frac{m}{s}}{50 \frac{1}{s}} \lambda_{Wirbel} \approx 4 \text{ cm} \quad (3.7)$$

Aufgrund dieser Überlegungen wird das abzufahrende Raster auf 5 mm Schritte in Düsennähe und auf 10 mm Schritte weiter stromabwärts festgelegt. Eine Übersicht gibt Abbildung 3.3.2. Die Beschränktheit des Rasters über die untere Hälfte der Brennkammer ergibt sich aus der Annahme einer achssymmetrischen Flamme. Diese Behauptung kann nach Analyse der Aufnahmen aus der Schlierenuntersuchung über den überwiegenden Teil der Brennkammer aufgestellt werden.

Das exakte Abfahren des Rasters wird von einer computergesteuerten 3-Achsen-Traversierung übernommen. Dabei wird der zuvor verwendete Parabolspiegel durch zwei Planspiegel (einen pro Vibrometer) ersetzt. Dies ermöglicht bei ausreichender Grösse eine fixe Position der Spiegel und vereinfacht den Versuchsaufbau.

Abbildung 3.3.2 zeigt eine Frontalansicht des erweiterten Aufbaues. *Pos(1)* stellt eine

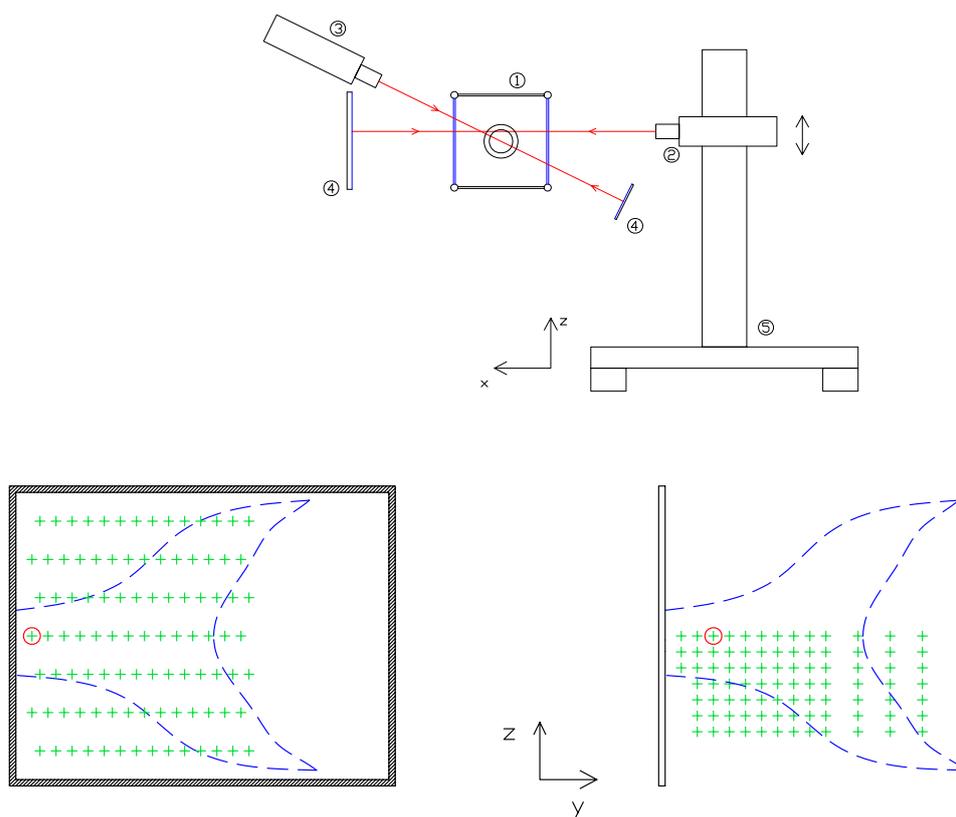


Abbildung 3.15: (a) Frontalansicht des Aufbaues; (b) Übersicht über das gewählte Messraster in der Brennkammer (links) und im Free-Jet (rechts); Grün: Rasterpunkte; Rot: Referenzpunkt

Schnittansicht der Brennkammer dar; $Pos(2)$ das verfahrbare Mess- und $Pos(3)$ das fixe Referenzvibrometer. $Pos(4)$ sind die beiden Planspiegel; $Pos(5)$ skizziert die Traversierung, wobei hier nur eine der drei Bewegungsachsen eingezeichnet ist.

Beide Vibrometer sind auf die vertikale Mittelebene der Brennkammer fokussiert. Dies soll den Einfluss der unterschiedlichen Beobachtungswinkel minimieren.

3.3.3 Aufbereitung der erhaltenen Daten

Die Auswertung der Laser-Daten erfolgt in vier Schritten:

1. Umorganisation der Datenstrangs
2. Transformation
3. Analyse der Standardabweichung
4. Analyse der Phasenverschiebung

Umorganisation

Das Aufnahmeprogramm liefert Dateien des Typs '.cdl'. Diese beinhalten die drei pro Messung aufgenommenen Signale (beide Vibrometer plus Sirene). Um eine differenzierte Auswertung vornehmen zu können, ist eine Umorganisation dieses Datenstrangs notwendig: Als erstes werden die 3 Signale getrennt. Die Länge eines jeden Signals beträgt 10 s bei einer Aufnahme Frequenz von ca. 10,25 kHz.

Der nächste Schritt ist eine Aufteilung jedes Signals in 2^n Teilsignale. Nach der Überprüfung mehrere Kombinationen wird für n der Wert 11 gewählt. Dieser stellt den besten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungsaufwand dar. Für die Länge eines Zeitsignals ergibt sich somit:

$$\begin{aligned} 2^{11} &= 2048 \\ \frac{10250[Hz]}{2048} &\approx 5 \text{ Hz} \\ \frac{1}{5[Hz]} &= 0,2 \text{ s} \end{aligned}$$

Ein Teilsignal deckt also den Aufnahmebereich von ca. 0,2 s ab.

Die eigentlich Umorganisation ist damit abgeschlossen. Die Signale werden nun in einer Matrix mit vier Zeilen gespeichert. Die vier Dimensionen sind wie folgt definiert: [1] Identifikation des Gerätes; [2] Das ursprüngliche Signal; [3] Die zugehörigen Koordinaten in der Rasterebene; [4] Die aufgeteilten Teilsignale;

Diese Aufteilung hat den Vorteil, dass der jeweils benötigte Wert einfach als Zeile der Matrix ausgelesen werden kann.

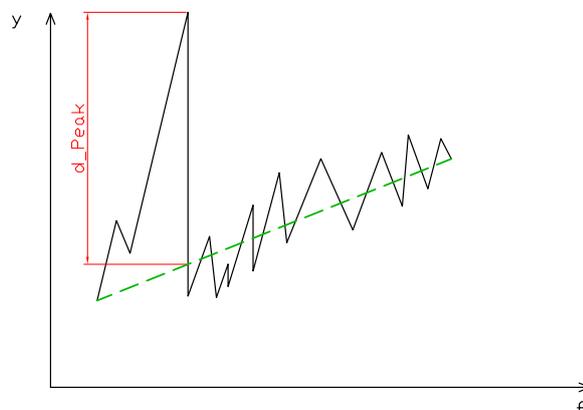


Abbildung 3.16: Messung der Peakhöhe: durchgezogen: Signal; strichliert: lineare Verbindung der Grenzwerte

Transformation

Die Teilsignale werden nun jedes für sich einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) unterworfen. Diese Transformation liefert pro Eingangssignal zwei Ergebnisse: Das Frequenzspektrum des Signals und den Verlauf der Phase über die Signallänge im Bereich von $\pm 2\pi$. Diese Spektren und Phasenverläufe bleiben im Speicher des Programmes und können so von den nächsten beiden Analysen weiterverwendet werden.

Standardabweichungsanalyse

Die Analyse der Standardabweichung erfolgt semiautomatisch:

Erster Schritt ist die Bildung eines gemittelten 'Power Spectrum' aus den Frequenzspektren der Teilsignale. Dieses wird graphisch ausgegeben.

Der Benutzer kann nun einen gewünschten Teilbereich des Power Spectrums herauszoomen. Nur dieser Bereich wird weiter bearbeitet.

Im nächsten Schritt wird der ausgewählte Teil auf auftretende Spitzen im Spektrum untersucht. Dies geschieht dadurch, dass der Abstand des Signalwertes zu einer linearen Verbindung zwischen dem Anfangs- und Endwert des Spektrums gemessen wird. Abbildung 3.16 illustriert dieses Verfahren:

Die höchste Spitze wird mit Wert und zugehöriger Frequenz gespeichert. Mehrere Messungen entlang einer Linie können dann in einem Plot aufgetragen werden. Beispiele dazu sind in Kapitel 4.1 aufgeführt.

Dieser Maximalwert ist als Verstärkung der zugehörigen Frequenz durch die Flamme zu sehen, kann also als Maß für die Eigenmoden der Verbrennung dienen. Vorsicht ist allerdings bei der Messung in der geschlossenen Brennkammer geboten! Bevor etwas über die Flamme

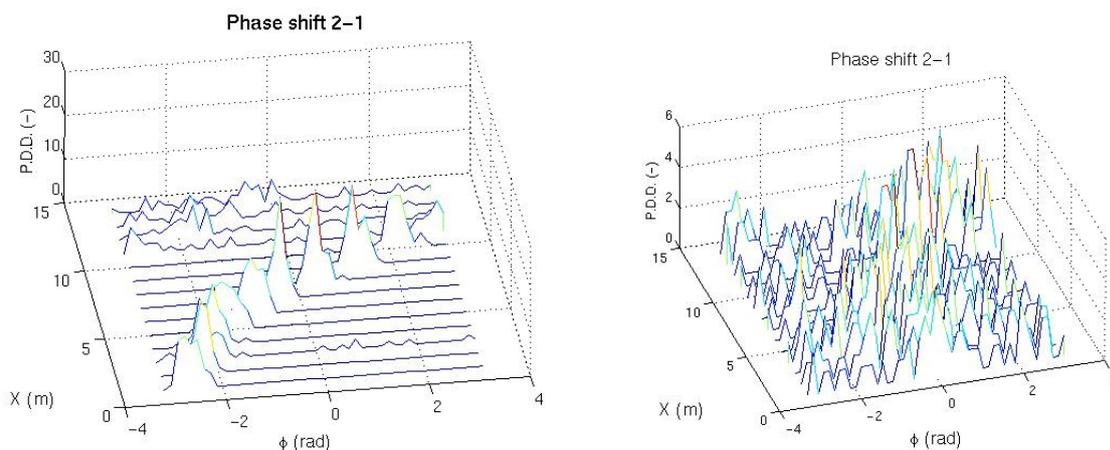


Abbildung 3.17: Beispiel für Waterfall - Plots; Links: deutliche Struktur bei pulsierter Flamme; Rechts: grosse Streuung ohne Pulsation

ausgesagt werden kann, muß erst sichergestellt sein, dass nicht die Eigenfrequenzen der vibrierenden Scheiben gemessen wurden.

Analyse der Phasenverschiebung

Die ersten Schritte der Phasenverschiebungs - Analyse entsprechen denen der Untersuchung der Standardabweichung. Der einzige - aber äusserst bedeutende - Unterschied besteht darin, dass die ausgelesenen Phasenverläufe vor der Analyse nicht gemittelt werden! Durch den engen Betrachtungsbereich der Phasenverschiebung ($\pm 2\pi$) führt bei einer Mittelung ein einzelner Ausreisser zu einer starken Verfälschung des Ergebnisses.

Zur graphischen Auswertung findet eine Diskretisierung des betrachteten Bereiches (Linie oder Ebene) statt. Anschliessend werden die pro diskreten Element ermittelten Spitzen (diesmal mit zugehöriger Phasenverschiebung) gezählt und in einem Waterfall-Plot dargestellt. Abb 3.3.3 zeigt ein Beispiel dieser Ausgabe.

Kapitel 4

Diskussion der Ergebnisse

4.1 Diskussion der Ergebnisse

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Ergebnissen der oben behandelten Methoden. Dabei wird so vorgegangen, dass zuerst ein „Beispielresultat“ für jedes Verfahren vorgestellt wird. Dadurch soll einerseits auf die Darstellungsmethode an sich und andererseits auf die zu beachtenden Punkte eingegangen werden.

Anschliessend werden die Ergebnisse aller Methoden anhand dreier charakteristischer Betriebspunkte gegenübergestellt.

Als letzter Punkt werden der Anwendungsbereich und die Möglichkeiten jeder Methode diskutiert, die Korrelation bei den Ergebnissen überprüft und so ein Vorschlag zur Kombination der Methoden erarbeitet.

4.1.1 Einzelerläuterungen

Ergebnisbilder der CCD-Untersuchung

Wie in Kapitel 3.1.4 erwähnt, liefert die Auswertung der CCD-Untersuchung vier statistische Bilder: Mean, Max, Min und RMS. Abbildung 4.1 zeigt ein solches Beispiel.

Da die Darstellung ja eine Mittelung über viele Einzelaufnahmen ist, sind einzelne Details nicht zuverlässig zu beobachten. Der Fokus soll deshalb auf folgende grossflächige Merkmale und Trends der Flamme gelegt werden:

1. Form (Umriss) der Flamme
2. Intensitätsverteilung innerhalb der Flamme
3. Position der Flamme
4. Erkennung von grossen Strukturen

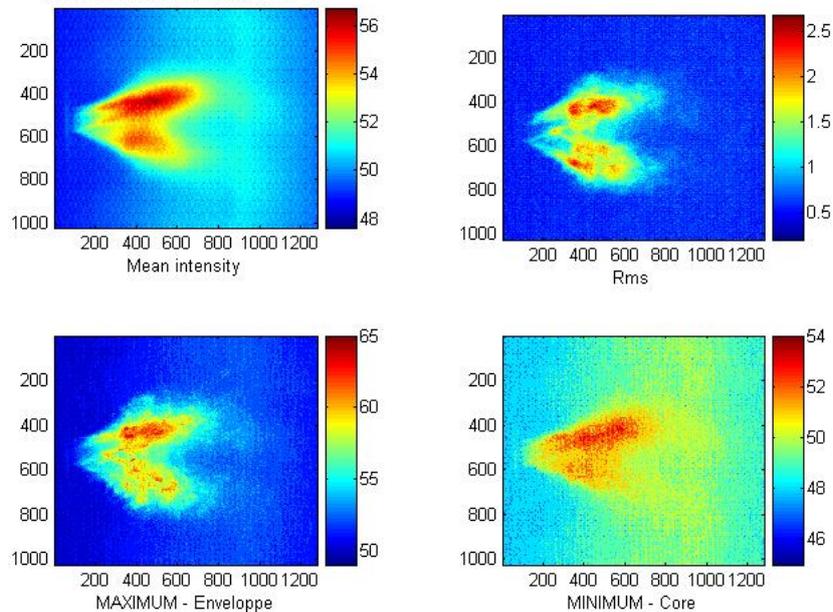


Abbildung 4.1: Beispielhaftes Ergebnis der CCD-Analyse von Links oben nach rechts unten: Mittel, Umriss (Max), Kern (Min) und Standardabweichung (RMS)

ad 1) Form der Flamme Zur Veranschaulichung dieses Punktes eignet sich die Umrissfunktion, bei der von jedem Pixel der Maximalwert dargestellt wird, am besten. Deutlich zu erkennen sind die schmale Flammenform nach Austritt aus der Düse und das rasche Aufplatzen des Freistrahles wenn die kinetische Energie nachlässt. Die beiden charakteristischen Flammenspitzen oben und unten entstehen durch die dreistrahligte Düse, bei der in dieser Kamera-Anordnung die oberen beiden Kanäle projizierend zur Betrachtungsebene stehen. Diese drei Strahlen und ihre Verdrillung durch die Dralldüse erscheinen auch deutlich knapp nach Düsenaustritt.

Der angesprochene Drall hat auch einen starken Einfluss auf die allgemeine Form der Strahlen. Durch die Ablenkung eines Teils der kinetischen Energie in radiale Richtung sowie durch das „Festhalten“ der Flamme in dieser Wirbelstruktur ist der Flammenkegel deutlich kürzer und breiter als bei Austritt aus einer geraden Düse. Dieser Effekt wird durch die Pulsation noch verstärkt. Abbildung 4.2 veranschaulicht diesen Effekt.

ad 2) Intensitätsverteilung in der Flamme Bei Betrachtung der Intensitätsverteilung in der Flamme erregen zwei Punkte augenblicklich Aufmerksamkeit: Eine deutlich höhere Intensität im oberen Bereich der Flamme sowie eine unregelmässige Strukturierung im gesamten Inneren.

Der Intensitätsunterschied zwischen den Strahlen beruht wiederum auf der Kameraposition, bei der zwei Strahlen projizierend dargestellt werden und die Intensitäten sich so addieren. Diesem Punkt muss also keine weitere Betrachtung geschenkt werden.

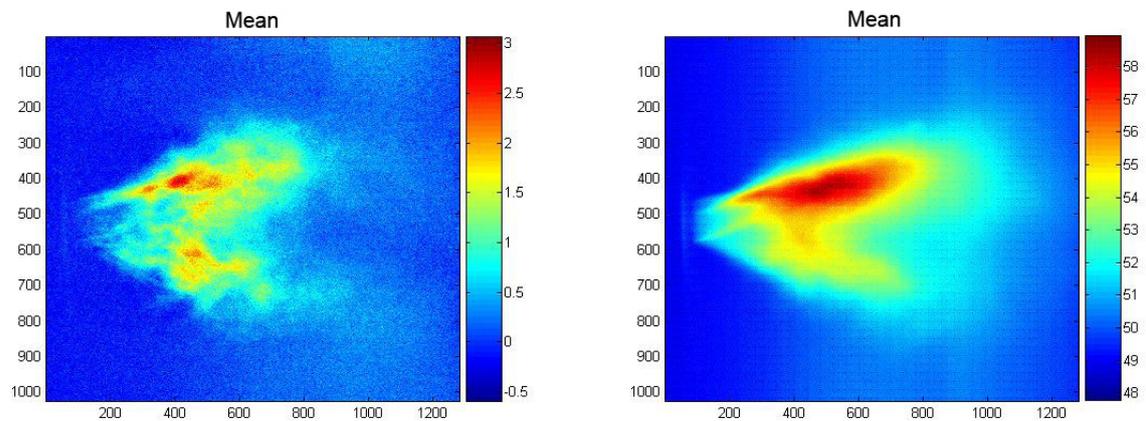


Abbildung 4.2: Vergleich der Flammenform; Links: Dralldüse mit 25 Hz pulsiert; Rechts: Ohne Pulsation

Die Strukturierung ergibt sich aus der Pulsation des Gasstromes. Pro Puls ändert sich mit der kinetischen Energie natürlich auch die Menge an transportiertem Gemisch zyklisch. Diese „stossweise“ Umsetzung des Brennstoffes bewirkt gemeinsam mit dem Vermischungsprozess diese feinen Strukturen innerhalb der Flamme. Abbildung 4.3 zeigt den Vergleich der Flammenstruktur bei gepulster und ungepulster Verbrennung.

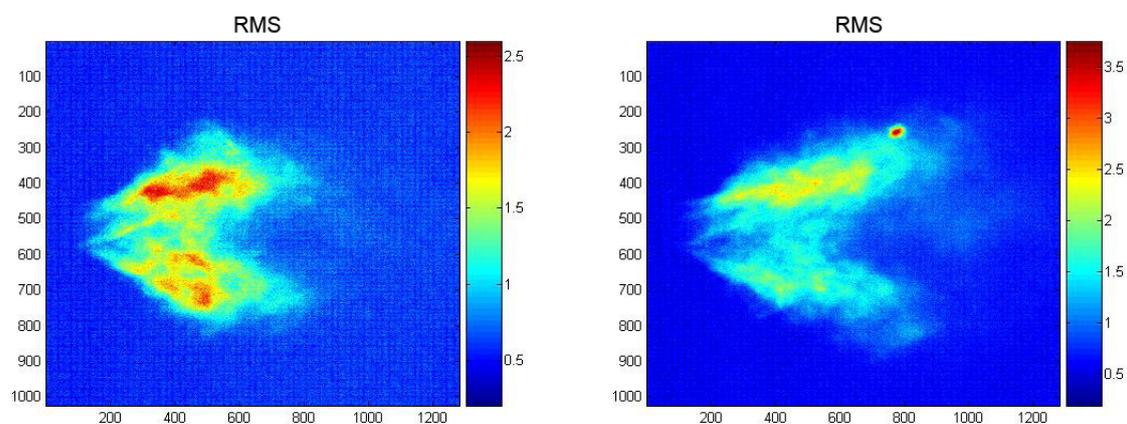


Abbildung 4.3: Vergleich der Flammenstruktur; Links: gepulst mit 25 Hz; Rechts: Ohne Pulsation

ad 3) Position der Flamme Unter diesem Punkt wird hauptsächlich die Position des Zündbeginnes der Flamme verstanden. Grundsätzlich kann wieder gesagt werden, dass die Ablenkung von Bewegungsenergie in radialer Richtung bei der Dralldüse eine deutliche Verschiebung des Zündpunktes zur Düse hin bewirkt (im Vergleich zur geraden Düse). Dieser

Effekt tritt auch bei der Pulsation auf: Durch die Impulsschwankungen des Gasstromes ist auch eine Vor- und Zurückbewegung des Flammenbeginnes zu beobachten. Abbildung 4.4 zeigt dies anhand mehrerer zeitaufgelöster Maximalwertsbilder.

ad 4) Erkennung von grossen Strukturen Dieser Punkt kann als eine Weiterführung von Punkt 2) verstanden werden. Hier wird die Intensität der Flamme über eine zeitaufgelöste Reihe betrachtet. Zur besseren Sichtbarkeit von Unterschieden zwischen den Zeitschritten werden jeweils zwei zeitlich benachbarte Bilder voneinander subtrahiert. Durch diese Massnahme können örtlich klar begrenzte Intensitätsschwankungen gut ermittelt werden. Diese lassen auf Strukturen innerhalb der Flamme wie Verbrennungsfronten oder Wirbel schliessen.

Wie schon eingangs erwähnt, sind die hier verwendeten CCD-Bilder integral in Beobachtungsrichtung und zusätzlich noch im oberen Bereich aus zwei Strahlen projizierend. Die Ermittlung von Wirbelstrukturen war deshalb mit dieser Methode nicht möglich. Fronten, die als annähernd konstant über die gesamte Flammenbreite angenommen wurden, sind allerdings zu beobachten. Abbildung 4.4 lässt das periodische Wechseln von Verbrennungsfront \leftrightarrow -lücke erkennen.

Schlierenaufnahmen

Hochgeschwindigkeits - Schlierenaufnahmen stellen eine ausgezeichnete Möglichkeit dar, das qualitative Verhalten der Flamme in sehr kurzen Zeiträumen zu beobachten und eine Analyse der Flammendynamik durchzuführen. Da es sich aber wiederum um eine Durchsichtmethode, also um ein Integralbild in Beobachtungsrichtung handelt, ist eine Quantifizierung - wenn überhaupt - nur in den Randbereichen möglich. Die erhaltenen Aufnahmen werden in dieser Arbeit deshalb hauptsächlich dazu verwendet, Gebiete mit auftretenden Wirbelstrukturen zu lokalisieren bzw. Anhaltspunkte für Unklarheiten in der vibrometrischen Untersuchung (Knicke, Sprünge, ...) zu finden.

Die zu beachtenden Punkte in den Schlierenaufnahmen sind deshalb:

1. Pulsation des Umrisses
2. Zonen der Entstehung von grossen Wirbeln
3. Beschleunigungs- / Staupunkte in der Flamme

Diese Punkte können offensichtlich nur mit einer Reihe an Bildern, wie sie in Abbildung 4.5 dargestellt ist, untersucht werden.

ad 1: Oben dargestellte Beispielfolge stellt nur einen kurzen Ausschnitt eines Pulsationszyklus' dar. Die Änderung des Umrisses ist deshalb als stetiges Wachsen von Bild 1 bis hin zu Bild 4 erkenntlich. Wenn man die Reihe fortführt, ist wieder eine Kontraktion hin zum Zustand im ersten Bild zu beobachten.

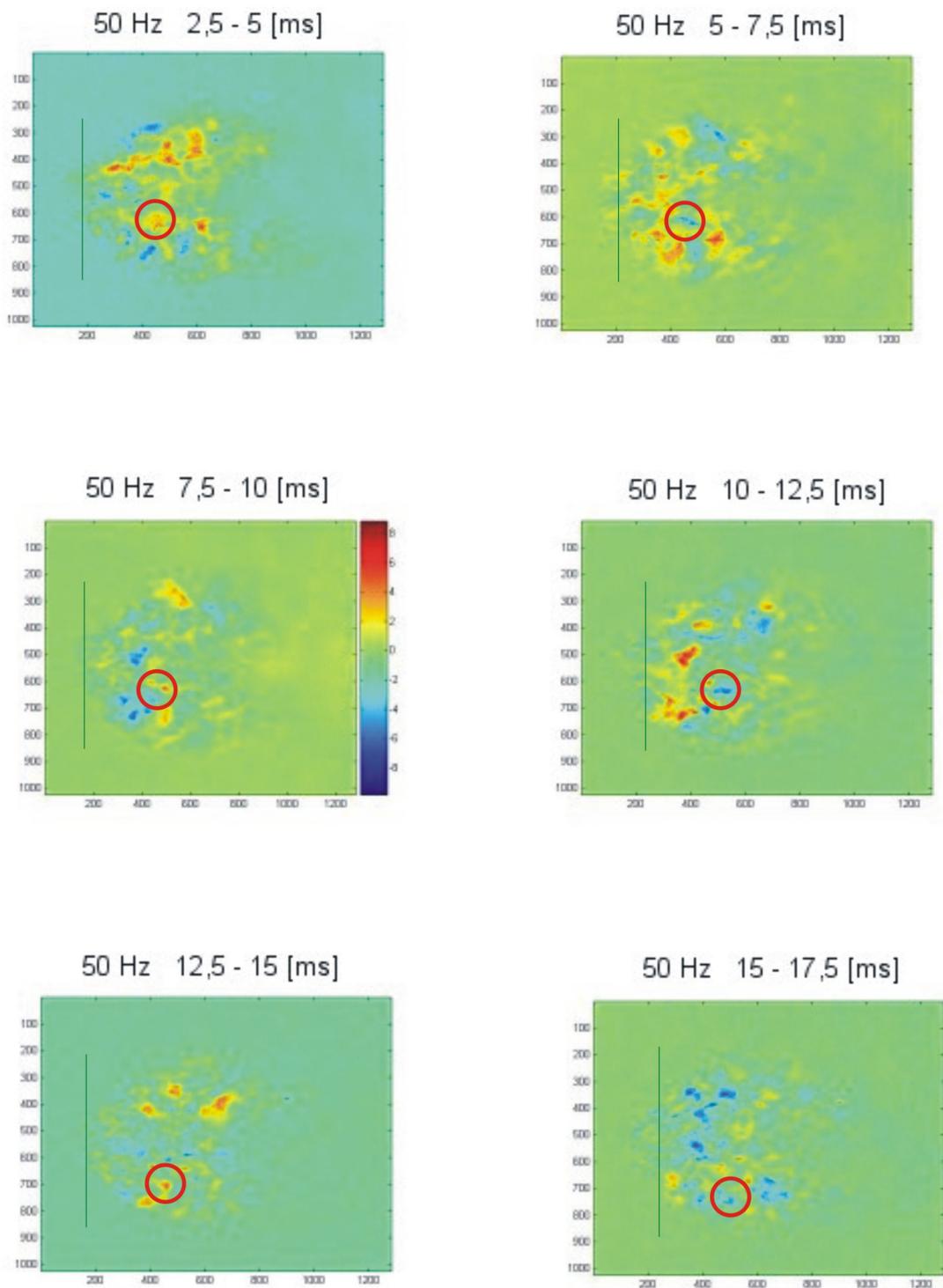


Abbildung 4.4: Zeitaufgelöste Reihe der Verbrennung mit Drall bei 50 Hz; Grün: Position des Zündbeginnes; Rot: periodischer Wechsel der Intensität



Abbildung 4.5: Beispiel einer kurzen Folge an Schlierenaufnahmen bei 50 Hz Pulsation. Zeitliche Laufrichtung von links oben nach rechts unten

ad 2: In den Aufnahmen sind mehrere Zonen, in denen grosse Strukturen entstehen - die also für die Energiefluktuationen in der Flamme von grosser Bedeutung sind - zu beobachten. Die auffälligsten befinden sich am Flammenrand oben und unten etwa in der Mitte der Aufnahme. Sie drehen entgegen der Strömung (also in der oberen Hälfte gegen den Uhrzeigersinn) und entstehen vor allem durch Reibungs- und Zähigkeitseffekte beim Kontakt der Flamme mit der in Ruhe befindlichen Umgebungsluft. Sie sind gemeinsam mit den Dichtestössen der Pulsation hauptsächlich für die äussere Kontur der Flamme verantwortlich. Diese Wirbel sind für einen Strahl bei Eintritt in ein langsames Medium charakteristisch. In der Literatur werden sie als „Kelvin-Helmholtz - Wirbel“ bezeichnet [15]. Innerhalb einer Brennkammer kann beobachtet werden, dass sie sich beim Auftreten von Verbrennungsinstabilitäten stabilisieren und somit einen beträchtlichen Anteil an entstehenden Brennkammerschwingungen besitzen [4].

ad 3: Beschleunigungs- oder Staupunkte erscheinen in der Schlierenaufnahme durch die Verdünnung bzw. Verdichtung des Mediums als hellere bzw. dunklere Bereiche. Im Beispiel sind solche Effekte gut im Zentrum der Flamme zu beobachten. Sie zeigen deutlich die wandernden Stossfronten der Pulsation.

Auswertung der Vibrometrie

Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, werden nach der vibrometrischen Aufzeichnung drei unabhängige Programme zur Spektralanalyse bzw. zur Ermittlung der Phasenverschiebung verwendet. Die graphischen Outputs dieser Analysen können nun zur besseren Vergleichbarkeit für die entsprechende Messreihe (Frequenz, Position auf der z-Achse) auf einem Blatt zusammengefasst werden. Abbildung 4.6 zeigt eine solche Zusammenfassung.

Die einzelnen Bilder sollen nun beginnend von links-oben nach rechts-unten erläutert werden:

Die Überschrift gibt kompakt den betrachteten Zustand wider. In diesem Beispiel bedeutet die Folge „FJ-73[Hz]z=0“ dass die Messung am Free-Jet (FJ) bei einer Pulsationsfrequenz von 73 Hz ($\approx 75\text{Hz}$) an der Linie $z=0$, also in der Symmetrieachse, durchgeführt wurde.

Bild 1 - Gesamtspektrum Dieses Bild zeigt den niederfrequenten Bereich (bis ca. 1 kHz) des ermittelten Frequenzspektrums. Die einzelnen Signale stellen den gesamten Messverlauf für verschiedene Messpositionen entlang der betrachteten Linie dar. Deutlich zu erkennen sind die Peaks der Pulsationsfrequenz sowie der mitangeregten harmonischen Moden höherer und niederer Ordnung. Auffällig ist auch noch der starke Intensitätsunterschied der Signale im extrem niederfrequenten Bereich. Diese Differenz nimmt mit steigender Frequenz ab. Daraus lässt sich ableiten, dass die Empfindlichkeit des Gesamtsystems nach oben hin abnimmt.

FJ-73[Hz]-z=0

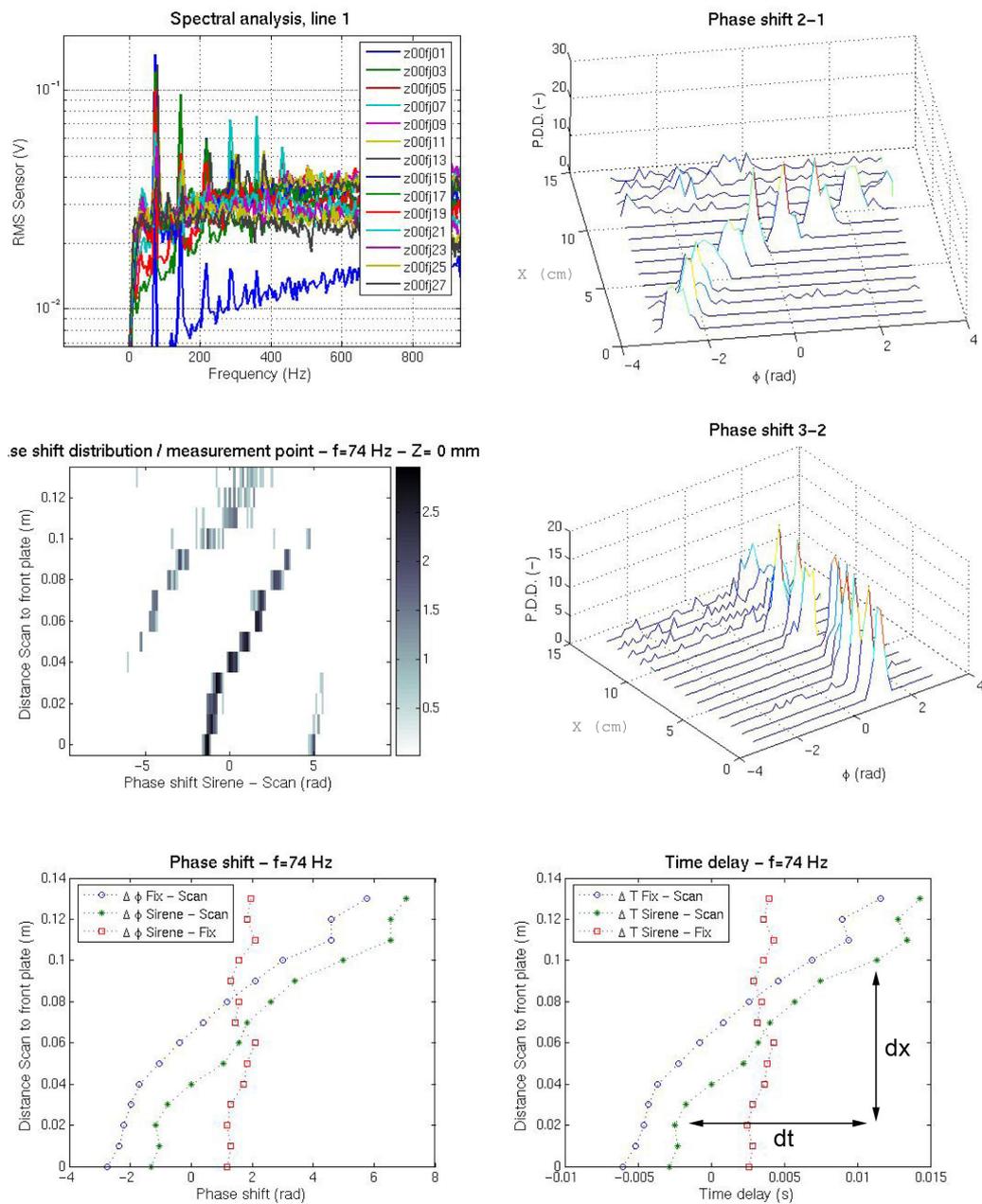


Abbildung 4.6: Beispiel für die Zusammenfassung der graphischen Outputs

Bild 2 - Phase Raster/Referenz In dieser Grafik wird der gemessene Phasenunterschied zwischen bewegtem und Referenz-Vibrometer (x-Achse) über der Entfernung zum Düsenaustritt (y-Achse) dargestellt. Der Wert auf der z-Achse gibt die Anzahl der Messwerte an, die auf das entsprechende ortsdiskretisierte Element zutreffen.

Für eine gleichmässige Strömung mit konstanter Geschwindigkeit wird diese Darstellung eine Gerade in der x-y-Ebene liefern ($\rightarrow s = v \cdot t$). Jede Abweichung von dieser Geraden stellt also eine Beschleunigung oder Verzögerung der Strömung in axialer Richtung dar. Der entscheidende Punkt bei dieser Analyse ist das Entdecken einer Hauptstruktur. Dies ist vor allem bei hochturbulenten Bereichen oft sehr schwer möglich.

Bild 3 - Scatterplot Diese Ansicht zeigt den selben Sachverhalt wie die vorhergehende, allerdings in 2-D mit dem z-Wert als Grauskalenintensität. Zur genaueren Analyse einer Struktur ist diese oft geeigneter als die 3-D Darstellung, da diese - vor allem bei breit gefächerten Strukturen - rasch unübersichtlich werden kann. Mehrere markierte Werte bei ein und demselben Abstand zur Düse entstehen dadurch, dass die Phasenverschiebung in Radiant, also in einem fix definierten Bereich ($\pm 2\pi$) angegeben wird. Verschiebungen, die diesen Bereich überschreiten, treten dementsprechend periodisch umgewandelt auf (Bsp: Bereich 4 rad; Verschiebung +6 rad \rightarrow Anzeige = -2 rad).

Bild 4 - Phase Referenz/Sirene Dieses Bild entspricht von den Grundlagen her exakt Bild 2. Nur wird hier der Phasenunterschied zwischen Referenzvibrometer und TTL-Signal der Sirene dargestellt. Da dieses Vibrometer nicht bewegt wird, sollte die hier dargestellte Kurve möglichst einer Geraden bei einem fixem Verschiebungswert entsprechen. Sie kann somit als Maß für die Güte der Messreihe dienen.

Bild 5 - Phase Shift Das Phase-Shift-Diagramm fasst die Phasenverschiebungen aller drei Signale (Scan,Referenz und TTL-Sirene) zueinander als 2-D - Linien zusammen. Diese Darstellung dient hauptsächlich als Vorstufe zu Bild 6.

Bild 6 - Time Delay Als letzte Darstellung dient die Gegenüberstellung von Zeitverschiebung zwischen den Signalen zu Abstand von der Düse. Im Vergleich zu Bild 5 wird hier die Abszisse mithilfe der Frequenz von einer Winkeldifferenz in eine Zeitdifferenz umgerechnet. Der Hauptvorteil dieser Darstellung liegt jetzt darin, dass die Kurve eine Beziehung zwischen Weg und Zeit darstellt. Es kann also - einen annähernd gleichmässigen Verlauf vorausgesetzt - über die mittlere Steigung des Plots die Bewegungsgeschwindigkeit der beobachteten Struktur abgeschätzt werden (siehe Skizze in Abbildung 4.6).

4.1.2 Gegenüberstellungen

Die Gegenüberstellung wird bei den Free-Jet-Betriebspunkten von 25, 175 und 0 Hz Pulsation durchgeführt. Diese Punkte wurden deshalb ausgewählt, da das gesamte System bei den beiden ersten Punkten in Resonanz steht und so ein deutlicher Unterschied zum

nicht-pulsierten Betrieb gegeben ist.

Leider kann nur der Fall des Free-Jets behandelt werden, da aufgrund von Lieferproblemen bei den Brennkammerscheiben keine repräsentativen Ergebnisse für CCD- und Schlierenuntersuchung mit angeschlossener Brennkammer vorliegen. Vibrometrische Scans konnten zum Teil noch durchgeführt werden. Diese Ergebnisse befinden sich als Ergänzung in Anhang A.

Free-Jet bei 25 Hz Pulsationsfrequenz

Dieser Zustand wird betrachtet, da bei 25 Hz die niedrigste beobachtete Resonanzfrequenz des Systems liegt. Zu erwarten sind folgende Punkte:

- deutliche Pulsation von Intensität und Kontur der Flamme
- klare Erkennbarkeit der auftretenden Strukturen

CCD: Die CCD-Aufnahmen bestätigen diese Annahmen nur teilweise, wie Abbildung 4.7 zeigt:

An den Bildern „Rms“ und „MAXIMUM“ sind diese prognostizierten Fluktuationen innerhalb der Flamme zu erkennen. Die deutliche Änderung der Flammenkontur über die Pulsation ist aus der unterschiedlichen Form der Bilder „MINIMUM“ und „MAXIMUM“ zu erkennen.

Wandernde Strukturen können bei dieser Darstellungsform nur schwer ausgemacht werden. Es treten zwar klar erkennbare Intensitätssprünge innerhalb der Flamme auf (siehe Bild „Rms“ zwischen 300 und 600 Pixel Abstand), diese verlieren sich allerdings schnell im hinteren Bereich der Flamme. Als Grund dafür kann die geringe Pulsationsfrequenz vermutet werden. Durch den relativ grossen Abstand zwischen zwei Pulsationen ist für die Strukturen ausreichend Zeit vorhanden, sich mit der seitlich angesaugten Luft zu vermischen und so deutlich an Stärke zu verlieren.

Die oben getroffenen Annahmen können mit den folgenden beiden Untersuchungsmethoden überprüft werden.

Schlierenaufnahmen: Hier sollte vor allem die starke Pulsation aufscheinen. Da die unterste Resonanzfrequenz angeregt wird, ist eine grosse Amplitude zwischen Expansion und Kontraktion zu erwarten. Abbildung 4.8 zeigt eine Folge von sechs Aufnahmen bei 25 Hz.

Die erste Aufnahme zeigt den linken Teil der Flamme in der Kontraktionsphase, während im rechten Teil gerade das Ende (der Zusammenbruch) einer Expansion stattfindet. In den Bildern zwei und drei kann die stetige Expansion des vormals eingeschnürten Teiles bis hin zu einer explosionsförmigen Struktur beobachtet werden. Erkennbar ist auch der vertikale Dichtestoss an der Grenze zwischen dieser Struktur und dem nächsten, wieder eingeschnürten Teil der Flamme.

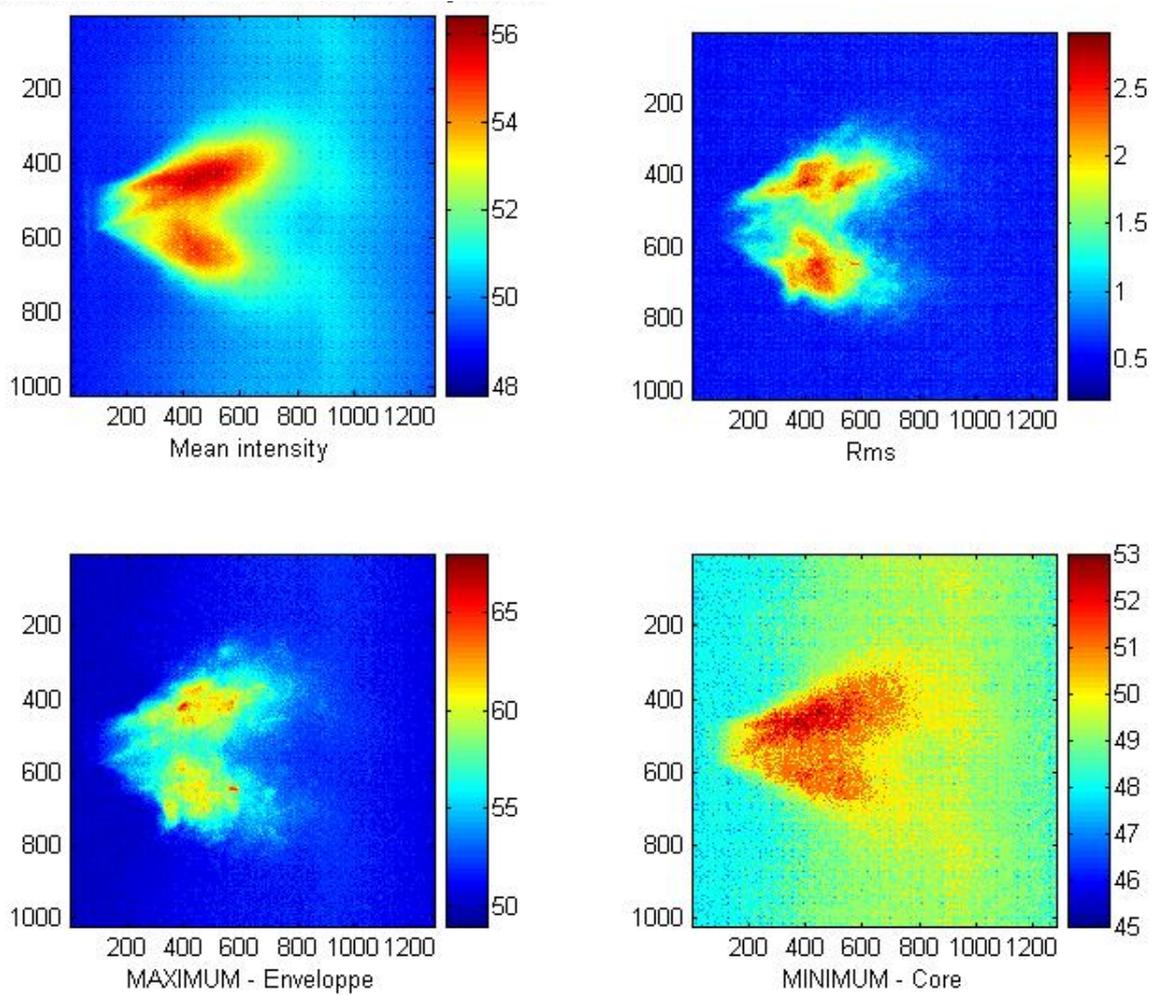


Abbildung 4.7: Die vier statisch ermittelten Bilder bei einer Pulsation von 25 Hz

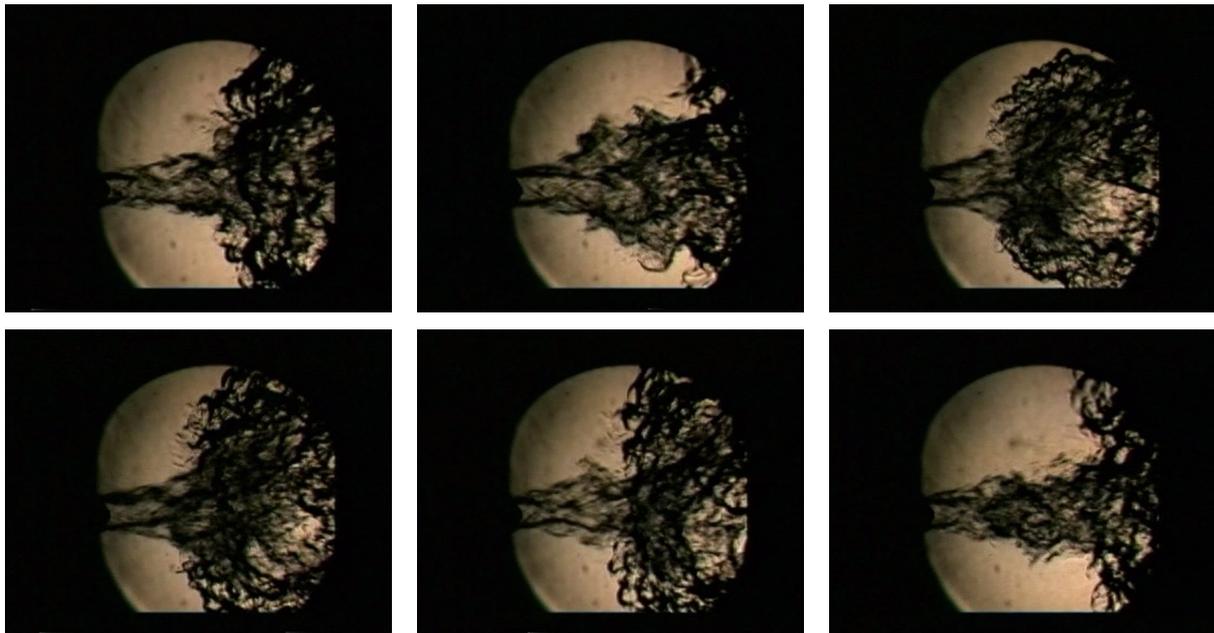


Abbildung 4.8: Folge von Schlierenaufnahmen der Pulsation bei 25 Hz

Über die Bilder vier und fünf wird dieser Stoss stromabwärts transportiert und erzeugt zwei grosse symmetrische Wirbel, die einerseits oben erwähnte Einschnürung der nächsten Phase bewirken und andererseits zum Zusammenbruch des Explosionsballes führen.

Bild sechs schliesst den Kreis. Wie in Bild eins ist wieder der Zusammenbruch rechts und die beginnende Expansion im linken Teil zu erkennen.

Dieser starke Unterschied zwischen Expansion und Kontraktion mit gleichmässiger Erweiterung und schnellem Zusammenbruch führt im Versuchsbetrieb zu einer charakteristischen Geräuschentwicklung. Dieses „Knattern“ - ähnlich dem Start eines Traktors - erreicht eine deutlich höhere Intensität als das Verbrennungsgeräusch der umgebenden Frequenzen und erzeugt einen spürbaren Schalldruck, der immer die Gefahr einer Flammenauslöschung mit sich bringt.

Vibrometrie Die Vibrometrie liefert die höchste Genauigkeit der verwendeten Methoden was die Verfolgung auftretender Strukturen betrifft. Die Analyse sollte also deutliche Ausschläge bei Frequenzspektrum und Waterfall-Darstellung zeigen.

Die oben angesprochenen Punkte sind deutlich auszumachen.

Frequenzspektrum: Hier tritt ein sehr hoher Peak an der Anregefrequenz auf. Die Tatsache, dass es nur sehr wenig mitangeregte harmonische Frequenzen gibt (etwa bei 50 Hz und Vielfachen davon) und diese auch nur auf einzelne Messsignale beschränkt sind, bestätigt die Annahme, dass die aufgebrachten 25 Hz wirklich die Grundfrequenz des Systems darstellen.

Bild 2-4: Das Waterfall-Diagramm für die Phasenbeziehung zwischen Referenz und Scan, sowie der daraus abgeleitete Scatterplot zeigen, dass es praktisch keine Strukturen gibt,

FJ-25[Hz]-z=0

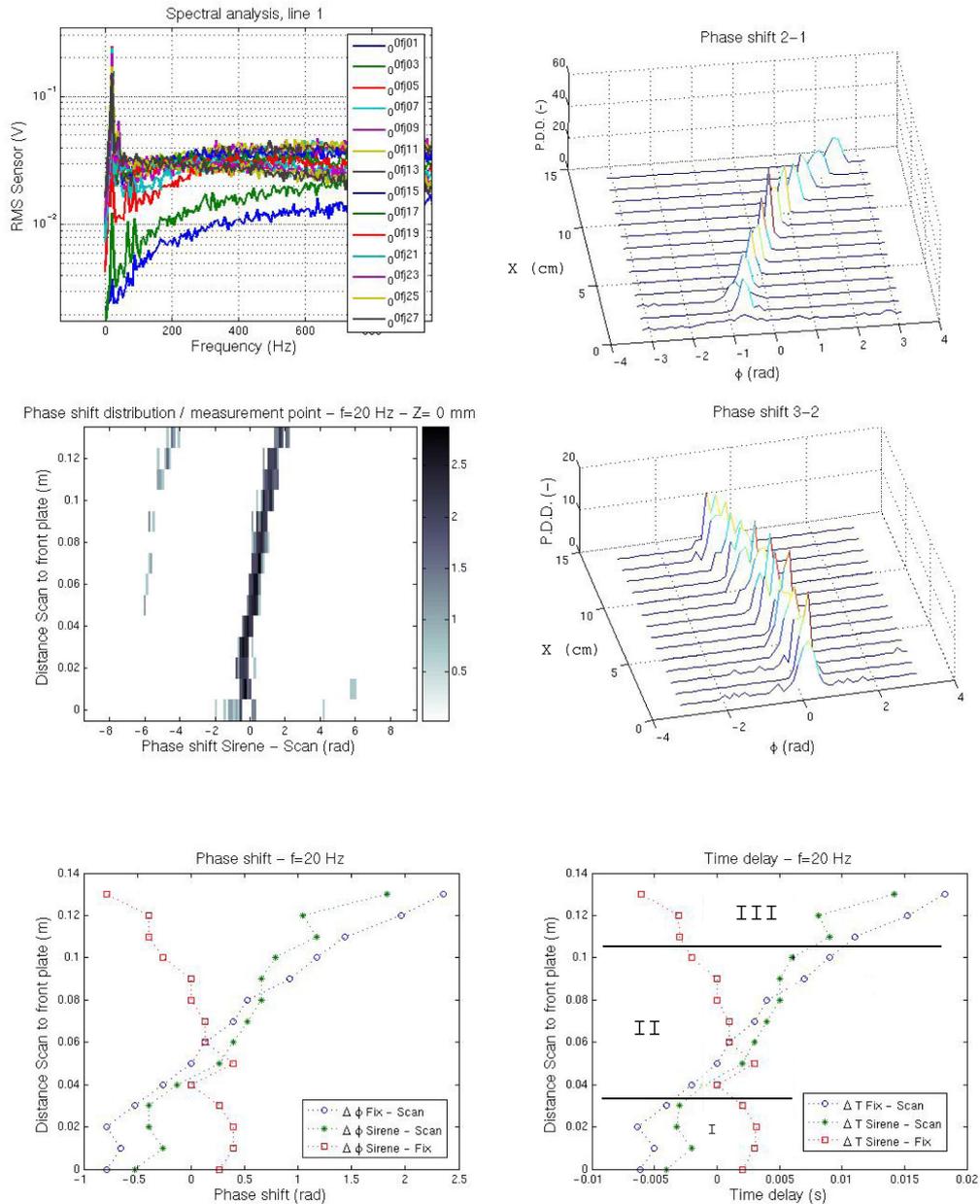


Abbildung 4.9: Zusammenfassung der vibrometrischen Analyse bei 25 Hz Pulsation

die von der Grundfrequenz abweichen; Es tritt nur eine klare Linie auf. Die gleichmässig grösser werdende Abweichung von der Geraden nach unten über die Länge der Flamme (also eine Verlangsamung der Struktur) kann als Effekt der Vermischung mit der Umgebungsluft gedeutet werden. Diese Behauptung lässt sich durch eine Einteilung der Flamme in drei Zonen veranschaulichen (Abb. 4.10):

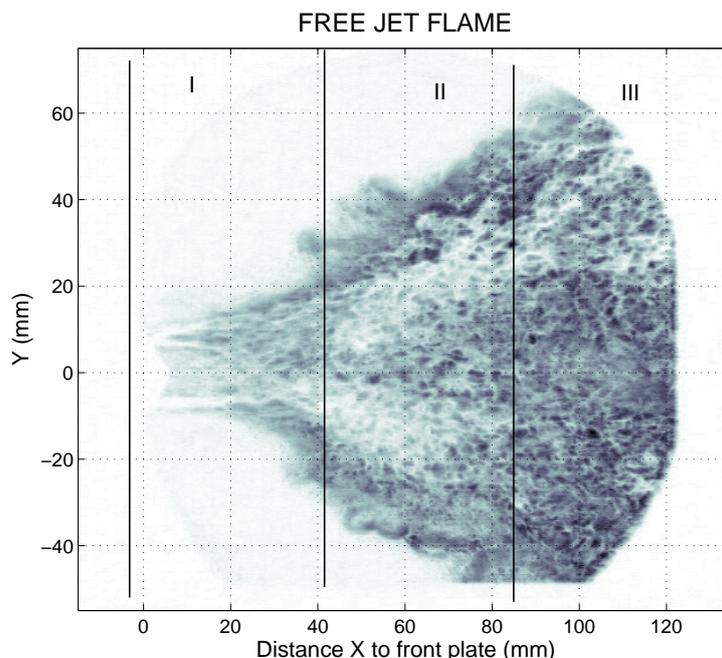


Abbildung 4.10: Aufteilung der Flamme in eine Ausströmungs- [I], eine Expansions- [II] und eine Vermischungszone [III]; Quelle: [3]

Wenn man diese Einteilung mit der Position der Geschwindigkeitsabweichung vergleicht, sieht man, dass diese in etwa mit dem Beginn der Vermischungszone stark zunimmt. Diese Änderung der Geschwindigkeit gibt also den Verlust an axialem Fortschritt zu Gunsten der turbulenten Vermischung an.

Allerdings ist bei dieser Deutung mit zu berücksichtigen, dass die Güte der Messreihe in grösserer Entfernung zur Kopfplatte abnimmt, wie am wachsenden Phasenunterschied zwischen Pulsation und Referenz im zweiten Waterfall-Diagramm zu beobachten ist. Eine zuverlässige Quantifizierung dieser Abbremsung ist also nicht durchzuführen.

Bild 5+6: Auch diese beiden Plots lassen wieder klar die Gleichmässigkeit der Struktur- bewegung - nach einer kurzen turbulenten Phase kurz nach Düsenaustritt - erkennen. Gemeinsam mit den Unregelmässigkeiten im oberen Bereich lässt sich das 3-Zonen-Modell aus Abbildung 4.10 erkennen und skizzieren. Für die Geschwindigkeit im linearen Bereich wurde ein Wert von etwa 10.6 m/s ermittelt. Dies ist in etwa die Hälfte der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit, was die Annahmen für grosse Strukturen aus Kapitel 3.3.2 bestätigt.



Abbildung 4.11: Schlierenaufnahmen der Pulsation bei 175 Hz

Free-Jet bei 175 Hz Pulsationsfrequenz

Bei einer Erregung mit 175 Hz sind ähnliche Ergebnisse wie im letzten Punkt zu erwarten, da diese Frequenz ein ganzzahlig Vielfaches der vorigen ist. Allerdings sollten durch die Erregung einer höheren Harmonischen zur Grundfrequenz mehrere angeregte Frequenzen und somit auch mehrere parallel durchlaufende Strukturen auftreten.

Für diesen Zustand stehen nur Schlierenbilder und vibrometrische Daten zu Verfügung, da die Bestätigung der Grundfrequenz von 25 Hz erst nach Ende der CCD-Aufnahmen gefunden wurde und dieses ungeradzahlig-Vielfache in dieser frühen Phase deshalb keine Beachtung fand.

Schlieren: Der erste Blick auf Abbildung 4.11 zeigt die klar veränderte Aussenkontur der Flamme durch die höhere Pulsationsfrequenz. Die Expansionsstöße erfolgen nun schneller, als die Vermischung mit der Umgebungsluft sie wieder kompensieren kann. Die Folge ist ein „welliger“ Umriss der Verbrennung. Diese Wellen weisen allerdings eine deutlich geringere Amplitude auf als bei der Erregung mit der Grundfrequenz. Gleichzeitig entsteht durch die höhere Anzahl der gleichzeitig auftretenden Dichteschwankungen ein homogenerer Flammenkern.

Diese letzten beiden Punkte können als Grundlage für eine deutlich stabilere Verbrennung als in der Resonanzfrequenz angesehen werden. Diese Pulsation weist auch eine deutlich geringere Geräuscentwicklung auf.

FJ-175[Hz]-z=0

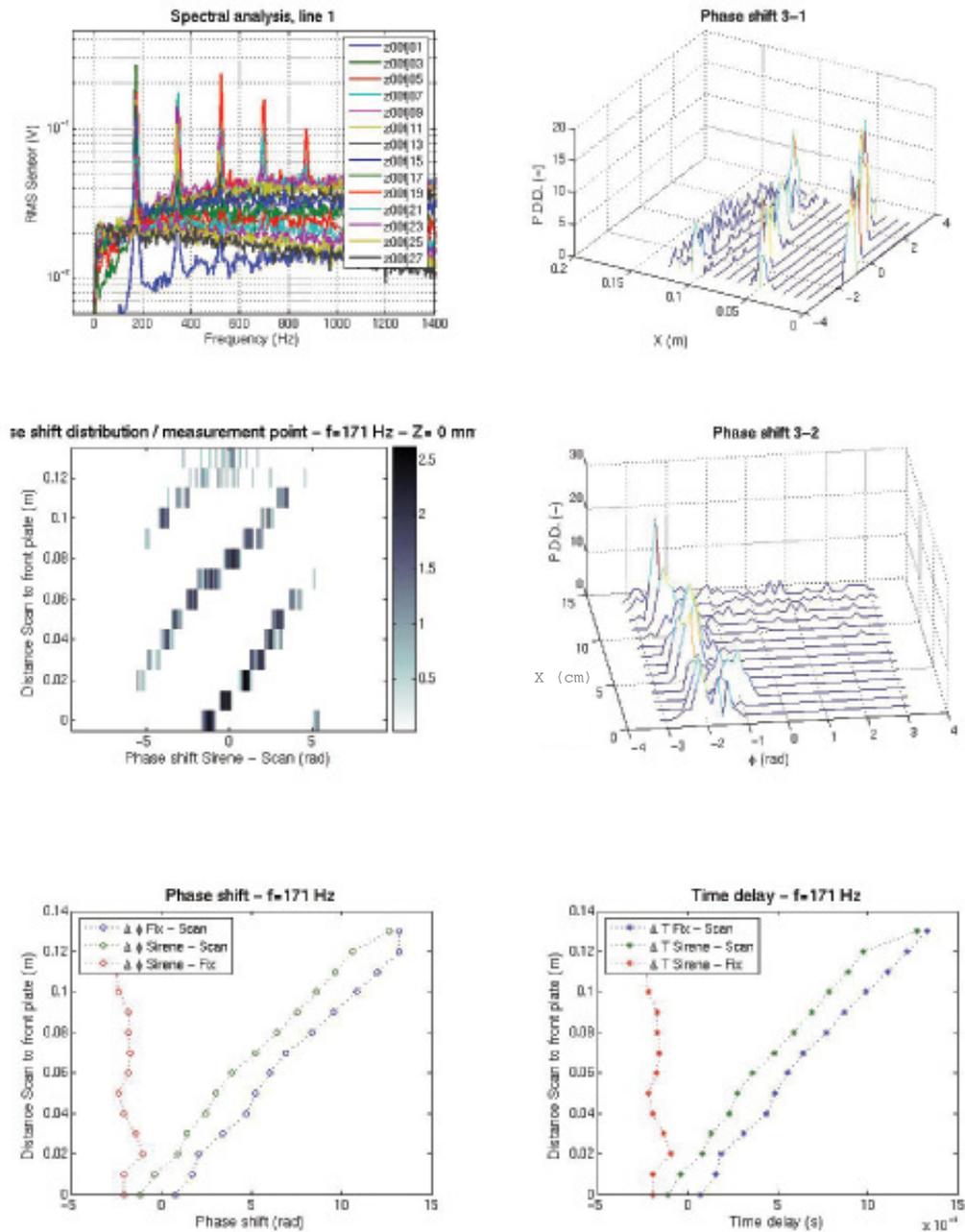


Abbildung 4.12: Ergebnisse der Messung bei 175 Hz Pulsation

Vibrometrie: *Frequenzspektrum:* Wie im ersten Bild von Abbildung 4.12 zu sehen ist, ist die Energie der Flamme nicht mehr auf die Anregfrequenz beschränkt. Bis zum Bereich um 1 kHz treten noch deutlich die geradzahlig Vielfachen der Pulsation - allerdings mit stetig sinkender Amplitude - auf. Das bedeutet, dass innerhalb der Flamme selbständig kleinere Strukturen auftauchen.

Bild 2-4: Diese Bilder bestätigen die oben getroffene (und auch in den Schlieren-Aufnahmen beobachtete) Annahme von mehreren, parallel auftretenden Strukturen. Es sind deutlich zwei verstärkte Linien erkennbar, bis die Flamme im Endbereich (im Waterfall-Plot in positiver y-Richtung) durch die Durchmischung mit der Umgebung in starke Turbulenz umschlägt.

Der Verlauf der beiden Strukturen ist annähernd linear. Dies lässt im Vergleich zu Resonanz auf eine homogenere Temperaturverteilung in der Flamme schliessen. Da die Phasendifferenz zwischen Pulsation und Referenz annähernd konstant bleibt, ist die Güte dieser Messreihe als hoch einzustufen.

Bild 5+6: Beide Plots bestätigen die Gleichmässigkeit und Linearität aller Phasenverschiebungen zueinander. Dadurch wird eine Geschwindigkeitermittlung über den Grossteil der Flammenlänge möglich. Das errechnete Ergebnis liegt bei 10.75 m/s, also wiederum im erwarteten Bereich.

Free-Jet ohne Pulsation

Der Betrieb ohne Pulsation diene vor allem als Vergleichswert der natürlichen Fluktuation des Umrisses, verursacht durch Reibungs- und Vermischungsvorgänge, zu der Änderung aufgrund aufgebrachter Anregung. Dieser Vergleich ist vor allem für die vibrometrische Untersuchung von Bedeutung. Liefert sie in diesem Fall kein - oder ein sehr schwaches - Signal, reicht die Empfindlichkeit des Systems nur für bereits verstärkte Schwingungen. Können aber auch in diesem Betriebspunkt klare Strukturen ausgemacht werden, ist der Beweis der Tauglichkeit zur Untersuchung von selbsterregten Instabilitäten in der Flamme erbracht. Diese Behauptung ist insofern stichhaltig, da jede detektierte Struktur bei ausgeschaltetem Pulsator nur selbsterregt sein kann.

CCD: Wie schon bei der Vorstellung der CCD-Ergebnisse erwähnt, weicht die nicht pulsierte Flamme in Bezug auf Flammenform und Intensitätsverteilung in der Flamme deutlich von der pulsierten ab. Abbildung 4.13 zeigt die vier ermittelten Bilder für den quasi-stationären Betriebspunkt:

Charakteristisch für diese Flamme ist der beträchtlich „glattere“ Umriss im Vergleich zum pulsierten Betrieb. Auffällig ist auch die geringere Intensitätsdifferenz zwischen Mittelwert und Max bzw. Min. Diese somit auch zeitlich gleichmässigeren Verteilung der Intensität lässt auf eine deutlich ruhigere, aber dadurch auch weniger durchmischte Flamme schliessen.

Schlierenaufnahme: Von der Schlierenaufnahme ohne Pulsation ist keine starke periodische Änderung des Umrisses oder der Kernstruktur zu erwarten. Interessant macht diese

...CD-Aufnahmen\20050525 Images 0-49

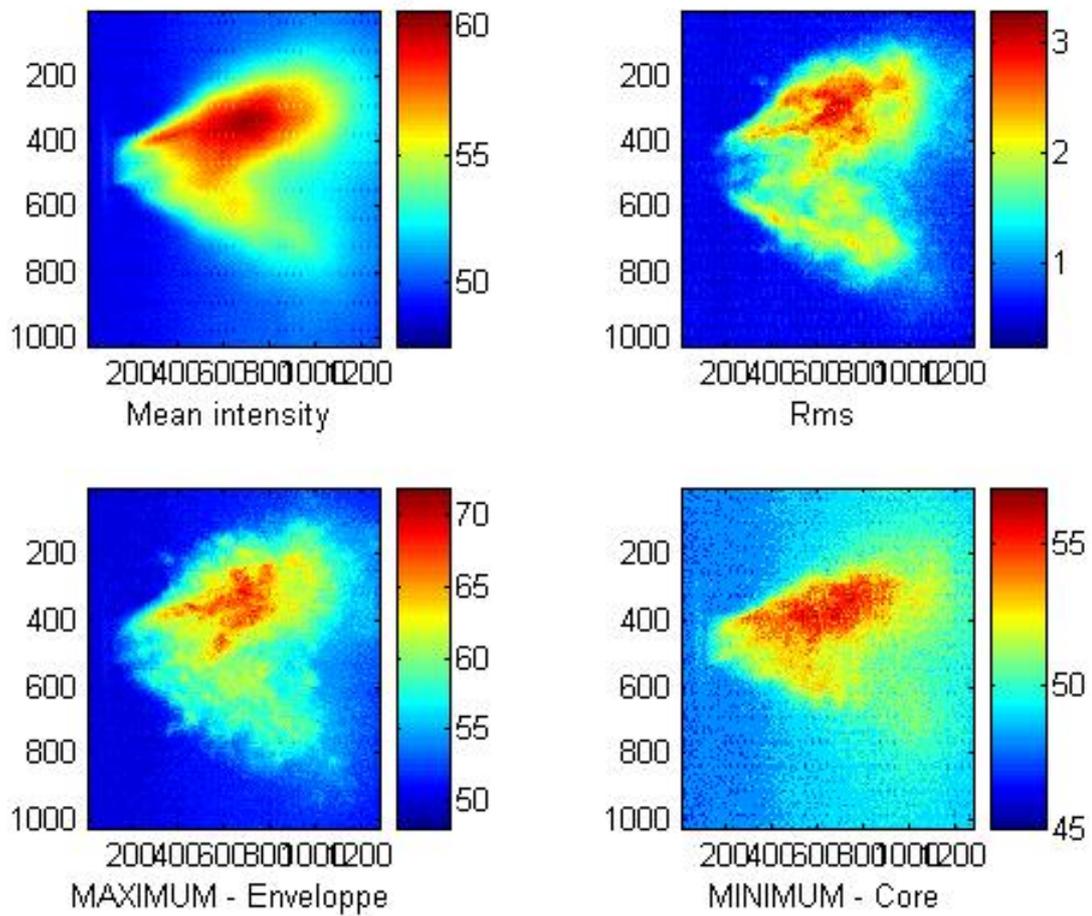


Abbildung 4.13: Max, Min, Mittelwert und RMS - Bilder für die nichtpulsierende Flamme



Abbildung 4.14: Schlierenaufnahmen der Flamme ohne Pulsation

Untersuchung allerdings die Möglichkeit, Verwirbelungen und Wellenstrukturen, die ausschließlich dem Ausströmprozess zuzurechnen sind, zu erkennen. Diese können dann von den Werten bei Pulsation abgezogen werden, um den - sozusagen - tärten Einfluss der Pulsation zu erkennen.

Wie Abbildung 4.14 zeigt, sind noch geringe Wirbelstrukturen an den Rändern erkennbar. Diese sind allerdings nicht mehr intensiv genug, um die Flammenform stärker zu beeinträchtigen. Es bildet sich die klassische Kegelform eines Freistrahles bei Eintritt in ein dünneres Medium aus.

Auch eine Verschiebung von dichten und verdünnten Zonen tritt hier nicht mehr auf. Die Flamme kann konstant in drei Bereiche geteilt werden:

- Den Bereich horizontaler Ausströmung nach der Düse
- Den Bereich dichter Verbrennung am Expansionsbeginn
- Den Bereich starker Verdünnung und Verwirbelung innerhalb des Expansionskegels

Vibrometrie: Das oben erwähnte Fehlen von erregten, sich bewegenden Strukturen wirkt sich am stärksten auf die Ergebnisse der Vibrometrie aus:

Die Zusammenfassung enthält in diesem Fall nur mehr fünf Bilder, da eine Phasenverschiebung zur Sirene ohne Pulsation nicht zielführend ist. Diesem Punkt wird auch in den Phase-Shift und Time-Delay Diagrammen Rechnung getragen, die jetzt nur mehr eine Kurve (Referenz zu Scan) enthalten.

FJ-0[Hz]-z=0

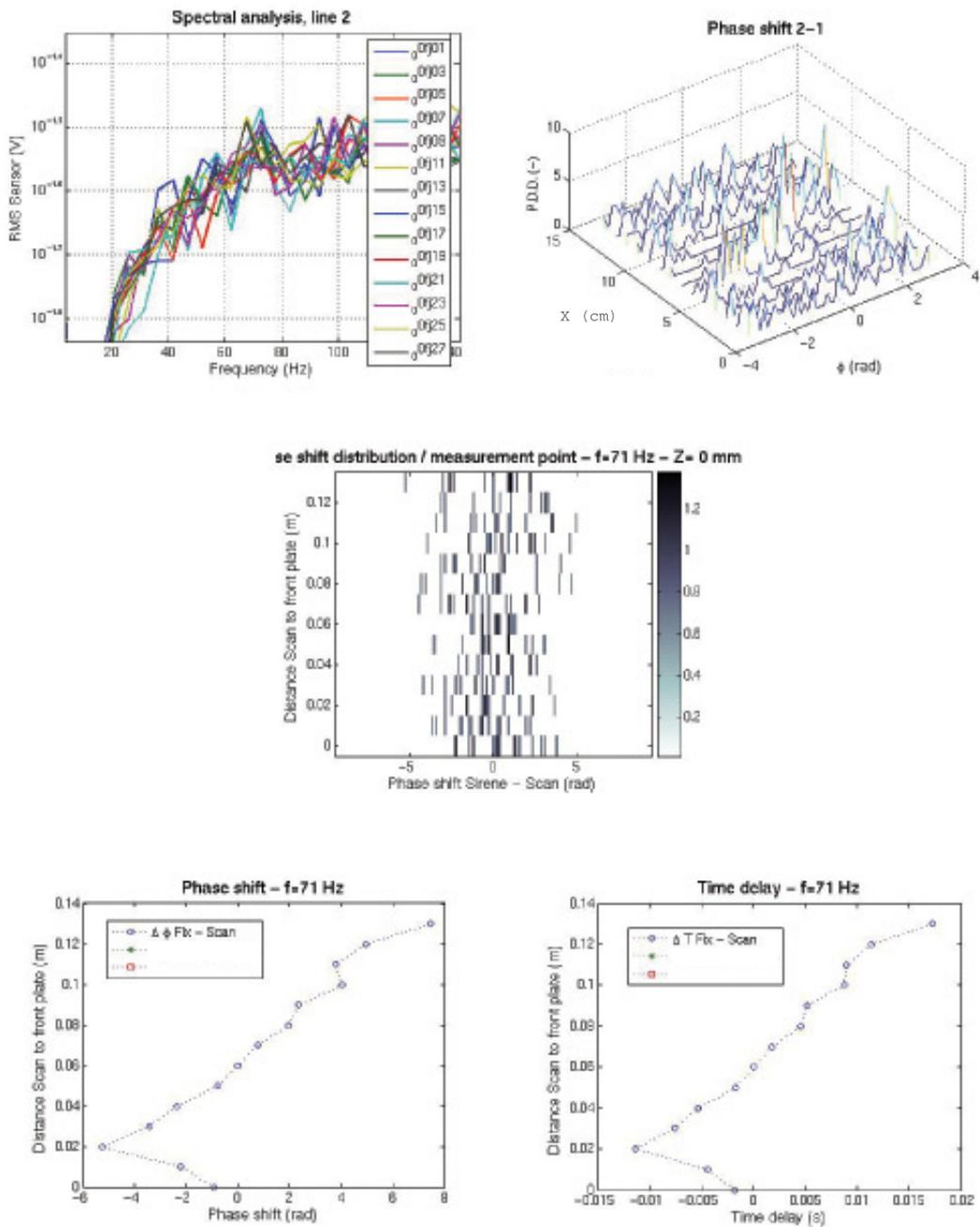


Abbildung 4.15: Vibrometrische Untersuchung des ungelasteten Freistahles

Frequenzspektrum: Das Frequenzspektrum zeigt nur einen Ausschlag niedriger Intensität (man vergleiche die Skala links mit der eines pulsierten Falles), diesen allerdings auf einer klaren Frequenz um etwa 75 Hz. Das ist insofern überraschend, da ja keine Anregung stattfindet. Es muss sich also um eine Eigenresonanzfrequenz des Aufbaues selbst, der in die Flamme übertragen wird, handeln.

Bilder Zwei und Drei: Der Waterfall-Plot lässt sehr schön eine einzelne wandernde Struktur inmitten vieler kleiner Peaks erkennen. Diese behält ihre Linearität beinahe über die gesamte Länge bei, sie wird also durch Vermischungsvorgänge nicht so stark beeinträchtigt, wie im pulsierten Fall. Der Scatterplot ist für diesen Fall weniger brauchbar, da die vielen kleinen Ausschläge neben der Struktur die Ansicht von oben unübersichtlich gestalten.

Die letzten beiden Plots: Da die Vergleichswerte des Pulsators wegfallen, ist nur mehr eine Kurve pro Diagramm darzustellen. Diese zeigt allerdings wieder deutlich die oben beobachtete, fortschreitende Struktur - hier rechnerisch mit 71 Hz angegeben. Vom turbulenten Anfang nach Austritt an der Düse abgesehen, kann man wiederum die Linearität - wenn auch mit etwas geringerer Steigung als in den letzten betrachteten Punkten - erkennen. Die errechnete Geschwindigkeit liegt bei 4,4 m/s. Dies ist in etwa die Hälfte der Geschwindigkeit bei Pulsation.

Zusammenfassung der Vibrometrie ohne Pulsation: Das Auftreten einer klar erkennbaren Struktur in der nicht-pulsierten Flamme, sichtbar in fast allen Darstellungarten (ausgenommen dem Scatterplot), lässt den eindeutigen Schluss zu, eine selbsterregte Verbrennungsinstabilität detektiert zu haben. Das Verfahren der Vibrometrie ist damit dazu fähig, solche Störungen bereits bei niedrigen Amplituden - also etwa schon in der Entstehung - erkennen zu können.

4.1.3 Diskussion der Methoden

Was sagen diese drei beobachteten Fälle über die Anwendbarkeit bzw. das Anwendungsgebiet der untersuchten Methoden aus? Eine separate Betrachtung der Vor- und Nachteile für jede Methode liefert ein übersichtliches Ergebnis:

CCD-Analyse: Die CCD-Analyse hat ihre Stärken in der guten Steuerbarkeit der Auslösezeiten und der automatischen Diskretisierung der Flamme in Pixel. Diese vereinfacht eine folgende Erfassung und Weiterverarbeitung durch Rechnereinsatz. Weiters ist der Aufbau des Systems unkompliziert und schnell durchzuführen.

Die Schwächen dieser Methode liegen klar in der Integration über die Sichtachse sowie der aufwändigen Ermittlung quantitativer Größen.

Das Anwendungsgebiet für diese Untersuchung liegt demnach eher in der ersten Charakterisierung einer Flamme. Soll nur die Form oder die Intensität (→ Wärmeabstrahlung!!) einer Verbrennung zu präzisen Zeitpunkten ermittelt werden, bietet sich diese Methode durch ihre unkomplizierte Handhabung an. Für genauere Untersuchungen an der reinen

Flamme (ohne Verfolgung von Seeding-Material oder Ähnlichem) ist sie den bisherigen Erfahrungen nach weniger zu empfehlen.

Schlierenmethode: Die Vorteile der Schlierenmethode liegen in der Übersichtlichkeit der Aufnahmen bei gleichzeitig hoher Detaillierung. Das System ist, da es vorwiegend aus einfachen optischen Komponenten besteht, auch deutlich preiswerter als etwa die Untersuchung per CCD-Kamera. Bei Einsatz einer Mehrfarbenblende ist auch die Ermittlung der Richtung eines Dichteunterschiedes unkompliziert durchzuführen.

Als nachteilig an dieser Methode sind der hohe Zeitaufwand zur Justierung des Aufbaues und die ebenfalls integrale Betrachtung entlang des optischen Weges zu nennen. Weiters ist eine Quantifizierung der erkennbaren Strukturen nur mit sehr genauen Messgittern und guter Kenntnis der eingesetzten Optik im Hinblick auf Verzerrung, etc. möglich.

Die Schlierenmethode in Verbindung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera ist erste Wahl, wenn eine Verbrennung rein visuell auf Wirbelerscheinungen oder andere Strukturen in der Flamme untersucht werden soll. Da die Ermittlung quantitativer Daten aber mit sehr grossem Aufwand verbunden ist, wird sie eher als unterstützende Untersuchung denn als Primärwerkzeug Anwendung finden.

Vibrometrie: Hauptvorteil der Vibrometrie ist die äusserst hohe Genauigkeit und Geschwindigkeit der Messung. Die schnell erhaltenen Frequenzsignale liefern eine Vielzahl von Informationen zur Weiterverarbeitung.

Als nachteilig ist die punktweise Messung zu nennen. Um die komplette Flamme charakterisieren oder eine Wirbelstruktur komplett erfassen zu können ist das Durchfahren eines Rasters nötig. Dessen Auflösung beeinflusst dann stark die Qualität der Ergebnisse. Ein weiterer negativer Punkt ist die Empfindlichkeit auf Erschütterung und/oder Positionsveränderung, die sich zwangsläufig aus der hohen Empfindlichkeit ergibt.

Zusammenfassend kann die Vibrometrie als eine Untersuchungsmethode, die punktweise äusserst exakte Daten mit hohem Informationspotential über die Strömung liefern kann, bezeichnet werden. Dies gemeinsam mit den moderaten Kosten macht sie zu einer echten Alternative für die Online-Kontrolle von Verbrennungsprozessen. Zum kurzen Testeinsatz ist sie allerdings aufgrund des hohen Aufwandes zur Signalverarbeitung nur bedingt geeignet.

Kapitel 5

Zusammenfassung

5.1 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel lässt die Arbeit noch einmal kurz Revue passieren. Dabei soll einerseits diskutiert werden, ob die gesteckten Ziele mit den verwendeten Methoden erreicht wurden, andererseits wird ein Ausblick auf die mögliche Zukunft des Projektes - sowohl instituts-intern als auch im industriellen Einsatz - gegeben.

5.1.1 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war die Charakterisierung der Flamme und die Erkennung simulierter CDOs durch die Methoden der CCD-Analyse, Schlierenvisualisierung und der Laser-Vibrometrie. Dazu war zuerst ein geeigneter Testbrenner mit angeschlossener Brennkammer zu konstruieren. Diese wurde aus Gründen des guten optischen Zugangs sowie minimaler Komplexität als modular aufgebauter „Dump Combustor“ ausgeführt.

Weitere konstruktive Aufgaben umfassten die Einbindung des Luftstrom - Pulsators und den Anschluss von Überwachungssensorik bzw. Steuerungselektronik.

Messungen wurden mit allen drei optischen Methoden bei charakteristischen Pulsationsfrequenzen durchgeführt. Als Messfrequenzen wurden 0 Hz (nicht erregt), 25 Hz (Grundresonanz des Systems) und 175 Hz (ungeradzahlig höhere Harmonische der Resonanzfrequenz) gewählt.

Während der Einsatz von CCD-Analyse und Schlierenvisualisierung für die Detektion von Instabilitäten als ungeeignet bzw. stark verbesserungswürdig bezeichnet werden darf, belegen die deutlich unterschiedlichen Signale von beeinflusster und unbeeinflusster Flamme bei der Vibrometrie die prinzipielle Tauglichkeit von Methode und Aufbau.

Gleichzeitig wurden auch Eigenheiten und Mängel dieser Konfiguration sichtbar. Diese reichen von kleineren Konstruktionsfehlern bis hin zu Adjustierungsproblemen der Laser im realen Einsatz - ohne darauf näher eingehen zu wollen.

Die Hauptidee der Arbeit war aber sicherlich, dass die Methode der Vibrometrie nicht nur tauglich zur Erkennung von selbsterregten Verbrennungsinstabilitäten ist, sondern dass sie zudem noch überraschend präzise Ergebnisse trotz widriger Umstände (Brennkammer-

scheiben minderer Qualität, eingeleitete Gebäudevibrationen trotz Federfundament) in kurzer Zeit zu liefern vermag. Diese Eigenschaft verbunden mit dem Preisverfall der letzten Jahre im Lasersegment macht sie zu einer ernstzunehmenden Alternative zu herkömmlichen Überwachungssystemen, vorallem für stationäre Verbrennungsturbinen. Kann die technische Herausforderung des optischen Zuganges trotz heftiger Vibrationen, wie sie in Flugtriebwerken vermehrt auftreten, gelöst werden, ist auch ein Einsatz in diesem Bereich denkbar.

5.1.2 Zukunft und Weiterentwicklung des behandelten Themas

Weiterentwicklung der Brennkammer / des Brenners

Als nächste Stufe des Ausbaues ist ein Umbau der Brennkammer hin zu geringem Überdruck vorgesehen. Eine - bisher noch nicht genauer ausgeführte - Möglichkeit dafür stellt eine Ummantelung der bestehenden Brennkammer mit einer Druckhülle dar. Durch diese Adaption würde sich auch die Charakteristik von einer einfachen Diffusionsbrennkammer hin zu einer 2-Zonen-Brennkammer ändern (vgl. Kapitel 2.2 Abbildung 2.15) .

Eine weitere Ausbaustufe wurde durch eine Umorganisation des bestehenden Luftversorgungssystems am Institut durch C. Santner ermöglicht. Die dadurch entstehende Anbindung an eine Luftvorerhitzung ermöglicht in Zukunft die Simulation von Hochtemperaturverbrennung, wie sie in einer Verbrennungsturbine nach Ausgang aus dem Verdichter stattfindet.

Die Fertigstellung dieser Installation mit Luftvorverdichtung und -erhitzung, sowie der Befuerung durch Kerosin anstelle des bisher verwendeten Erdgases ist mit dem Jahr 2008 projektiert.

Weiterentwicklung des Brennkammerprojektes am ITTM

Die Entwicklung des Testbrenners und die Tauglichkeitsuntersuchung der optischen Messmethoden sind nur zwei Schritte im Brennkammerprojekt des Instituts für Thermische Turbomaschinen an der TU-Graz. Gesamtziel ist es, im Zeitraum der nächsten fünf Jahre einen funktionsfähigen Brennkammerprüfstand zur Erprobung neuer Design und / oder Messtechniken zu entwickeln und zu installieren.

Folgende Arbeitsschritte sind in diesem Zeitraum vorgesehen:

- *Aufbau der Installation:* Dieser Punkt umfasst sowohl die Ausbaustufen der Brennkammer und des Brenners als auch den Anschluss an Hochdruckversorgung und Luftvorerhitzer.
- *Entwicklung und Anpassung der Messtechnik:* Diese Aufgaben sind im Programm TOSCA zusammengefasst. Die vorliegende Arbeit kann als ein Baustein dieses Blocks gesehen werden.
- *Verbrennungskontrolle:* Nach erfolgter Installation des Aufbaues und der Messtechnik richtet sich das Augenmerk auf die Verbrennungskontrolle an sich (Programm

„ReADy2FIGHT“). In dieser Phase sind bereits Kooperationen mit der Industrie zu erwarten*.

- *Zerstäubungsanalyse*: Die Anlage soll auch zur Grundlagenforschung im Brennkammerbereich verwendet werden. Einer der Bereiche von Interesse ist die Analyse der Kerosinzerstäubung in der Primärzone. Diese Untersuchungen sollen auch Raum für Kooperationen im universitären Bereich (etwa mit der ONERA [21] oder dem DLR [19]) sowohl im experimentellen als auch im simulativen Bereich bieten.

Das gesamte Programm ist auch so konzipiert, dass viele Arbeitsschritte im Rahmen von Diplomarbeiten oder Dissertationen erledigt werden können, sogar sollen. Für die vorliegende Arbeit wäre etwa eine Erweiterung zu einer Dissertation im Rahmen des TOSCA-Projektes denkbar.

*Verhandlungen mit der Fa. PIEZOCRYST [23] über den Einsatz neuartiger Drucksonden laufen bereits

Anhang A

Ergänzende Ergebnisse

Ergänzend wird noch ein Ergebnis der vibrometrischen Untersuchung mit Brennkammer erläutert. Der untersuchte Betriebspunkt liegt bei 175 Hz. Aufgrund der schlechten Qualität der Brennkammerscheiben konnten keine aussagekräftigen Ergebnisse für die Verbrennung mit niederen Frequenzen (0, 25 Hz) in der Brennkammer ermittelt werden.

Der Aufbau der Bilder ist derselbe wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben. Unterschiede zu den Auswertungen des Free-Jets lassen sich in den Bildern 1, 5 und 6 ausmachen.

Bild 1 - Gesamtspektrum: Auch hier sieht man, wie schon aus der Free-Jet-Untersuchung gleicher Frequenz bekannt, eine Anregung der ungeradzahlig höher Harmonischen zur Pulsationsfrequenz. Der Unterschied liegt im Peak am unteren Ende des Frequenzspektrums: Wenn man das Gesamtspektrum dieser 175 Hz - Pulsation betrachtet, fällt auf, dass im Gegensatz zum Free-Jet die unterste Resonanzfrequenz bei 25 Hz mitangeregt wird. Diese Tatsache wirft zwei Möglichkeiten auf: Entweder wird die Grundfrequenz des Systems über die Brennkammer auf die Flamme übertragen - was in etwa der Situation der selbsterregten Schwingung bei nichtpulsierendem Free-Jet entspricht - oder die Brennkammerscheiben schwingen unabhängig von der Pulsation in dieser Frequenz und erzeugen dadurch das 25 Hz - Signal.

Aufgrund der Tatsache, dass der Laserstrahl zwei Scheiben sowohl im Vor- als auch im Rückwärtslauf passiert, und diese dann zur Erzeugung eines 25 Hz - Signales die komplette Laufzeit exakt in Gleichphase schwingen müssten, scheint die erste Erklärung, die Übertragung über die Brennkammer, plausibler.

Dies wirft allerdings bei weiterer Überlegung die Frage auf, ob in kompletten technischen Systemen dann nicht nur die Brennkammergeometrie, sondern - bei fehlender Entkopplung - auch das Design der Bauteile vor und nach der Kammer einen Einfluss auf das Entstehen von Verbrennungsinstabilitäten hat. Dies ist mit Sicherheit ein Punkt, der mit zukünftigen Versuchsanlagen überprüft werden muss.

Bild 5 + 6 - Phase Shift und Time Delay: Der Verlauf dieser Kurven gibt einen Hinweis auf die unterschiedliche Wirbelstruktur in der Brennkammer im Vergleich zum Free-Jet.

Während die Geschwindigkeitsverläufe im Free-Jet mehr oder weniger deutlich in drei Zonen eingeteilt werden können, trifft dies bei dieser Untersuchung nicht mehr zu. Hier lässt sich eher ein Zwei-Zonen-Modell erkennen. Dabei fällt auf, dass die Geschwindigkeit der Strukturen gegen Ende der Flamme hin zu- und nicht wie beim Free-Jet abnimmt. Eine Erklärung dafür könnten die geringen Abmasse der Brennkammer sein. Durch den relativ geringen Querschnitt von 98x98 mm trifft der Flammenkegel schon ungefähr bei der Hälfte der Brennkammerlänge auf die Wände auf. Die so entstehende Zirkulation in den Ecken der Brennkammer bewirkt einerseits eine starke Geschwindigkeitsreduzierung am Rand, andererseits unterstützt sie den Sog durch den Brennkammeraustritt in der Mitte. Da die hier beobachtete Messung in der Symmetrieachse durchgeführt wurde, werden die Strukturen im hinteren Teil beschleunigt, ohne vorherige Verzögerung.

BK-175[Hz]-z=0

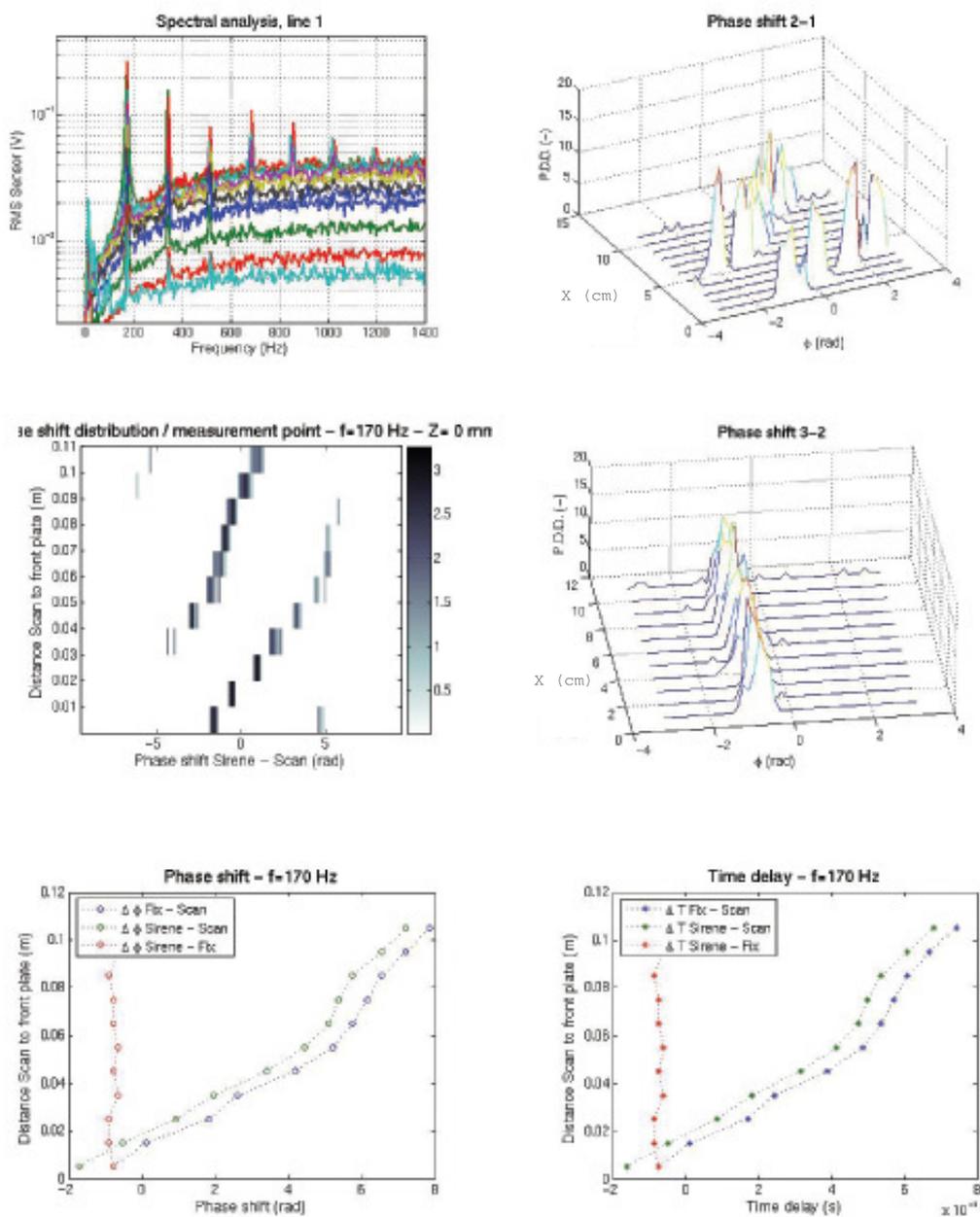


Abbildung A.1: Vibrometrie in der Brennkammer bei 175 Hz

Anhang B

Datenblätter verwendeter Komponenten

In diesem Teil des Anhangs sind die Datenblätter zu folgenden Geräten zu finden:

1. Drucksensor SAMSOMATIC T-6051
2. Magnetventil SAMSOMATIC Typ 3963

Für detaillierte Informationen zu im Text erwähnten, hier aber nicht aufgeführten, Komponenten soll auf die entsprechenden Referenzadressen in der Bibliographie verwiesen werden.

Anhang C

Das STEP 7 - Lite Steuerprogramm

Anhang D

Technische Zeichnungen

In diesem Teil des Anhangs befindet sich eine Auswahl der erstellten Konstruktionszeichnungen.

Konkret handelt es sich um die Baugruppen des Brenners mit angeschlossener Brennkammer, die Baugruppe der Gaszufuhr und die beiden Adapter zwischen Rohren deutscher und französischer Norm.

Weitere Zeichnungen befinden sich auf der beiliegenden CD im AUTOCAD bzw. ProEngineer Wildfire 2 - Format.

Anhang E

Veröffentlichung in diesem Bereich

Anhang F

Nomenklatur

F.1 Formelzeichen

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
c	Schallgeschwindigkeit	[m/s]
d	Durchmesser	[m]
f	Frequenz	[1/s],[Hz]
\dot{m}	Massenstrom	[kg/s]
m_{ges}	Gesamtmasse	[kg]
m_i	Masse der Komponente i	[kg]
m_l	Luftmasse	[kg]
n	Brechungsindex	[-]
n_{ges}	Gesamt - Molanzahl	[mol]
n_i	Molanzahl der Komponente i	[mol]
$n_{(x)}$	Anzahl der Werte x	[-]
p	Druck	[Pas],[bar]
p_0	stationärer Druckanteil	[Pas],[bar]
p'	instationärer Druckanteil	[Pas],[bar]
Δp	Druckdifferenz	[Pas],[bar]
q	Wärmestrom	[J/s]
q_0	stationärer Anteil des Wärmestroms	[J/s]
q'	instationärer Anteil des Wärmestroms	[J/s]
r	Radius	[m]
r_k	Krümmungsradius	[m]
t	Zeit	[s]
u, v, w	Geschwindigkeit	[m/s]
u_0	stationärer Geschwindigkeitsanteil	[m/s]
u'	instationärer Geschwindigkeitsanteil	[m/s]
v_{gem}	Strömungsgeschwindigkeit des Gasgemisches	[m/s]
\vec{v}	Geschwindigkeitsvektor	[-]

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	[m ²]
C	Konstante	[-]
D	Durchmesser	[m]
G'	Gibb'sche Energie der Ausgangsprodukte	[kJ/kg]
G''	Gibb'sche Energie der Endprodukte	[kJ/kg]
ΔG	Differenz der Gibb'schen Energie	[kJ/kg]
I	Intensität des Rayleigh-Kriteriums	[-]
M _{ges}	Molmasse des Gemisches	[kg/kmol]
M _i	Molmasse der Komponente i	[kg/kmol]
M _(x)	Mittelwert von x	[-]
P	Leistung	[W]
R _i	Gaskonstante der Komponente i	[$\frac{J}{mol \cdot K}$]
R _m	allgemeine Gaskonstante	[$\frac{J}{kg \cdot K}$]
S	Swirl - Number	[-]
S _(x)	Standardabweichung von x	[-]
T _b	Belichtungszeit	[s]
T _d	Auslöseverzögerung	[s]
V _(Θ)	tangentiale Geschwindigkeit der Strömung	[m/s]
λ	Wellenlänge	[m]
λ ₀	ursprüngliche Wellenlänge	[m]
μ _i	Massenanteil der Komponente i	[kg/kg]
ν _i	Molanteil der Komponente i	[mol/mol]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
ρ _l	Dichte der Luft	[kg/m ³]
τ	Periodendauer	[s]
Θ	Winkelmaß	[rad]

F.2 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ABB	„Asea Brown Boveri Ltd.“ - weltweiter Energie-Konzern
ALSTOM	internationaler Energie- und Transportkonzern
ASME	„American Society of Mechanical Engineers“
BK	Brennkammer
CCD	„Charge Coupled Device“
CDO	„Combustion Driven Oscillation“ - verbrennungsinduzierte Schwingung
CPU	„Control Processing Unit“ - Hauptprozessor
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FJ	„Free Jet“ - Freistrahler
LPP	„Lean Premixed Prevaporized“ - mager, vorgemischt, vorverdampft
MMC	„Micro Memory Card“ - Siemens-eigenes Speicherkartenformat
NO_x	Stickoxide
ONERA	„Office Nationale d'Études et de Recherche Aéronautique“ - Nationales französisches Luftfahrt-Forschungszentrum
ReADy2FIGHT	„Reliable Activation of combustion Dynamics to control Flame Instabilities at High Temperature and pressure conditions“
RMS	Standardabweichung
ROM	„Read Only Memory“
TOSCA	„Technology for Oscillating and Steady-state Combustion Analysis“
TTL	„Transistor to Transistor Logic“ - Schaltung, in der der Output von 2 Transistoren gesteuert wird
UV	Ultraviolett

Literaturverzeichnis

- [1] J.A.C. Kentfield A.A. Putnam, F.E. Belles. Pulse combustion. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 12:43–79, 1986.
- [2] S.Evesque A. Dowling. Adaptative control of combustions oscillations, 1998.
- [3] F.Giuliani B.Wagner J.Woisetschläger F.Heitmeir. Laser Vibrometry for Real-Time Combustion Stability Diagnostic, 2005.
- [4] K.H. Yu K.J.Wilson. Scale-up experiments on liquid-fueled active combustion control. 18,No.1:53–60, 2002.
- [5] M.Gabriel M.Garmatter. Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit von Glas unter Wärmeeinfluss, 2002.
- [6] J.M.Beér N.A.Chigier. Combustion aerodynamics. *Applied Science Publishers Ltd.*, pages 100–146, 1972.
- [7] N.H.Fletcher S.Thwaites. Wave propagation on turbulent jets. 45/3:175–179, 1980.
- [8] F.E.C. Culick. Active control of engine dynamics: Dynamics of combustion systems, fundamentals, acoustics and control, 2001.
- [9] F. Giuliani. Analysis on the behaviour of an aeroengine air-blast injection device with forced entries, 2002.
- [10] G.S.Settles. Schlieren And Schadowgraph Techniques, 2001.
- [11] H.Lukas. Today's High Efficiency Gas Turbines – Advantages and Problems, 2003.
- [12] J.Hermann. Active control of engine dynamics: Application of active instability control to heavy duty gas turbines, 2001.
- [13] J.Woisetschläger. Laser in der Strömungs- und Schwingungsmesstechnik, 2004.
- [14] S. Kröber. Grundlagen des rijke-rohr. max.pi.tu-berlin.de/Lehre/TSI/Rijke1.ppt.
- [15] K.Schadow. Active Control Of Engine Dynamics. Lecture at the von Karman Institute for Fluid Dynamics VKI/RTO, May 2001.

- [16] Internet Page. Alstom 'not yet saved' as Kron plans more asset sales, job cuts. <http://www.threegorgesprobe.org/tgp/print.cfm?ContentID=11873>, November 2005.
- [17] Internet Page. BET-Fachwörterbuch - CCD-Chip. <http://www.bet.de/lexikon/begriffe/CCDChip.htm>, November 2005.
- [18] Internet Page. CCD-SENSOR.DE - Startseite. <http://www.ccd-sensor.de>, November 2005.
- [19] Internet Page. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. <http://www.dlr.de>, November 2005.
- [20] Internet Page. GASEQ - A Chemical Equilibrium Program for Windows. <http://www.gaseq.co.uk/>, November 2005.
- [21] Internet Page. Homepage des ONERA-Forschungsinstitutes. <http://www.onera.fr>, November 2005.
- [22] Internet Page. KROMSCHROEDER - Homepage. <http://www.kromschroeder.de>, November 2005.
- [23] Internet Page. PIEZOCRYST - Advanced Sensorics GmbH. <http://www.piezocryst.com/>, November 2005.
- [24] Internet Page. Standardqualitäten Quarzglas. <http://www.quarzglas-qcs.de/material1.php?language=ger>, November 2005.
- [25] Internet Page. The High-Accuracy, Fit-Anywhere Flowmeter. <http://www.mccrometer.com/products/pdvcone.htm>, November 2005.
- [26] Internet Page. Vergleich der CCD-Technik gegenüber der Fotografie. <http://www.astronomie.de/technik/ccd-technik/ineltech/ccdpc.htm>, November 2005.
- [27] S.D. Sharma Shekhar M. Sarpotdar, N. Anathkrishnan. The rijke tube - a thermo-acoustic device. pages 59–71, 2003.
- [28] R.Müller u.A. Selbstüberwachender durchflusssensor mit diversitärer redundanz. 72/4:198–204, 2005.
- [29] W.Koller. Eigenschaften des Glases. Vortrag Glasfachschule Kramsach; www.angelfire.com/ab7/siddharta_gautama/TE2-2003.pdf, 2003.

Elektrischer Messumformer Typ 6051

für Überdruck und Absolutdruck
mit Messspannen von 0,02 bis 399 bar und 0,04 bis 400 bar_{abs}
mit oder ohne externen Druckmittler



**SAMSO
MATIC**

Allgemeines

Die elektrischen Messumformer Typ 6051 dienen zum Messen von Überdruck oder Absolutdruck und zum Umformen des Messwertes in ein druckproportionales Ausgangssignal von 4 bis 20 mA.

Die Geräte haben folgende Leistungsmerkmale:

- Mikroprozessortechnik in SMD-Technologie
- Bedienung und Einstellung mit Drehschalter und Taste
- LC-Display, 3 1/2-stellig (optional),
Anzeigebereich -1999 bis +1999
- Korrosionsfestes Gehäuse in Schutzart IP 65
- Einsetzbar für Gase, Dämpfe und Flüssigkeiten
- Messen von Überdruck oder Absolutdruck
- Austauschbares Messelement
- Kapazitiver keramischer Sensor für Messspannen von
0,02 bis 69 bar und 0,04 bis 70 bar_{abs}
- Piezoresistiver Sensor für Messspannen von
31 bis 399 bar und 32 bis 400 bar_{abs}
- Überlastgrenze 1,5- bis 40-fache Messspanne
- Einfache Einstellung von Nullpunkt und Messspanne
- Nullpunktverschiebung von 0 bis 80 % einstellbar
- Messspannenverhältnis 1 : 5 einstellbar
- Kennlinienabweichung $\leq 0,2\%$ (kapazitiver Sensor)
oder $\leq 0,5\%$ (piezoresistiver Sensor)
- Ausgangssignal 4 ... 20 mA in Zweileiterschaltung;
Wirkrichtung >> oder << wählbar
- Zündschutzart „Eigensicherheit“ II 2 G EEx ia IIC T6 (optional)
- Dämpfung des Ausgangssignals von 0,015 bis 15 s wählbar
- Fehlersignal wählbar
- Elektrischer Anschluss über Kabelverschraubung M 20 x 1,5
auf einen Klemmenblock oder mit Steckverbinder
- Anschlusszapfen G 1/2 A gemäß DIN 16288
- Einschraubdruckmittler, Flanschdruckmittler, Rohrdruckmittler
oder Zellendruckmittler (optional);
Füllflüssigkeit: Silikonöl, Pflanzenöl oder Vakuumöl
für allgemeine Anwendungen oder Sauerstoffbetrieb

Funktion

Der Prozessdruck p wird auf das Messelement übertragen und bewirkt eine Spannungs- bzw. Kapazitätsänderung, die in ein druckproportionales Ausgangssignal von 4 bis 20 mA umgeformt wird. Die Bedienung und Einstellung erfolgen mit einem Drehschalter und einer Taste (siehe Abb. 2 und Einbau- und Bedienungsanleitung EB 6051).

Anwendungshinweise

Flüssigkeitsstandmessung und -regelung

Für Flüssigkeitsstandmessungen und -regelungen in geschlossenen Behältern mit niedrigem statischen Druck können zwei Messumformer in Verbindung mit einer Prozessregelstation SAMSON TROVIS 64X2 mit zwei mA-Eingängen eingesetzt werden (siehe Typenblatt T 6412).



Abb. 1 · Elektrischer Messumformer Typ 6051

Blockschaltbild

Kapazitiver oder piezoresistiver Sensor

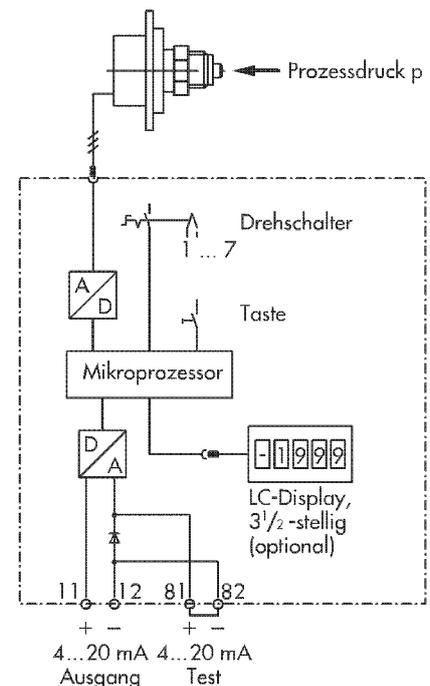


Abb. 2

Technische Daten

Messelement	Kapazitiver keramischer Sensor		Piezoresistiver Sensor
Messspanne	Einstellverhältnis 1:5 (siehe „Ausführungen und Bestellangaben“)		
Nullpunkt	0 ... 80 % der max. Messspanne (Nullpunkt + eingestellte Messspanne ≤ max. Messspanne)		
Überlastgrenze	siehe „Ausführungen und Bestellangaben“		
Prozessanschluss	Anschlusszapfen G 1/2 A gemäß DIN 16288, optional mit externem Druckmittler (siehe „Ausführungen und Bestellangaben“)		
Füllflüssigkeit	Ohne		Silikonöl
Werkstoffe	Membran	Keramik Al ₂ O ₃ (96 %)	WN 1.4435
	Sensorgehäuse	Ohne	WN 1.4301
	Dichtung	FKM	Ohne
	Prozessanschluss	WN 1.4571	
	Gehäuse	Aluminium GD AlSi10Mg, pulverbeschichtet grau-beige RAL 1019	
	LC-Display	Schutzscheibe aus Polycarbonat	
	Dichtringe	Nitrilbutadienkautschuk	
Speisespannung	U _s	11 ... 30 V DC	
Ausgangssignal	4 ... 20 mA, Zweileiterschaltung		
Zündschutzart	ohne Ex-Schutz, optional „Eigensicherheit“ II 2 G EEx ia IIC T6 ¹⁾		
Ausgangsspannung ²⁾	U _i	≤ 28 V	
Ausgangsstrom ²⁾	I _i	≤ 115 mA	
Verlustleistung ²⁾	P _i	≤ 1 W	
Innere Induktivität ²⁾	L _i	49 µH	
Innere Kapazität ²⁾	C _i	5 nF	
Dämpfung des Ausgangssignals	15 ms, 60 ms, 240 ms, 960 ms, 3,84 s oder 15,36 s wählbar		
Fehlersignal	3,6 mA oder 22,8 mA wählbar		
Zulässige Bürde	R _B	(U _s - 11)/0,02 in Ω	
Kennlinienabweichung	≤ 0,2 %		≤ 0,5 %
Einfluss der Umgebungstemperatur	≤ 0,2 %/10 K auf den Nullpunkt ³⁾		≤ 0,3 %/10 K auf den Nullpunkt ³⁾
	≤ 0,2 %/10 K auf die Messspanne		≤ 0,2 %/10 K auf die Messspanne
Hysterese	≤ 0,05 %		
Langzeitstabilität	≤ 0,15 %/a		
Einfluss der Hilfsenergie	≤ 0,005 %/V		
Einfluss der Einbaulage	vernachlässigbar klein		
Digitalanzeige (optional)	LC-Display, 3 1/2-stellig, Anzeigebereich -1999 ... +1999 (bei -20 ... +70 °C)		
Umgebungstemperatur	-30 ... +80 °C (ohne Ex-Schutz) -30 ... +60 °C (Temperaturklasse T6) -30 ... +70 °C (Temperaturklasse T5) -30 ... +80 °C (Temperaturklasse T4)		
Luftfeuchtigkeit	5 ... 95 % r. F.		
Elektrischer Anschluss	siehe „Ausführungen und Bestellangaben“		
Schutzart	IP 65		
Gewicht ca.	1,1 kg		1,2 kg

- 1) Gemäß EG-Baumusterprüfbescheinigung PTB 02 ATEX 2075 für Zone 1 (Nachtrag für Zone 21 in Vorbereitung). Für Zone 2 und 22 liegt eine Herstellererklärung vor.
- 2) Zulässige Maximalwerte bei Anschluss an einen bescheinigten eigensicheren Stromkreis.
- 3) Zusätzliche Nullpunktabweichung bei Anbau eines externen Druckmittlers (siehe Abb. 3).

Zusätzliche Nullpunktabweichung bei Anbau eines externen Druckmittlers

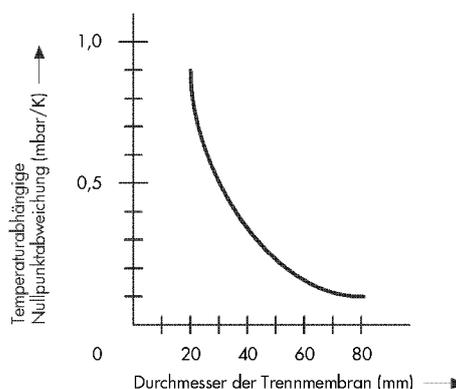


Abb. 3

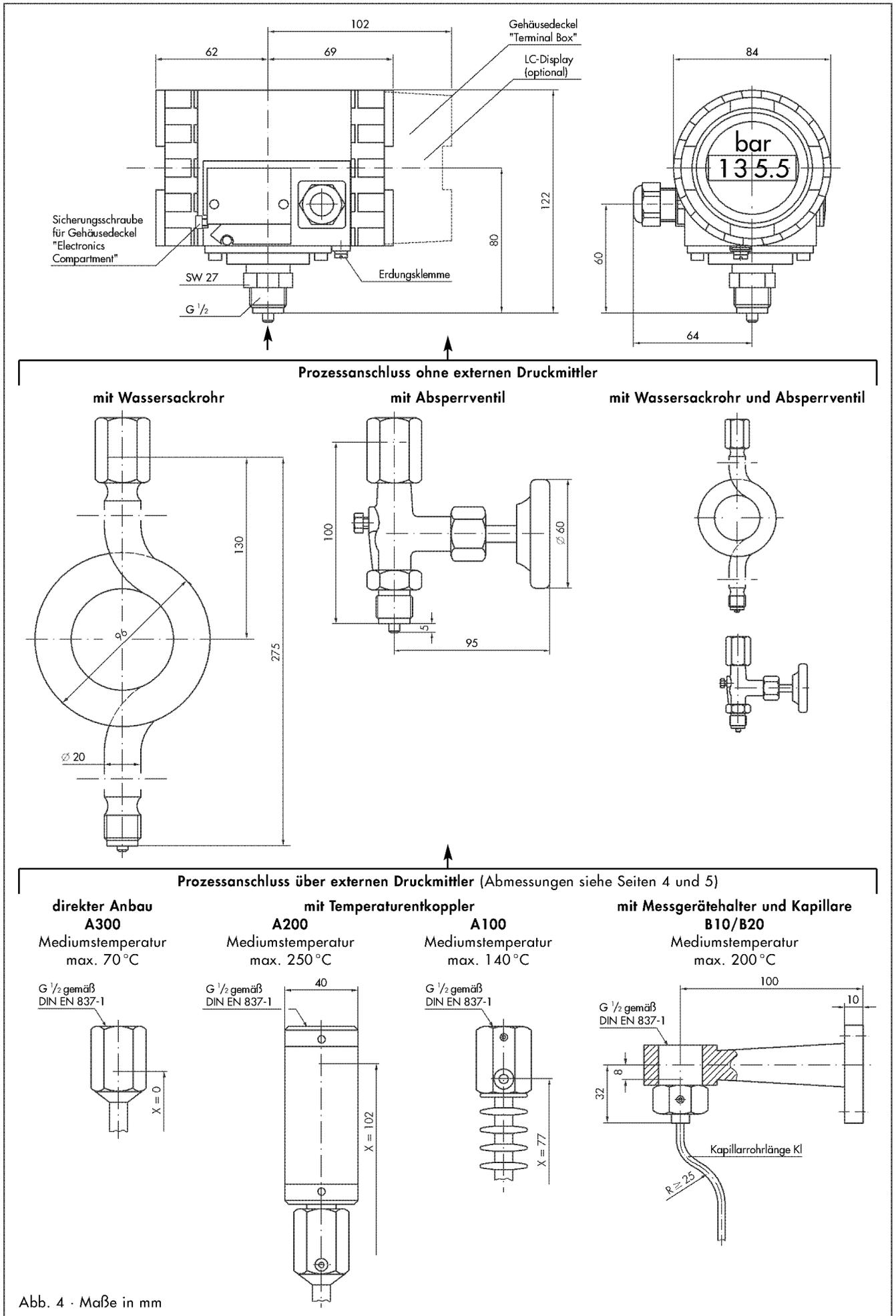


Abb. 4 · Maße in mm

Abmessungen von externen Druckmittlern

Flanschdruckmittler in Flachbauweise

Typ	DN	PN	D	d4	k	d2	Bohrungen	b	f	Gewicht
DA2120	25	10 ... 40	115	68	85	14	4	20	4	1,5 kg
DA2150	25	64 ... 100	140	68	100	18	4	26	4	2,0 kg
DA2420	50	10 ... 40	165	102	125	18	4	21	4	3,2 kg
DA2430	50	64	180	102	134	22	4	27	4	4,1 kg
DA2620	80	10 ... 40	200	138	160	18	8	25	4	5,0 kg
DA2710	100	10 ... 16	220	158	180	18	8	25	4	6,0 kg
DA2720	100	25 ... 40	235	162	190	22	8	29	4	10,0 kg
DA2810	125	10 ... 16	250	188	210	18	8	27	4	10,0 kg
DA2820	125	25 ... 40	270	188	220	26	8	27	4	11,0 kg

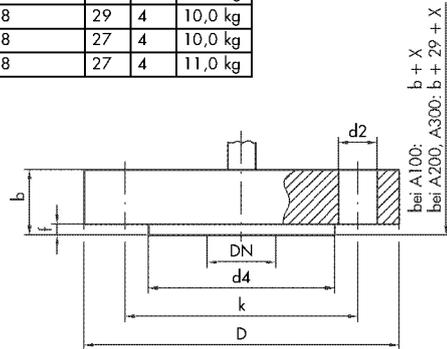


Abb. 5 · Maße in mm

Flanschdruckmittler in Rüsselbauweise

Typ	DN	PN	D	d4	k	d2	Bohrungen	b	b1	f	Gewicht
DB1420	50	10 ... 40	165	102	125	18	4	20	23	3	4,1 kg
DB1620	80	10 ... 40	200	138	160	18	8	21	28	3	6,5 kg
DB1720	100	25 ... 40	235	162	190	22	8	21	28	3	11,5 kg

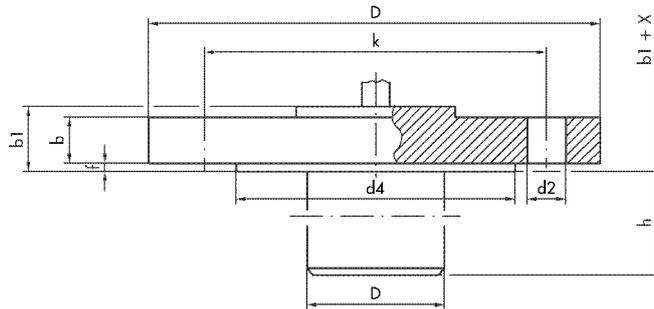


Abb. 6 · Maße in mm

Zellendruckmittler zum Zwischenflanschen

Typ	DN	PN	d4	b	L	d1	Gewicht
DC1480	50	400	102	20	75	14	1,3 kg
DC1580	65	400	122	20	75	14	1,8 kg
DC1680	80	400	138	20	75	14	2,2 kg
DC1780	100	400	162	22	120	16	3,6 kg
DC1880	125	400	188	22	120	16	4,8 kg

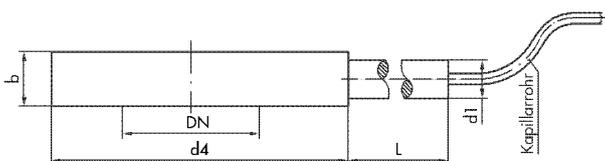


Abb. 7 · Maße in mm

Einschraubdruckmittler

Typ	PN	G	h1	h2	d	Gewicht
DE1180	400	G 1/2 A	27	14	26	0,2 kg
DE1280	400	G 3/4 A	31	16	32	0,3 kg
DE1380	400	G 1 A	33	18	41	0,5 kg
DE1580	400	G 1 1/2 A	40	22	55	1,0 kg
DE1680	400	G 2 A	42	24	68	1,6 kg

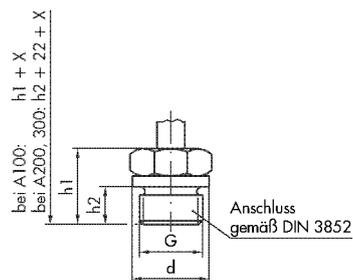


Abb. 8 · Maße in mm

Druckmittler für Lebensmittel-Rohrverschraubungen						
Typ	DN	PN	G	h	A	Gewicht
DL2100	25	40	Rd 52 × 1/6	45	21	0,3 kg
DL2200	32	40	Rd 58 × 1/6	45	21	0,4 kg
DL2300	40	40	Rd 65 × 1/6	45	21	0,5 kg
DL2400	50	25	Rd 78 × 1/6	46	22	0,6 kg
DL2500	65	25	Rd 95 × 1/6	47	25	0,9 kg
DL2600	80	25	Rd 110 × 1/4	47	29	1,2 kg
DL2700	100	25	Rd 130 × 1/4	50	31	1,6 kg

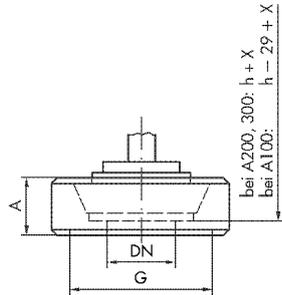


Abb. 9 · Maße in mm

Druckmittler mit Clamp-Anschluss							
Typ	DN	PN	D	i	h	h1	Gewicht
DL3100	1"	16 ... 40	50,5	19	62	14	0,3 kg
DL3200	1 1/2"	16 ... 40	50,5	19	60	12	0,3 kg
DL3300	2"	16 ... 40	64	19	62	14	0,4 kg
DL3400	2 1/2"	16 ... 40	77,5	19	62	14	0,5 kg
DL3500	3"	10 ... 40	91	19	62	14	0,8 kg

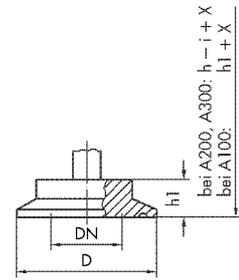


Abb. 10 · Maße in mm

Rohrdruckmittler zum Zwischenflansch						
Typ	DN	PN	D	h	h2	Gewicht
DP2180	25	400	68	63	111	2,5 kg
DP2380	40	400	88	73	121	3,9 kg
DP2480	50	400	100	80	128	4,6 kg
DP2580	65	400	122	90	137	6,7 kg
DP2680	80	400	138	98	146	7,9 kg
DP2780	100	400	160	109	157	9,7 kg

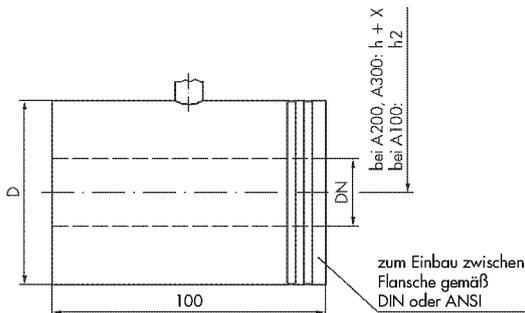


Abb. 11 · Maße in mm

Rohrdruckmittler für Lebensmittel-Rohrverschraubungen							
Typ	DN	PN	G	l	h	h1	Gewicht
DR1100	25	40	Rd 52 × 1/6	120	47	95	0,6 kg
DR1200	32	40	Rd 58 × 1/6	120	50	98	0,7 kg
DR1300	40	40	Rd 65 × 1/6	120	54	102	0,9 kg
DR1400	50	25	Rd 78 × 1/6	122	61	109	1,2 kg
DR1500	65	25	Rd 95 × 1/6	124	69	117	1,4 kg
DR1600	80	25	Rd 110 × 1/4	132	76	124	2,0 kg
DR1700	100	25	Rd 130 × 1/4	60	89	137	2,1 kg

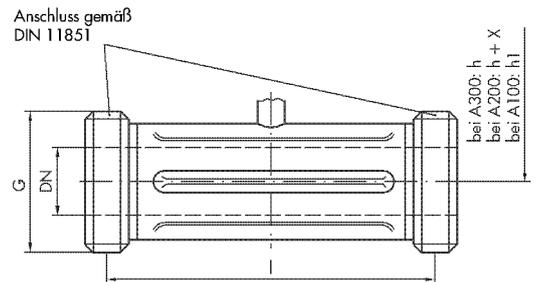


Abb. 12 · Maße in mm

Rohrdruckmittler mit IDF-Gewinde						
Typ	DN	PN	l	h	h1	Gewicht
DR4100	1"	40	142	46	94	0,6 kg
DR4200	1 1/2"	40	150	53	101	0,8 kg
DR4300	2"	25	150	61	109	1,1 kg
DR4400	2 1/2"	25	150	65	113	1,2 kg
DR4500	3"	25	150	73	121	1,6 kg

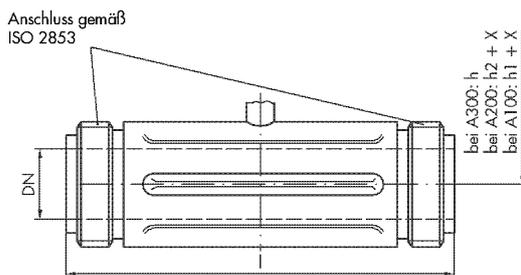


Abb. 13 · Maße in mm

Rohrdruckmittler mit Clamp-Anschluss						
Typ	DN	PN	l	h	h1	Gewicht
DR6100	1"	16	126	46	94	0,5 kg
DR6200	1 1/2"	16	126	53	101	0,7 kg
DR6300	2"	16	126	61	109	0,9 kg
DR6400	2 1/2"	10	131	65	113	1,1 kg
DR6500	3"	10	131	73	121	1,3 kg

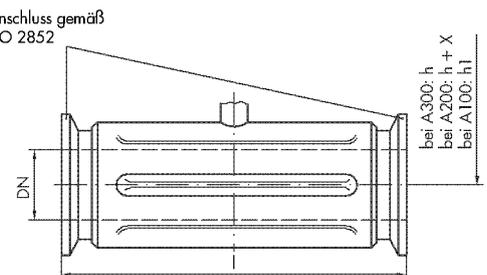


Abb. 14 · Maße in mm

Ausführungen und Bestellangaben

Elektrischer Messumformer für Überdruck und Absolutdruck					Bestell-Nr. 6051-	.	.	.	.	.
Zündschutzart	Ohne Ex-Schutz				0	↑	↑	↑	↑	↑
	II 2 G EEx ia IIC T6 ¹⁾				1					
Messelement	Sensor	Messspanne ²⁾		Überlastgrenze	Anwendung					
		Überdruck	Absolutdruck							
	Kapazitiv keramisch	0,02 ... 0,1 bar	-	-0,3 ... +4 bar		10				
	Kapazitiv keramisch	0,04 ... 0,2 bar	-	6 bar		11				
	Kapazitiv keramisch	0,08 ... 0,4 bar	-	6 bar		12				
	Kapazitiv keramisch	0,2 ... 1,0 bar	-	10 bar		13				
	Kapazitiv keramisch	0,4 ... 2,0 bar	-	18 bar		14				
	Kapazitiv keramisch	0,8 ... 4,0 bar	-	25 bar		15				
	Kapazitiv keramisch	2,0 ... 10,0 bar	-	40 bar		16				
	Kapazitiv keramisch	-	0,04 ... 0,2 bar _{abs}	6 bar		31				
	Kapazitiv keramisch	-	0,2 ... 1,0 bar _{abs}	10 bar		33				
	Kapazitiv keramisch	-	0,4 ... 2,0 bar _{abs}	18 bar		34				
	Kapazitiv keramisch	-	0,8 ... 4,0 bar _{abs}	25 bar		35				
	Kapazitiv keramisch	-	2,0 ... 10,0 bar _{abs}	40 bar		36				
	Kapazitiv keramisch	3,0 ... 19,0 bar	4,0 ... 20,0 bar _{abs}	40 bar		37				
	Kapazitiv keramisch	7,0 ... 39,0 bar	8,0 ... 40,0 bar _{abs}	60 bar		38				
	Kapazitiv keramisch	13,0 ... 69,0 bar	14,0 ... 70,0 bar _{abs}	105 bar		39				
	Piezoresistiv	31,0 ... 159,0 bar	32,0 ... 160,0 bar _{abs}	600 bar		42				
	Piezoresistiv	79,0 ... 399,0 bar	80,0 ... 400,0 bar _{abs}	600 bar		43				
	Kapazitiv keramisch	0,04 ... 0,2 bar ³⁾	-	6 bar		50				
	Kapazitiv keramisch	0,02 ... 0,1 bar	-	-0,3 ... +4 bar	Sauerstoffbetrieb	60				
	Kapazitiv keramisch	0,04 ... 0,2 bar	-	6 bar	Sauerstoffbetrieb	61				
	Kapazitiv keramisch	0,08 ... 0,4 bar	-	6 bar	Sauerstoffbetrieb	62				
	Kapazitiv keramisch	0,2 ... 1,0 bar	-	10 bar	Sauerstoffbetrieb	63				
	Kapazitiv keramisch	0,4 ... 2,0 bar	-	18 bar	Sauerstoffbetrieb	64				
	Kapazitiv keramisch	0,8 ... 4,0 bar	-	25 bar	Sauerstoffbetrieb	65				
	Kapazitiv keramisch	2,0 ... 10,0 bar	-	40 bar	Sauerstoffbetrieb	66				
	Kapazitiv keramisch	-	0,04 ... 0,2 bar _{abs}	6 bar	Sauerstoffbetrieb	71				
	Kapazitiv keramisch	-	0,2 ... 1,0 bar _{abs}	10 bar	Sauerstoffbetrieb	73				
	Kapazitiv keramisch	-	0,4 ... 2,0 bar _{abs}	18 bar	Sauerstoffbetrieb	74				
	Kapazitiv keramisch	-	0,8 ... 4,0 bar _{abs}	25 bar	Sauerstoffbetrieb	75				
	Kapazitiv keramisch	-	2,0 ... 10,0 bar _{abs}	40 bar	Sauerstoffbetrieb	76				
	Kapazitiv keramisch	3,0 ... 19,0 bar	4,0 ... 20,0 bar _{abs}	40 bar	Sauerstoffbetrieb	77				
Kapazitiv keramisch	7,0 ... 39,0 bar	8,0 ... 40,0 bar _{abs}	60 bar	Sauerstoffbetrieb	78					
Kapazitiv keramisch	13,0 ... 69,0 bar	14,0 ... 70,0 bar _{abs}	105 bar	Sauerstoffbetrieb	79					
Piezoresistiv	31,0 ... 119,0 bar	32,0 ... 120,0 bar _{abs}	600 bar	Sauerstoffbetrieb	82					
Kapazitiv keramisch	0,04 ... 0,2 bar ³⁾	-	6 bar	Sauerstoffbetrieb	90					
Prozessanschluss	Anschlusszapfen G 1/2 A gemäß DIN 16288				1					
	Externer Druckmittler (siehe Spezifikationstabelle, Seite 7)				5					
Elektrischer Anschluss	Gewindeanschluss M 20 x 1,5				(-30 ... +80°C)	0				
	Kabelverschraubung M 20 x 1,5 aus Polyamid, blau				(-20 ... +80°C)	1				
	Kabelverschraubung M 20 x 1,5 aus Polyamid, schwarz				(-20 ... +80°C)	2				
	Gerätestecker gemäß EN 175301-803, Bauform A ⁴⁾ , aus Polyamid, schwarz, Schutzart IP 65 ⁴⁾				(-30 ... +80°C)	4				
	Gerätestecker Han 7 D (Fabrikat Harting), 7-polig, aus Aluminium, silbergrau, Schutzart IP 65 ⁴⁾				(-30 ... +80°C)	5				
	Kabelverschraubung M 20 x 1,5 aus Metall, blau				(-30 ... +80°C)	6				
	Kabelverschraubung M 20 x 1,5 aus Metall, farblos				(-30 ... +80°C)	7				
LC-Display	Ohne LC-Display				0					
	LC-Display, 3 1/2-stellig (Messspanne und Einheit im Klartext angeben)				(-20 ... +70°C)	1				
Druckeinstellung	Überdruck				0					
	Absolutdruck				1					

Ab Lager lieferbar 

- 1) Gemäß EG-Baumusterprüfbescheinigung PTB 02 ATEX 2075 für Zone 1 (Nachtrag für Zone 21 in Vorbereitung).
Für Zone 2 und 22 liegt eine Herstellererklärung vor.
- 2) Messbereich 0 bar bis max. Messspanne (nicht bei Typen 6051-X50/-X90).
Druckeinstellung „Überdruck“ oder „Absolutdruck“ im Klartext angeben.
- 3) Messbereich in den Grenzen -0,3 bis +0,2 bar einstellbar (nur bei Typen 6051-X50/-X90).
- 4) Die Leitungsdose ist nicht im Lieferumfang enthalten (siehe „Zubehör und Ersatzteile“).

Spezifikationstabelle für externen Druckmittler siehe Seite 7

Elektrischer Messumformer für Überdruck und Absolutdruck mit externem Druckmittler		Bestell-Nr. 6051-		5	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Externer Druckmittler	Bauart	Nennweite	Nenndruck	▲										
		Flanschdruckmittler in Flachbauweise mit glatter Dichtleiste, Form E, gemäß DIN 2526	DN 25	PN 10 ... 40	DA2120									
DN 25			PN 64 ... 100	DA2150										
DN 50			PN 10 ... 40	DA2420										
DN 50			PN 64	DA2430										
DN 80			PN 10 ... 40	DA2620										
DN 100			PN 10 ... 16	DA2710										
DN 100			PN 25 ... 40	DA2720										
DN 125			PN 10 ... 16	DA2810										
DN 125			PN 25 ... 40	DA2820										
DN 50			PN 10 ... 40	DB1420										
DN 80		PN 10 ... 40	DB1620											
DN 100		PN 25 ... 40	DB1720											
Zellendruckmittler zum Zwischenflanschen mit glatter Dichtleiste, Form E, gemäß DIN 2526		DN 50	PN 400	DC1480										
		DN 65	PN 400	DC1580										
		DN 80	PN 400	DC1680										
		DN 100	PN 400	DC1780										
		DN 125	PN 400	DC1880										
Einschraubdruckmittler mit frontbündiger Trennmembran		G 1/2 A	PN 400	DE1180										
		G 3/4 A	PN 400	DE1280										
		G 1 A	PN 400	DE1380										
		G 1 1/2 A	PN 400	DE1580										
		G 2 A	PN 400	DE1680										
Druckmittler für Lebensmittel-Rohrverschraubungen mit Kegelstutzen und Nutüberwurfmutter gemäß DIN 11851		DN 25	PN 40	DL2100										
		DN 32	PN 40	DL2200										
		DN 40	PN 40	DL2300										
		DN 50	PN 25	DL2400										
		DN 65	PN 25	DL2500										
		DN 80	PN 25	DL2600										
Druckmittler mit Clamp-Anschluss gemäß DIN 32676 und ISO 2852		DN 1"	PN 16 ... 40	DL3100										
		DN 1 1/2"	PN 16 ... 40	DL3200										
		DN 2"	PN 16 ... 40	DL3300										
		DN 2 1/2"	PN 16 ... 40	DL3400										
		DN 3"	PN 10 ... 40	DL3500										
Rohrdruckmittler zum Zwischenflanschen mit glatter Dichtleiste, Form E, gemäß DIN 2526		DN 25	PN 400	DP2180										
		DN 40	PN 400	DP2380										
		DN 50	PN 400	DP2480										
		DN 65	PN 400	DP2580										
		DN 80	PN 400	DP2680										
Rohrdruckmittler für Lebensmittel-Rohrverschraubungen mit Gewindestutzen gemäß DIN 11851		DN 25	PN 40	DR1100										
		DN 32	PN 40	DR1200										
		DN 40	PN 40	DR1300										
		DN 50	PN 25	DR1400										
		DN 65	PN 25	DR1500										
		DN 80	PN 25	DR1600										
Rohrdruckmittler mit IDF-Gewinde gemäß ISO 2853		DN 100	PN 25	DR1700										
		DN 1"	PN 40	DR4100										
		DN 1 1/2"	PN 40	DR4200										
		DN 2"	PN 25	DR4300										
		DN 2 1/2"	PN 25	DR4400										
Rohrdruckmittler mit Clamp-Anschluss gemäß ISO 2852		DN 3"	PN 25	DR4500										
		DN 1"	PN 16	DR6100										
		DN 1 1/2"	PN 16	DR6200										
		DN 2"	PN 16	DR6300										
		DN 2 1/2"	PN 10	DR6400										
DN 3"		PN 10	DR6500											
Anbau		Direkter Anbau			A300									
		Mit Temperaturentkoppler, Mediumtemperatur +70 ... +140°C			A100									
		Mediumtemperatur -40 ... -10°C/+70 ... +250°C			A200									
		Mit Kapillare aus WN 1.4571, ohne Spiralschutzschlauch			B20	.								
		mit Spiralschutzschlauch aus WN 1.4571			B10	.								
		Länge 1 m			0									
		Länge 2 m			1									
		Länge 4 m			3									
		Länge 6 m			4									
Trennmembran		WN 1.4404												1
		Tantal (bei Typenzusatz -DA)												2
		Hastelloy C 276 (bei Typenzusatz -DA)												3
		Monel 400 (bei Typenzusatz -DA)												5
Rüssellänge (bei Typenzusatz -DB)		Ohne (bei Typenzusatz -DA, -DC, -DE, -DL, -DP und -DR)												00
		50 mm												F1
		100 mm												F2
		150 mm												F3
		200 mm												F4
Füllflüssigkeit		Silikonöl Typ FS 20, einsetzbar bei -10 ... +100°C/1 ... 600 bar _{abs}												L20M2
		Silikonöl Typ FS 20, modifiziert, einsetzbar bei -40 ... +200°C/1 ... 600 bar _{abs}												L11M2
		Silikonöl Typ FS 100, einsetzbar bei -20 ... +275°C/1 ... 600 bar _{abs}												L12M2
		Pflanzenöl Typ FP, einsetzbar bei -10 ... +200°C/0,01 ... 150 bar _{abs}												L17M2
		Vakuumöl Typ FV, einsetzbar bei -40 ... +200°C/0,014 ... 600 bar _{abs}												L18M2
		Pflanzenöl Typ FP, einsetzbar bei 0 ... +140°C/1 ... 600 bar _{abs} für Lebensmittelanwendung													L19M2

Zubehör und Ersatzteile

LC-Display, 3 $\frac{1}{2}$ -stellig, mit Halter

Bestell-Nr. 1180-8911

Gehäusedeckel für LC-Display

Bestell-Nr. 1790-9644

Leitungsdose gemäß EN 175301-803, Bauform A, aus Polyamid, schwarz, mit Kabelverschraubung Pg 9 (für Kabel- \varnothing 4 bis 8 mm) und Flachdichtung aus Nitrilbutadienkautschuk

Bestell-Nr. 0790-6658

Leitungsdose Han 7 D (Fabrikat Harting), abgewinkelte Bauform, 7-polig, aus Aluminium, silbergrau, mit Kabelverschraubung Pg 9 (für Kabel- \varnothing 6 bis 9 mm)

Bestell-Nr. 1400-8298

Absperrventil für Druckmessgeräte gemäß DIN 16270, Form A, mit Anschlusszapfen G $\frac{1}{2}$ A und Spannmuffe G $\frac{1}{2}$ gemäß DIN 16283,

aus C 22.8

Bestell-Nr. 8502-0505

aus WN 1.4571

Bestell-Nr. 8502-0503

Wassersackrohr in Kreisform für Druckmessgeräte gemäß DIN 16282, Form D, mit Spannmuffe G $\frac{1}{2}$ gemäß DIN 16283, mit Schweißanschluss, aus St 35.8

Bestell-Nr. 8580-5014

mit Schweißanschluss, aus WN 1.4571

Bestell-Nr. 8580-5015

Flachdichtung für Anschlusszapfen G $\frac{1}{2}$ gemäß DIN 16258, Form B, aus Vulkanfiber

Bestell-Nr. 8502-0513

Dichtring für Anschlusszapfen G $\frac{1}{2}$ gemäß DIN 19207, Form B, kammprofiliert, aus WN 1.4571

Bestell-Nr. 8502-0521

Messgerätehalter gemäß DIN 16281, aus Aluminium

Bestell-Nr. 3994-9582

aus WN 1.4301

Bestell-Nr. 3994-9583

Zwischenstück gemäß DIN 16281 für Messgerätehalter, aus St 37

Bestell-Nr. 0230-9584

aus WN 1.4571

Bestell-Nr. 0230-8585

Manometeranschlussverschraubung G $\frac{1}{2}$ für Rohr 12 \times 1, aus Stahl

Bestell-Nr. 8582-1317

aus WN 1.4571

Bestell-Nr. 8582-1318

Manometeranschlussverschraubung G $\frac{1}{2}$ für Schlauch 4 \times 1, max. 6 bar, aus Polyamid

Bestell-Nr. 8582-1604

(Änderungen vorbehalten)

SAMSOMATIC
AUTOMATIONSSYSTEME
GMBH

Weismüllerstraße 20–22
60314 Frankfurt am Main

Telefon: 069 4009-0
Telefax: 069 4009-1644
E-Mail: samsomatic@samson.de
Internet: <http://www.samsomatic.de>

– ein Tochterunternehmen der SAMSON AG

2005-01 A · T 6051 DE

Solenoid Valve Type 3963



General notes

The Type 3963 Solenoid Valves ensure a high level of operational reliability and fast response times for controlling pneumatic actuators in hazardous areas.

Intrinsically safe, low-power binary signals issued by automation or fieldbus systems can be used for controlling purposes.

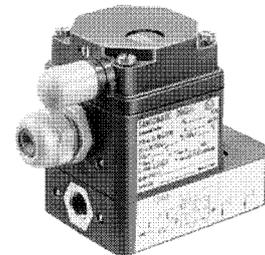
The Type 3963 Solenoid Valves offer a variety of switching functions, flow rates and connections for all desired applications (Fig. 1).

Special features of the Type 3963 Solenoid Valves include:

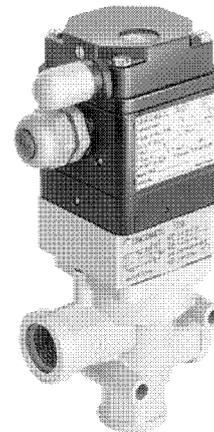
- Suitable for safety shut-off valves up to class AK 7 according to DIN V 19251 (optionally)
- Corrosion-resistant enclosure with degree of protection IP 54 or IP 65 for applications in humid, aggressive environments
- Versions free of silicone/compatible with paint (available on request)
- Service life $\geq 2 \times 10^7$ switching cycles
- Ambient temperature -45 to $+80$ °C, depending on the type of protection and temperature class
- Rail mounting or wall mounting
- Attachment to linear actuators with NAMUR rib according to DIN EN 60534-6-1 or to rotary actuators with NAMUR interface according to VDI/VDE 3845

- E/P binary converter with flapper/nozzle assembly
- Nominal signals 6 V DC, 12 V DC, 24 V DC, 24 V AC, 48 V AC, 115 V AC or 230 V AC
- Type of protection II 2 G EEx ia IIC T6, CSA, FM and II 3 G EEx nA II T6 for DC signals
- Power consumption 6 to 27 mW or 0.04 to 0.46 VA, depending on the nominal signal
- Manual override as pushbutton or pushbutton switch (optionally)
- Air supply 1.4 to 6 bar
- Electrical connection via cable gland M 20 \times 1.5 to terminals or via a plug-type connector
- Cable break protection device (accessory)

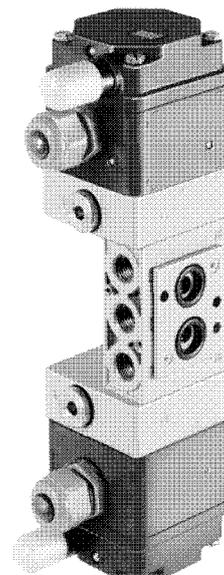
- Booster valve with diaphragm or piston, single or double actuated
- 3/2, 5/2, 5/3 or 6/2-way function
- Exhaust air return (optionally)
- K_{vs} value 0.16 to 4.3
- Supply air/exhaust air restrictors for adjusting different closing and opening times in a ratio of 1:15 (optionally)
- Threaded connection G (NPT) $1/4$ or $1/2$ /NAMUR



Type 3963-XX11 5/2-way Solenoid Valve



Type 3963-XX25 3/2-way Pilot Valve combined with Type 3756-1203 3/2-way Booster Valve G $1/2$



Type 3963-XX76 3/2-way Pilot Valves combined with Type 3756-3327 5/2-way Booster Valve G $1/4$ /NAMUR

Fig. 1

Versions with threaded connection

Type 3963 Solenoid Valves for on-off/continuous actuators

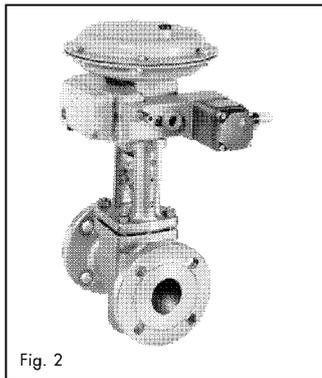


Fig. 2

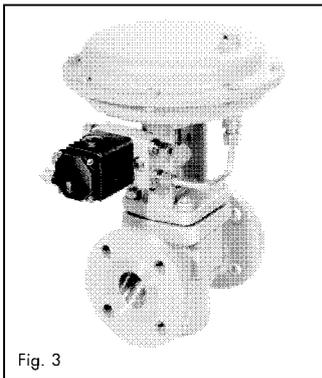


Fig. 3

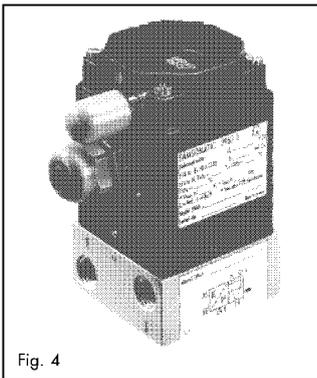


Fig. 4

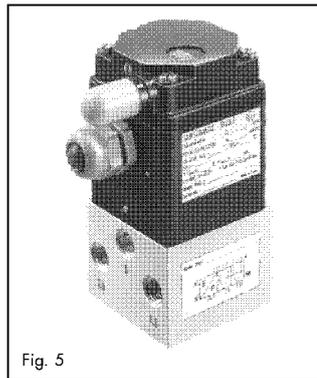
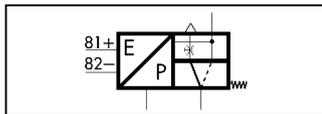
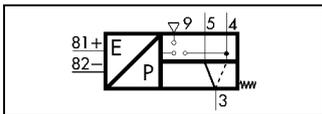


Fig. 5



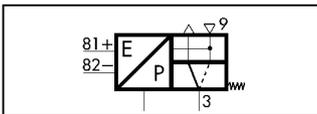
Type 3963-XX29 Solenoid Valve

- 3/2-way function
- Adjustable exhaust air restrictor
- K_{vs} value 0.16
- Attachment via a connection block to SAMSON's Type 3277 Linear Actuator with SAMSON's Type 3730/3766/3767/378X Positioner (see Fig. 2)



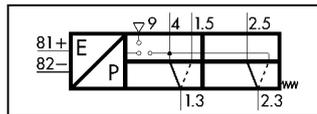
Type 3963-XX53 Solenoid Valve

- 3/2-way function
- K_{vs} value 0.32
- Connection G (NPT) 1/4
- Safety function according to TÜV
- Attachment to linear actuators with NAMUR rib, e. g. SAMSON's Type 271 Actuator (see Fig. 3)



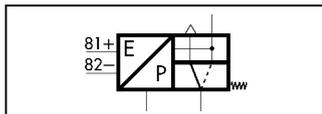
Type 3963-XX27 Solenoid Valve

- 3/2-way function
- K_{vs} value 0.16
- Connection G (NPT) 1/4
- Safety function according to TÜV
- Rail mounting, wall mounting or mounting with pipe fittings to on-off linear actuators, e. g. SAMSON's Type 271/3277 Actuator



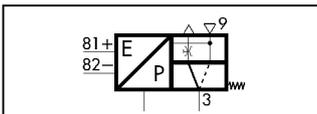
Type 3963-XX14 Solenoid Valve

- 5/2-way function
- K_{vs} value 0.16
- Connection G (NPT) 1/4
- Rail mounting or wall mounting



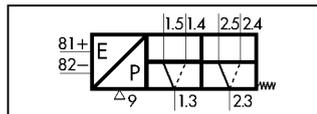
Type 3963-XX55 Solenoid Valve

- 3/2-way function
- K_{vs} value 0.32
- Safety function according to TÜV
- Attachment via a connection block to SAMSON's Type 3277 Linear Actuator with SAMSON's Type 3730/3766/3767/378X Positioner (see Fig. 2)



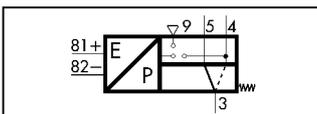
Type 3963-XX28 Solenoid Valve

- 3/2-way function
- Adjustable exhaust air restrictor
- K_{vs} value 0.16
- Connection G (NPT) 1/4
- Rail mounting, wall mounting or mounting with pipe fittings to on-off linear actuators, e. g. SAMSON's Type 271/3277 Actuator



Type 3963-XX64 Solenoid Valve

- 6/2-way function
- K_{vs} value 0.16
- Connection G (NPT) 1/4
- Rail mounting or wall mounting



Type 3963-XX54 Solenoid Valve

- 3/2-way function
- K_{vs} value 0.32
- Connection G (NPT) 1/4
- Safety function according to TÜV
- Rail mounting, wall mounting or mounting with pipe fittings to on-off linear actuators, e. g. SAMSON's Type 271/277 Actuator

Solenoid valves consisting of Type 3963 Pilot Valve ①/Type 3756 Booster Valve ②, for on-off/continuous actuators

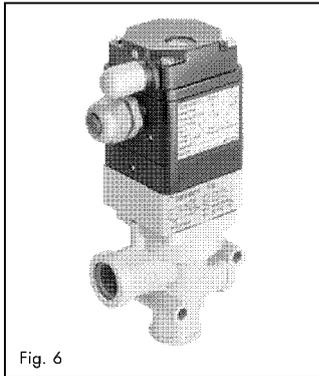


Fig. 6

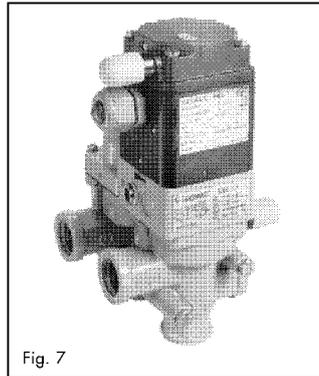


Fig. 7

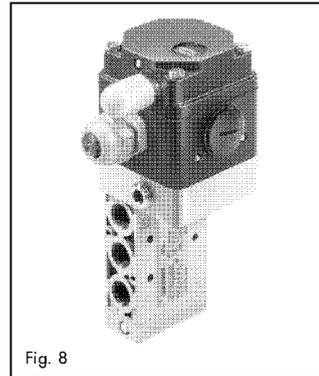


Fig. 8

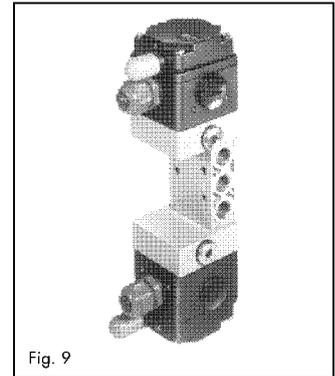
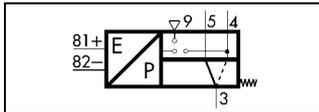
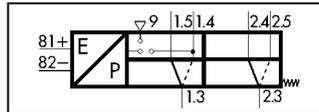


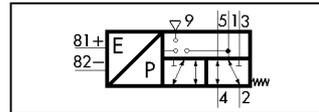
Fig. 9



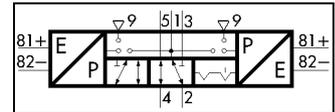
- Type 3963-XX25 Pilot Valve ①/
Type 3756-X2X3 Booster Valve ②**
- 3/2-way function
 - K_{vs} value 4.3
 - Connection G (NPT) $1/2$
 - Safety function according to TÜV
 - Wall mounting or mounting with pipe fittings to linear actuators, e. g. SAMSON's Type 271/3277 Actuator



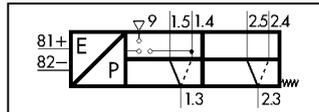
- Type 3963-XX25 Pilot Valve ①/
Type 3756-X209 Booster Valve ②**
- 5/2-way function
 - K_{vs} value 4.3
 - Connection G (NPT) $1/2$
 - Wall mounting



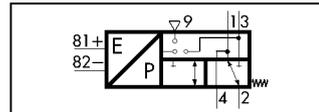
- Type 3963-XX76 Pilot Valve ①/
Type 3756-X205 Booster Valve ②**
- 5/2-way function
 - K_{vs} value 1.4
 - Connection G (NPT) $1/4$
 - Wall mounting or mounting with pipe fittings to linear actuators, e. g. SAMSON's Type 271/3277 Actuator



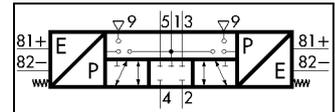
- Type 3963-XX76 Pilot Valves ①/
Type 3756-X325 Booster Valve ②**
- 5/2-way function, detented (two positions)
 - K_{vs} value 1.4
 - Connection G (NPT) $1/4$
 - Safety function according to TÜV
 - Wall mounting



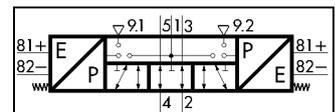
- Type 3963-XX25 Pilot Valve ①/
Type 3756-X210 Booster Valve ②**
- 6/2-way function
 - K_{vs} value 4.3
 - Connection G (NPT) $1/2$
 - Wall mounting



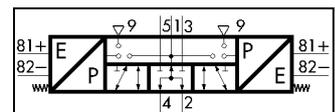
- Type 3963-XX76 Pilot Valve ①/
Type 3756-X206 Booster Valve ②**
- 3/2-way function
 - Exhaust air return
 - K_{vs} value 1.4
 - Connection G (NPT) $1/4$
 - Safety function according to TÜV
 - Wall mounting or mounting with pipe fittings to linear actuators, e. g. SAMSON's Type 271/3277 Actuator



- Type 3963-XX76 Pilot Valves ①/
Type 3756-X335 Booster Valve ②**
- 5/3-way function, spring centered (ports 2 and 4 closed)
 - K_{vs} value 1.4
 - Connection G (NPT) $1/4$
 - Wall mounting



- Type 3963-XX76 Pilot Valves ①/
Type 3756-X345 Booster Valve ②**
- 5/3-way function, spring centered (ports 2 and 4 vented)
 - K_{vs} value 1.4
 - Connection G (NPT) $1/4$
 - Safety function according to TÜV
 - Wall mounting



- Type 3963-XX76 Pilot Valves ①/
Type 3756-X355 Booster Valve ②**
- 5/3-way function, spring centered (ports 2 and 4 to air supply)
 - K_{vs} value 1.4
 - Connection G (NPT) $1/4$
 - Wall mounting

Versions with NAMUR interface

Type 3963 Solenoid Valves for on-off/continuous actuators

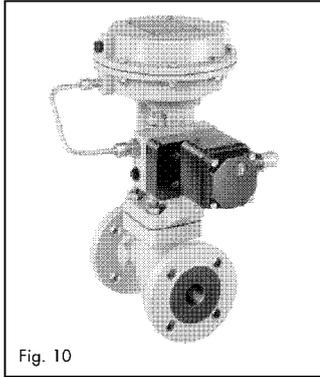


Fig. 10

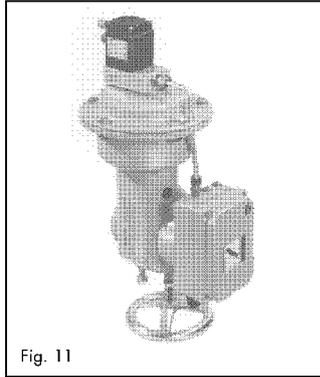


Fig. 11

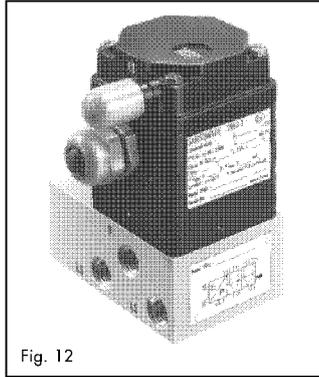
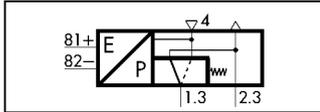
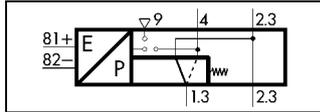


Fig. 12



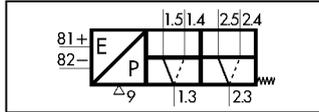
Type 3963-XX21 Solenoid Valve

- 3/2-way function
- K_{vs} value 0.16
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Safety function according to TÜV
- Attachment to on-off rotary actuators with NAMUR interface or via adapter plate (Order No. 1400-6751) to linear actuators with NAMUR rib, e. g. SAMSON's Type 241-1 (see Fig. 10)



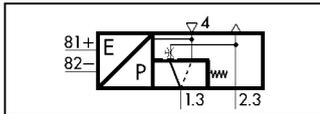
Type 3963-XX52 Solenoid Valve

- 3/2-way function
- K_{vs} value 0.32
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Safety function according to TÜV
- Attachment to rotary actuators with NAMUR interface, e. g. SAMSON's Type 3278 equipped with a SAMSON positioner (see Fig. 11)



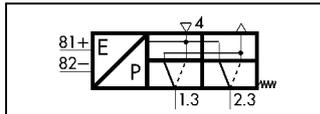
Type 3963-XX62 Solenoid Valve

- 6/2-way function
- K_{vs} value 0.16
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Attachment to rotary actuators with NAMUR interface or via adapter plate (Order No. 1400-6751) to linear actuators with NAMUR rib



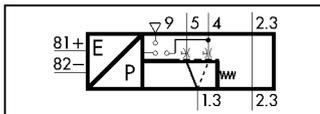
Type 3963-XX22 Solenoid Valve

- 3/2-way function
- Adjustable exhaust air restrictor
- K_{vs} value 0.16
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Attachment to on-off rotary actuators with NAMUR interface or via adapter plate (Order No. 1400-6751) to linear actuators with NAMUR rib, e. g. SAMSON's Type 241-1 (see Fig. 10)



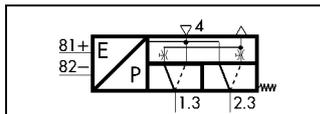
Type 3963-XX11 Solenoid Valve

- 5/2-way function
- K_{vs} value 0.16
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Attachment to on-off rotary actuators with NAMUR interface, e. g. SAMSON's Type 3278 equipped with a SAMSON positioner (see Fig. 11)



Type 3963-XX23 Solenoid Valve

- 3/2-way function
- Adjustable supply air/exhaust air restrictors
- K_{vs} value 0.16
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Attachment to on-off rotary actuators with NAMUR interface or via adapter plate (Order No. 1400-6751) to linear actuators with NAMUR rib, e. g. SAMSON's Type 241-1 (see Fig. 10)



Type 3963-XX12 Solenoid Valve

- 5/2-way function
- Two adjustable exhaust air restrictors
- K_{vs} value 0.16
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Attachment to on-off rotary actuators with NAMUR interface, e. g. SAMSON's Type 3278 equipped with a SAMSON positioner (see Fig. 11)

Solenoid valves consisting of Type 3963 Pilot Valve ①/Type 3756 Booster Valve ②, for on-off/continuous actuators

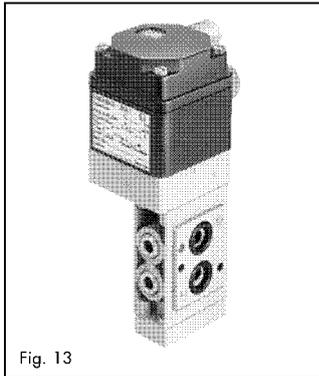
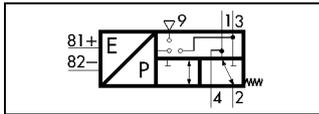


Fig. 13



Type 3963-XX76 Pilot Valve ①/
Type 3756-X208 Booster Valve ②

- 3/2-way function
- Exhaust air return
- K_{vs} value 1.4
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Safety function according to TÜV
- Attachment to rotary actuators with NAMUR interface or via adapter plate (Order No. 1400-6751) to linear actuators with NAMUR rib

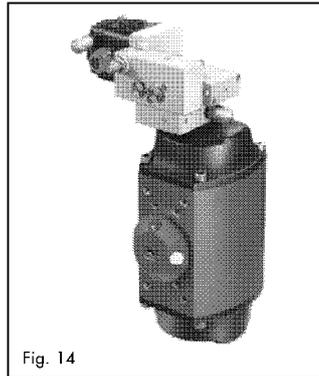
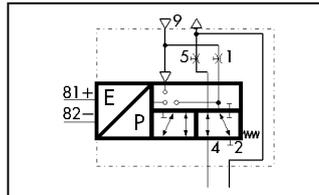


Fig. 14



Type 3963-XX76 Pilot Valve ①/
Type 3756-X207 Booster Valve ②/
Restrictor block (Order No. 1400-6763)

- 5/2-way function
- K_{vs} value 1.4
- Connection G 1/4" (NPT)/NAMUR
- Attachment to single-acting on-off rotary actuators with NAMUR interface (see Fig. 14)

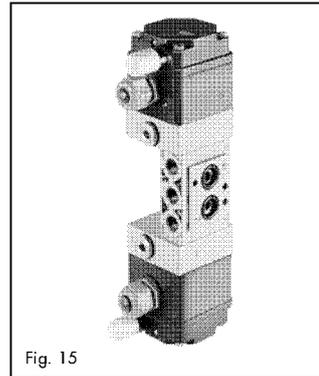
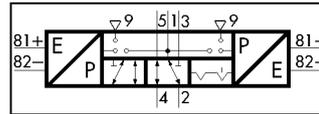
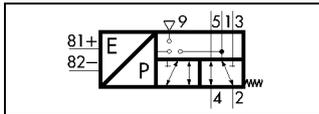


Fig. 15



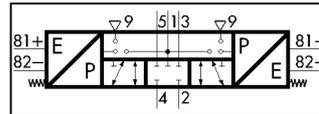
Type 3963-XX76 Pilot Valves ①/
Type 3756-X327 Booster Valve ②

- 5/2-way function, detented (two positions)
- K_{vs} value 1.4
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Safety function according to TÜV
- Attachment to rotary actuators with NAMUR interface



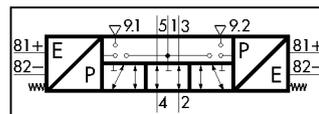
Type 3963-XX76 Pilot Valve ①/
Type 3756-X207 Booster Valve ②

- 5/2-way function
- K_{vs} value 1.4
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Attachment to rotary actuators with NAMUR interface or via adapter plate (Order No. 1400-6751) to linear actuators with NAMUR rib



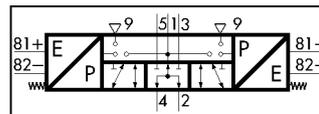
Type 3963-XX76 Pilot Valves ①/
Type 3756-X337 Booster Valve ②

- 5/3-way function, spring centered (ports 2 and 4 closed)
- K_{vs} value 1.4
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Attachment to rotary actuators with NAMUR interface



Type 3963-XX76 Pilot Valves ①/
Type 3756-X347 Booster Valve ②

- 5/3-way function, spring centered (ports 2 and 4 vented)
- K_{vs} value 1.4
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Safety function according to TÜV
- Attachment to rotary actuators with NAMUR interface



Type 3963-XX76 Pilot Valves ①/
Type 3756-X357 Booster Valve ②

- 5/3-way function, spring centered (ports 2 and 4 to air supply)
- K_{vs} value 1.4
- Connection G (NPT) 1/4"/NAMUR
- Attachment to rotary actuators with NAMUR interface

Function

Solenoid valves with single actuation

The solenoid valves consist of an E/P binary converter (A) with manual override (B) (optionally) and a single-actuated booster valve (C) with return spring (Fig. 16).

The booster valve (C) supplies the E/P binary converter (A) internally with the air supply (delivery state). Rotating the flat gasket allows the E/P binary converter (A) to be supplied with external air supply via connection 9.

The pressure reducer (5) reduces the air supply pressure to 1.4 bar.

In the normal position, the flapper (2) is lifted off the outlet nozzle (1) by the spring (3). As a result, a pressure lower than the switch-off pressure of the booster valve (C) builds up in the pressure divider that consists of a restriction (4) and an outlet nozzle (1).

When the solenoid (4) is energized by an electrical binary signal, the outlet nozzle (1) is closed by the flapper (2) against the force of the spring (3). As a result, the pressure in the pressure divider rises above the switch-on pressure of the booster valve (C), thus switching it to the operating position.

After de-energizing the electrical binary signal, the booster valve (C) will be switched to the normal position by a return spring.

Solenoid valves with double actuation

The solenoid valves consist of two E/P binary converters (A) with manual override (B) (optionally) and a detented or spring-centered double-actuated booster valve (C).

The booster valve (C) supplies the E/P binary converters (A) internally with the air supply (delivery state). Rotating the two flat gaskets allow the E/P binary converters (A) to be supplied with external air supply via connection 9.

The pressure reducer (5) reduces the air supply pressure to 1.4 bar.

In the normal position, the flapper (2) is lifted off the outlet nozzle (1) by the spring (3). As a result, a pressure lower than the switch-off pressure of the booster valve (C) builds up in the pressure divider that consists of a restriction (4) and an outlet nozzle (1).

When the solenoid (4) is energized by an electrical binary signal, the outlet nozzle (1) is closed by the flapper (2) against the force of the spring (3). As a result, the pressure in the pressure divider rises above the switch-on pressure of the booster valve (C), thus switching it to the operating position.

After de-energizing the electrical binary signal, the operating position of the detented booster valve (C) will be retained until a reverse signal is received. After de-energizing the electrical binary signal, the spring-centered booster valve (C) will be switched to the mid-position by a return spring.

Energizing both E/P binary converters (A) at the same time must be prevented by appropriate electrical control.

Functional diagram

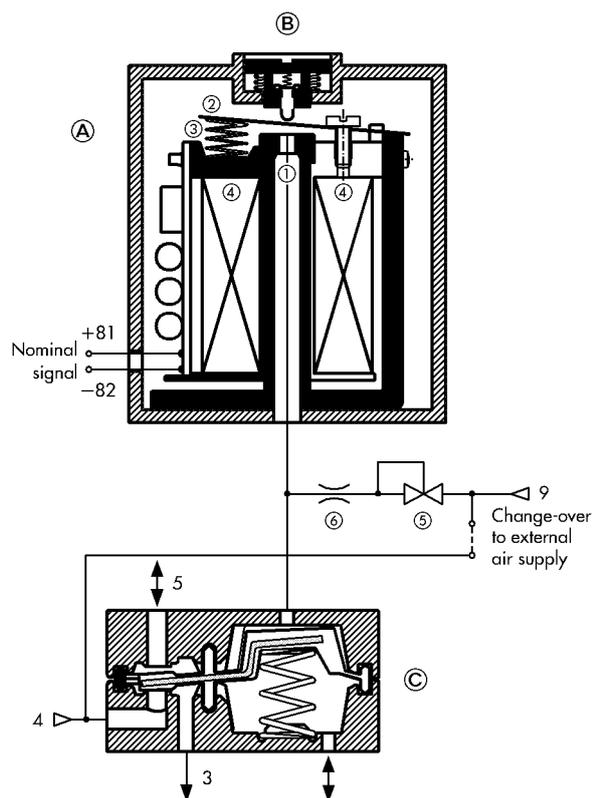


Fig. 16 · Solenoid valve with diaphragm element
(K_{vs} value 0.16)

Technical data

Type 3963 Solenoid Valves								
General data								
Construction	Solenoid with flapper/nozzle assembly and diaphragm elements							
Degree of protection	IP 54 with filter, IP 65 with filter check valve							
Material Enclosure	Trogamid TG 35, glass-fiber reinforced, black							
Connection plate	Al Mg, powder-coated, grayish beige, RAL 1019, or stainless steel on request, Trogamid TG 35, glass-fiber reinforced, black (for Types 3963-XX11/-XX12/-XX21/-XX22)							
Screws	Stainless steel							
Springs	Stainless steel							
Gaskets	Silicone rubber, Perbunan							
Diaphragms	Chloroprene 57 Cr 868 (–25 to +80 °C), silicone rubber (–45 to +80 °C)							
Ambient temperature	See "Electrical data"							
Mounting position	As desired							
Weight approx.	570 g							
Electrical data								
Nominal signal	U_n	6 V DC max. 27 V ¹⁾	12 V DC max. 25 V ¹⁾	24 V DC max. 32 V ¹⁾	24 V AC max. 36 V ¹⁾	48 V AC max. 80 V ¹⁾	115 V AC max. 130 V ¹⁾	230 V AC max. 255 V ¹⁾
	f	–				48 to 62 Hz		
Switching point "On"	$U_{+80^\circ\text{C}}$	$\geq 4.8 \text{ V}$	$\geq 9.6 \text{ V}$	$\geq 18 \text{ V}$	19 to 36 V	42 to 80 V	82 to 130 V	183 to 255 V
	$I_{+20^\circ\text{C}}$	$\geq 1.41 \text{ mA}$	$\geq 1.52 \text{ mA}$	$\geq 1.57 \text{ mA}$	$\geq 1.9 \text{ mA}$	$\geq 1.9 \text{ mA}$	$\geq 2.2 \text{ mA}$	$\geq 2.6 \text{ mA}$
	$P_{+20^\circ\text{C}}$	$\geq 5.47 \text{ mW}$	$\geq 13.05 \text{ mW}$	$\geq 26.71 \text{ mW}$	$\geq 0.04 \text{ VA}$	$\geq 0.07 \text{ VA}$	$\geq 0.17 \text{ VA}$	$\geq 0.46 \text{ VA}$
"Off"	$U_{-25^\circ\text{C}}$	$\leq 1.0 \text{ V}$	$\leq 2.4 \text{ V}$	$\leq 4.7 \text{ V}$	$\leq 4.5 \text{ V}$	$\leq 9 \text{ V}$	$\leq 18 \text{ V}$	$\leq 36 \text{ V}$
Input impedance	$R_{+20^\circ\text{C}}$	2.6 k Ω	5.5 k Ω	10.7 k Ω	Approx. 10 k Ω	Approx. 24 k Ω	Approx. 40 k Ω	Approx. 80 k Ω
Temperature effect		0.4 %/°C	0.2 %/°C	0.1 %/°C	0.1 %/°C	0.1 %/°C	0.05 %/°C	0.03 %/°C
Type of protection ²⁾	II 2 G EEx ia IIC T6 or II 3 G EEx nA II T6				Without explosion protection			
Output voltage ³⁾	U_i	25 V	27 V	28 V	30 V	32 V	–	
Output current ³⁾	I_i	150 mA	125 mA	115 mA	100 mA	85 mA	–	
Power dissipation ³⁾	P_i	250 mW	No limitation			–		
External inductance ³⁾	L_i	Negligible				–		
External capacitance ³⁾	C_i	Negligible				–		
Ambient temperature ⁴⁾		–25 to +60 °C (temperature class T6), –25 to +70 °C (temperature class T5), –25 to +80 °C (temperature class T4)				–25 to +80 °C		
Connection	Connection to a terminal or via a plug-type connector (see "Versions and ordering data", page 22)							
Pneumatic data								
Type 3963		-XX20/-XX22 -XX23/-XX28 -XX29	-XX21 -XX27	-XX50	-XX52/-XX53 -XX54/-XX55	-XX10/-XX11 -XX12/-XX14	-XX60/-XX62 -XX64	
Safety function		–	TÜV ⁵⁾	–	TÜV ⁵⁾	–	–	
Version		3/2-way function		3/2-way function		5/2-way function		6/2-way function
K_{vs} value ⁶⁾		0.16		0.32		0.16		0.16
Air supply	Medium	Instrument air, free of corrosive particles, or nitrogen						
	Pressure	1.4 to 6 bar						
Operating medium		Instrument air, free of corrosive particles ⁷⁾ , oil-containing air or noncorrosive gases ⁸⁾						
Operating pressure max.		6 bar						
Output signal		Operating pressure						
Air consumption		$\leq 80 \text{ l/h}$ at 1.4 bar air supply (normal position), $\leq 10 \text{ l/h}$ at 1.4 bar air supply (operating position)						
Switching time ⁹⁾		$\leq 65 \text{ ms}$						
Switching cycles		$\geq 2 \times 10^7$ (–25 to +80 °C), $\geq 2 \times 10^6$ (–45 to +80 °C)						
Connection		G (NPT) 1/4						

1) Permissible maximum value at continuous duty. For Ex versions, the permissible maximum value U_i applies.

2) According to EC-type-examination Certificate PTB 01 ATEX 2085 or Statement of Conformity PTB 01 ATEX 2086X.

3) Permissible maximum values when connected to a certified intrinsically safe circuit.

4) Permissible ambient temperature –45 °C with diaphragms made of silicone rubber.

5) Report No. S63/00 (used on control valves according to DIN 3394 Part 1, DIN EN 161, DIN 32725, DIN EN 264 and DIN 32730), Report No. S64/00 (safety function up to class AK 7 according to DIN V 19251).

6) Air flow at $p_1=2.4 \text{ bar}$ and $p_2=1.0 \text{ bar}$ can be calculated according to the following equation: $Q=K_{vs} \times 36.22$, expressed in m^3/h .

7) With internal air supply (delivery state).

8) With external air supply (see mounting and operating instructions EB 3963 EN).

9) For Types 3963-XX12/-XX22/-XX23/-XX29 with supply air/exhaust air restrictors different closing and opening times can be adjusted in a ratio of 1:15.

Technical data (continued from page 7)

Type 3963 Pilot Valves ① for Type 3756 Booster Valves ②									
General data									
Construction	Solenoid with flapper/nozzle assembly and diaphragm element								
Degree of protection	IP 54 with filter, IP 65 with filter check valve								
Material	Enclosure	Trogamid TG 35, glass-fiber reinforced, black							
	Connection plate	Al Mg, powder-coated, grayish beige RAL 1019, or stainless steel on request							
	Screws	Stainless steel							
	Springs	Stainless steel							
	Gaskets	Silicone rubber, Perbunan							
Diaphragm	Chloroprene 57 Cr 868 (-25 to +80 °C), silicone rubber (-45 to +80 °C)								
Ambient temperature	See "Electrical data"								
Mounting position	As desired								
Weight approx.	250 g								
Electrical data									
Nominal signal	U _n	6 V DC max. 27 V ¹⁾	12 V DC max. 25 V ¹⁾	24 V DC max. 32 V ¹⁾	24 V AC max. 36 V ¹⁾	48 V AC max. 80 V ¹⁾	115 V AC max. 130 V ¹⁾	230 V AC max. 255 V ¹⁾	
	f	-				48 to 62 Hz			
Switching point	"On"	U _{+80°C}	≥ 4.8 V	≥ 9.6 V	≥ 18 V	19 to 36 V	42 to 80 V	82 to 130 V	183 to 255 V
		I _{+20°C}	≥ 1.41 mA	≥ 1.52 mA	≥ 1.57 mA	≥ 1.9 mA	≥ 1.9 mA	≥ 2.2 mA	≥ 2.6 mA
		P _{+20°C}	≥ 5.47 mW	≥ 13.05 mW	≥ 26.71 mW	≥ 0.04 VA	≥ 0.07 VA	≥ 0.17 VA	≥ 0.46 VA
	"Off"	U _{-25°C}	≤ 1.0 V	≤ 2.4 V	≤ 4.7 V	≤ 4.5 V	≤ 9 V	≤ 18 V	≤ 36 V
Input impedance	R _{+20°C}	2.6 kΩ	5.5 kΩ	10.7 kΩ	Approx. 10 kΩ	Approx. 24 kΩ	Approx. 40 kΩ	Approx. 80 kΩ	
Temperature effect		0.4 %/°C	0.2 %/°C	0.1 %/°C	0.1 %/°C	0.1 %/°C	0.05 %/°C	0.03 %/°C	
Type of protection ²⁾		II 2 G EEx ia IIC T6 or II 3 G EEx nA II T6				Without explosion protection			
Output voltage ³⁾	U _i	25 V	27 V	28 V	30 V	32 V	-		
Output current ³⁾	I _i	150 mA	125 mA	115 mA	100 mA	85 mA	-		
Power dissipation ³⁾	P _i	250 mW	No limitation			-			
External inductance ³⁾	L _i	Negligible				-			
External capacitance ³⁾	C _i	Negligible				-			
Ambient temperature ⁴⁾		-25 to +60 °C (temperature class T6), -25 to +70 °C (temperature class T5), -25 to +80 °C (temperature class T4)				-25 to +80 °C			
Connection	Connection to a terminal or via a plug-type connector (see "Versions and ordering data", page 23)								
Pneumatic data									
Type 3963	-XX25				-XX76				
Safety function	TÜV ⁵⁾								
Version	3/2-way function								
K _{vs} value ⁶⁾	0.16				0.01				
Air supply	Medium	Instrument air, free of corrosive particles, or nitrogen							
	Pressure	1.4 to 6 bar							
Output signal	Air supply pressure					≥ 1.2 bar			
Air consumption	≤ 80 l/h at 1.4 bar air supply (normal position), ≤ 10 l/h at 1.4 bar air supply (operating position)								
Switching time	≤ 65 ms								
Switching cycles	≥ 2 × 10 ⁷ (-25 to +80 °C), ≥ 2 × 10 ⁶ (-45 to +80 °C)				≥ 2 × 10 ⁷				
Connection	Without connection plate								

1) Permissible maximum value at continuous duty. For Ex versions, the permissible maximum value U_i applies.

2) According to EC-type-examination Certificate PTB 01 ATEX 2085 or Statement of Conformity PTB 01 ATEX 2086X.

3) Permissible maximum values when connected to a certified intrinsically safe circuit.

4) Permissible ambient temperature -45 °C with diaphragm made of silicone rubber.

5) Report No. S63/00 (used on control valves according to DIN 3394 Part 1, DIN EN 161, DIN 32725, DIN EN 264 and DIN 32730), Report No. S64/00 (safety function up to class AK 7 according to DIN V 19251).

6) Air flow at p₁=2.4 bar and p₂=1.0 bar can be calculated according to the following equation: Q=K_{vs} × 36.22, expressed in m³/h.

Technical data (continued from page 8)

Type 3756 Booster Valves ②, single-actuated by one Type 3963-XX25 Pilot Valve ①				
Type 3756	-X203	-X213	-X209	-X210
Safety function	TÜV 1)	TÜV 1)	–	–
Version	3/2-way function	3/2-way function	5/2-way function	6/2-way function
K_{vs} value 2) (in direction of flow)	1.9 (4→3), 1.5 (3→4) 4.3 (3→5), 4.7 (5→3)	1.9 (4→3), 1.5 (3→4) 4.3 (3→5), 4.7 (5→3)	1.9 (4→3), 1.5 (3→4) 4.3 (3→5), 4.7 (5→3)	1.9 (4→3), 1.5 (3→4) 4.3 (3→5), 4.7 (5→3)
Construction	Seat valve, soft-seated type, with return spring			
Material	Enclosure	GD AlSi 12, powder-coated, grayish beige RAL 1019, or stainless steel on request		
	Diaphragm	Chloroprene	Silicone rubber	Chloroprene
	Gaskets	Chloroprene	Silicone rubber	Chloroprene
	Screws	Stainless steel		
Actuation	Single-actuated by one Type 3963-XX25 Pilot Valve ① (see "Technical data", page 8)			
Operating medium	Instrument air, free of corrosive particles, or nitrogen 3), instrument air, free of corrosive particles, oil-containing air or noncorrosive gases 4)			
Operating pressure max. (in direction of flow)	10 bar (4→3, 3→5) 2 bar (as desired)	10 bar (4→3, 3→5) 2 bar (as desired)	10 bar (as desired) 2 bar (as desired)	10 bar (as desired) 2 bar (as desired)
Ambient temperature 5)	–25 to +80 °C			
Switching cycles (operating pressure)	$\geq 10^7$ (6 bar) $\geq 10^6$ (10 bar)	$\geq 10^6$ (6 bar) $\geq 10^5$ (10 bar)	$\geq 10^7$ (6 bar) $\geq 10^6$ (10 bar)	$\geq 10^7$ (6 bar) $\geq 10^6$ (10 bar)
Connection	G (NPT) 1/2	G (NPT) 1/2	G (NPT) 1/2	G (NPT) 1/2
Mounting position	As desired			
Weight approx.	585 g	585 g	1 100 g	1 100 g

1) Report No. S63/00 (used on control valves according to DIN 3394 Part 1, DIN EN 161, DIN 32725, DIN EN 264 and DIN 32730), Report No. S64/00 (safety function up to class AK 7 according to DIN V 19251).

2) Air flow at $p_1=2.4$ bar and $p_2=1.0$ bar can be calculated according to the following equation: $Q=K_{vs} \times 36.22$, expressed in m³/h.

3) With internal air supply for pilot valve ① (delivery state).

4) With external air supply for pilot valve ① (see mounting and operating instructions EB 3963 EN).

5) The permissible ambient temperature can be limited by the pilot valve ① (see "Technical data", page 8).

Type 3756 Booster Valves ②, single-actuated by one Type 3963-XX76 Pilot Valve ①				
Type 3756	-X205	-X206	-X207	-X208
Safety function	–	TÜV 1)	–	TÜV 1)
Version	5/2-way function	3/2-way function with exhaust air return	5/2-way function	3/2-way function with exhaust air return
K_{vs} value 2)	1.4			
Construction	Piston, metal-to-metal seating, without overlap			
Material	Enclosure	GD AlSi 12, powder-coated, grayish beige RAL 1019, or stainless steel on request		
	Gaskets	Perbunan		
	Filter	Polyethylene		
	Screws	Stainless steel		
Actuation	Single-actuated by one Type 3963-XX76 Pilot Valve ① (see "Technical data", page 8)			
Operating medium	Instrument air, free of corrosive particles, or nitrogen 3), instrument air, free of corrosive particles, oil-containing air or noncorrosive gases 4)			
Operating pressure max.	6 bar ³⁾ or 10 bar ⁴⁾			
Ambient temperature 5)	–45 to +80 °C			
Switching cycles	$\geq 2 \times 10^7$			
Connection	G (NPT) 1/4	G (NPT) 1/4	G (NPT) 1/4 NAMUR 6)	G (NPT) 1/4 NAMUR 6)
Mounting position	As desired			
Weight approx.	485 g			

1) Report No. S63/00 (used on control valves according to DIN 3394 Part 1, DIN EN 161, DIN 32725, DIN EN 264 and DIN 32730), Report No. S64/00 (safety function up to class AK 7 according to DIN V 19251).

2) Air flow at $p_1=2.4$ bar and $p_2=1.0$ bar can be calculated according to the following equation: $Q=K_{vs} \times 36.22$, expressed in m³/h.

3) With internal air supply for pilot valve ① (delivery state).

4) With external air supply for pilot valve ① (see mounting and operating instructions EB 3963 EN).

5) The permissible ambient temperature can be limited by the pilot valve ① (see "Technical data", page 8).

6) NAMUR interface according to VDI/VDE 3845.

Technical data (continued from page 9)

Type 3756 Booster Valves ②, double-actuated by two Type 3963-XX76 Pilot Valves ①								
Type 3756	-X325	-X327	-X335	-X337	-X345	-X347	-X355	-X357
Safety function	TÜV 1)		-		TÜV 1)		-	
Version	5/2-way function, detented (two positions)		5/3-way function, spring-centered (ports 2 and 4 closed)		5/3-way function, spring-centered (ports 2 and 4 vented)		5/3-way function, spring-centered (ports 2 and 4 to air supply)	
K _{vs} value 2)	1.4							
Construction	Piston, metal-to-metal seating, without overlap							
Material	Enclosure	GD AlSi 12, powder-coated, grayish beige RAL 1019, or stainless steel on request						
	Gaskets	Perbunan						
	Filter	Polyethylene						
	Screws	Stainless steel						
Actuation	Double-actuated by two Type 3963-XX76 Pilot Valves ① (see "Technical data", page 8)							
Operating medium	Instrument air, free of corrosive particles, or nitrogen 3), instrument air, free of corrosive particles, oil-containing air or noncorrosive gases 4)							
Operating pressure max.	6 bar ³⁾ or 10 bar ⁴⁾							
Ambient temperature 5)	-45 to +80 °C							
Switching cycles	≥ 2 × 10 ⁷							
Connection	G (NPT) 1/4	G (NPT) 1/4 NAMUR 6)	G (NPT) 1/4	G (NPT) 1/4 NAMUR 6)	G (NPT) 1/4	G (NPT) 1/4 NAMUR 6)	G (NPT) 1/4	G (NPT) 1/4 NAMUR 6)
Mounting position	As desired							
Weight approx.	685 g							

1) Report No. S63/00 (used on control valves according to DIN 3394 Part 1, DIN EN 161, DIN 32725, DIN EN 264 and DIN 32730), Report No. S64/00 (safety function up to class AK 7 according to DIN V 19251).

2) Air flow at p₁=2.4 bar and p₂=1.0 bar can be calculated according to the following equation: Q=K_{vs} × 36.22, expressed in m³/h.

3) With internal air supply for pilot valves ① (delivery state).

4) With external air supply for pilot valves ① (see mounting and operating instructions EB 3963 EN).

5) The permissible ambient temperature can be limited by the pilot valves ① (see "Technical data", page 8).

6) NAMUR interface according to VDI/VDE 3845.

Dimensions of devices without threaded connection

Type 3963-XX25 Pilot Valve
Types 3963-XX10/-XX20/-XX50/-XX60 Solenoid Valves

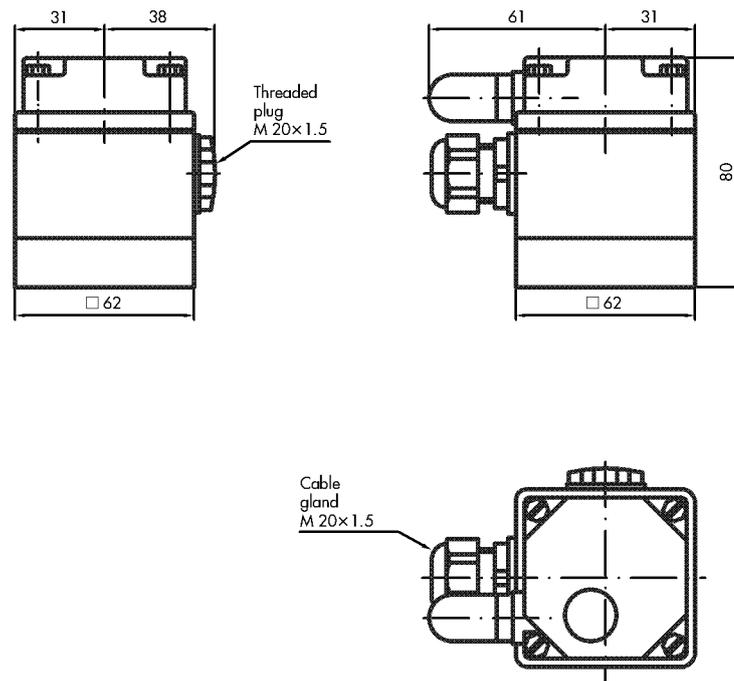


Fig. 17 · Dimensions in mm

Type 3963-XX76 Pilot Valve

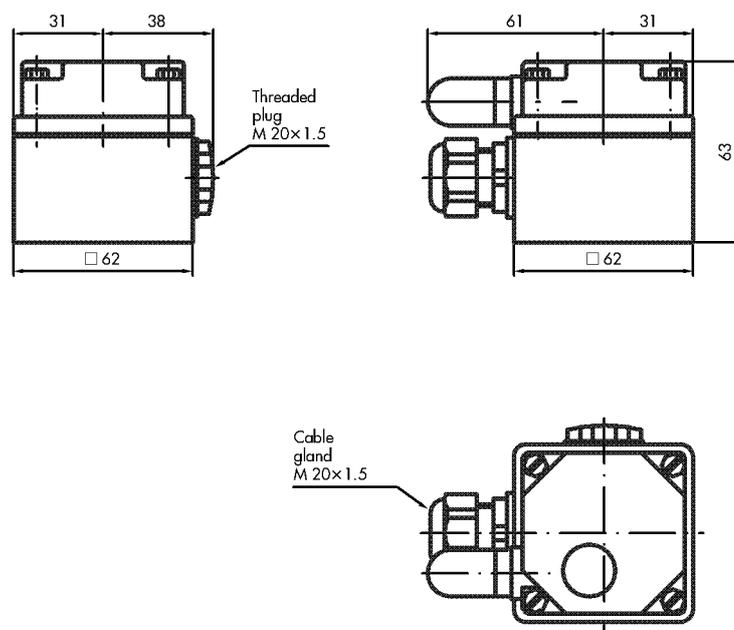


Fig. 18 · Dimensions in mm

Dimensions of devices with threaded connection

Type 3963-XX14 Solenoid Valve

Underneath view of connection plate

- ① M 4 / 7 mm depth
- ② M 3 / 6 mm depth
- ③ \varnothing 3 mm / 3.5 mm depth

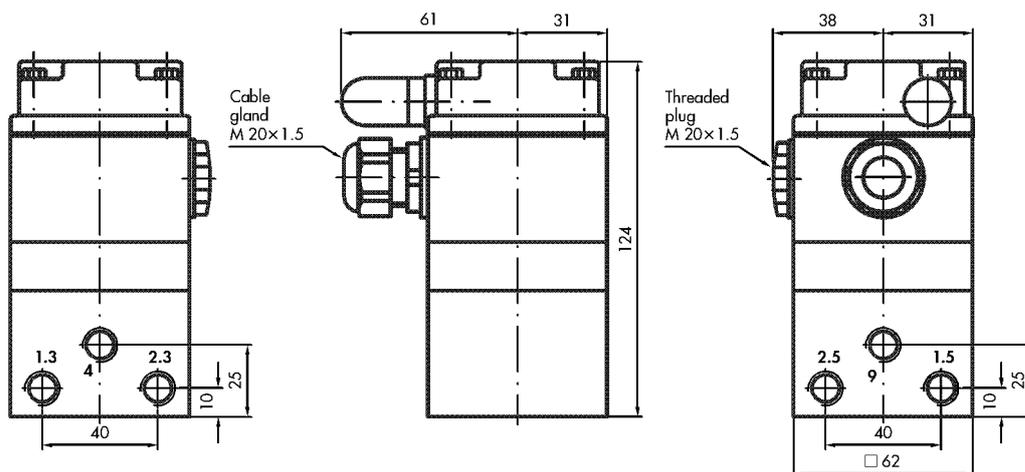
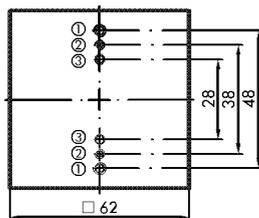
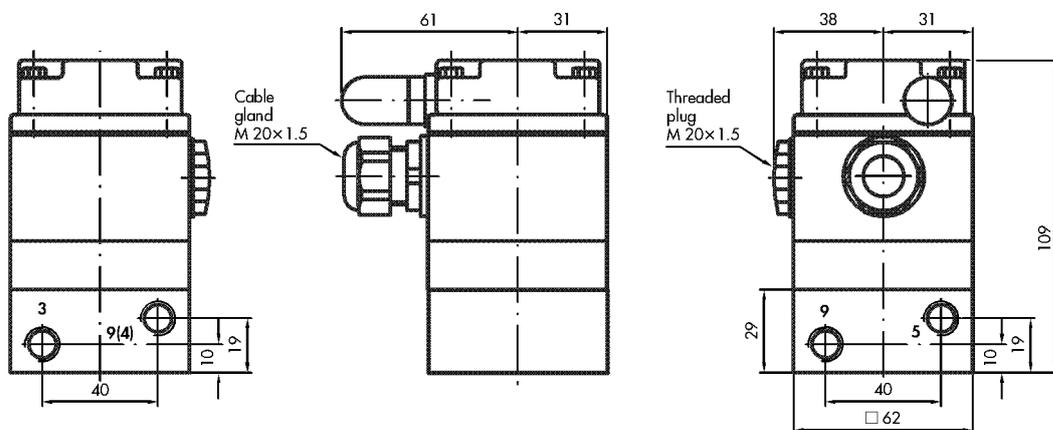
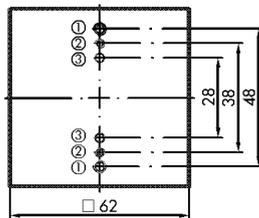


Fig. 19 · Dimensions in mm

Types 3963-XX27/-XX28/-XX54 Solenoid Valves

Underneath view of connection plate

- ① M 4 / 7 mm depth
- ② M 3 / 6 mm depth
- ③ \varnothing 3 mm / 3.5 mm depth



Connection 9 on Types 3963-XX27/-XX28
Connection 4 on Type 3963-XX54

Connections 5 and 9 only on Type 3963-XX54

Fig. 20 · Dimensions in mm

Type 3963-XX64 Solenoid Valve

Underneath view of connection plate

- ① M 4 / 7 mm depth
- ② M 3 / 6 mm depth
- ③ \varnothing 3 mm / 3.5 mm depth

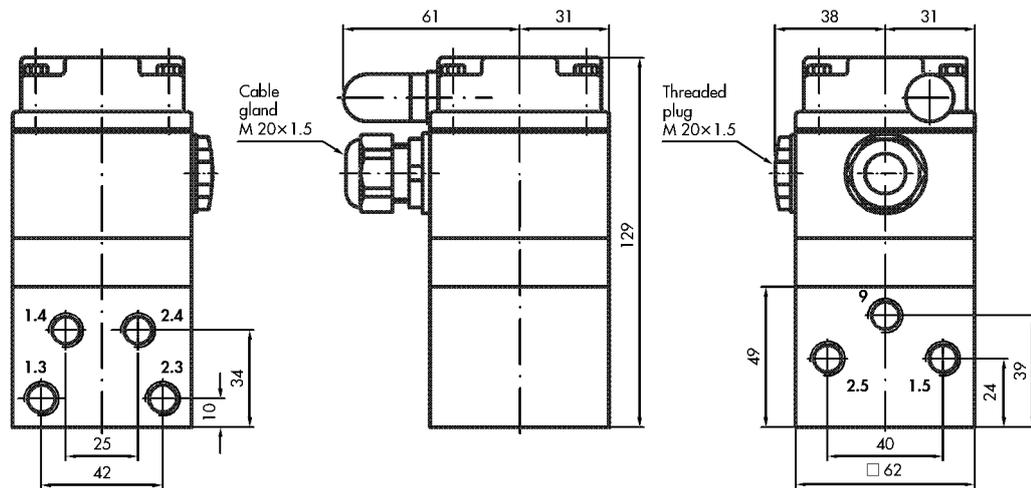
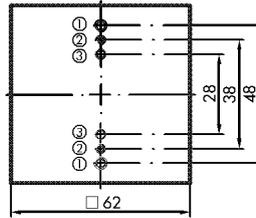
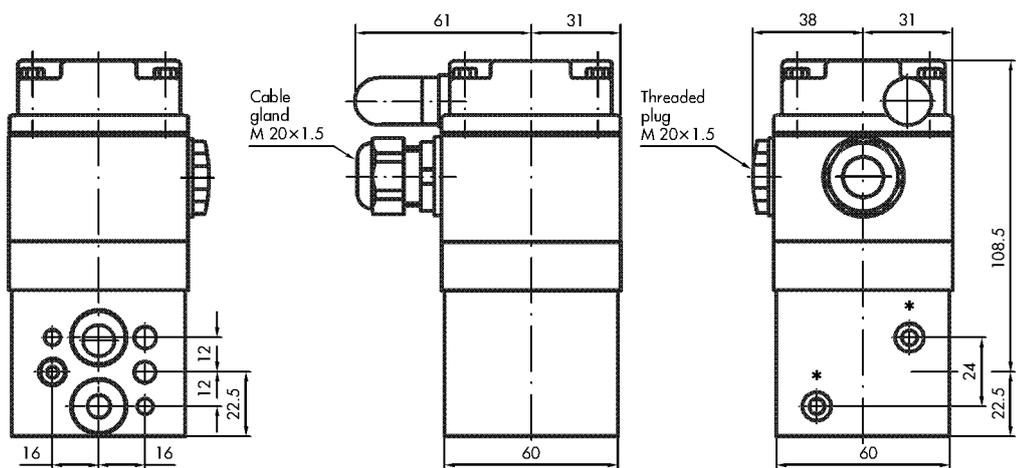


Fig. 21 · Dimensions in mm

Types 3963-XX29/-XX55 Solenoid Valves



* Attachment to connection block with 2 hexagon socket head screws

Fig. 22 · Dimensions in mm

Type 3963-XX25 Pilot Valve ① combined with Type 3756-X209 Booster Valve ②

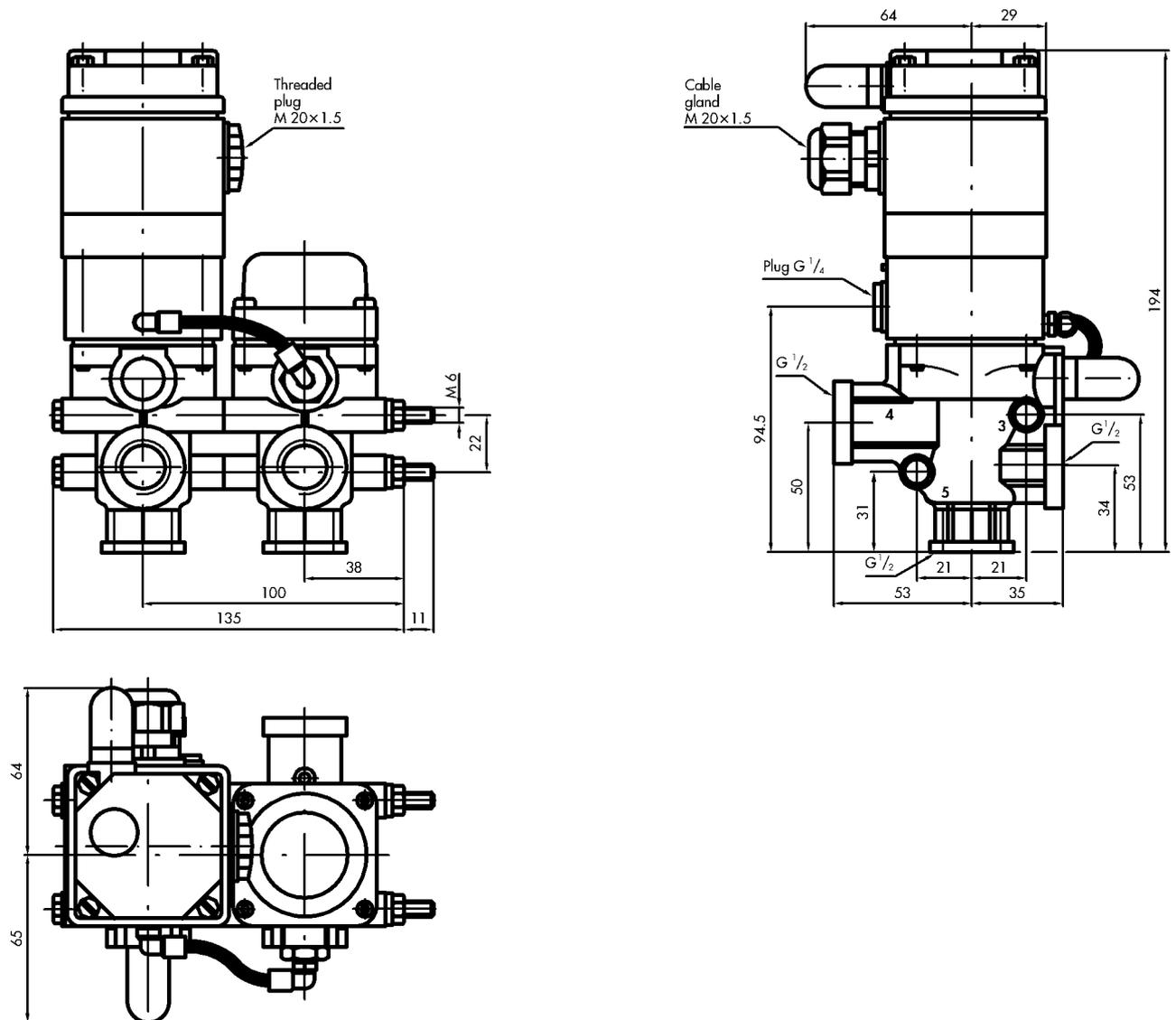


Fig. 24 · Dimensions in mm

Type 3963-XX25 Pilot Valve ① combined with Type 3756-X210 Booster Valve ②

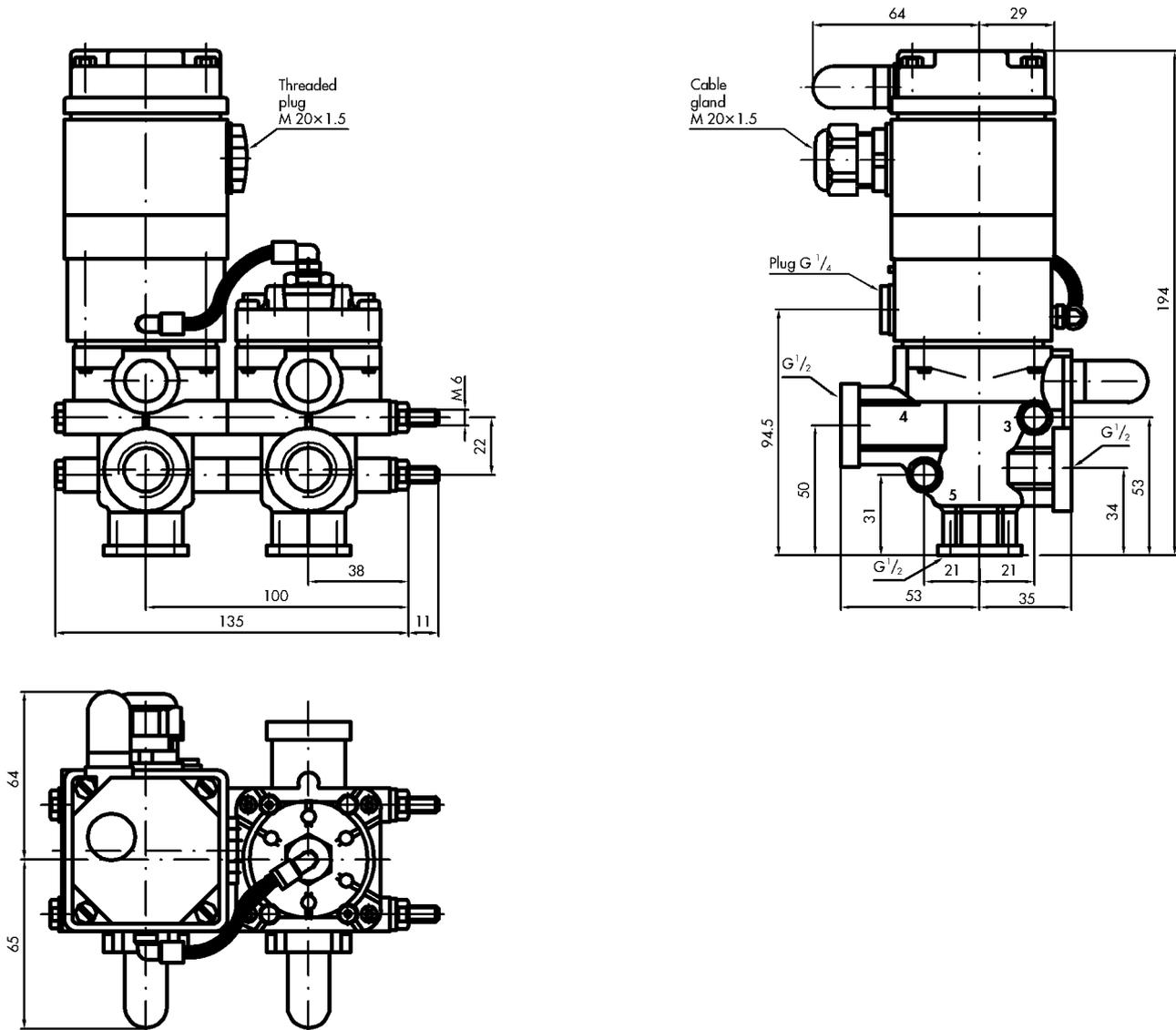
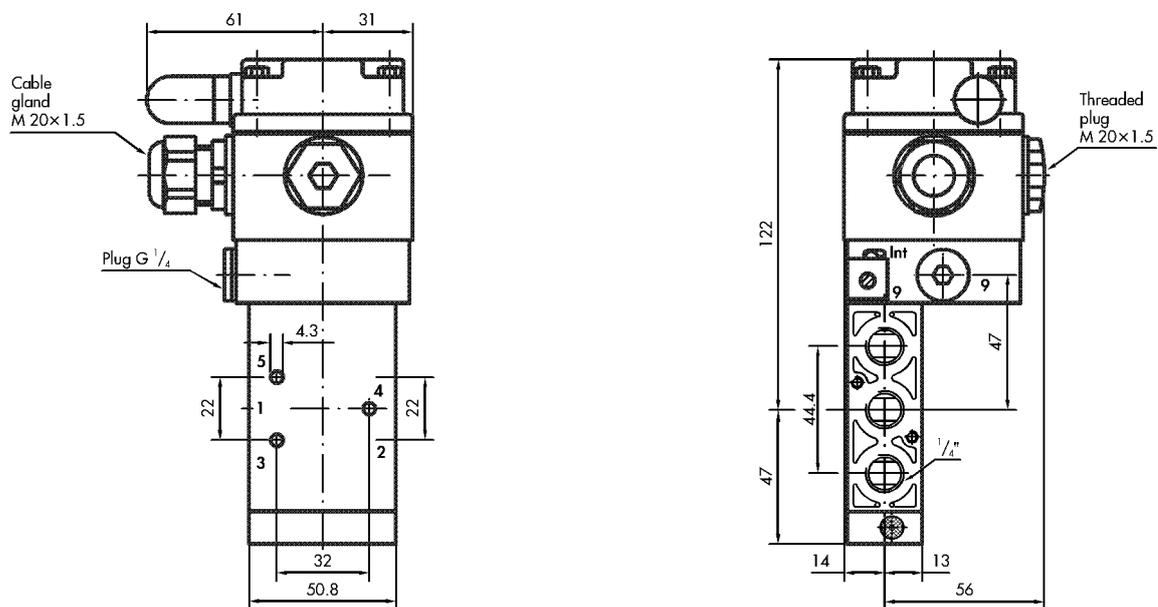


Fig. 25 · Dimensions in mm

Type 3963-XX76 Pilot Valve ① combined with Type 3756-X205/-X206 Booster Valve ②



Connection 5 is closed on Type 3756-X206

Fig. 26 · Dimensions in mm

Type 3963-XX76 Pilot Valve ① combined with Type 3756-X325/-X335/-X345/-X355 Booster Valve ②

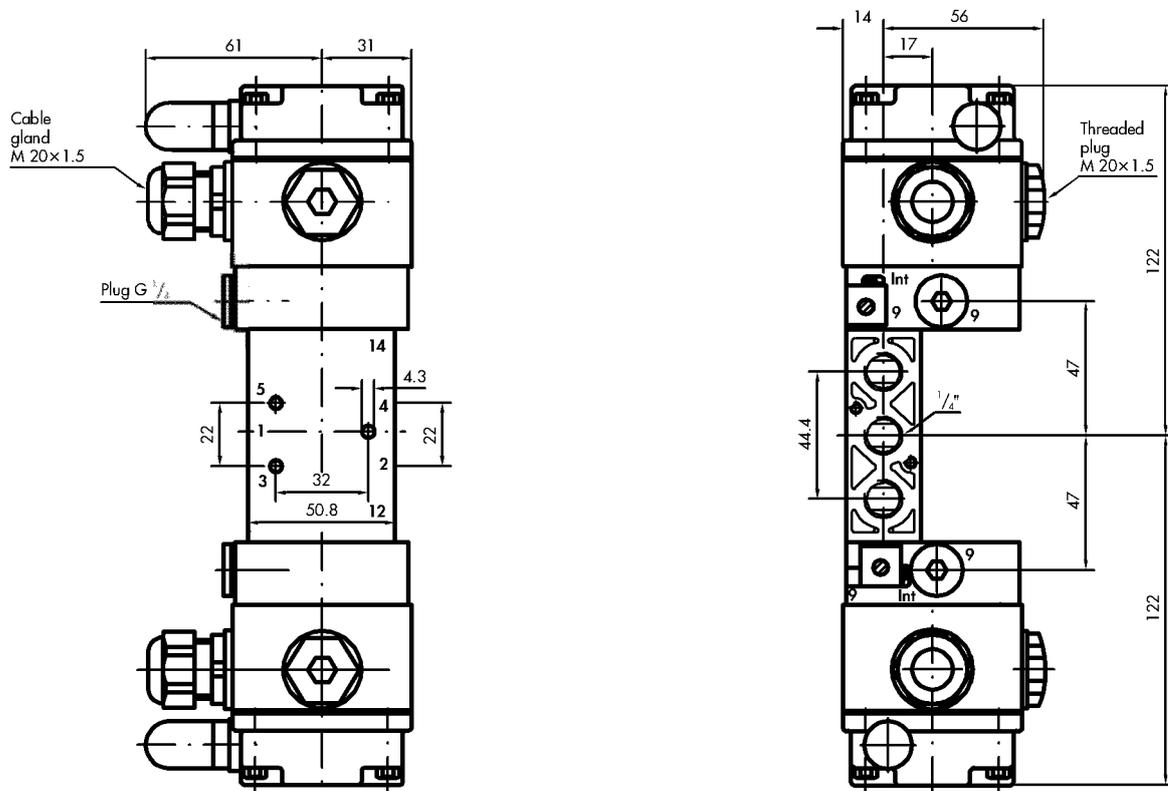


Fig. 27 · Dimensions in mm

Dimensions of devices with threaded connection for linear actuators with NAMUR rib

Type 3963-XX53 Solenoid Valve

Underneath view of connection plate

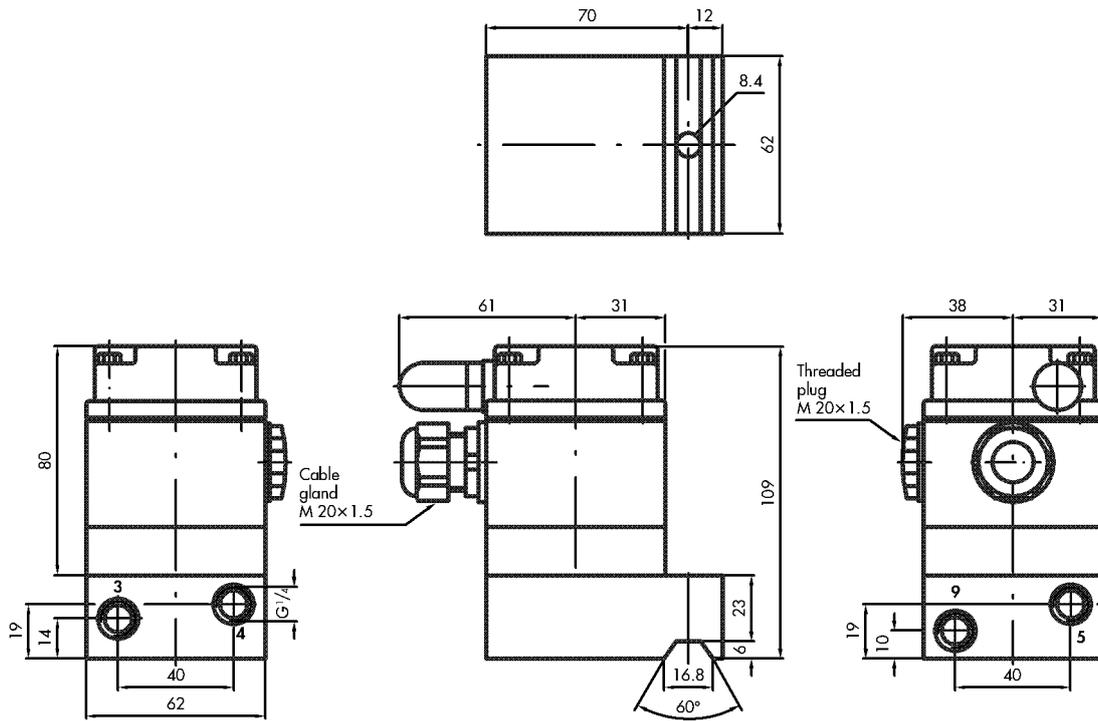


Fig. 28 · Dimensions in mm

Adapter plate NAMUR rib/NAMUR interface (Order No. 1400-6751)

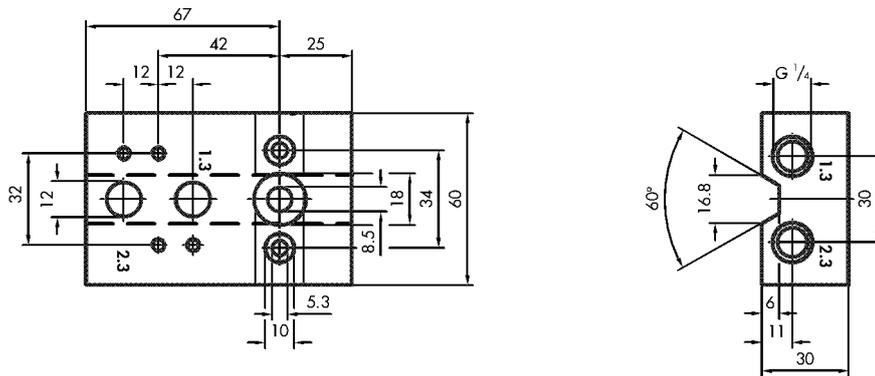


Fig. 29 · Dimensions in mm

Dimensions of devices with NAMUR interface for rotary actuators

Types 3963-XX11/-XX12/-XX21/-XX22 Solenoid Valves

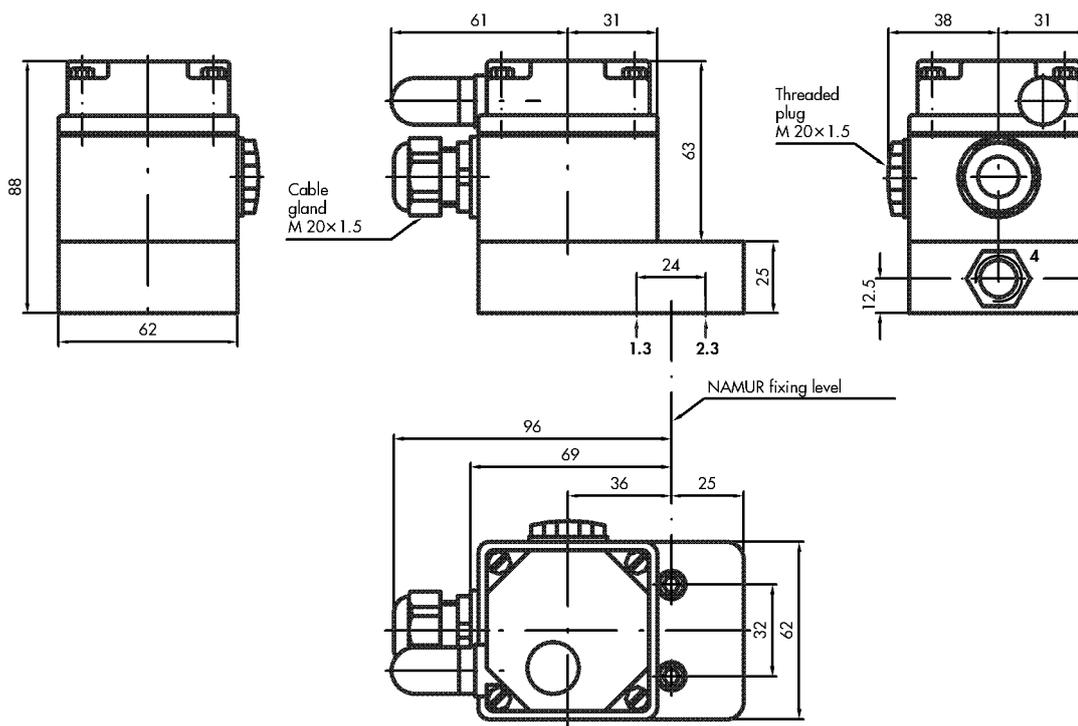


Fig. 30 · Dimensions in mm

Type 3963-XX52 Solenoid Valve

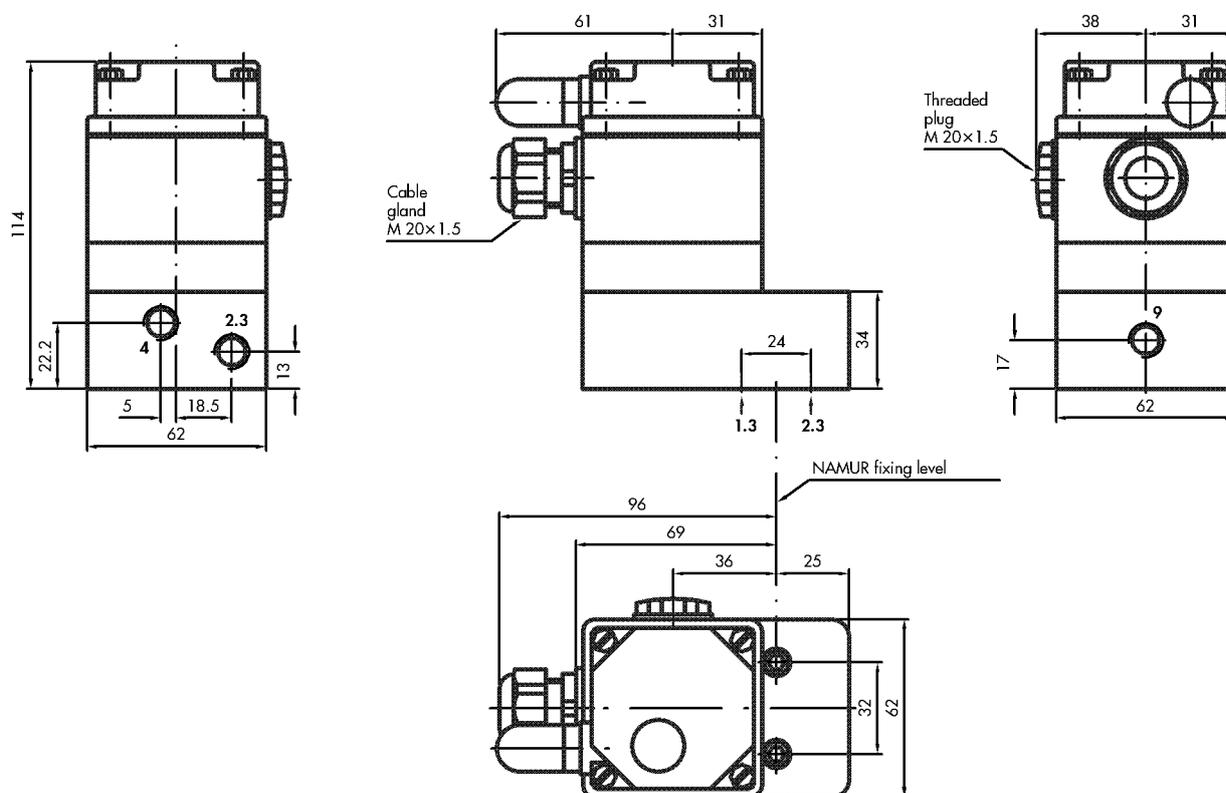


Fig. 31 · Dimensions in mm

Type 3963-XX62 Solenoid Valve

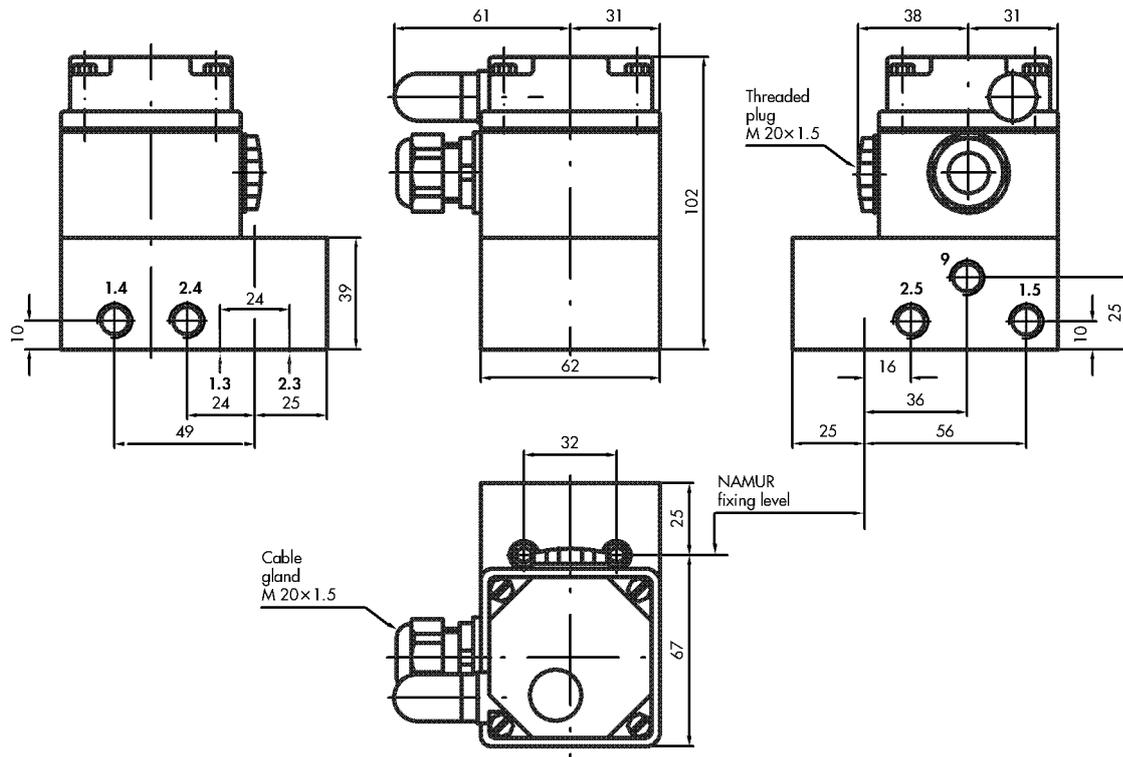
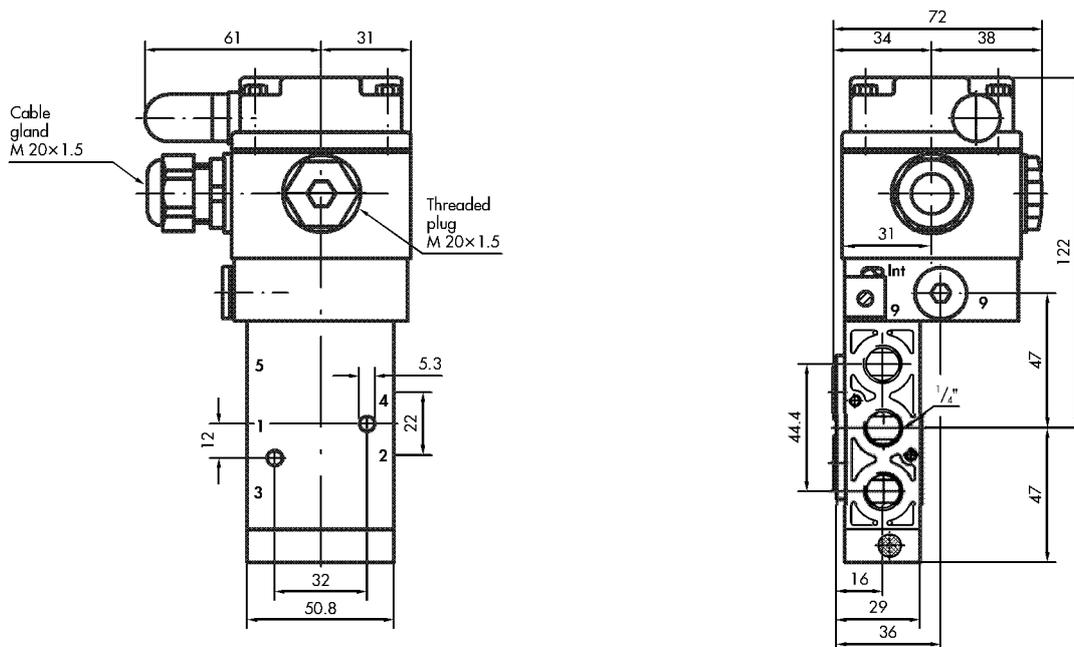


Fig. 32 · Dimensions in mm

Type 3963-XX76 Pilot Valve ① combined with Type 3756-X207/-X208 Booster Valve ②



Connection 5 is closed on Type 3756-X208

Fig. 33 · Dimensions in mm

Type 3963-XX76 Pilot Valve ① combined with Type 3756-X207 Booster Valve ② and restrictor block (Order No. 1400-6763) for single-acting rotary actuators with NAMUR interface

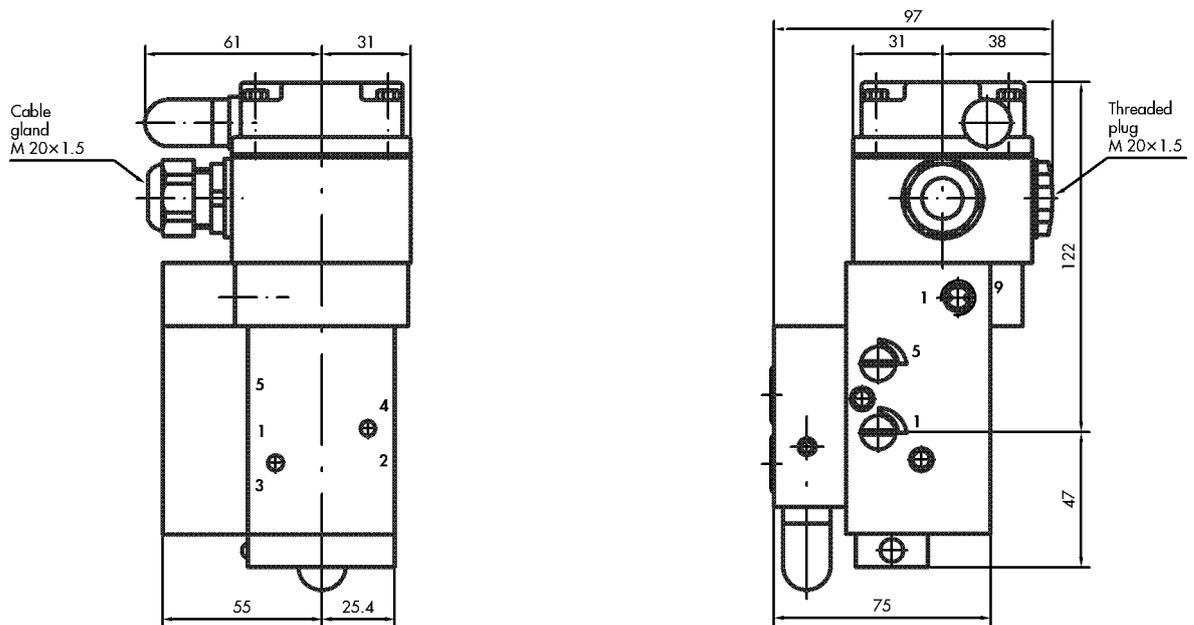


Fig. 34 · Dimensions in mm

Type 3963-XX76 Pilot Valve ① combined with Type 3756-X327/-X337/-X347/-X357 Booster Valve ②

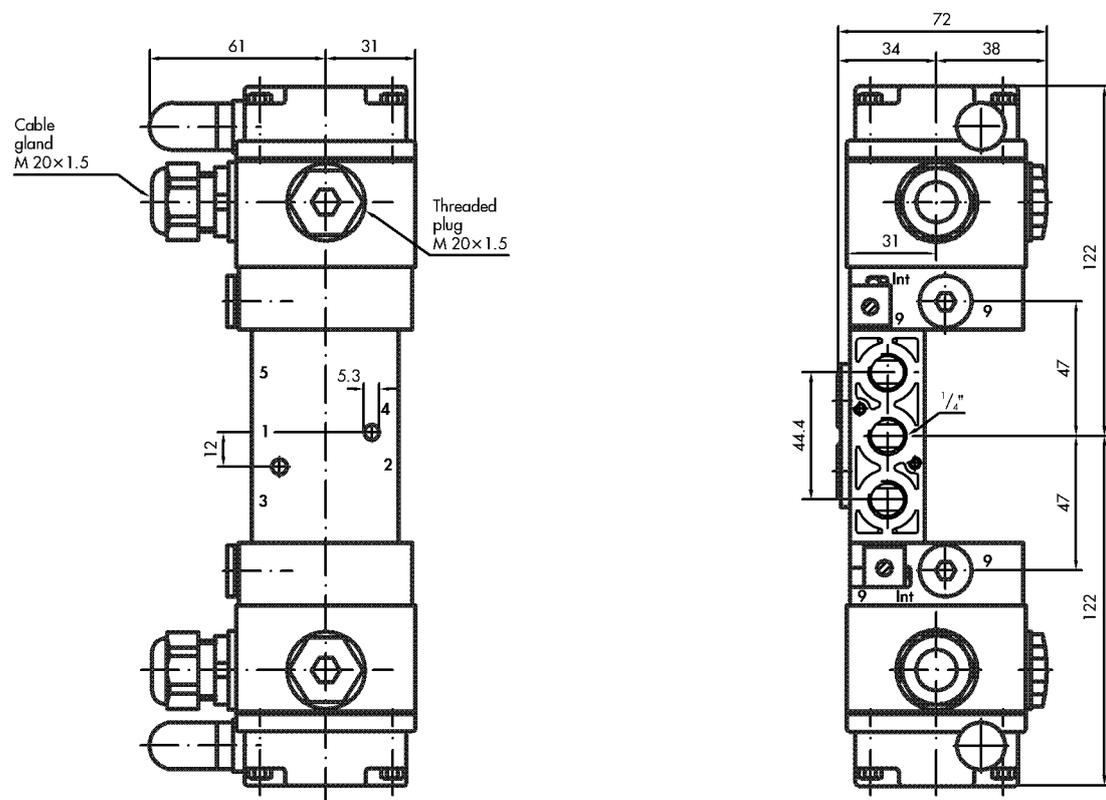


Fig. 35 · Dimensions in mm

Versions and ordering data

Type 3963 Solenoid Valve

(Connection G (NPT) 1/4, K_{vs} value 0.16 or 0.32)

Solenoid valve		Order No. 3963-	.	.	.	.	.	.
Type of protection	Without explosion protection (for DC nominal signal)		0	↑	↑	↑	↑	↑
	II 2 G EEx ia IIC T6 ¹⁾ (for DC nominal signal)		1	↑	↑	↑	↑	↑
	Without explosion protection (for AC nominal signal)		2	↑	↑	↑	↑	↑
	CSA/FM (for DC nominal signal)		3	↑	↑	↑	↑	↑
	II 3 G EEx nA II T6 ²⁾ (for DC nominal signal)		8	↑	↑	↑	↑	↑
Nominal signal	6 V DC, power consumption 5.47 mW		1	↑	↑	↑	↑	↑
	12 V DC, power consumption 13.05 mW		2	↑	↑	↑	↑	↑
	24 V DC, power consumption 26.71 mW		3	↑	↑	↑	↑	↑
	230 V AC, power consumption 0.46 VA (without explosion protection)		2 1	↑	↑	↑	↑	↑
	115 V AC, power consumption 0.17 VA (without explosion protection)		2 2	↑	↑	↑	↑	↑
	48 V AC, power consumption 0.07 VA (without explosion protection)		2 3	↑	↑	↑	↑	↑
	24 V AC, power consumption 0.04 VA (without explosion protection)		2 4	↑	↑	↑	↑	↑
	Special version		9	↑	↑	↑	↑	↑
Version	3/2-way function	0.16	Without connection plate (as spare part for Type 3963-XX27)		20	↑	↑	↑
			NAMUR interface for on-off rotary actuators		TUV ⁴⁾	21	↑	↑
	NAMUR interface for on-off rotary actuators, with exhaust air restrictor			22	↑	↑		
	NAMUR interface for on-off/continuous rotary actuators, with supply air/exhaust air restrictors			23	↑	↑		
	Threaded connection (as E/P binary converter)		TUV ⁴⁾	27	↑	↑		
	Threaded connection, with exhaust air restrictor (as E/P binary converter)			28	↑	↑		
	Connection block for Type 3277 Linear Actuator with Types 3766/3767/378X Positioner, with exhaust air restrictor			29	↑	↑		
	3/2-way function	0.32	Without connection plate (as spare part for Types 3963-XX52/-XX53/-XX54/-XX55)		50	↑	↑	↑
			NAMUR interface for on-off/continuous rotary actuators		TUV ⁴⁾	52	↑	↑
			For linear actuators with NAMUR rib		TUV ⁴⁾	53	↑	↑
			Threaded connection, connection as desired		TUV ⁴⁾	54	↑	↑
			Connection block for Type 3277 Linear Actuator with Types 3766/3767/378X Positioner		TUV ⁴⁾	55	↑	↑
	5/2-way function	0.16	Without connection plate (as spare part for Type 3963-XX14)		10	↑	↑	↑
			NAMUR interface for on-off rotary actuators			11	↑	↑
			NAMUR interface for on-off rotary actuators, with 2 exhaust air restrictors			12	↑	↑
			Threaded connection, connection as desired			14	↑	↑
	6/2-way function	0.16	Without connection plate (as spare part for Types 3963-XX62/-XX64)		60	↑	↑	↑
			NAMUR interface for on-off/continuous rotary actuators			62	↑	↑
			Threaded connection, connection as desired			64	↑	↑
	Ambient temperature⁵⁾	-25 to +80 °C ⁶⁾		0	↑	↑	↑	↑
-45 to +80 °C		1	↑	↑	↑	↑		
Electrical connection	Cable gland M 20 × 1.5 made of polyamide, black		0	↑	↑	↑	↑	
	Cable gland M 20 × 1.5 made of polyamide, blue		1	↑	↑	↑	↑	
	Adapter M 20 × 1.5/NPT 1/2 made of aluminum, powder-coated, grayish beige RAL 1019		2	↑	↑	↑	↑	
	Han 7 D male connector (manufactured by Harting), 7 poles, made of aluminum, silvery gray, IP 65 ⁷⁾		3	↑	↑	↑	↑	
	Round plug connector M 12 × 1, 4 poles, made of brass, nickel-plated, IP 65 ⁷⁾		4	↑	↑	↑	↑	
	Male connector according to EN 175301-803, type A, made of polyamide, black, IP 65 ⁷⁾		5	↑	↑	↑	↑	
	Round plug connector (manufactured by Binder), 7 poles, made of PBT GV, black, IP 67 ⁷⁾		6	↑	↑	↑	↑	
	EExe cable gland M 20 × 1.5 (manufactured by CEAG) made of polyamide, black		7	↑	↑	↑	↑	
	Cable gland M 20 × 1.5 made of brass, nickel-plated (required for Type 3963-8XXX1)		8	↑	↑	↑	↑	
	Special version		9	↑	↑	↑	↑	
Air connection	Without threaded connection (for Types 3963-XX10/-XX20/-XX29/-XX50/-XX55/-XX60)		0	↑	↑	↑	↑	
	G 1/4		1	↑	↑	↑	↑	
	NPT 1/4		2	↑	↑	↑	↑	
Manual override	None		0	↑	↑	↑	↑	
	Degree of protection IP 54⁶⁾ with filter made of polyethylene	Pushbutton switch, screwdriver-actuated, accessible from outside		1	↑	↑	↑	
		Pushbutton, pin-actuated, accessible from outside		2	↑	↑	↑	
		Pushbutton underneath enclosure cover ⁸⁾		3	↑	↑	↑	
	Degree of protection IP 65 with filter check valve made of polyamide⁹⁾	None		4	↑	↑	↑	
		Pushbutton switch, screwdriver-actuated, accessible from outside		5	↑	↑	↑	
		Pushbutton, pin-actuated, accessible from outside		6	↑	↑	↑	
Pushbutton underneath enclosure cover ⁸⁾		7	↑	↑	↑			

1) According to EC-type-examination Certificate PTB 01 ATEX 2085.

2) According to Statement of Conformity PTB 01 ATEX 2086X.

3) Air flow at p₁ = 2.4 bar and p₂ = 1.0 bar can be calculated according to the following equation: Q = K_{vs} × 36.22, expressed in m³/h.

4) Report No. S63/00 (used on control valves according to DIN 3394 Part 1, DIN EN 161, DIN 32725, DIN EN 264 and DIN 32730), Report No. S64/00 (safety function up to class AK 7 according to DIN V 19251).

5) Permissible maximum ambient temperature for EExi versions according to temperature classes T4/T5/T6 (see EC-type-examination certificate).

6) Silicone-free version with degree of protection IP 54 at permissible ambient temperature from -25 to +80 °C on request.

7) The female connector is not delivered with the device (see "Accessories and spare parts").

8) Manual override lever accessible from outside on request.

9) Filter check valve made of stainless steel with degree of protection IP 65 or NEMA 4 on request.

Versions and ordering data (continued from page 22)

Type 3963 Pilot Valve ① with single-actuated Type 3756 Booster Valve ②
(Connection G (NPT) 1/4 or 1/4/NAMUR or 1/2, K_{vs} value 1.4 or 4.3)

Pilot valve ①						Order No. 3963-				/3756-					
Type of protection	Without explosion protection (for DC nominal signal)					0	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	II 2 G EEx ia IIC T6 ¹⁾ (for DC nominal signal)					1	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Without explosion protection (for AC nominal signal)					2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	CSA/FM (for DC nominal signal)					3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Nominal signal	6 V DC, power consumption 5.47 mW					1	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	12 V DC, power consumption 13.05 mW					2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	24 V DC, power consumption 26.71 mW					3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	230 V AC, power consumption 0.46 VA (without explosion protection)					2	1	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	115 V AC, power consumption 0.17 VA (without explosion protection)					2	2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	48 V AC, power consumption 0.07 VA (without explosion protection)					2	3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	24 V AC, power consumption 0.04 VA (without explosion protection)					2	4	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Special version					9	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Version	K _{vs} value ³⁾		Connection/attachment												
	3/2-way function		0.01 For Types 3756-X205/-X206/-X207/-X208 Booster Valves ②			TUV ⁴⁾	76	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
		0.16 For Types 3756-X203/-X213/-X209/-X210 Booster Valves ②			TUV ⁴⁾	25	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Ambient temperature ⁵⁾	-25 to +80 °C ⁶⁾					0	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	-45 to +80 °C					1	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Electrical connection	Cable gland M 20 × 1.5 made of polyamide, black					0	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Cable gland M 20 × 1.5 made of polyamide, blue					1	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Adapter M 20 × 1.5/NPT 1/2 made of aluminum, powder-coated, grayish beige RAL 1019					2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	Han 7 D male connector (manufactured by Harting), 7 poles, made of aluminum, silvery gray, IP 65 ⁷⁾					3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Round plug connector M 12 × 1, 4 poles, made of brass, nickel-plated, IP 65 ⁷⁾					4	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Male connector according to EN 175301-803, type A, made of polyamide, black, IP 65 ⁷⁾					5	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Round plug connector (manufactured by Binder), 7 poles, made of PBT GV, black, IP 67 ⁷⁾					6	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	EExe cable gland M 20 × 1.5 (manufactured by CEAG) made of polyamide, black					7	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Cable gland M 20 × 1.5 made of brass, nickel-plated (required for Type 3963-8XXX1)					8	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Special version					9	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Air connection	Without threaded connection					0	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Manual override	None					0	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Degree of protection IP 54 ⁶⁾ with filter made of polyethylene	Pushbutton switch, screwdriver-actuated, accessible from outside					1	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Pushbutton, pin-actuated, accessible from outside					2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Pushbutton underneath enclosure cover ⁸⁾					3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Degree of protection IP 65 with filter check valve made of polyamide ⁹⁾	None					4	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Pushbutton switch, screwdriver-actuated, accessible from outside					5	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Pushbutton, pin-actuated, accessible from outside					6	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Pushbutton underneath enclosure cover ⁸⁾					7	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Booster valve ②, single-actuated						Order No. 3756-									
Actuation	Version	Operating pressure (in direction of flow)	K _{vs} value ³⁾ (in direction of flow)	Ambient temperature	Air connection	↑	↑	↑	↑						
Type 3963-XX25 Pilot Valve ①	3/2-way function	max. 10 bar (3→5, 4→3) max. 2 bar (as desired)	1.9 (4→3), 1.5 (3→4) 4.3 (3→5), 4.7 (5→3)	-25 to +80 °C	G 1/2 TUV ⁴⁾	1	2	0	3						
					NPT 1/2 TUV ⁴⁾	6	2	0	3						
					G 1/2 TUV ⁴⁾	1	2	1	3						
	5/2-way function	max. 10 bar (at 4) max. 2 bar (as desired)	1.9 (4→3), 1.5 (3→4) 4.3 (3→5), 4.7 (5→3)	-25 to +80 °C	NPT 1/2 TUV ⁴⁾	6	2	1	3						
					G 1/2	1	2	0	9						
					NPT 1/2	6	2	0	9						
6/2-way function	max. 10 bar (at 4) max. 2 bar (as desired)	1.9 (4→3), 1.5 (3→4) 4.3 (3→5), 4.7 (5→3)	-25 to +80 °C	G 1/2	1	2	1	0							
				NPT 1/2	6	2	1	0							
Type 3963-XX76 Pilot Valve ①	5/2-way function	max. 10 bar (as desired)	1.4 (as desired)	-40 to +80 °C	G 1/4	3	2	0	5						
					NPT 1/4	8	2	0	5						
	3/2-way function with exhaust air return	max. 10 bar (as desired)	1.4 (as desired)	-40 to +80 °C	G 1/4 TUV ⁴⁾	3	2	0	6						
					NPT 1/4 TUV ⁴⁾	8	2	0	6						
	5/2-way function	max. 10 bar (as desired)	1.4 (as desired)	-40 to +80 °C	G 1/4/NAMUR	3	2	0	7						
					NPT 1/4/NAMUR	8	2	0	7						
	3/2-way function with exhaust air return	max. 10 bar (as desired)	1.4 (as desired)	-40 to +80 °C	G 1/4/NAMUR TUV ⁴⁾	3	2	0	8						
					NPT 1/4/NAMUR TUV ⁴⁾	8	2	0	8						

1) According to EC-type-examination Certificate PTB 01 ATEX 2085.
 2) According to Statement of Conformity PTB 01 ATEX 2086X.
 3) Air flow at p₁=2.4 bar and p₂=1.0 bar can be calculated according to the following equation: Q = K_{vs} × 36.22, expressed in m³/h.
 4) Report No. S63/00 (used on control valves according to DIN 3394 Part 1, DIN EN 161, DIN 32725, DIN EN 264 and DIN 32730), Report No. S64/00 (safety function up to class AK 7 according to DIN V 19251).
 5) Permissible maximum ambient temperature for EExi versions according to temperature classes T4/T5/T6 (see EC-type-examination certificate).
 6) Silicone-free version with degree of protection IP 54 at permissible maximum ambient temperature from -25 to +80 °C on request.
 7) The female connector is not delivered with the device (see "Accessories and spare parts").
 8) Manual override lever accessible from outside on request.
 9) Filter check valve made of stainless steel with degree of protection IP 65 or NEMA 4 on request.

Versions and ordering data (continued from page 23)

Type 3963 Pilot Valves ① **with double-actuated Type 3756 Booster Valve** ②
(Connection G (NPT) 1/4 or 1/4/NAMUR, K_{vs} value 1.4)

Pilot valves ①		Order No. 3963-				/3756-				
Type of protection	Without explosion protection (for DC nominal signal)	0	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	II 2 G EEx ia IIC T6 ¹⁾ (for DC nominal signal)	1	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	Without explosion protection (for AC nominal signal)	2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	CSA/FM (for DC nominal signal)	3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	II 3 G EEx nA II T6 ²⁾ (for DC nominal signal)	8	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Nominal signal	6 V DC, power consumption 5.47 mW	1	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	12 V DC, power consumption 13.05 mW	2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	24 V DC, power consumption 26.71 mW	3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	230 V AC, power consumption 0.46 VA (without explosion protection)	2 1	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	115 V AC, power consumption 0.17 VA (without explosion protection)	2 2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	48 V AC, power consumption 0.07 VA (without explosion protection)	2 3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	24 V AC, power consumption 0.04 VA (without explosion protection)	2 4	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Special version	9	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑		
Version	K _{vs} value ³⁾	Connection/attachment	TUV ⁴⁾ 76							
3/2-way function	0.01	For booster valve ②								
Ambient temperature ⁴⁾	-25 to +80 °C ⁶⁾		0							
	-45 to +80 °C		1							
Electrical connection	Cable gland M 20 × 1.5 made of polyamide, black		0							
	Cable gland M 20 × 1.5 made of polyamide, blue		1							
	Adapter M 20 × 1.5/NPT 1/2 made of aluminum, powder-coated, grayish beige RAL 1019		2							
	Han 7 D male connector (manufactured by Harting), 7 poles, made of aluminum, silvery gray, IP 65 ⁷⁾		3							
	Round plug connector M 12 × 1, 4 poles, made of brass, nickel-plated, IP 65 ⁷⁾		4							
	Male connector according to EN 175301-803, type A, made of polyamide, black, IP 65 ⁷⁾		5							
	Round plug connector (manufactured by Binder), 7 poles, made of PBT GV, black, IP 67 ⁷⁾		6							
	EExe cable gland M 20 × 1.5 (manufactured by CEAG) made of polyamide, black		7							
	Cable gland M 20 × 1.5 made of brass, nickel-plated (required for Type 3963-8XXX1)		8							
Special version		9								
Air connection	Without threaded connection		0							
Manual override	None		0							
Degree of protection IP 54 ⁶⁾ with filter made of polyethylene	Pushbutton switch, screwdriver-actuated, accessible from outside		1							
	Pushbutton, pin-actuated, accessible from outside		2							
	Pushbutton underneath enclosure cover ⁸⁾		3							
Degree of protection IP 65 with filter check valve made of polyamide ⁹⁾	None		4							
	Pushbutton switch, screwdriver-actuated, accessible from outside		5							
	Pushbutton, pin-actuated, accessible from outside		6							
Pushbutton underneath enclosure cover ⁸⁾		7								
Booster valve ②, double-actuated		Order No. 3756-								
Version	Operating pressure (in direction of flow)	K _{vs} value ³⁾ (in direction of flow)	Ambient temperature	Air connection	↑	↑	↑	↑	↑	
5/2-way function, detented (two positions)	max. 10 bar (as desired)	1.4 (as desired)	-40 to +80 °C	G 1/4 TUV ⁴⁾	3	3	2	5		
				NPT 1/4 TUV ⁴⁾	8	3	2	5		
				G 1/4/NAMUR TUV ⁴⁾	3	3	2	7		
				NPT 1/4/NAMUR TUV ⁴⁾	8	3	2	7		
5/3-way function, spring-centered (ports 2 and 4 closed)	max. 10 bar (as desired)	1.4 (as desired)	-40 to +80 °C	G 1/4	3	3	3	5		
				NPT 1/4	8	3	3	5		
				G 1/4/NAMUR	3	3	3	7		
				NPT 1/4/NAMUR	8	3	3	7		
5/3-way function, spring-centered (ports 2 and 4 vented)	max. 10 bar (as desired)	1.4 (as desired)	-40 to +80 °C	G 1/4 TUV ⁴⁾	3	3	4	5		
				NPT 1/4 TUV ⁴⁾	8	3	4	5		
				G 1/4/NAMUR TUV ⁴⁾	3	3	4	7		
				NPT 1/4/NAMUR TUV ⁴⁾	8	3	4	7		
5/3-way function, spring-centered (ports 2 and 4 to air supply)	max. 10 bar (as desired)	1.4 (as desired)	-40 to +80 °C	G 1/4	3	3	5	5		
				NPT 1/4	8	3	5	5		
				G 1/4/NAMUR	3	3	5	7		
				NPT 1/4/NAMUR	8	3	5	7		

¹⁾ According to EC-type-examination Certificate PTB 01 ATEX 2085.

²⁾ According to Statement of Conformity PTB 01 ATEX 2086X.

³⁾ Air flow at p₁ = 2.4 bar and p₂ = 1.0 bar can be calculated according to the following equation: Q = K_{vs} × 36.22, expressed in m³/h.

⁴⁾ Report No. S63/00 (used on control valves according to DIN 3394 Part 1, DIN EN 161, DIN 32725, DIN EN 264 and DIN 32730), Report No. S64/00 (safety function up to class AK 7 according to DIN V 19251).

⁵⁾ Permissible maximum ambient temperature for EExi versions according to temperature classes T4/T5/T6 (see EC-type-examination certificate).

⁶⁾ Silicone-free version with degree of protection IP 54 at permissible maximum ambient temperature from -25 to +80 °C on request.

⁷⁾ The female connector is not delivered with the device (see "Accessories and spare parts").

⁸⁾ Manual override lever accessible from outside on request.

⁹⁾ Filter check valve made of stainless steel with degree of protection IP 65 or NEMA 4 on request.

Spare parts and accessories

Spare parts for Type 3963 Solenoid Valves, Type 3963 Pilot Valves and Type 3756 Booster Valves	
Order No.	Designation
0439-0088	Flat gasket (for connection plate for Type 3963, not for Types 3963-XX11/-XX21)
8205-1090	Molded gasket (for air supply for Types 3756-X205/-X206/-X207/-X208)
0520-0620	Diaphragm made of chloroprene, -25 to +80 °C (for Types 3756-1203/-6203)
0520-0622	Diaphragm made of chloroprene, -25 to +80 °C (for Type 3963, not for Type 3963-XX76)
0520-1097	Diaphragm made of silicone rubber, -40 to +80 °C (for Type 3963, not for Type 3963-XX76)
0520-1128	Diaphragm made of silicone rubber, -40 to +80 °C (for Types 3756-1203/-6203)
1180-8311	Actuating element insert, -25 to +80 °C (for Types 3756-1203/-6203/-1213/-6213)
1180-8553	Actuating element insert, -40 to +80 °C (for Types 3756-1203/-6203/-1213/-6213)
8421-0021	O-ring 2 × 1 (for connection plate for Types 3756-XXX5/-XXX6/-XXX7/-XXX8)
8421-0308	O-ring 11 × 4,5 (for NAMUR interface for Types 3756-X207/-X208)
8421-9002	O-ring 16 × 2 (for NAMUR interface for Types 3963-XX11/-XX21/-XX52/-XX62)
8421-0085	O-ring 26 × 2, -25 to +80 °C (for Types 3756-1203/-6203/-1213/-6213)
8421-0418	O-ring 26 × 2, -40 to +80 °C (for Types 3756-1203/-6203/-1213/-6213)
8421-0102	O-ring 36 × 2, -25 to +80 °C (for Types 3756-1203/-6203/-1213/-6213)
8421-0101	O-ring 36 × 2, -40 to +80 °C (for Types 3756-1203/-6203/-1213/-6213)
1099-0673	Enclosure cover without filter (for Type 3963)
1099-0674	without manual override
1099-0674	with pushbutton switch, screwdriver-actuated, accessible from outside
1099-0675	with pushbutton, pin-actuated, accessible from outside
1099-1194	with lever switch, accessible from outside
8323-0032	Plug G 1/4 made of stainless steel (for connection 9 on Type 3963)
8414-0140	Seal ring (for plug G 1/4)

Accessories for Type 3963 Solenoid Valves, Type 3963 Pilot Valves and Type 3756 Booster Valves	
Order No.	Designation
0790-6658	Female connector according to EN 175301-803, type A, made of polyamide, black, IP 65
1400-8298	Female connector (manufactured by Harting), 7 poles, made of aluminum, silvery gray, IP 65
8801-2810	Sensor connecting cable, 2 wires, length 3 m, blue, with angle connection M 12 × 1, 4 poles, IP 68
8831-0716	Female connector (manufactured by Binder), 7 poles, made of PBT GV, black, IP 67
8831-0865	Female connector M 12 × 1, 4 poles, angle type, made of polyamide, black, IP 67
3994-0158	Cable break protection device with enclosure for top hat rail 35, IP 20 (for Type 3963-X1 with 6 V DC solenoid)
1400-5268	Filter made of polyethylene, connection G 1/G 1/2, IP 54 (required for actuator size > 1 400 cm ² !)
8504-0066	Filter made of polyethylene, connection G 1/4, IP 54
8504-0068	Filter made of polyethylene, connection G 1/2, IP 54
	Filter check valves made of polyamide or stainless steel, IP 65 or NEMA 4, see Data Sheet Z 900-7 EN
1400-5930	Mounting base for G profile 32 according to EN 50035 (for Types 3963-XX14/-XX27/-XX28/-XX54/-XX64 – 2 pieces are required!)
1400-5931	Mounting base for top hat rail 35 according to EN 50022 (for Types 3963-XX14/-XX27/-XX28/-XX54/-XX64 – 2 pieces are required!)
1400-6726	Mounting plate for wall mounting (for Types 3963-XX14/-XX27/-XX28/-XX54/-XX64)
1400-6763	Restrictor block with 2 restrictors for supply air and exhaust air for adjusting different closing and opening times in a ratio of 1:15 (for Type 3963-X207) for single-acting rotary actuators with NAMUR interface

Connection blocks and accessories for attaching Types 3963-XX29/-XX55 Solenoid Valves to Type 3277 Linear Actuators	
Order No.	Designation
	Connection block for Type 3277 Linear Actuators with integral Type 3766/3767/3780 Positioner attachment
1400-6943	Actuator "Stem extends", connection G 1/4
1400-6944	Actuator "Stem extends", connection NPT 1/4
1400-6945	Actuator "Stem retracts", connection G 1/4
1400-6946	Actuator "Stem retracts", connection NPT 1/4
	Piping kit for "Stem retracts"
1400-6444	Actuator size 240 cm ² , made of steel, galvanised
1400-6445	Actuator size 240 cm ² , made of stainless steel
1400-6446	Actuator size 350 cm ² , made of steel, galvanised
1400-6447	Actuator size 350 cm ² , made of stainless steel
1400-6448	Actuator size 700 cm ² , made of steel, galvanised
1400-6449	Actuator size 700 cm ² , made of stainless steel
1400-6376	Pressure gauge, 0 to 6 bar/75 psi

Spare parts and accessories (continued from page 25)

Mounting kits for Type 3963 Solenoid Valves with threaded connection	
Order No.	Designation
1400-6759	Mounting kit for linear actuators (actuator size 80/240 cm ² , connection G 1/4) with screwed pipe connection G 1/4/G 1/4, made of stainless steel
1400-6735	Mounting kit for linear actuators (actuator size 350/700 cm ² , connection G 3/8) with screwed pipe connection G 1/2/G 3/8, made of stainless steel
1400-6761	with screwed pipe connection G 1/4/G 3/8, made of stainless steel
1400-6736	Mounting kit for linear actuators (actuator size 1 400 cm ² , connection G 3/4) with screwed pipe connection G 1/2/G 3/4, made of stainless steel
1400-6737	Mounting kit for linear actuators (actuator size 2800 cm ² , connection G 1) with screwed pipe connection G 1/2/G 1, made of stainless steel
1400-6749	Mounting kit for linear actuators (actuator size 80/240 cm ² , connection G 1/4) with angle bracket made of stainless steel
1400-6750	and screwed joints for pipe 8 × 1, connection G 1/4/G 1/4, made of steel, galvanised
	and screwed joints for pipe 8 × 1, connection G 1/4/G 1/4, made of stainless steel
1400-6738	Mounting kit for linear actuators (actuator size 350/700 cm ² , connection G 3/8) with angle bracket made of stainless steel
1400-6739	and screwed joints for pipe 8 × 1, connection G 1/4/G 3/8, made of steel, galvanised
1400-6743	and screwed joints for pipe 8 × 1, connection G 1/4/G 3/8, made of stainless steel
1400-6743	and screwed joints for pipe 12 × 1, connection G 1/4/G 3/8, made of stainless steel
1400-6744	and screwed joints for pipe 10 × 1, connection G 1/2/G 3/8, made of polyamide
1400-6745	and screwed joints for pipe 10 × 1, connection G 1/4/G 3/8, made of polyamide
1400-6740	Mounting kit for linear actuators (actuator size 700 cm ² , connection G 3/8) with angle bracket made of stainless steel
1400-6741	and screwed joints for pipe 12 × 1, connection G 1/2/G 3/8, made of steel, galvanised
1400-6741	and screwed joints for pipe 12 × 1, connection G 1/4/G 3/8, made of steel, galvanised
1400-6742	and screwed joints for pipe 12 × 1, connection G 1/2/G 3/8, made of stainless steel

Mounting kits for Type 3963 Solenoid Valves with NAMUR interface	
Order No.	Designation
1400-6746	Mounting kit for linear actuators (actuator size 350/700 cm ² , connection G 3/8) with NAMUR rib via adapter plate NAMUR rib/NAMUR interface (Order No. 1400-6751)
1400-6747	with screwed joints for pipe 12 × 1, connection G 1/4/G 3/8, made of steel, galvanised
1400-6748	with screwed joints for pipe 12 × 1, connection G 1/4/G 3/8, made of stainless steel
	with screwed joints for pipe 10 × 1, connection G 1/4/G 3/8, made of polyamide
1400-6752	Mounting kit for linear actuators (actuator size 80/240 cm ² , connection G 1/4) with NAMUR rib via adapter plate NAMUR rib/NAMUR interface (Order No. 1400-6751)
1400-6753	with screwed joints for pipe 6 × 1, connection G 1/4/G 1/4, made of steel, galvanised
1400-6756	with screwed joints for pipe 6 × 1, connection G 1/4/G 1/4, made of stainless steel
	with screwed joints for hose 10 × 1, connection G 1/4/G 1/4, made of polyamide
1400-6754	Mounting kit for linear actuators (actuator size 350/700 cm ² , connection G 3/8) with NAMUR rib via adapter plate NAMUR rib/NAMUR interface (Order No. 1400-6751)
1400-6755	with screwed joints for pipe 8 × 1, connection G 1/4/G 3/8, made of steel, galvanised
1400-6757	with screwed joints for pipe 8 × 1, connection G 1/4/G 3/8, made of stainless steel
	with screwed joints for pipe 10 × 1, connection G 1/4/G 3/8, made of polyamide
1400-6759	Mounting kit for linear actuators (actuator size 80/240 cm ² , connection G 1/4) with screwed pipe connection G 1/4/G 1/4, made of stainless steel

Accessories for mounting kits	
Order No.	Designation
0320-1416	Bracket for NAMUR rib (required when a positioner or a limit switch is to be mounted to linear actuators with nominal size < DN 50 at the same time)
8320-0131	Hexagon socket head screw M 8 × 60 – A 4 DIN 931
1400-6751	Adapter plate NAMUR rib/NAMUR interface

(Specifications subject to change without notice.)

SAMSOMATIC
AUTOMATIONSSYSTEME
GMBH

Weismüllerstraße 20-22
60314 Frankfurt am Main · Germany

Phone: +49 69 4009-0
Fax: +49 69 4009-1644
E-mail: samsomatic@samson.de
Internet: <http://www.samsomatic.de>

– a subsidiary of SAMSON AG

2003-06 A · T 3963 EN

is a need for refined combustor design guidelines, facing the fact that the most promising technologies for environmental and economical issues appear to be bridled or ineffective as soon as the flame becomes unstable [2]. Combustion instabilities are also a risk for the system integrity. Concerning the Know-Why aspect, the phenomenology on combustion instabilities for single or multiphase reactive flow is by now well understood [3]. Modelling has also improved, single reactive flow dynamics can be simulated with precision, and unsteady multiphase combustion is in progress.

In order to avoid combustion-driven instabilities (CDO) on the full operating range of a gas turbine combustor, a trial-and-error bench session is worked out until the best compromise is found. Nevertheless, the use of passive control methods (e.g. optimised combustor shape) may not be sufficient to face instabilities triggered during transients, such as start and stop for a stationary gas turbine or change of operating point for an aero-engine. Specific active control methods including a sense-decide-actuate feedback loop have already been implemented with success on power GT [4]. Some generic control algorithms have been developed with success [5]. The challenge is now the choice of ad-hoc sensing and actuating techniques toward a universal control system.

This paper focuses on the Know-How aspect, or more precisely how it is possible to detect and identify the presence of combustion instability using the Laser Vibrometry (LV) technique. Performing laser-based measurement system in a GT combustor test rig is very common, and the application on condition-monitored maintenance with optics placed in-situ of a real system is in progress. Integral or local measurements can monitor in real time exhaust gases [6], or characterise the injection and the flow dynamics [7–9]. Any line-of-sight laser-based technique can be complemented with LV technology. LV is here presented as a performant and low cost combustion diagnostic method for real-time stability analysis of gas-fuelled burners.

The test rig and LV technique are briefly presented, together with measurements performed on a premixed air-CH₄ flame with natural and forced inlet flow modulation. Signal processing is described into details, and the results show a high sensitivity to flow density fluctuations, this means a high potential for detecting organised vortical structures that are characteristic to CDO. LV could become a standard benchmarking method, and feasibility issues on implementation of such a system in a real gas turbine are eventually assessed.

TEST RIG

Resonance cavity and siren

Combustion instabilities in a combustor in the low frequency range (e.g. "Humming") result from complex couplings between the combustor acoustic pressure, the internal flow dynamics and the combustion unsteady heat release. Acoustic pressure fluctu-

ation modulates the injection, the resulting injected mixture is transported with the flow and feeds the flame front with a variable equivalence ratio Φ as well as with an unsteady flow pattern (cyclic). The flame responds with a change in position following this flow pattern, and in the meantime produces local unsteady heat release due to the Φ fluctuation. Provided some conditions related to the combustor main dimensions are respected [1], energy transfer from heat release to acoustic pressure can happen in a constructive way, and the combustion instability is enhanced during the next cycles until saturation.

The test rig present at the institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics (TTM) at the Graz University of Technology performs an open-loop instability by modulating the air flow upstream from the injection. A pipe serves as a resonant cavity, with close-open configuration (air injection is performed through a nearly-choked nozzle, see Fig. 1). This configuration provides a quarter-wave amplification as a fundamental mode. The pipe is 3m long, and his fundamental corresponds to 25Hz at room conditions (sound velocity $c \simeq 340m/s$). This mode and its sub-harmonics (odd multiples) can be amplified with help of a siren [3] in order to get nearer to fluctuation levels achieved during fully developed CDO's. The siren (ONERA model [8]) consists in a cogged-wheel which teeth cover partially the air nozzle outlet, make its critical section vary and therefore pulsate the air sonic jet. A DC electrical motor allows to set the rotation frequency, and an opto-electronic sensor placed on the wheel feeds-back the precise status of the pulsation cycle.

A squared section combustion chamber with SQ1 glass for optical access can be added to the set-up, allowing to analyse a contained primary zone (without cooling). Enclosed jet measurements are just briefly discussed in here.

The measured resonance frequencies match the calculated ones, and the burner and chamber can be considered as acoustically transparent.

Premixed air-CH₄ injector

The atmospheric burner prototype developed at TTM as shown in Fig. 2 was dimensioned for 250kW heat power. It consists in a venturi tube (ratio 1/2) combined to an axial air swirler (axial in order to minimise damping effects on the resonance, blades screw angle= $\pi/4$). Methane injection is performed about 10cm upstream the front plate through a perforated steal pipe (12*0.5mm injection holes, small enough to contain the flame outside the pipe in case of flashback at our test conditions). The 10cm length and the local turbulence due to the blade blockages make the premixing effective.

Operating point

For the experiment presented in this paper, the test conditions are 13.7g/s of air for 0.64g/s of CH₄ (equivalence ratio $\Phi = 0.8$, lean combustion). The outlet mixture velocity is

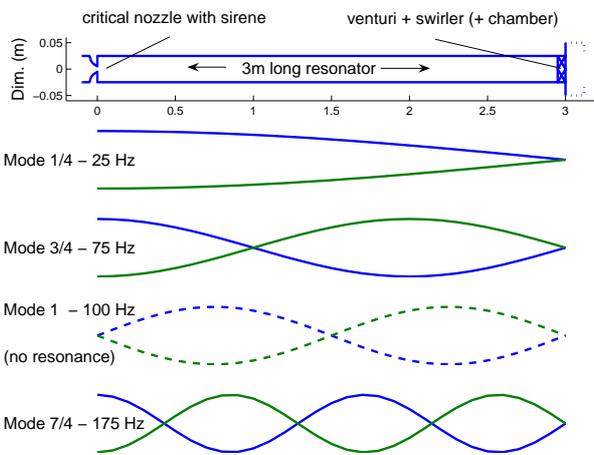


Figure 1. Quarter-wave pipe with siren for amplification of resonant modes

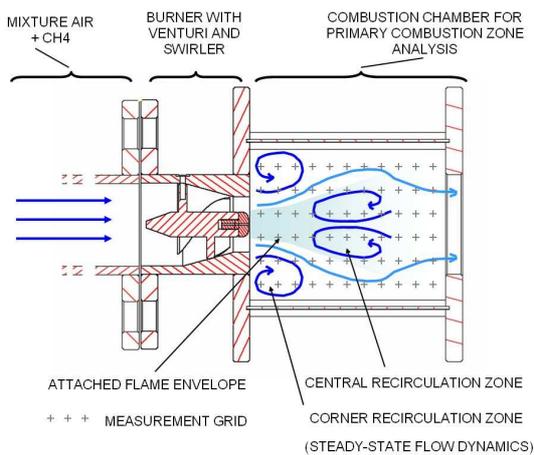


Figure 2. PREMIXED AIR-CH₄ BURNER DETAIL: LONGITUDINAL SECTION OF THE ENSEMBLE BURNER (VENTURI 1/2 AND SWIRLER 45 DEGREES) AND BLUFF-BODY COMBUSTION CHAMBER (OPTIONAL)

16.5m/s (axial direction) at room conditions. The resulting flame pattern shown on Fig. 3 (free-jet configuration) consists in three main zones: the attachment zone (labelled I), the front flame (II) where the fresh gases ignite through an expansion cone, that appears to be very sensitive to the flow pattern modulation, and the rear flame (III), extremely turbulent and disappearing downstream as the central recirculation zone breaks down.

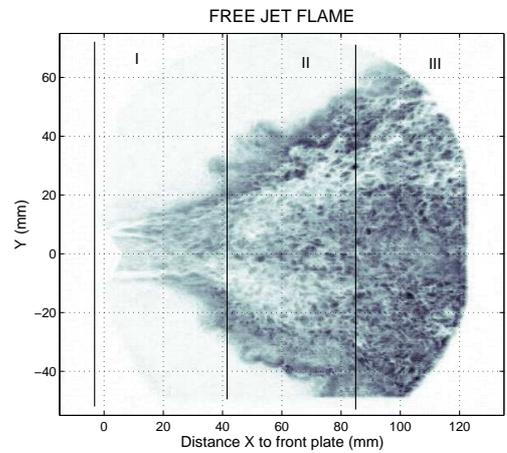


Figure 3. FLAME ENVELOPE FOR FREE JET CONFIGURATION (SCHLIEREN VISUALISATION WITH BACKGROUND WITHDRAWAL)

LASER VIBROMETRY FOR DETECTION OF AIR DENSITY FLUCTUATION

Principles of Laser Vibrometry

Interferometric techniques are well established in vibration analysis, detecting minute changes in the geometrical light path of a laser beam reflected by the surface under investigation (so-called "Laser Vibrometers", see Lewin [10]). These changes are usually caused by surface vibrations.

In the flow investigations presented herein, the geometrical path is kept constant. So, mainly density fluctuations altered the optical path, delaying or advancing the phase front of light. This technique offers a higher sensitivity in comparison to a direct line-of-sight laser transmission measurement with help of a photodiode (as previously done by Giuliani et al. while investigating kerosine spray vaporisation under GT operating conditions with the Infra-Red Absorption technique [2]). Mayrhofer and Woisetschläger [11] presented the application of LV to the investigation of the frequency spectra of density fluctuations in a free jet of rotational symmetry. Recently, a free jet was studied at TTM also using dual LV measurement for a localised detection of frequency spectra of density fluctuations in compressible flows [12].

The LV model used here (see the LV principle in Fig.4) consists of a Mach-Zehnder interferometer (Polytec OVD 353 mid-range Laser Vibrometer with OFV-3001 controller and OVD-02 velocity decoder). The laser beam of this system shines through the flow and is reflected backwards into the LV by a surface mirror on the opposite side of the flame. Laser cavity, sensor and optics are encased as a compact apparatus, simplifying the optical settings to the only alignment of the incident beam with its own reflection and focus at the centre of the test volume.

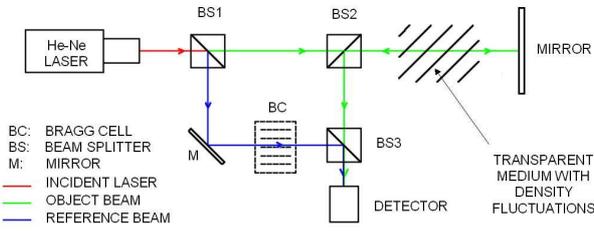


Figure 4. PRINCIPLE OF LASER VIBROMETRY

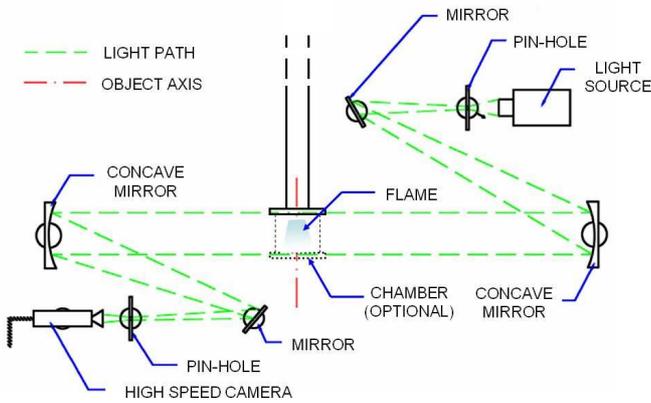
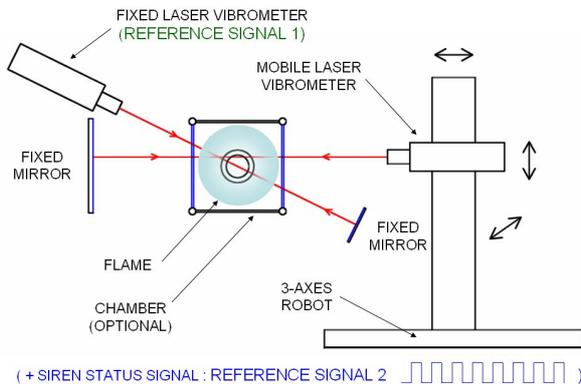


Figure 5. MEASUREMENT ARRANGEMENTS FOR DUAL LASER VIBROMETRY MEASUREMENT (TOP) AND SCHLIEREN VISUALISATION TECHNIQUE (BOTTOM)

Measurement set-up

Schlieren visualisations, usually analysing density gradients in compressible flows [13], allow to compare the observed air density fluctuations due to the presence of the flame with the LV measurements. Figure 5 shows the Schlieren set-up (rig view as seen from the top), and the dual LV arrangement (front rig view), with one apparatus fixed for the signal reference and one mobile

for the flame scan. The fixed LV is placed so that its line-of-sight shines through the flame expansion cone (zone II, see Fig. 3). We remind here that the siren also provides a reference signal when being used.

Signal processing

Acquisition of LV and siren signals are done by an analog-digital NI4551 PC board with 200kHz sampling rate. A LABVIEW routine drives the acquisition chain and conditions the signal for a post-processing performed with MATLAB.

Although the first signal processing steps are standard procedures, the specifics concerning the phase-shift measurements justify the following didactic approach.

The goal is to observe a time correlation between the scanning LV signal and a reference signal indicating the pulsation status at a fixed point, at a given resonance frequency. This reference can be the signal issued from the siren (only when the siren is used, of course), or the one coming from the fixed LV. The acquired time signals, as shown in Fig. 6 (top), are processed with a Fast Fourier Transform (FFT). The resulting power spectrum (middle) is analysed, and the presence of a peak (here at 175 Hz) is detected. For this particular frequency, the phase shifts between the three signals (LV fixed, LV scan, and siren status signal) are measured in the Fourier complex domain. No averaging is done so far on the power spectrum, while tiny changes in frequency peak position during the signal sampling would make the phase-shift measurement inaccurate.

The samples are performed on 3 lines at 10kHz simultaneously during 0.2s. Although our 200kHz AD acquisition card can much more, we optimised the measurement to reduce acquisition time, to avoid buffer swap memory provoking time jumps within the signal, and to make sure that the sample is small enough to monitor tiny frequency peak drifts. This sampling allows a power spectrum analysis up to 5kHz with 5Hz frequency step, which suffices our application. This operation is repeated 50 times, so that the previous phase-shifts become statistically stable. These are arranged as a distribution of occurrence in Fig. 7.

Figure 8 displays the same kind of distribution (as seen from the top, the color meaning the histogram level) for a serie of measurements performed along the flame axis. The 175Hz peak from Fig. 6 is traced along the jet axis X , and we observe that this maximum of the phase shift distribution appears to vary with the distance to the front plate. This trace, and the ones repeated above, mark actually the passage at each measurement point of vortical structures, probably donut-shaped, that generate around the jet outlet, detach from the front plate and are conveyed by the flow.

By reducing each histogram on a $[-\pi + \pi]$ interval, and by translating one pulsation period into time, the displacement is displayed versus time (see Fig. 9, where only the maximum of the $\Delta\phi$ distribution measured in Fig. 7 is taken into consideration), so that the advection velocity of the structure along X can

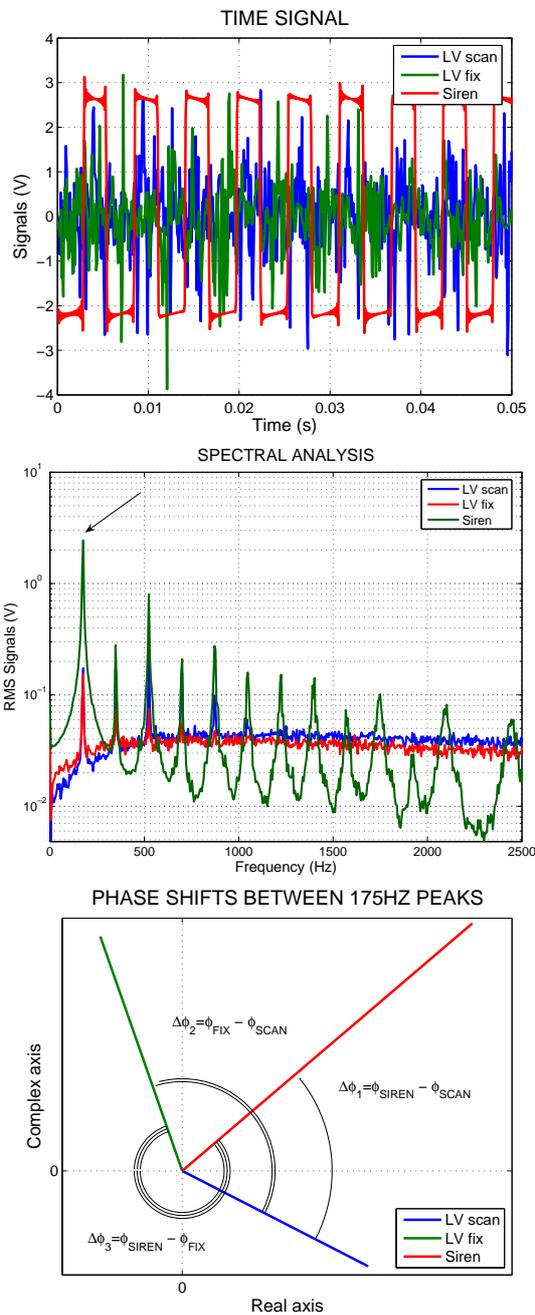


Figure 6. SIGNAL SAMPLING, RESONANCE FREQUENCY PEAK TRACKING AND PHASE-SHIFTS MEASUREMENTS AT 175HZ

eventually be determined.

The phase shift determination is robust as long as the histogram distribution is well centred. As soon as this distribution scatters, a jump in phase and time may happen as seen on the $\Delta\phi_2$ and ΔT_2 curves at $X = 13\text{cm}$ in Fig. 9. This measurement

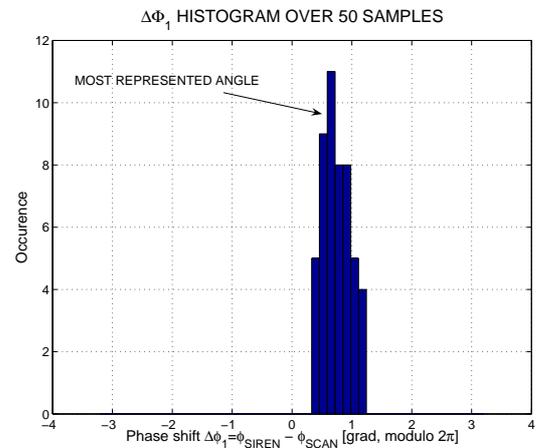


Figure 7. STATISTIC DISTRIBUTION OF THE PHASE SHIFT $\Delta\phi_1$ FOR ONE MEASUREMENT POINT

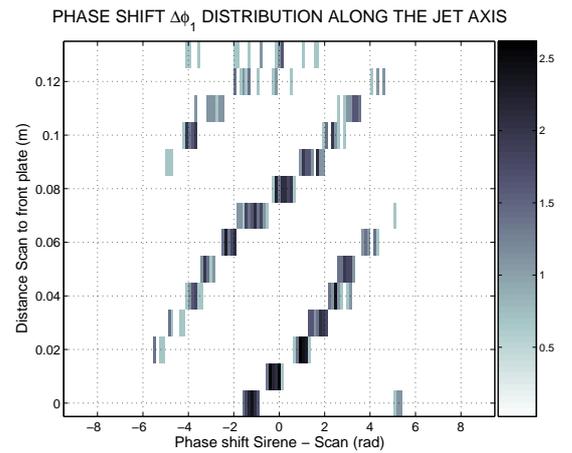


Figure 8. PHASE SHIFT DISTRIBUTION $\Delta\phi_1$ ALONG THE JET AXIS

was performed at the end of the flame (zone III) that is very turbulent (compare the trace at this point in Fig. 8).

The fluctuation on the phase shift $\Delta\phi_3 = \phi_{SIREN} - \phi_{FIX}$ is a good indicator on the measurement uncertainty. Measurement on Fig. 9, indicates a 6% standard deviation for $\Delta\phi_3$, which is supposed to remain constant. Considering more than twice this duration allows to observe a significant change in the vortex position from one time subdivision to the next, so that for a phase-averaged analysis of the data at 175Hz, up to 8 subdivisions per cycle (12.5%) are possible.

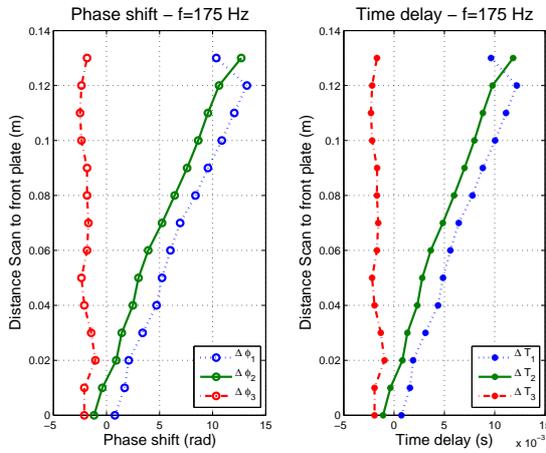


Figure 9. FROM PHASE SHIFT MEASUREMENT TO VORTICAL STRUCTURE VELOCITY DETERMINATION

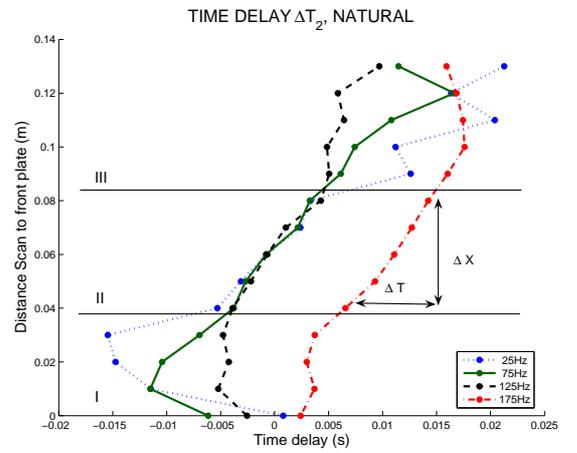


Figure 10. AXIAL ADVECTION OF VORTICES, NATURAL RESONANT MODE

FLOW DYNAMICS ANALYSIS WITH LV

Advection velocity of vortical structures

For the given operating point, the measured axial advection velocities for ring vortices are $U_{adv}/U_{out}=0.44$ in the forced resonant mode (with siren) and 0.33 in the natural mode, independently from their detachment frequency (results displayed in Fig. 10). Similar values were reported by Panda et al. [14] concerning ring vortices created by air jets (no reaction, natural mode, $U_{adv}/U_{out}=0.5$) and Giuliani et al. [8] (forced mode, no reaction, $U_{adv}/U_{out}=0.47$) for an air-blast atomiser. This nondimensional velocity is expected to be somewhere in the middle between zero (ambient air at rest) and 1 (jet outlet velocity). The velocity difference between natural and resonant mode must be related to the increase in vorticity provided by the forcing, resulting in a greater "roll-up" of the ring vortex and an eased penetration through the mixing layer between jet and ambient air.

It is also interesting to observe that the presence of the flame affects very little this advection velocity. No sudden acceleration because of heating is observed. The structure seems to go through the flame at constant speed.

Figure 10 analyses the 175Hz natural resonant mode (no siren). It shows also a different behaviour according to the flame zones. The attachment zone (I) has a complex interaction between the front plate and the the flame front, with possible bounce back of one part of the vortex on the flame that explains the negative slope [15]. The flame front (zone II) is remarkable for the fact that all measured velocities match. In the rear zone (III), the local turbulence augments the measurement uncertainty.

Similar observations were done in presence of the combustion chamber, with a greater interaction between walls and advected structures.

Flow maps

By performing a grid measurement as shown within the flame region in Fig. 2, it is possible to map the flame dynamics as a phase-locked motion. The result for a 175Hz excitation in free-jet configuration is shown in Fig. 11. One LV measurement map (left column) represents one specific period subdivision (175Hz divided by 8 gives 0.7ms per image, or 12.5% or 0.79rad of a cycle). The colour corresponds to the occurrence level of histogram in Fig. 7 at this period subdivision. Simultaneous Schlieren visualisations taken with a high-speed camera (KODAK Motion Corder Analyser, SR series, up to 1kHz in full frame resolution) are there for comparison (right column).

Going from one map to the next: the development of a ring vortex at the front plate surrounding the flame jet is first observed. This vortex detaches and then quenches the flame envelope, a neck restriction is visible on the Schlieren. Then, the two of them travel towards the front flame until they meet. The vortical structure seems to penetrate the front flame, and goes on travelling within the flame at approximately the same speed.

Future developments

Provided the flame jet has got an axi-symmetrical geometry (which is not the case here), an Abel transform would extract a local information from the line-of-sight integration. This means refine and reveal the structures involved in the flow dynamics.

So far we did not process the peak intensity of the power spectrum as a quantitative data, because of the unsatisfactory level of reproducibility when working with a standard-quality mirror, or through glass windows. Ameliorating this point would allow quantification of the air density changes, and maybe turn back - for a part of it at least - to local heat transfers.

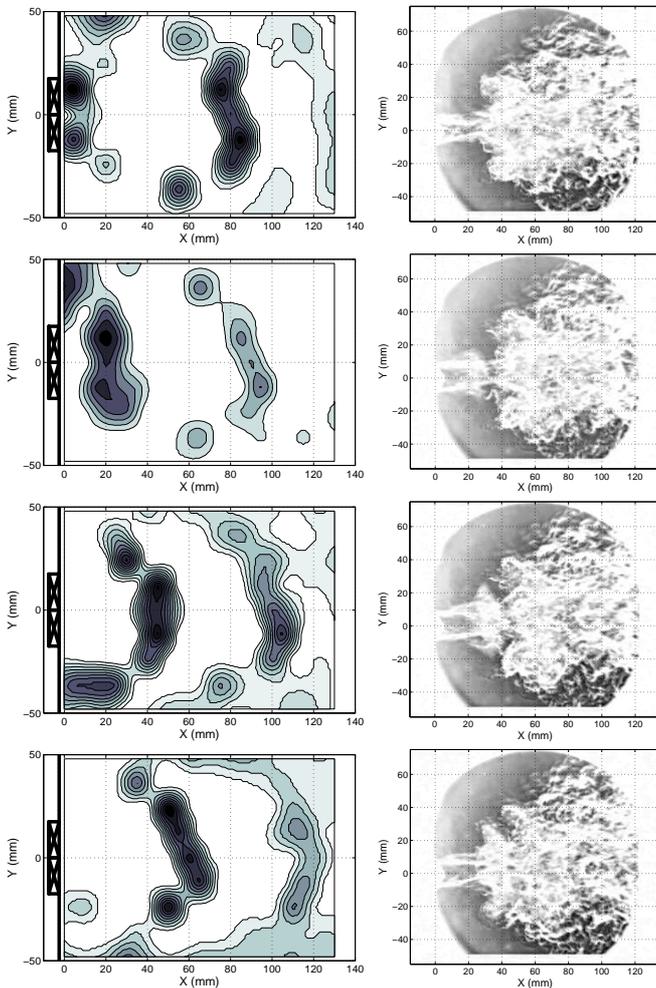


Figure 11. FLAME DYNAMICS, 175Hz FORCED. LEFT: FOUR PHASE-LOCKED DUAL LV MEASUREMENTS OVER ONE PULSATION CYCLE. RIGHT: SIMULTANEOUS HIGH SPEED SCHLIEREN VISUALISATIONS

CONCLUSIONS:

POTENTIAL OF LV FOR GT COMBUSTION

Precise measurement in an aggressive medium

LV is a low-cost, easy to set and easy to use measurement method that provides valuable information in a GT test-facility. Single LV detects with a high sensibility the presence of a flow instability. Dual LV measurements allow to perform rapidly flow dynamics description at a specific resonance frequency, without need of seeding, and without complex optical access as long as punctual line of sight measurements are allowed.

For measurements under high pressure and temperature where optical access becomes critical, optics can be placed directly in the diffuser and aim at the flame through the dilution jet holes, so that they are not directly exposed to the aggressive medium.

The high sensitivity of LV allows time-defined measurements, turning back to advection velocity of structures as well as phase-averaged maps of flow structures. This is a new tool for studying phenomenology in turbulent flames. The current test session at TTM is dedicated to this phenomenological approach using LV.

Technical challenges for built-in systems

LV would do a precise monitoring of combustion stability, provided it has at least two points of measurement in a combustor.

Assuming a set of 6 LV's are monitoring in real time combustion stability in the axial, radial and azimuthal direction for a complete combustor ring, a current automation processor could perform LV signal conditioning plus the described process when allocated to this only task, and produce a command for countermeasures with a fast response time (of the order of the millisecond). Some connections can be drawn with automation technologies developed in the automobile industry to manage engine misfiring (or knock effect [16]), and the next significant step on combustion control for turbomachinery may come from transverse engineering.

Technical challenges about optical sensing in a turbine follow: the device shall realign and focus automatically (operation aspect), it shall compensate its drift with duration (endurance), and should last about 10000h long (lifetime).

These issues on ad-hoc measurement and controls for GT combustion are currently under study at TTM-Graz University of Technology, in the frame of the research program "Reliable Actuation of combustor Dynamics applied to Flame Instability in Gas Turbine under High Temperature and pressure conditions" (ReADy2FIGHT).

ACKNOWLEDGMENTS

Thanks to Pierre Gajan and Alain Strzelecki from ONERA Centre de Toulouse for lending us the ONERA siren.

Thanks to Olivier Peltan from SIEMENS Automotive for kindly answering some questions on automation.

Thanks to Cornelia Santner for her help during the experiments.

REFERENCES

- [1] Culick, F., 1988. "Combustion instabilities in liquid-fueled propulsion systems - an overview". In AGARD Conference Proceedings No. 450.
- [2] Giuliani, F., Becker, J., and Hassa, C., 2004. "Investigation of vapour phase, LOPOCOTEP deliverable 4.15". In EU FP6 - GROWTH Project. DLR-IB-325-04-04.

- [3] Eckstein, J., Freitag, E., Hirsch, C., Sattelmayer, T., von der Bank, R., and Schilling, T., 2003. "Forced low-frequency spray characteristics of a generic airblast swirl diffusion burner". In ASME Turbo Expo 2003, Atlanta, USA. GT-2003-38646.
- [4] Hermann, J., 2001. "Application of active instability control to heavy duty gas turbines". In Active control of engine dynamics, RTO AVT - VKI Special Course.
- [5] Evesque, S., Park, S., Riley, A., Annaswamy, A., and Dowling, A., 2004. "Adaptive combustion instability control with saturation: theory and validation". *Journal of propulsion and power*, **20**(6).
- [6] Allen, M., Upschulte, B., Sonnenfroh, D., Kessler, W., and Mulhall, P., 2000. "Overview of diode laser measurements in large-scale test facilities". In 21st AIAA Aerodynamic measurement technology and ground testing conference, Denver, CO, USA. AIAA 2000-2452.
- [7] Swithenbank, J., Beer, J., Taylor, D., Abbot, D., and McCreath, G., 1976. "A laser diagnostic technique for the measurement of droplet and particle size distribution.". In 14th Aerospace Sciences Meeting, Washington, D.C., USA. AIAA 1976-69.
- [8] Giuliani, F., Gajan, P., Diers, O., and Ledoux, M., 2002. "Influence of pulsed entries on a spray generated by an airblast injection device - an experimental analysis on combustion instability processes in aeroengines". In Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, The Combustion Institute, Sapporo, Japan, pp. 91–98.
- [9] Becker, J., and Hassa, C., 2004. "Experimental investigation of spatial and temporal aspects of the liquid fuel placement in a swirl cup at elevated pressure". In ASME Turbo Expo, W. V. Oz and M. Yannakakis, eds., Wien, Austria. GT2004-53524.
- [10] Levin, A., 1999. "New compact laser vibrometer for industrial and medical applications". In Third international conference on vibration measurements by laser techniques, T. EP, ed., Vol. SPIE Proc Series 3411, pp. 61–67.
- [11] Mayrhofer, N., and Woisetschlager, J., 2001. "Frequency analysis of turbulent compressible flows by laser vibrometry". *Experiments in fluids*, **31**, pp. 153–161.
- [12] Hampel, B., and Woisetschlager, J., 2006. "Spatially resolved frequency analysis of turbulent compressible flows by laser vibrometry". *Experiments in fluids*. In progress.
- [13] Arts, T., Boerrigter, H., Carbone, M., Charbonnier, J., Degrez, G., Olivari, D., Riethmuller, M., and van den Braembussche, R., 1994. "Measurement techniques in fluid dynamics - an introduction". *VKI LS 1994-01*.
- [14] Panda, J., and McLaughlin, K., 1990. "Experiments on the instabilities in a free swirling jet". In 28th Aerospace Sciences Meeting. AIAA 1990-0506.
- [15] Durox, D., Schuller, T., and Candel, S., 2002. "Self-induced instability of a premixed jet flame impinging on a plate". In Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, The Combustion Institute, Sapporo, Japan, pp. 69–76.
- [16] Lindemann, M., and Filbert, D., 1998. "A new method of misfire detection with knock sensors". In 31st International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA), Düsseldorf, Germany.

OB1:CYCL_EXC

Cycle Execution

Name: Zeitstempel Code: 12.09.05
 Autor: Interface: 20.01.04
 Familie: Längen Baustein: 00242
 Version: 1.0 Code: 00108
 Codeversion: 2 Daten: 00028

Baustein: OB1 "Main Program Sweep (Cycle)"

Adresse	Deklaration	Name	Typ	Anfangswert	Kommentar
0.0	temp	OB1_EV_CLASS	BYTE		Bits 0-3 = 1 (Coming event), Bits 4-7 = 1 (Event class 1)
1.0	temp	OB1_SCAN_1	BYTE		1 (Cold restart scan 1 of OB 1), 3 (Scan 2-n of OB 1)
2.0	temp	OB1_PRIORITY	BYTE		1 (Priority of 1 is lowest)
3.0	temp	OB1_OB_NUMBR	BYTE		1 (Organization block 1, OB1)
4.0	temp	OB1_RESERVED_1	BYTE		Reserved for system
5.0	temp	OB1_RESERVED_2	BYTE		Reserved for system
6.0	temp	OB1_PREV_CYCLE	INT		Cycle time of previous OB1 scan (milliseconds)
8.0	temp	OB1_MIN_CYCLE	INT		Minimum cycle time of OB1 (milliseconds)
10.0	temp	OB1_MAX_CYCLE	INT		Maximum cycle time of OB1 (milliseconds)
12.0	temp	OB1_DATE_TIME	DATE_AND_TIME		Date and time OB1 started

Netzwerk: 1 Startposition

Startposition aller Ventile...alle Merker rückgesetzt ...

```
CALL "Neu"
```

Netzwerk: 2 Merker setzen 1 (Starten)

Bei alleiniger Betätigung des Startknopfes setze Merker 1.0 -> Ventilstellung
 Netzwerk 6; Merker 8.0 gibt an, daß System läuft und verhindert wiederholtes
 Nullsetzen durch Funktion "Neu"

```
U "Startknopf"
UN "Stopknopf"
S M 1.0
S M 8.0
```

Netzwerk: 3 Merker setzen 2 (Stoppen)

Bei alleinigem Drücken des Stopknopfes soll StartMerker 1.0 ebenso
 wie Spül-Merker 3.0 rückgesetzt werden. Merker 2.0 setzt Ventile nach Netzwerk
 8

```
U "Stopknopf"
UN "Startknopf"
R M 1.0
S M 2.0
```

Netzwerk: 4 Merker setzen 3 (Spülen)

Bei Drücken des Spülknopfes Rücksetzen des Start-Merker 1.0 und setzen des Spül-Merker 3.0. Dieser setzt Ventile nach Netzwerk 7

```

U    "Spülknopf"
R    M    1.0
S    M    3.0

```

Netzwerk: 5 Merker setzen 4 (Flammenwächter)

Wenn der Flammenwächter Signal gibt, Rücksetzen des Start-Merker und setzen des Abbruch-Merker 4.0. Weiter nach Netzwerk 8. Die Prüfsekunde dient dazu, Flammenauslöschung von konstruktionsbedingten Signalaussetzern zu unterscheiden.

```

U    "FW"
L    S5T#1S500MS
SE   "pruefsekunde"
U    "pruefsekunde"
R    M    1.0
S    M    4.0

```

Netzwerk: 6 Ventile in Zündposition

Bei aktiviertem Start-Merker M1.0 schalten des CH4 und des 3 Wege -Ventils und (sicherheitshalber) Rücksetzen des Helium-Ventils

```

U    M    1.0
R    "VHe"
S    "VCH4"
S    "V3W"
S    "Lampe_An"

```

Netzwerk: 7 Ventile in Spülposition

Zum Spülen der Leitungen bei gesetztem Spül-Merker M3.0 Rücksetzen des CH4 und des 3-Wege-Ventils und schalten des Helium Ventils.

```

U    M    3.0
R    "VCH4"
R    "V3W"
S    "VHe"
S    "Lampe_Sp"

```

Netzwerk: 8 "Herunterfahren"

Wenn Stop-Merker 2.0 oder Abbruch-Merker 4.0 gesetzt ist, setze Merker 8.0 zurück --> Totaler Stop und Löschung aller Merker durch Funktion "Neu"

```

O    M    2.0
O    M    4.0
R    M    8.0

```

Netzwerk: 9 Fehlerüberprüfung 1

Sollten beide Gasventile offen sein --> m10.0 --> Fehlerzustand

```

U    "VCH4"
U    "VHe"
S    M    10.0

```

Netzwerk: 10 Fehlerüberprüfung 2

Fehlersignal, sobald Start- und Stopknopf gleichzeitig gedrückt werden!

```
U   "Startknopf"  
U   "Stopknopf"  
S   M    10.0
```

Netzwerk: 11 Reaktion auf Fehler

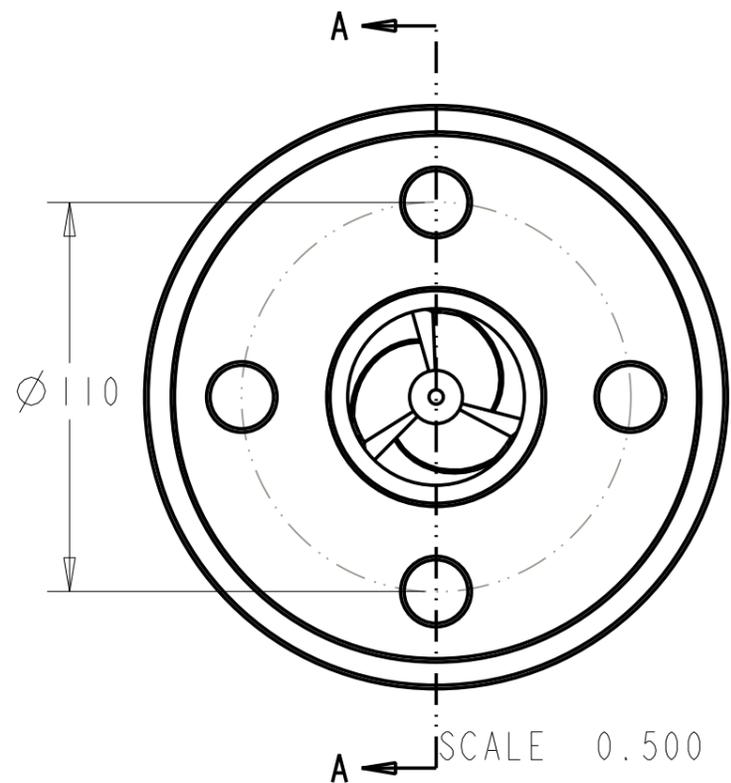
Bei Fehlerfall (= aktivierter Merker 10.0) Ausschalten aller Ventile und Auslösen eines Fehlersignals.

```
U   M    10.0  
R   "V3W"  
R   "VCH4"  
R   "VHe"  
S   "Fehlersignal"
```

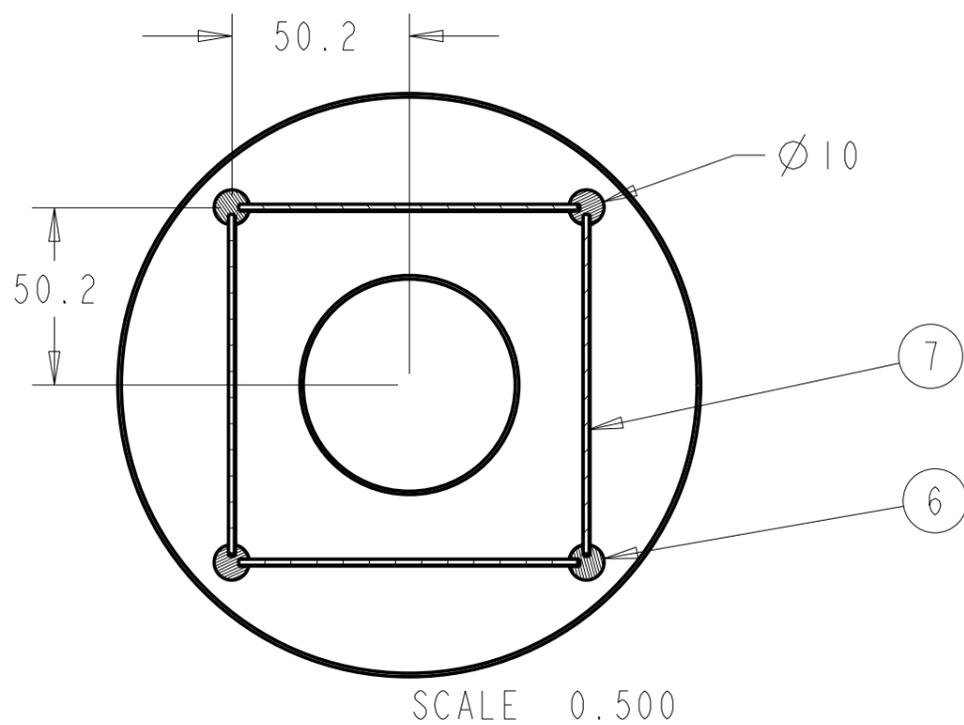
Netzwerk: 12 Entstören

Bei Betätigung des Entstörschalters Stoppen des Fehlersignals und Aktivierung der Löschfunktion "Neu"

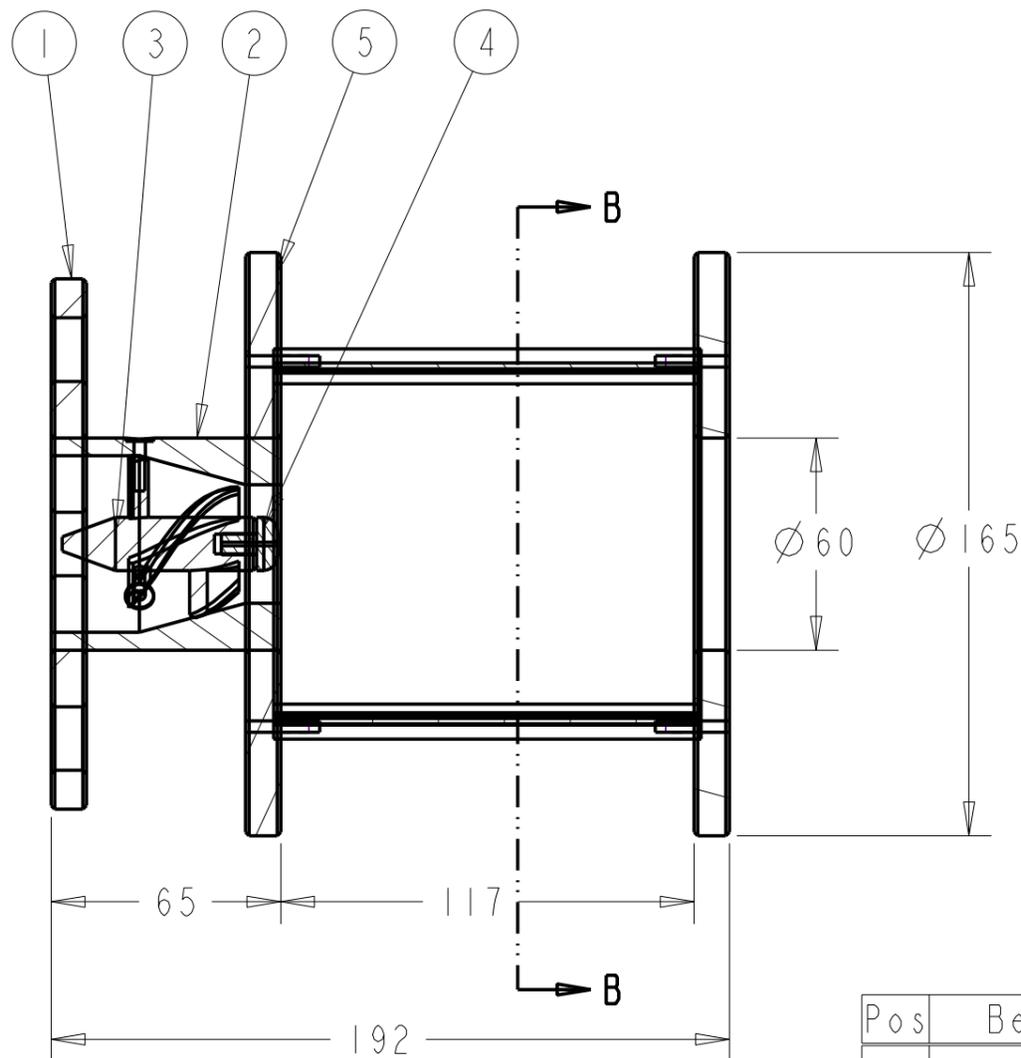
```
U   "Fehlersignal"  
U   "E-Knopf"  
R   "Fehlersignal"  
R   M    8.0
```



SCALE 0.500

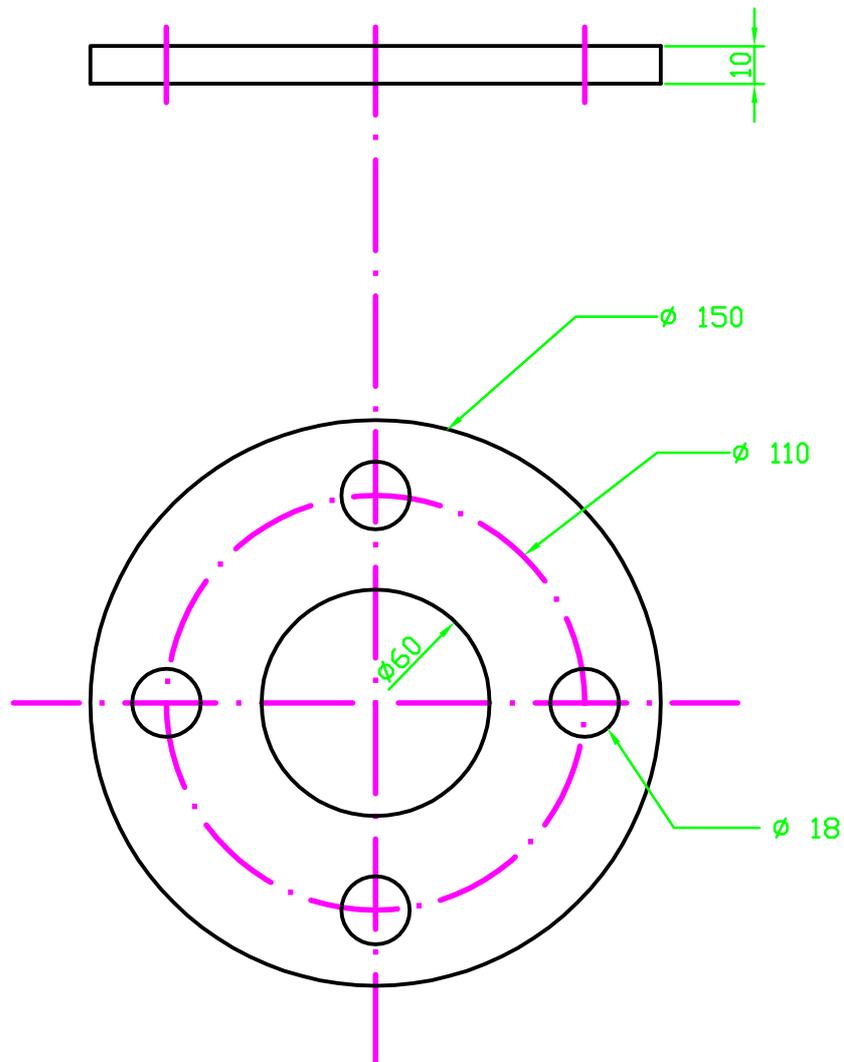


SCALE 0.500

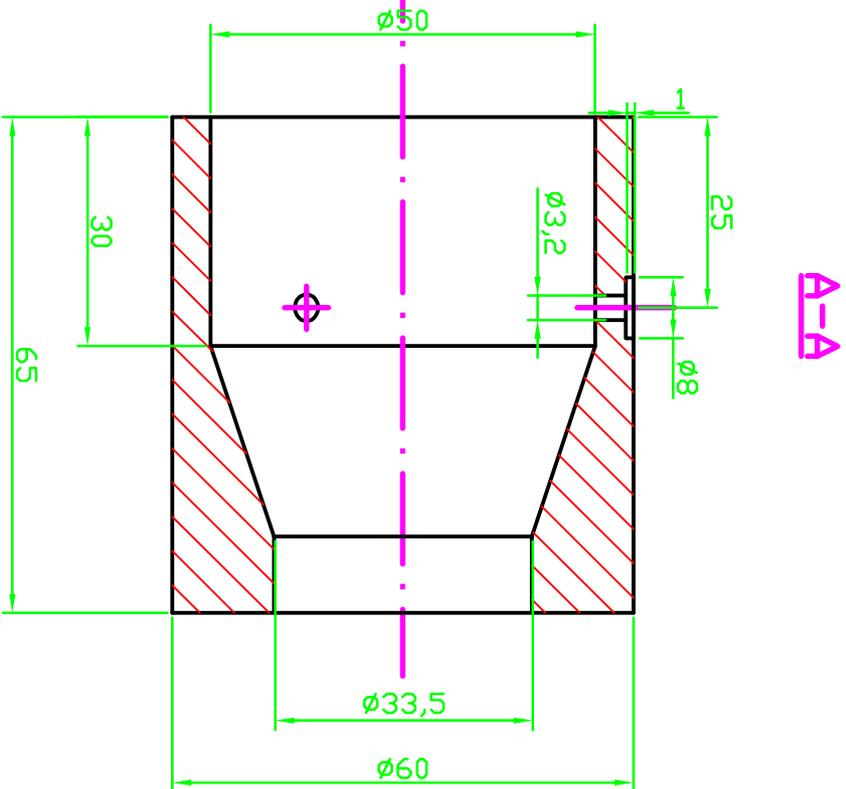
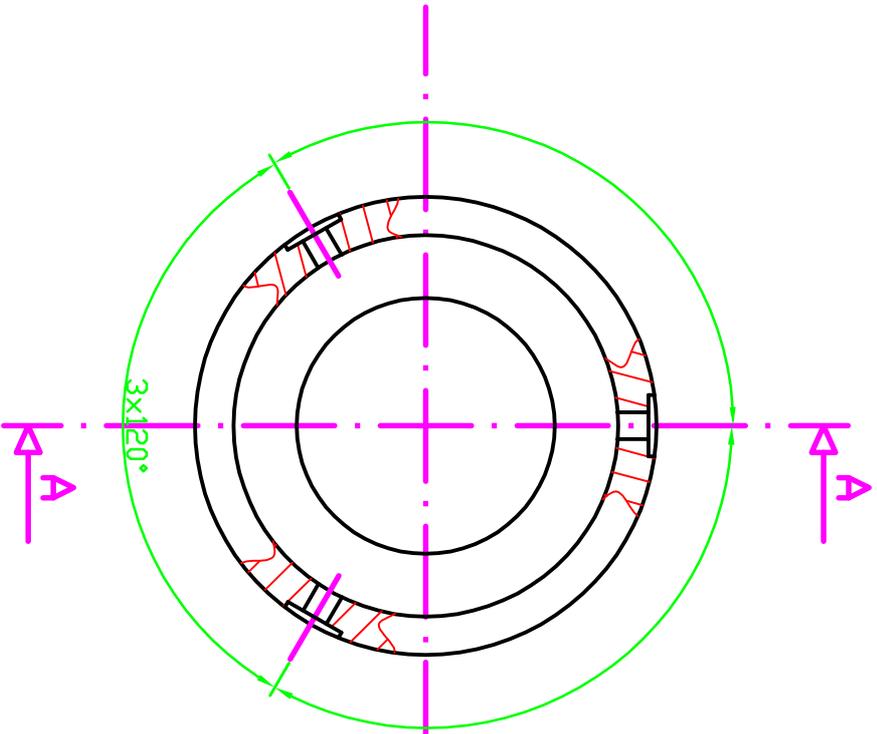


Pos	Bezeichnung	Zeichn.-Nr.
7	Scheibe	BK-01-07
6	Spannstange	BK-01-06
5	Kopfplatte	BK-01-05
4	Duesenspitze	BK-01-04
3	Drallduese 45°	BK-01-03
2	Aufnahme	BK-01-02
1	Anschlussflansch	BK-01-01

Dateiname des Zeichnungsobjektes: ZUSAMMENBAU_BK		Dateityp: ASSEM	Dateiname der Zeichnung: ZUS-ST-BK	
Tolerierung ISO 8015 Allg. Toleranz DIN ISO 2768 m-K		Maßstab 0.500 Gew.:		
Bear. 26.10.2005 Wagner		Werkstoff:		Benennung: Zusammenstellung Brennkammer
Gepr.		Halbzeug:		
Norm		TU-GRAZ		
Zust. Änderung Datum Nam (Urspr.)		Zeichnungsnummer: BK-01		Blatt 1 1 Bl.
		(Ers.f.):		(Ers.d.):

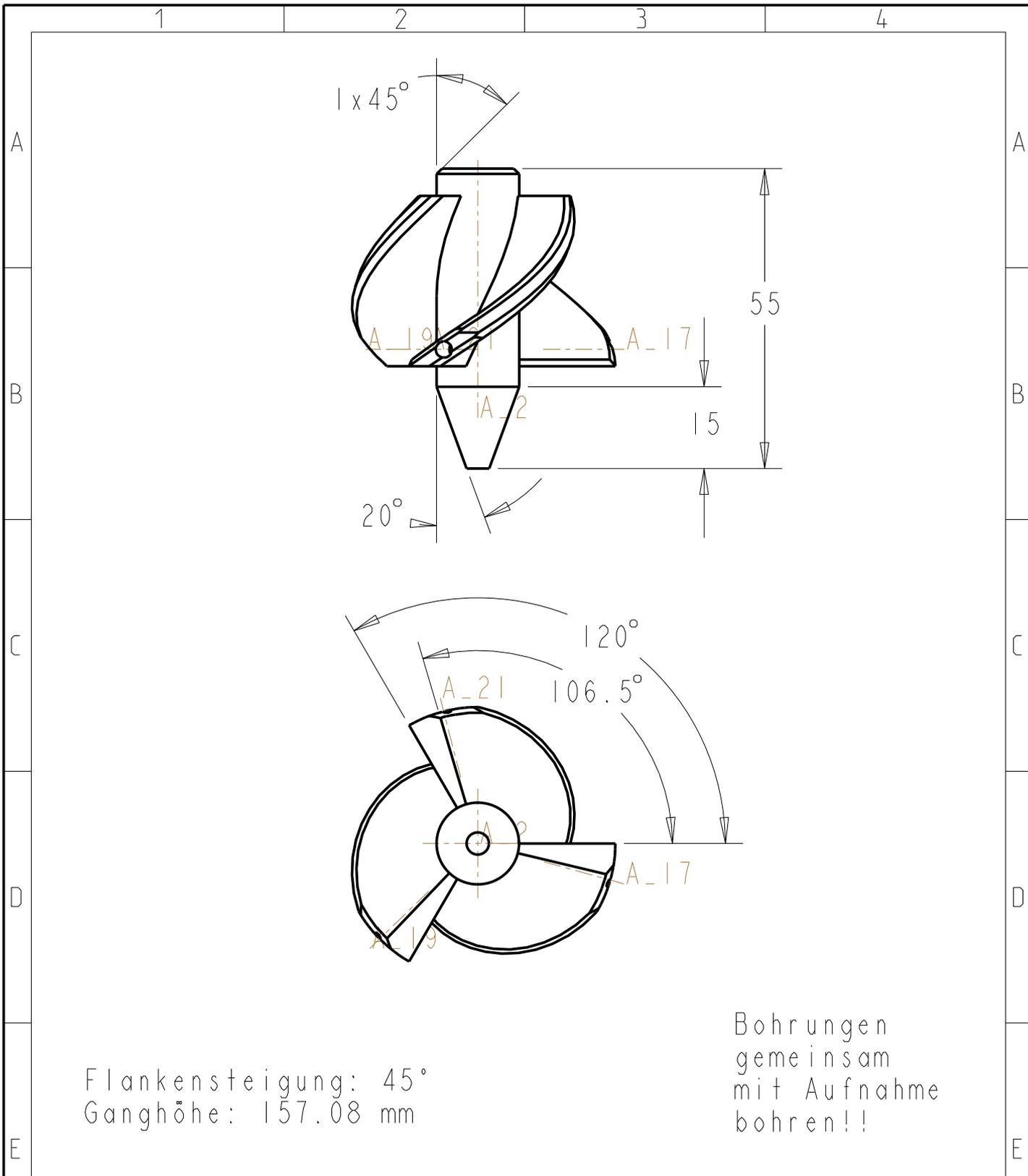


(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 1:2		(Gewicht)	
								(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)			
					Datum	Name		Flansch Düse			
				Bearb.	11.03.05	BW					
				Gepr.	00.00.00	XXX					
				Norm							
				TU-GRAZ				BK-01-01			Blatt
											Blätter
Zust	Änderung	Datum	Name	Ursprung				Ersatz für:		Ersatz durch:	



A-A

(Verwendungsbereich)		(Zul. Abw.)	(Oberfl.)	Maßstab 1:1	(Gewicht)
				(Werkstoff Halbzug) (Rohrteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)	
		Datum	Name	Aufnahme Düse	
		Bearb. 28.02.05	BW		
		Gepr. 00.00.00	XXX		
		Norm			
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ersatz für: BK-01-02	
				Ersatz durch:	
				Blatt	
				Blätter	
TU GRAZ					

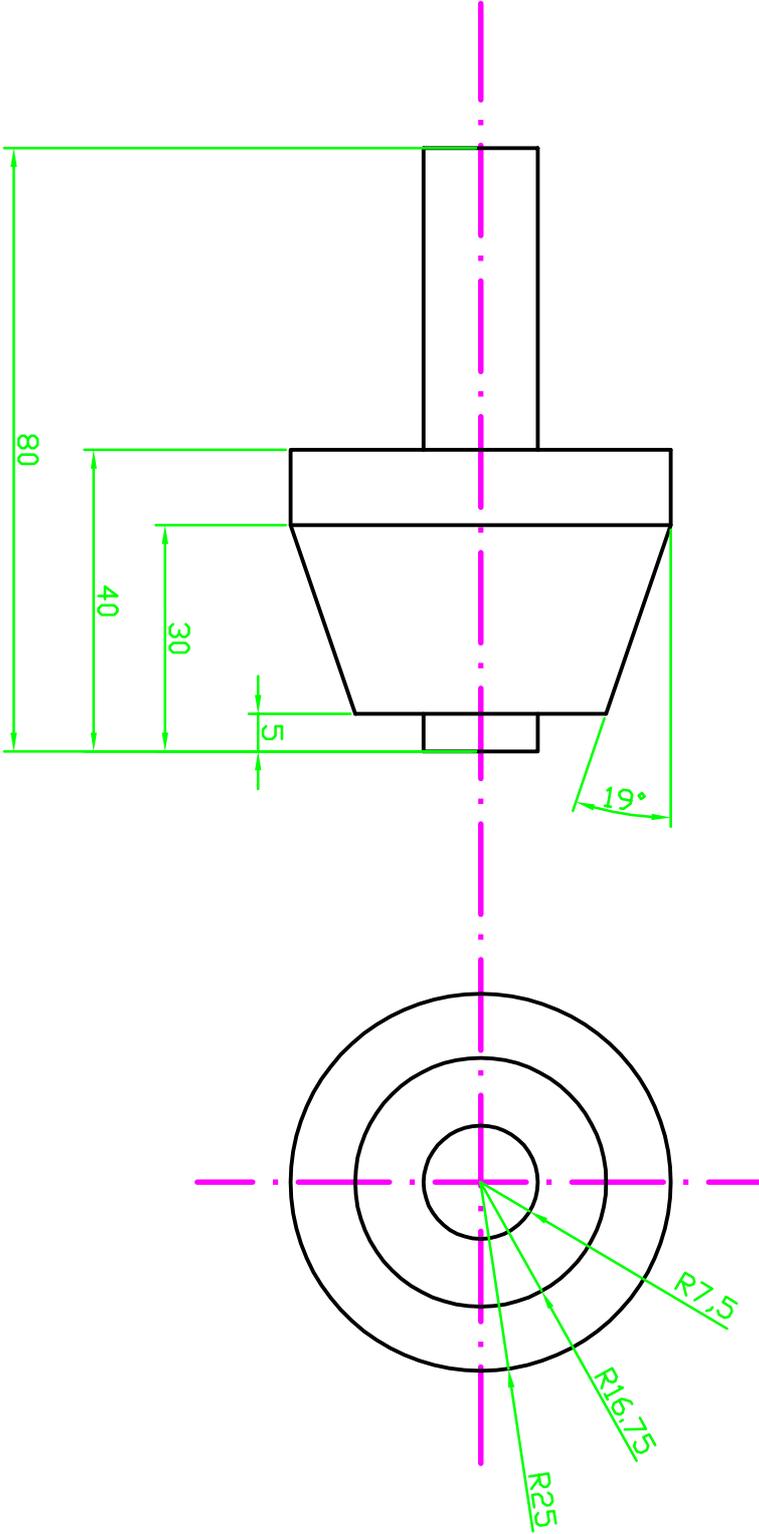


Flankensteigung: 45°
 Ganghöhe: 157.08 mm

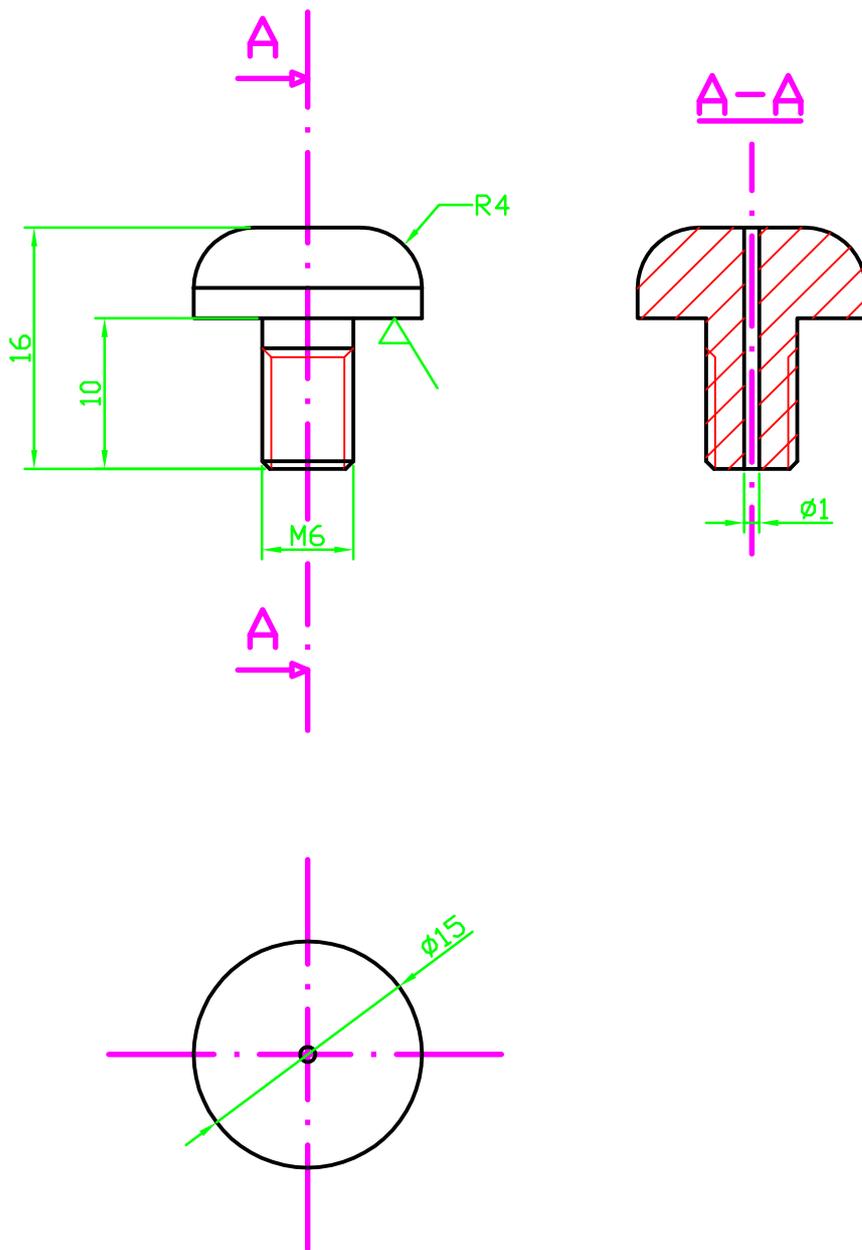
Bohrungen
 gemeinsam
 mit Aufnahme
 bohren!!

Dateiname des Zeichnungsobjektes: DUESE_DRALL_V3				Dateityp: PART	Dateiname der Zeichnung: DUESE	
				Tolerierung ISO 8015 Allg. Toleranz DIN ISO 2768 m-K	Maßstab 1.000	Gew.:
					Werkstoff: St 37-2	
					Halbzeug:	
				Datum	Name	Benennung: Drallduese 45°
				Bear. 26.10.2005	Wagner	
				Gepr.		
				Norm		
				TU-Graz		Zeichnungsnummer: BK-01-03
Zust.	Änderung	Datum	Nam	(Urspr.)	(Ers.f.:)	(Ers.d.:)

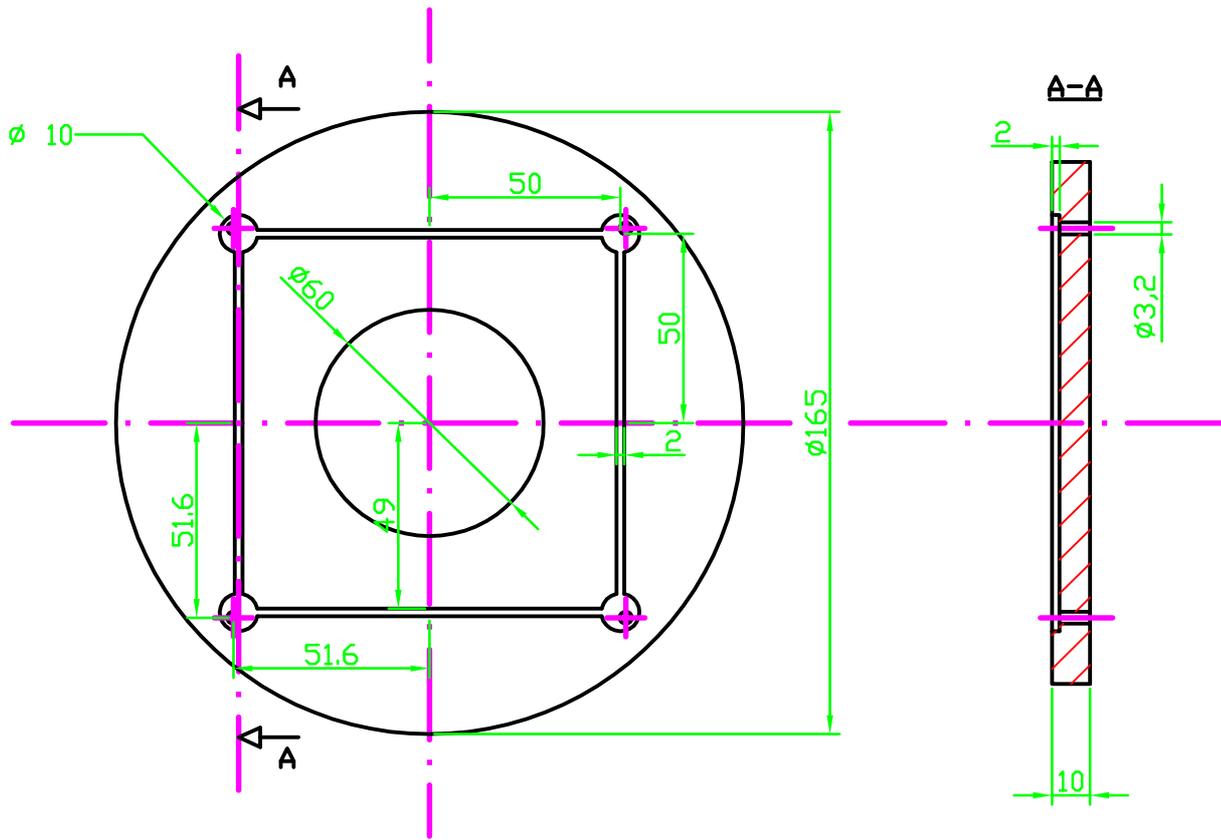
A



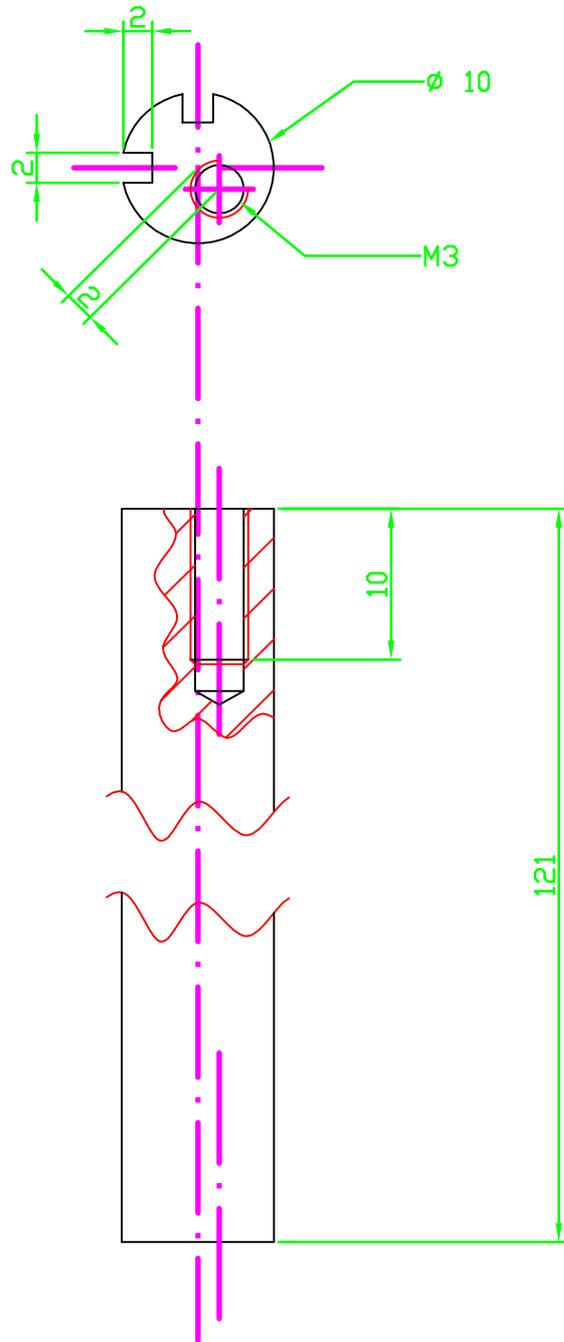
(Verwendungsbereich)		(Zul. Abw.)	(Oberfl.)	Maßstab 1:1	(Gewicht)	
				(Werkstoff Halbzeug) (Kontroll-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)		
		Datum	Name	Duese - Rohrtteil		
		Bearb. 02.03.05	Wagner			
		Gepr.				
		Norm				
		TU-GRAZ			BK-01-03	Blatt 2
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ersatz für:	Ersatz durch:	Blätter



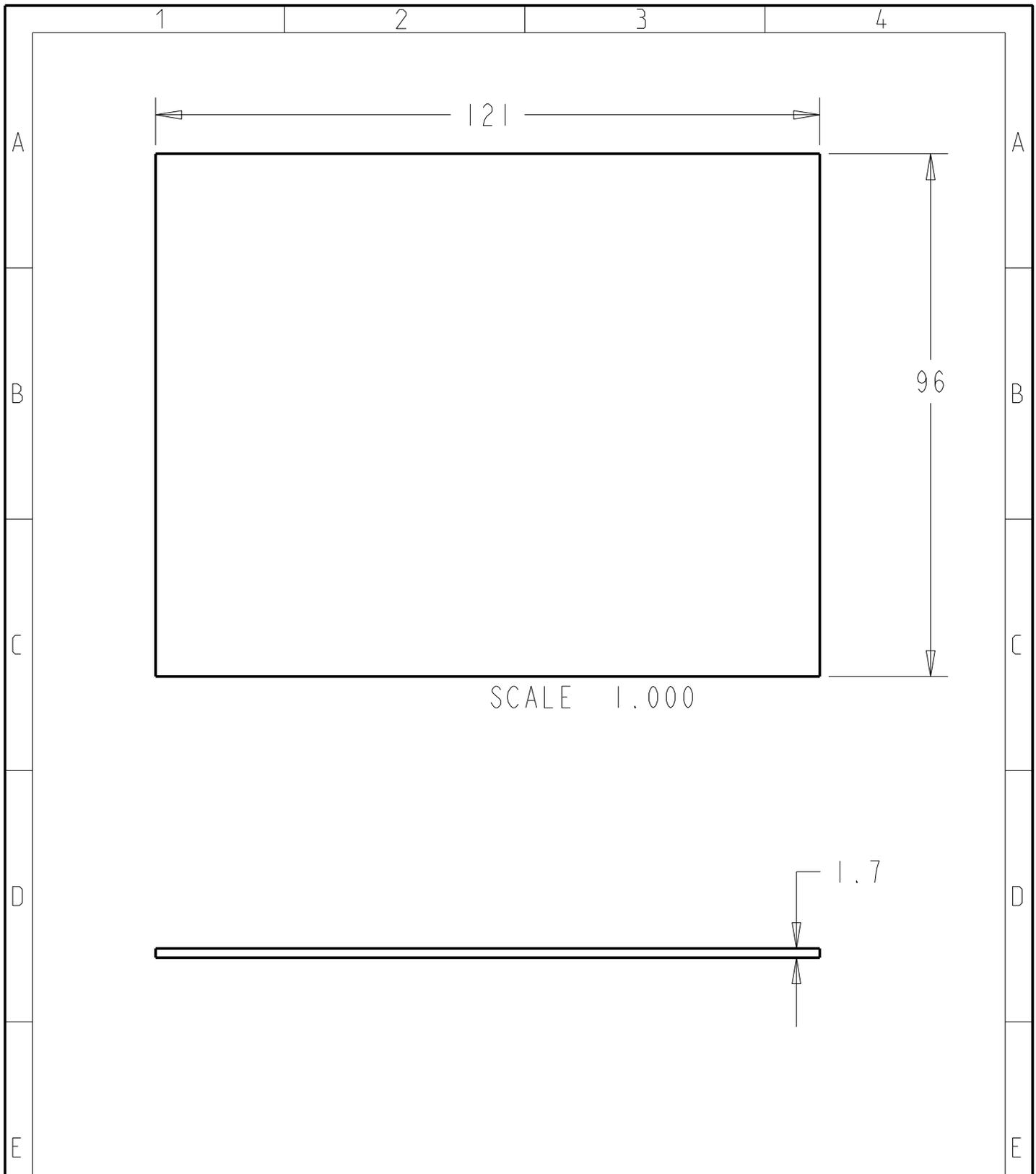
(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 2:1		(Gewicht)	
								(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)			
				Datum	Name	Düsen Spitze_v.1					
				Bearb. 14.03.05	BW						
				Gep. 00.00.00	XXX						
				Norm							
				TU-GRAZ				BK-01-04			Blatt
											Blätter
Zust	Änderung	Datum	Name	Ursprung				Ersatz für:		Ersatz durch:	



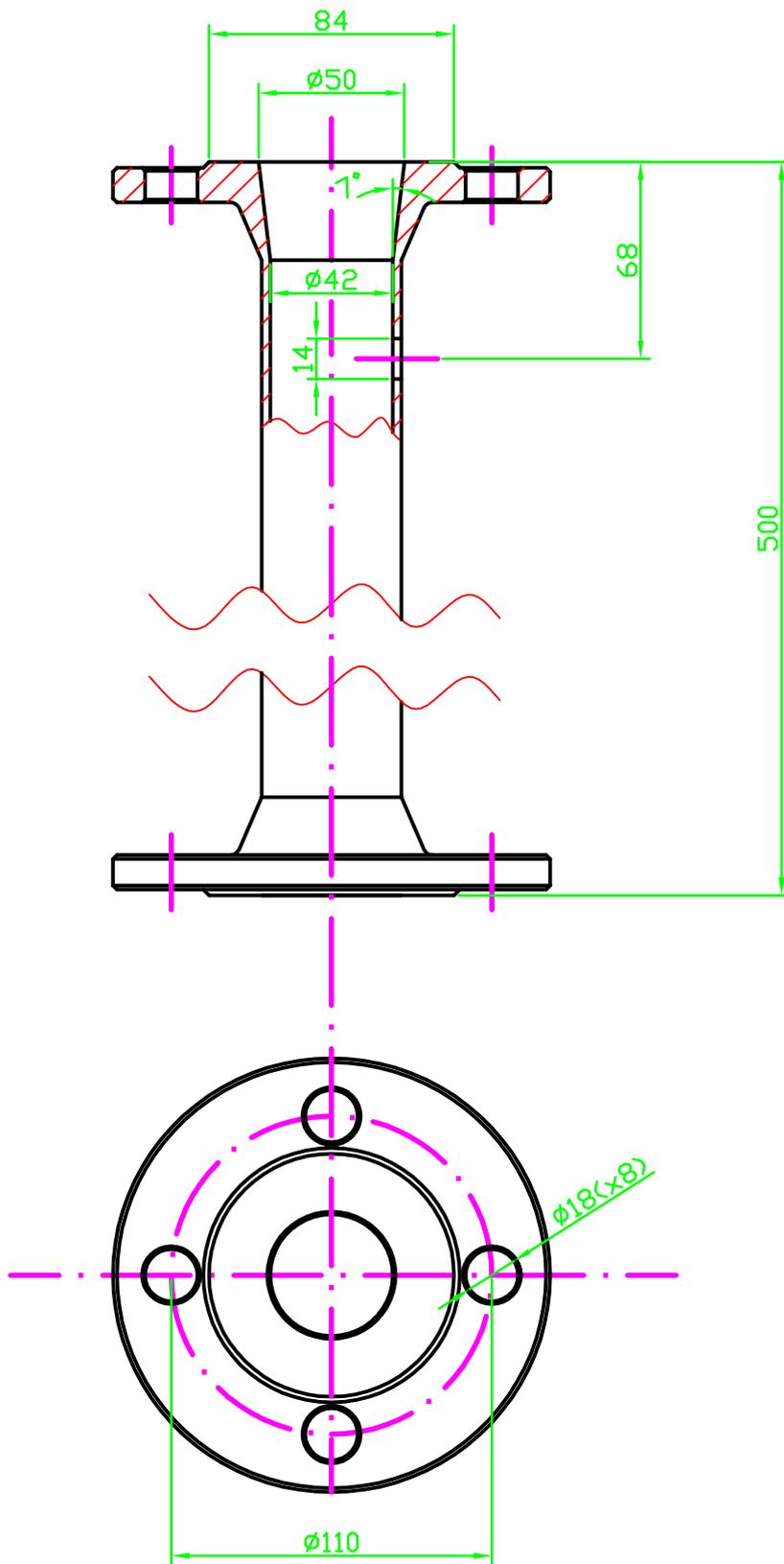
(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 1:2		(Gewicht)	
								(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)			
					Datum	Name		Kopfplatte			
				Bearb.	16.03.05	BW					
				Gepr.	00.00.00	XXX					
				Norm							
				TU-GRAZ				BK-01-05			
								Blatt			
								Blätter			
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung				Ersatz für:		Ersatz durch:	



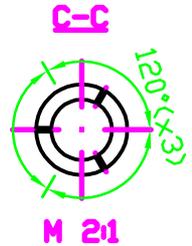
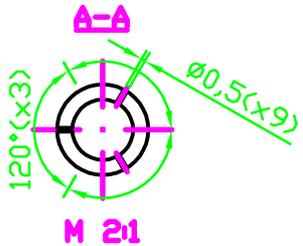
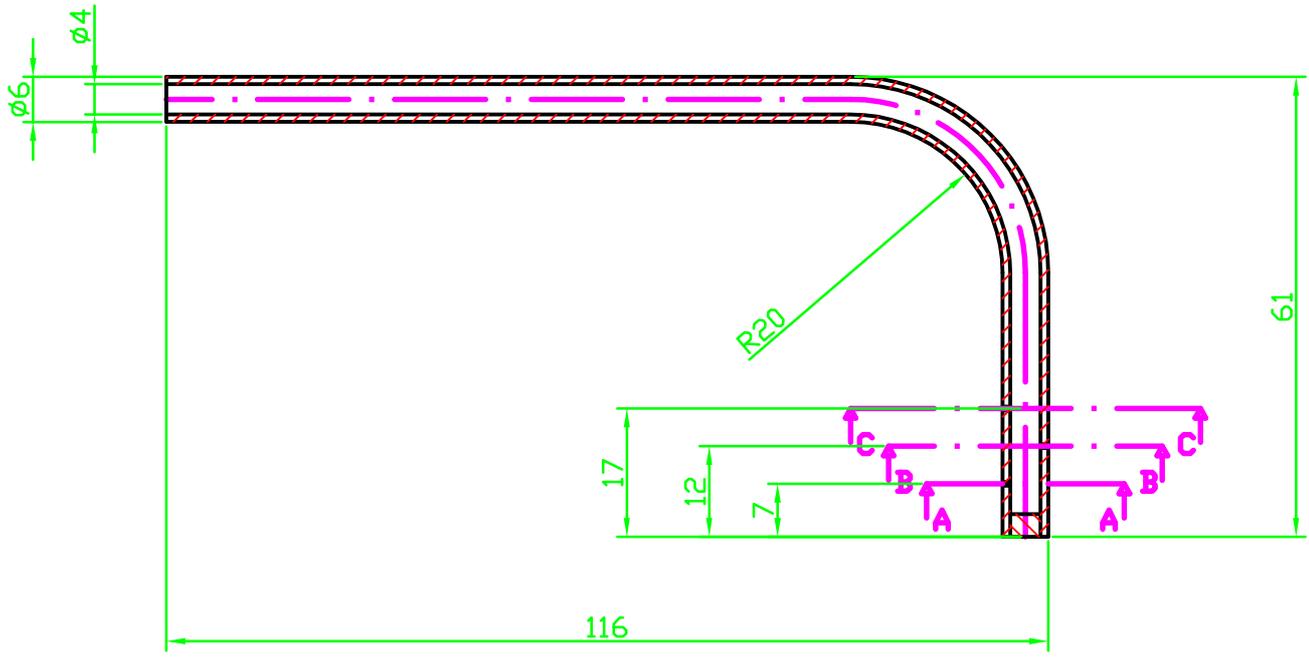
(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 2:1		(Gewicht)	
								(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)			
					Datum	Name		Spannstange			
				Bearb.	16.03.05	BW					
				Gepr.	00.00.00	XXX					
				Norm							
				TU-GRAZ				BK-01-06			Blatt
											Blätter
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung				Ersatz für:		Ersatz durch:	



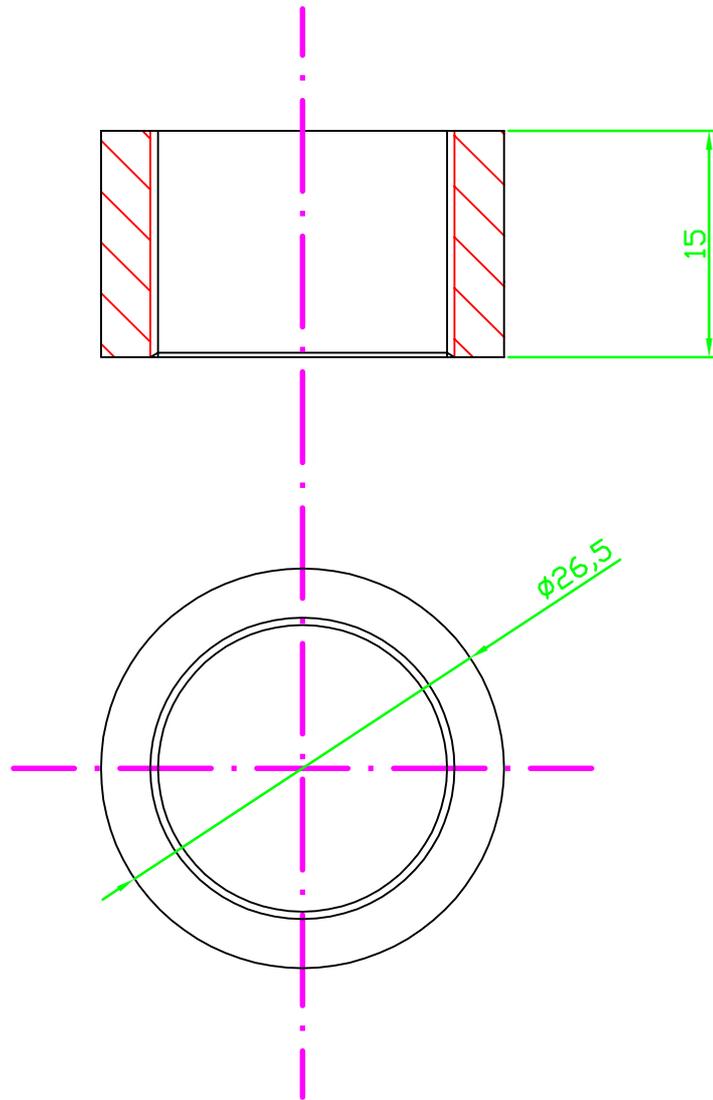
Dateiname des Zeichnungsobjektes: GLASPLATTE				Dateityp: PART		Dateiname der Zeichnung: SCHEIBE	
				Tolerierung ISO 8015 Allg. Toleranz DIN ISO 2768 m-K		Maßstab 0.500 Gew.:	
						Werkstoff: SQ 1	
						Halbzeug:	
				Datum		Name	
				Bear. 26.10.2005		Wagner	
				Gepr.			
				Norm			
						Benennung: Scheibe	
				TU-GRAZ		Zeichnungsnummer: BK-01-07	
						Blatt 1	
						1 Bl.	
Zust.	Änderung	Datum	Nam	(Urspr.)	(Ers.f.)	(Ers.d.)	



(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)	(Oberfl.)	Maßstab 1:2.5	(Gewicht)
						(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)	
				Datum	Name	Zuströmrohr	
			Bearb.	04.03.05	BW		
			Gepr.	00.00.00	XXX		
			Norm				
				TU-GRAZ		GA-01_01	
						Blatt	
						Blätter	
Zust	Änderung	Datum	Name	Ursprung		Ersatz für:	Ersatz durch:

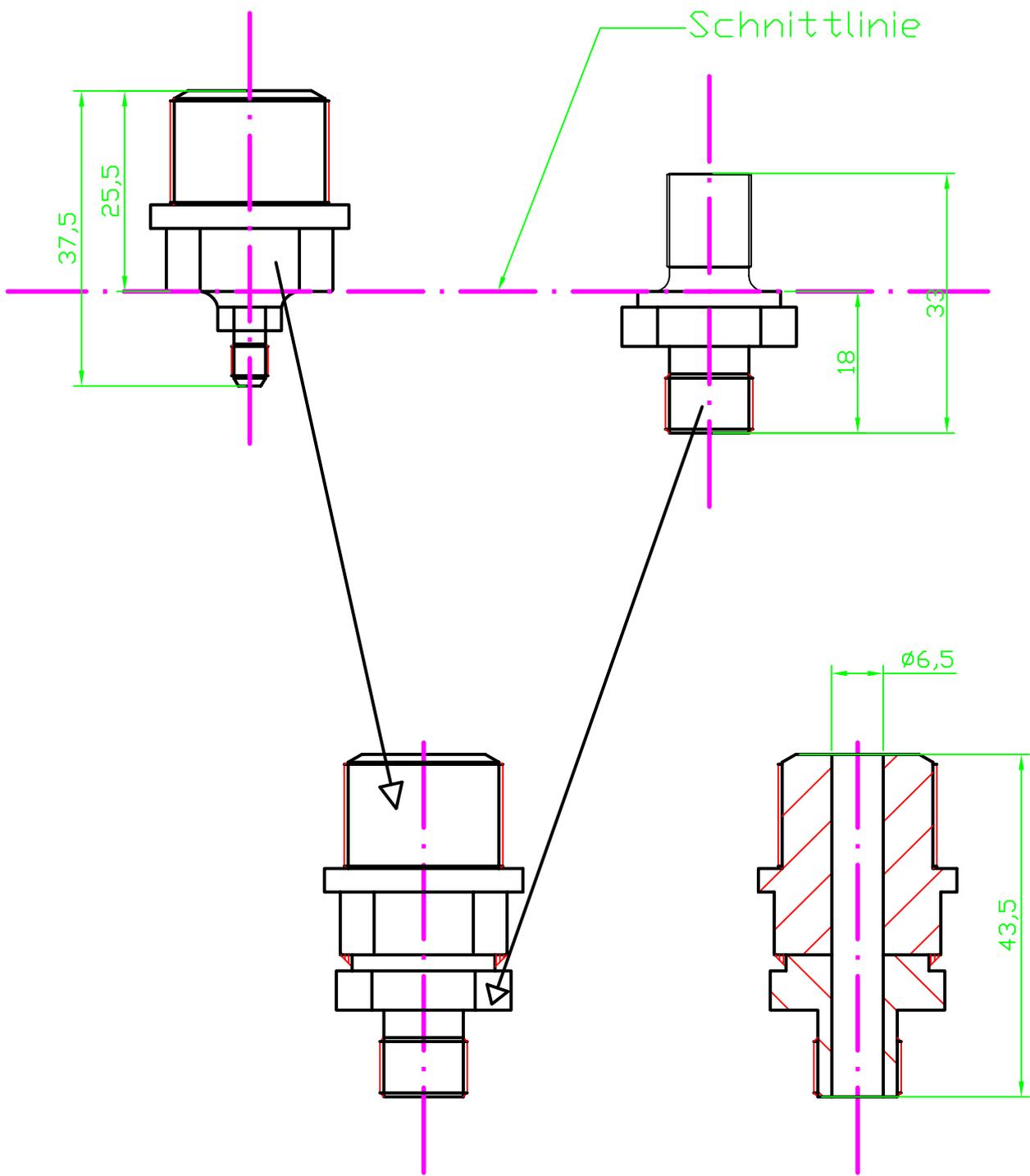


(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 1:1 (2:1)		(Gewicht)	
								(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)			
				Datum	Name	Gaszuleitung					
				Bearb. 04.03.05	BW						
				Gepr. 00.00.00	XXX						
				Norm							
				TU-GRAZ		GA-01_02				Blatt	
										Blätter	
Zust	Änderung	Datum	Name	Ursprung		Ersatz für:			Ersatz durch:		

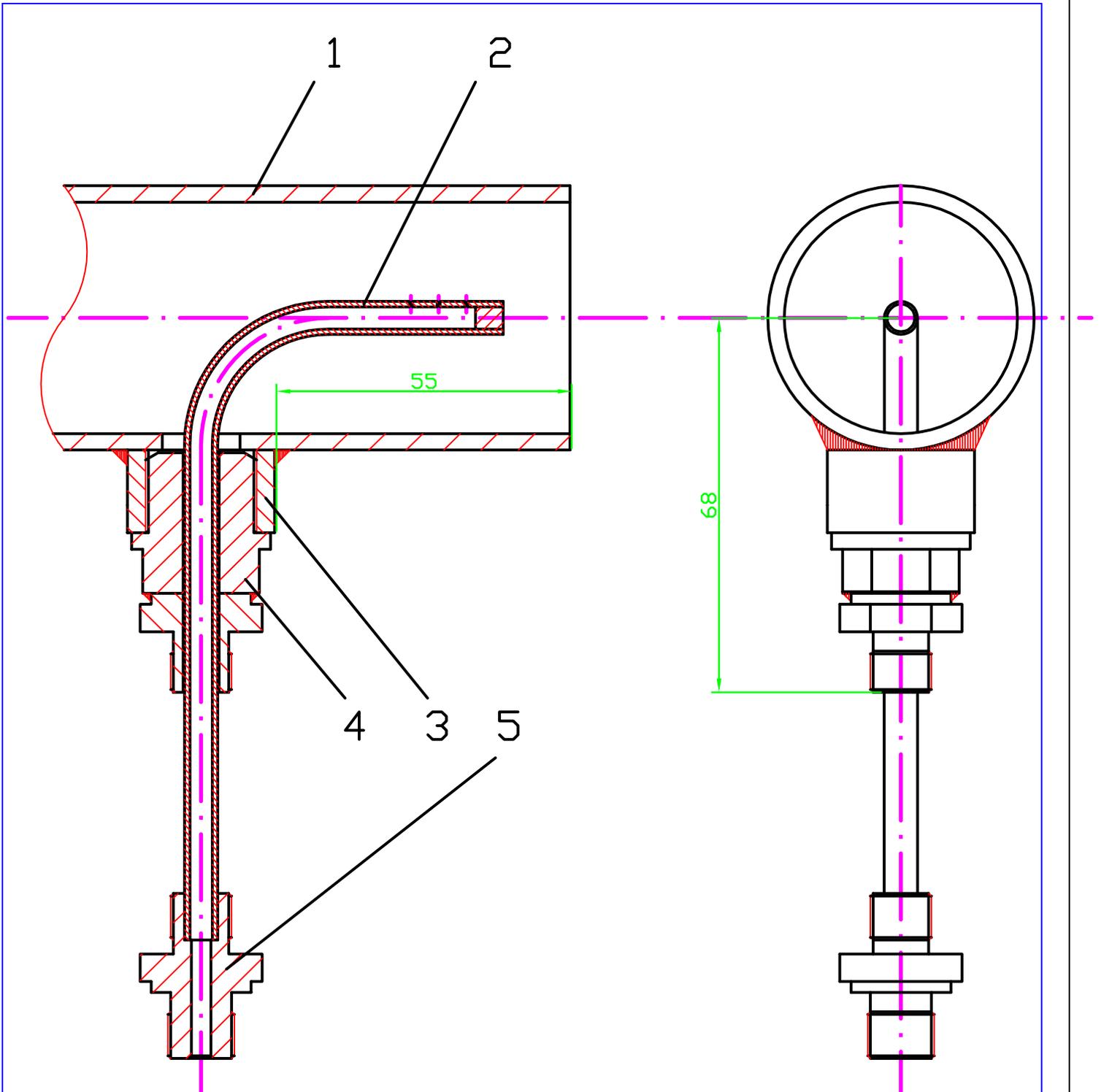


Anmerkung: Teil schon vorhanden! Muß nur mehr zugeschnitten werden!

(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		(Gewicht)	
								(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)			
					Datum	Name		Anschlußpfropfen			
				Bearb.	07.03.05	BW					
				Gepr.	00.00.00	XXX					
				Norm							
				TU-GRAZ				GA-01_03		Blatt	
										Blätter	
Zust	Änderung	Datum	Name	Ursprung				Ersatz für:		Ersatz durch:	



(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)	(Oberfl.)	Maßstab 1:1	(Gewicht)
						(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)	
				Datum	Name	Schraubanschluß	
				Bearb. 07.03.05	BW		
				Gepr. 00.00.00	XXX		
				Norm			
				TU-GRAZ		GA-01_04	
						Blatt	
						Blätter	
Zust	Änderung	Datum	Name	Ursprung		Ersatz für:	Ersatz durch:

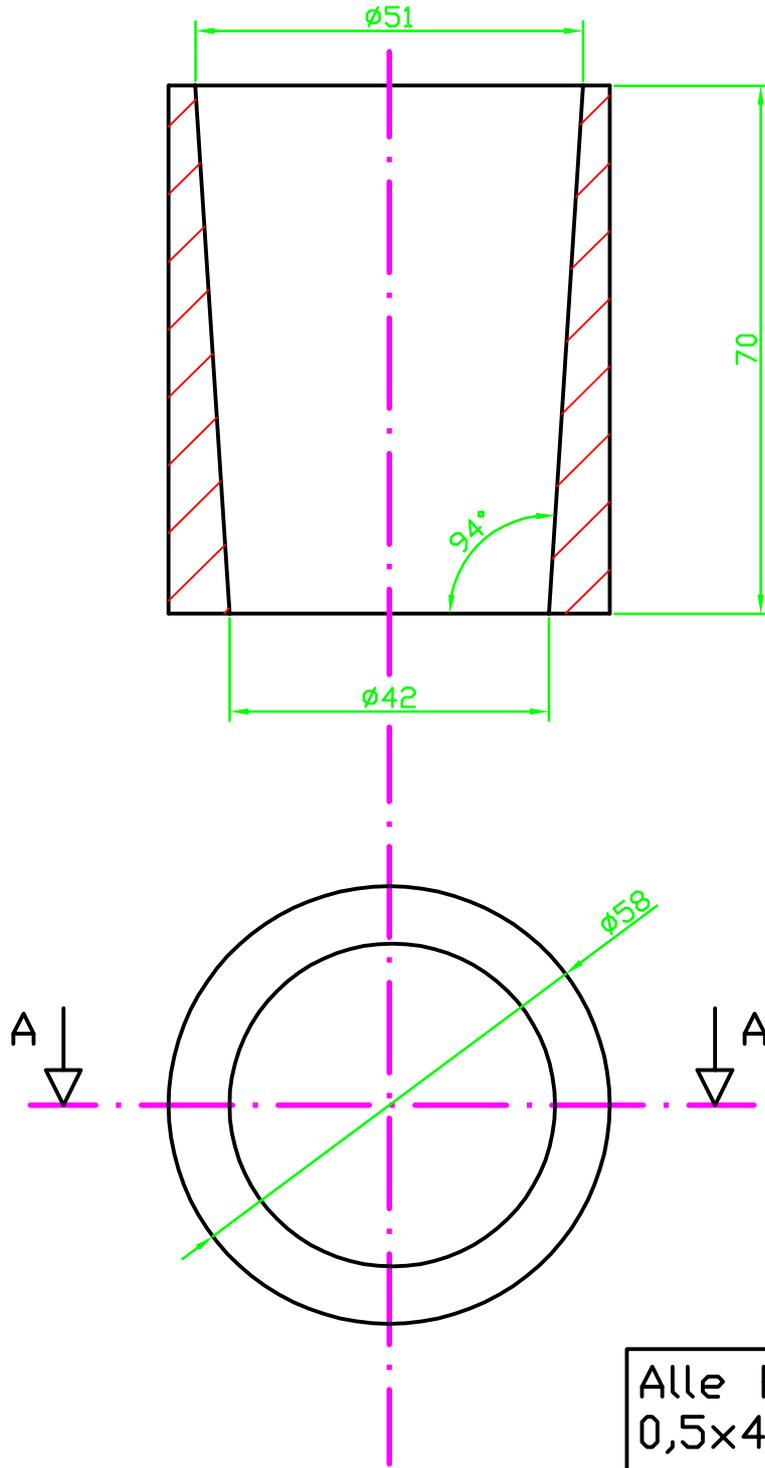


Swadgelock-Verschlüsse
nicht gezeichnet !

Pos	Bezeichnung	Zeichnungs-Nr.
5	Swadgelock (R)	N/A
4	Schraubanschluß	GA-01_04
3	Anschlußpfropfen	GA-01_03
2	Gaszuleitung	GA-01_02
1	Zuströmrohr	GA-01_01

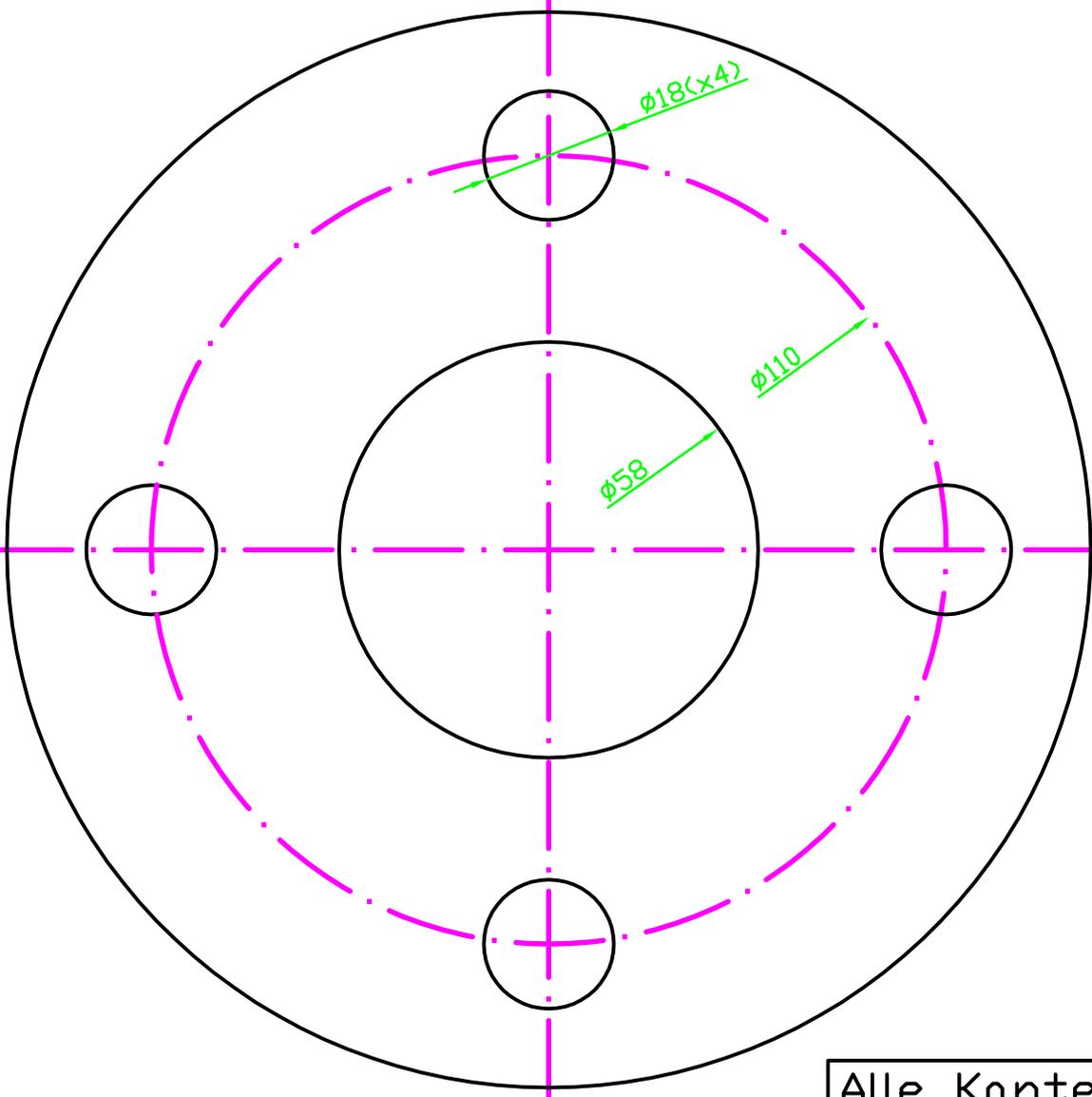
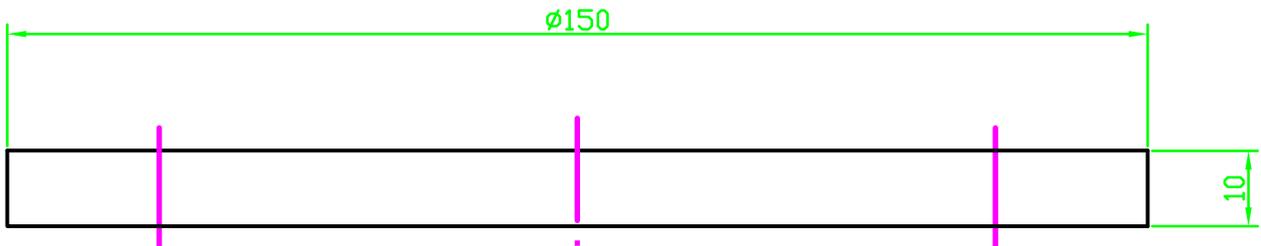
(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)	(Oberfl.)	Maßstab 1:1	(Gewicht)
						(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)	
				Datum	Name	Detail Gasanschluß	
				Bearb. 04.03.05	BW		
				Gepr. 00.00.00	XXX		
				Norm			
				TU-GRAZ		GA-01	Blatt
							Blätter
Zust	Änderung	Datum	Name	Ursprung	Ersatz für:	Ersatz durch:	

A-A



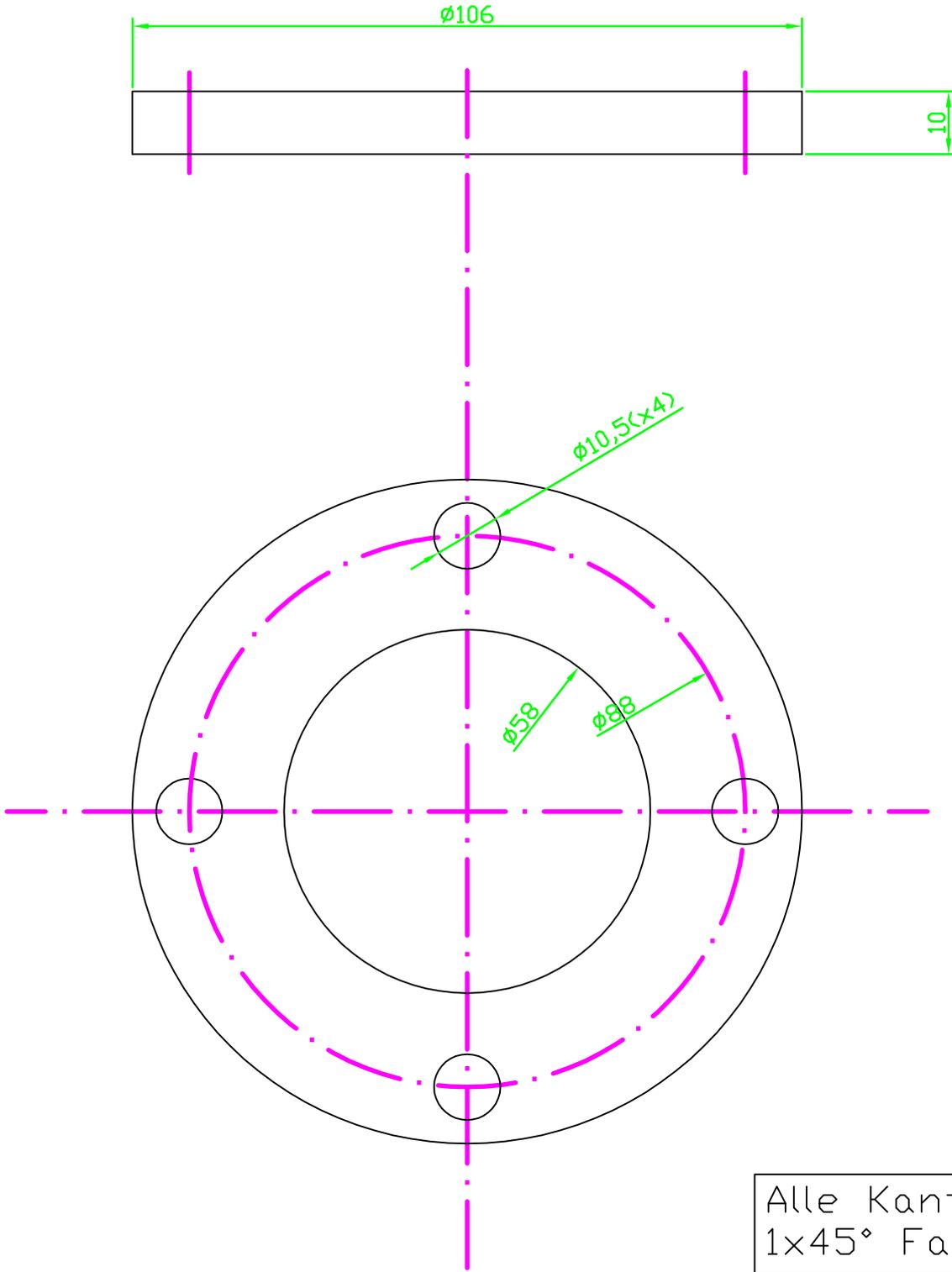
Alle Kanten mit
0,5x45° Fase

(Verwendungsbereich)			(Zul. Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		(Gewicht)	
							(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)			
				Datum	Name		Übergangskonus			
			Bearb.	10.03.05	BW					
			Gepr.	00.00.00	XXX					
			Norm							
			TU- GRAZ				ÜS-01_01			Blatt
										Blätter
Zust	Änderung	Datum	Name	Ursprung			Ersatz für:		Ersatz durch:	



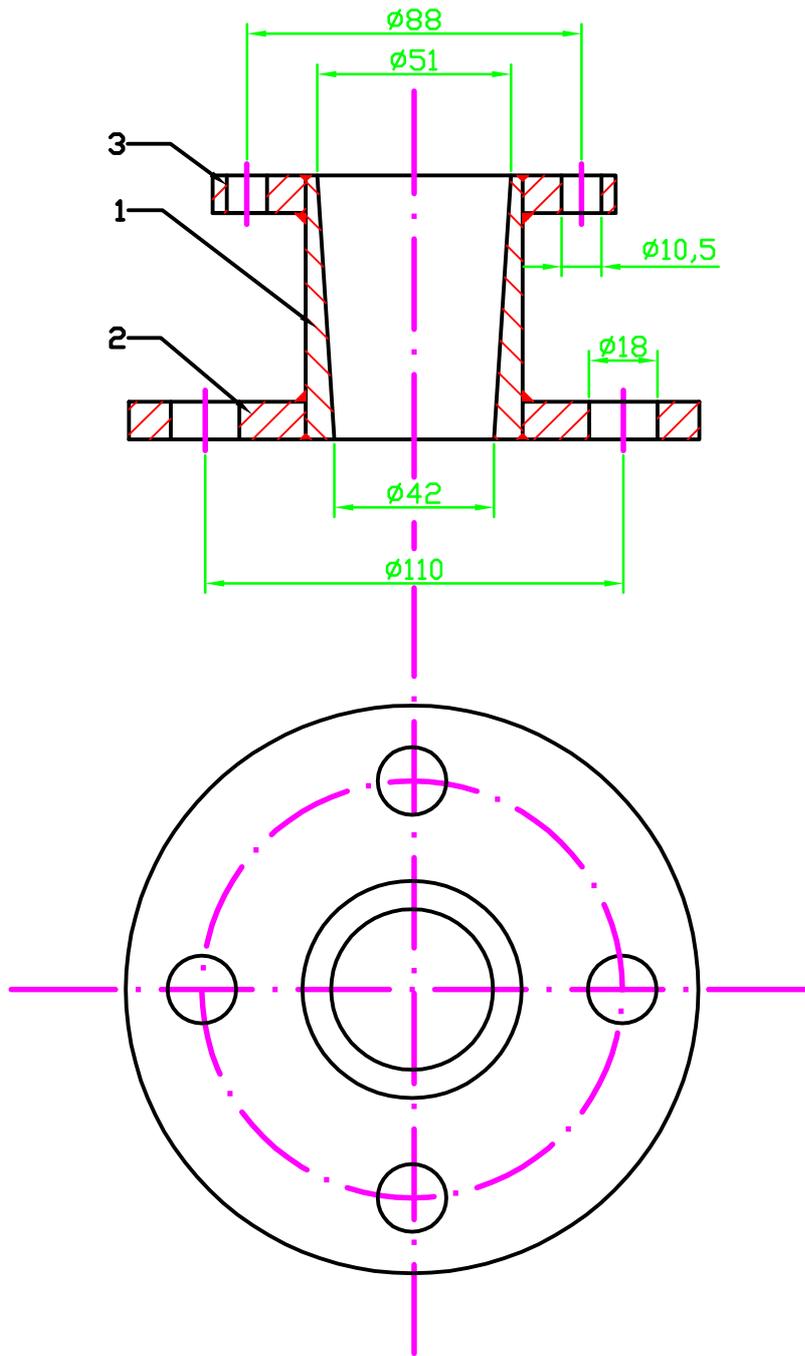
Alle Kanten mit
1x45° Fase

(Verwendungsbereich)		(Zul. Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		(Gewicht)	
						(Werkstoff Halbzug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)			
				Datum	Name	Flansch-Rohr			
				Bearb. 10.03.05	BW				
				Gepr. 00.00.00	XXX				
				Norm					
				TU- GRAZ		ÜS-01_02			Blatt
									Blätter
Zust	Änderung	Datum	Name	Ursprung	Ersatz für:			Ersatz durch:	



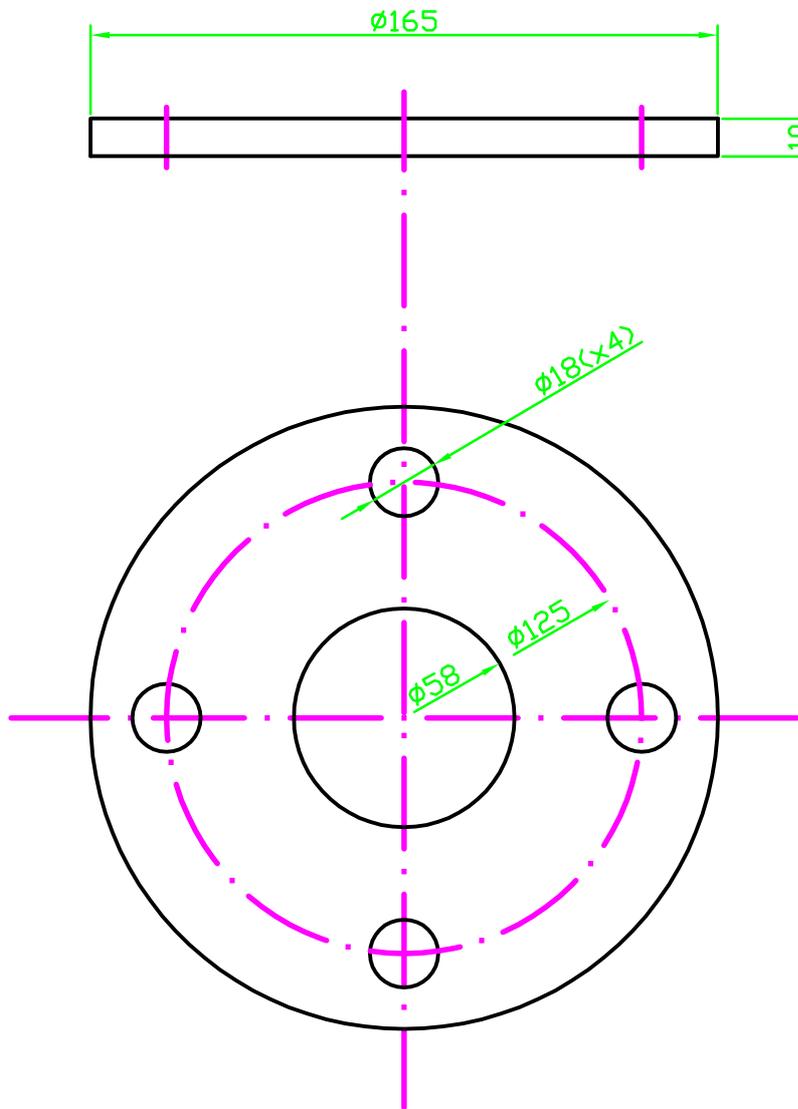
Alle Kanten mit
1x45° Fase

(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		(Gewicht)	
								(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)			
				Datum		Name		Flansch-Sirene 1			
				Bearb. 10.03.05		BW					
				Gepr. 00.00.00		XXX					
				Norm							
				TU-GRAZ				ÜS-01_03		Blatt	
										Blätter	
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung				Ersatz für:		Ersatz durch:	



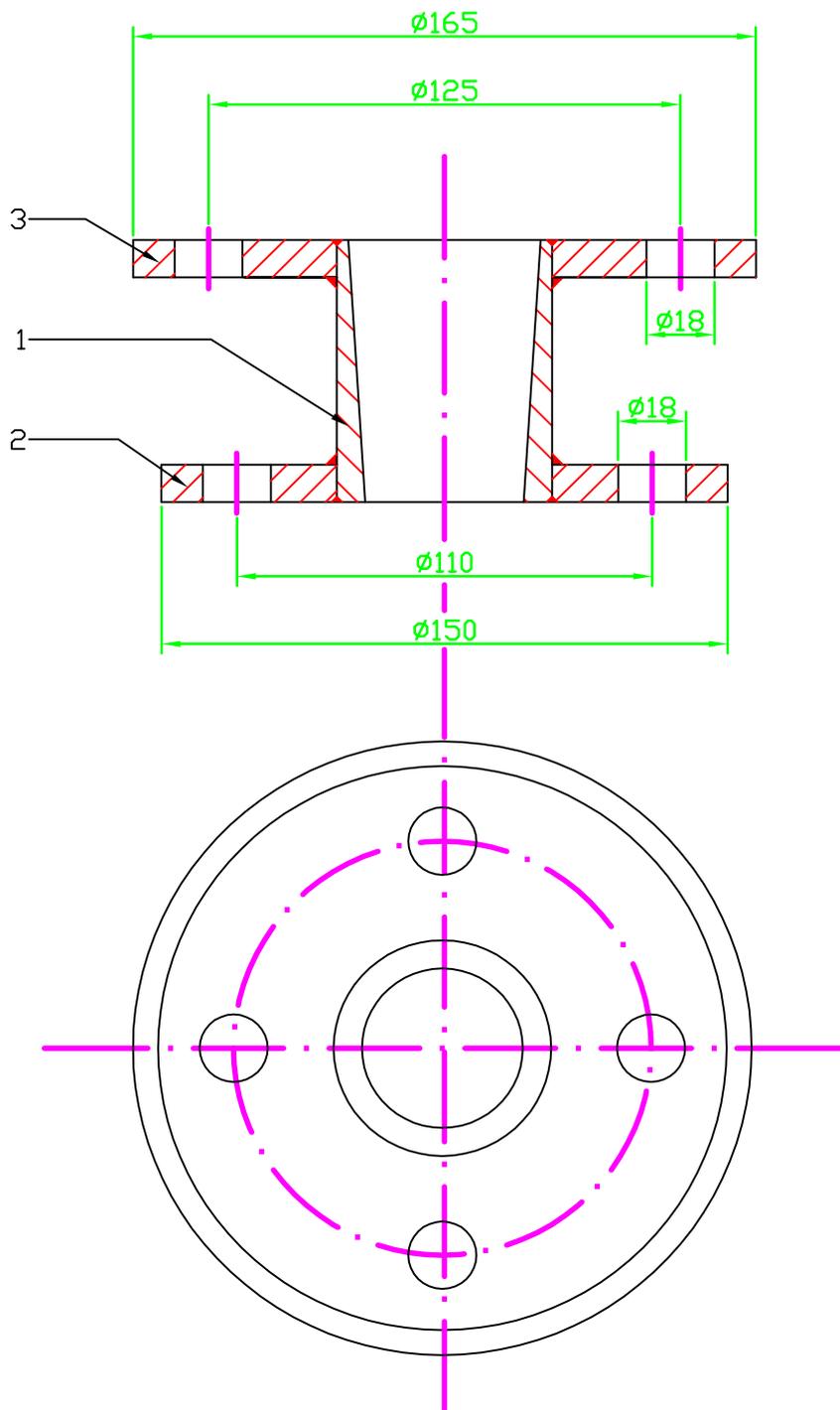
Pos	Bezeichnung	Zeichnungs-Nr.
3	Flansch-Sirene 1	ÜS-01_03
2	Flansch-Rohr	ÜS-01_02
1	Übergangskonus	ÜS-01_01

(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)	(Oberfl.)	Maßstab 1:2	(Gewicht)
						(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)	
				Datum	Name	Zusst. Üb-Stück 1	
				Bearb. 10.03.05	BW		
				Gepr. 00.00.00	XXX		
				Norm			
				TU-GRAZ		ÜS-01	
						Blatt	
						Blätter	
Zust	Änderung	Datum	Name	Ursprung	Ersatz für:		Ersatz durch:



Alle Kanten mit $1 \times 45^\circ$ Fase

(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab 1:2		(Gewicht)	
								(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)			
					Datum	Name		Flansch-Sirene 2			
				Bearb.	10.03.05	BW					
				Gepr.	00.00.00	XXX					
				Norm							
				TU-GRAZ				ÜS-02_01			Blatt
											Blätter
Zust	Änderung	Datum	Name	Ursprung			Ersatz für:		Ersatz durch:		



Pos	Bezeichnung	Zeichnungs-Nr.
3	Flansch-Sirene 2	ÜS-02_01
2	Flansch-Rohr	ÜS-01_02
1	Übergangskonus	ÜS-01_01

(Verwendungsbereich)			(Zul. Abw.)	(Oberfl.)	Maßstab 1:2	(Gewicht)	
					(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)		
			Datum	Name	Zusst.Üb-Stück 2		
			Bearb. 10.03.05	BW			
			Gepr. 00.00.00	XXX			
			Norm				
			TU-GRAZ			ÜS-02	Blatt
							Blätter
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	Ersatz für:	Ersatz durch:	