

Frank Stolpe und Jens Grube

Entwicklung von Verfahren zur Qualifizierung und Prüfung von innermotorischen Flammensperren in Gasmotoren für wasserstoffhaltiges Erdgas/Biogas

ISSN 2751-6598
ISBN 978-3-944659-32-9

DOI 10.7795/110.20240214

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Metrologie

PTB-M-5

Braunschweig, Februar 2024

Frank Stolpe und Jens Grube

Entwicklung von Verfahren zur Qualifizierung und Prüfung von innermotorischen Flammensperren in Gasmotoren für wasserstoffhaltiges Erdgas/Biogas

Bericht zu FV 37066

ISSN 2751-6598

ISBN 978-3-944659-32-9

DOI 10.7795/110.20240214

<https://doi.org/10.7795/110.20240214>

Empfohlene Zitierweise/recommended citation

Stolpe, F. und J. Grube, 2024. *Entwicklung von Verfahren zur Qualifizierung und Prüfung von innermotorischen Flammensperren in Gasmotoren für wasserstoffhaltiges Erdgas/Biogas: Bericht zu FV 37066.*

Braunschweig:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

PTB-Bericht M-5. ISBN 978-3-944659-32-9.

Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20240214>

Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21

Telefax: (05 31) 592-92 92

www.ptb.de



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

Fachbereich 3.7 „Grundlagen des Explosionsschutzes“

Bericht zu FV 37066

**Entwicklung von Verfahren zur
Qualifizierung und Prüfung von
innermotorischen Flammensperren in
Gasmotoren für wasserstoffhaltiges
Erdgas/Biogas**

F. Stolpe * ; J. Grube †

Stand 6. Februar 2024

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt

†Rolls-Royce Solutions GmbH

Abstract

This report summarises a research project focusing on flame arresting elements used in gaseous-fuel engines operated with natural gas or biogas enriched with hydrogen up to 40% by volume. Starting point are the series "4000 Gas" engines of MTU. A test rig derived from series components was used for qualifying tests and tests to determine the performance limits of four different flame arresting elements.

The data of the performance limit tests are showing a good suitability for the maximum experimental safe gap to describe the performance limit independent of gas composition and initial pressure. This leads to further experiments using appropriate hydrogen methane mixture for testing inline deflagration flame arresters.

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	7
2. Versuchsaufbau	9
2.1. Versuchsgefäß	9
2.2. Gemischaufbereitung	10
2.3. Messtechnik	13
3. Versuchsprogramm	15
3.1. Versuchsdurchführung	15
3.2. Qualifizierungsversuche	17
3.3. Bestimmung von Leistungsgrenzen	19
4. Auswertung und Ergebnisse	21
4.0.1. Exkurs flammendurchschlagsichere Spaltweite	21
4.1. Qualifizierungsversuche	26
4.2. Bestimmung von Leistungsgrenzen	27
4.3. Besondere Probleme und Beobachtungen	33
5. Schlussfolgerungen	37
5.1. Qualifizierungsversuche	37
5.2. Bestimmung der Leistungsgrenzen	38
5.3. Weiterführende Schlussfolgerungen	40
Quellen und Verweise	43
A. Gemischtabeln	45

1. Aufgabenstellung

Ausgangspunkt der Betrachtung ist die MTU Gasmotoren-Baureihe 4000 für die Anwendung mit Erdgas und Biogas. Die Motoren der Baureihe 4000 Gas sind mit einer Homogenisierung von Luft und Brennstoff vor Eintritt in die Verdichterstufe des Turboladers als zentrale Gemischbildung ausgeführt. Um einen sicheren Betrieb bei der Gemischverdichtung zu gewährleisten, muss der gemischführende Bereich gegen gefährliche, vorhersehbare Ereignisse abgesichert sein.

Aktuell geht der Trend beim Betrieb von Erdgas-Gasmotoren zunehmend hin zur Nutzung von Brenngasen mit Wasserstoffgehalten von bis zu 20 Vol.-% in Erdgasnetzen und bis zu 40 Vol.-% in Spezialanwendungen.

Als Sicherungseinrichtung gegen Rückzündungen aus dem Zylinder-Brennraum werden Flammensperren in die Zuleitung zum Zylinderkopf eingesetzt. Diese befinden sich zylinderindividuell direkt vor dem Einlass des Zylinders. Die Flammensperren der heutigen Anwendung sind für die Verwendung in Kombination mit Erdgas und Biogas ertüchtigt und geprüft. Bei einer potenziellen Änderung der Gemisch-Zusammensetzung muss die Eignung der Flammensperren entsprechend überprüft werden. Die Einführung von steigenden Wasserstoffanteilen im Erdgasnetz wird in den kommenden Jahren erwartet und stellt eine Herausforderung für neue und bereits im Einsatz befindliche Motoren dar. Die Notwendigkeit der Ertüchtigung der bereits im Feld befindlicher Motoren für die neuen Randbedingungen stellt besondere Anforderungen an die Nachrüstbarkeit der Flammensperren im Feld.

Ziel der Überprüfung ist es, eine Aussage zur Funktion der heute für Erdgas-Motoren in Verwendung befindlichen Flammensperre in Kombination mit steigendem Wasserstoffgehalt im Brennstoff zu treffen. Die Flammensperre ist für Gasgemische der Explosionsgruppe IIA1 gemäß Tabelle 2 der DIN EN ISO 16852:2010 [1] bei einem maximalen Betriebsdruck von $450 \text{ kPa}_{\text{abs}}$ in Anlehnung an diese Norm geprüft worden.

Ein Ziel der weiterführenden Untersuchungen ist es, das Verhalten der verschiedenen Typen von Flammensperren unter den sich ergebenden neuen Randbedingungen zu testen und daraus geeignete Testverfahren abzuleiten, die eine vereinfachte Qualifikation anderer Typen von Flammensperren erlauben.

Neben der Entwicklung eines Testschemas für Qualifizierungstests ist die Ermittlung der Leistungsgrenzen der eingesetzten Flammensperren ein weiterer Zielpunkt. Dabei sollen die Grundlagen für die Beschreibung der Leistungsgrenzen von Flammensperren erweitert und vertieft werden.

1. Aufgabenstellung

2. Versuchsaufbau

Bei der zu betrachtenden Anwendung werden die Flammensperren nicht im Zuge von Rohrleitungen eingesetzt, sondern in einem Verbrennungsmotor. Sie sind vor dem Einlass des jeweiligen Zylinders angeordnet. Da sich diese Anwendung deutlich vom Einsatz im Zuge von Rohrleitungen unterscheidet, wurde der Ansatz gewählt die Untersuchungen im Anwendungsumfeld durchzuführen.

2.1. Versuchsgefäß

Das Versuchsgefäß besteht aus zwei Teilvolumina, die durch eine Flammensperre explosionstechnisch voneinander getrennt sind. Diese Teilvolumina werden durch Teile eines MTU Gasmotors der Baureihe 4000 gebildet. Der Aufbau bildet zum einen die Geometrie eines einzelnen Zylinders nach. Der Brennraum wird durch ein feststehendes Zylindervolumen bei einer Kolbenstellung von 25° vor dem oberen Totpunkt gebildet. Ein einzelnes Einlassventil wird durch eine mechanische Vorrichtung dauerhaft geöffnet. Das zweite Teilvolumen besteht aus einem Abschnitt der Gemischzuleitung. Das Teilvolumen bestehend aus Brennraum und Zylinderkopf bis zur Flammensperre stellt in den Versuchen die ungeschützte Seite dar. Die geschützte Seite wird durch den Abschnitt der Gemischzuleitung gebildet. Abbildung 2.1 zeigt die Position der Flammensperre. Das Teilvolumen des Versuchsgefäßes auf der ungeschützten Seite beträgt $1,81$, auf der geschützten Seite beträgt das Volumen $18,31$. Da die Versuche mit Anfangsdrücken bis $500 \text{ kPa}_{\text{abs}}$ durchgeführt werden, wäre im Falle eines Flammendurchschlages bei diesem Druck mit einem maximalen Explosionsdruck von mehr als $4 \text{ MPa}_{\text{abs}}$ zu rechnen. Für einen solchen Explosionsdruck sind weder die verwendeten Serienbauteile noch das daraus abgeleitete Versuchsgefäß ausgelegt. Um diesen zu erwartenden Belastungen entgegenzuwirken, wurde das Versuchsgefäß auf der geschützten Seite mit der Möglichkeit einer Explosionsdruckentlastung versehen. Die Druckentlastung erfolgt mittels einer Platzmembrane. Diese besteht aus vier Lagen einer für Wasserstoff diffusionsarmen Kunststoffolie. Die Folien sind zwischen zwei Flanschen mit einer freien Öffnung von $\varnothing 100 \text{ mm}$ geklemmt. Der Ansprechdruck dieser Druckentlastung beträgt $\approx 750 \text{ kPa}$.

Zum Spülen des Versuchsgefäßes mit explosionsfähigem Gemisch stehen zwei Anschlüsse zur Verfügung. Die Gemischerzeugung erfolgt außerhalb des Aufbaus in der im Folgenden beschriebenen Anlage.

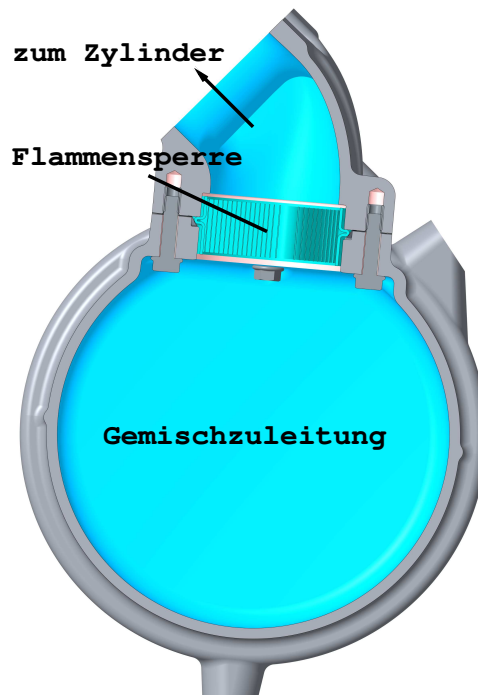


Abbildung 2.1.: Position der Flammensperre (siehe auch Abbildung 2.2)

Abbildung 2.2 zeigt eine Zeichnung des gesamten Aufbaus und Abbildung 2.3 die Realisierung.

2.2. Gemischaufbereitung

Zur Durchführung der Versuche ist es notwendig das Versuchsgefäß homogen mit explosionsfähigem Gemisch der erforderlichen Zusammensetzung und mit dem notwendigen initialen Druck zu füllen. Zur Erreichung einer homogenen Füllung wird das Gefäß mit etwa dem fünf- bis zehnfachen seines Volumens mit Gemisch gespült. Das erforderliche explosionsfähige Gemisch wird mittels Massenstromregler erzeugt. Damit werden die erforderlichen Ströme von trockener Luft und den beiden Brenngasen Methan und Wasserstoff bereitgestellt und im weiteren Verlauf des Systems homogen gemischt. Eingesetzt werden Massenstromregler des Typs EL-Flow Select, Modell F-201CV der Firma Bronkhorst, die bereits werksseitig für verschiedene Gase kalibriert sind. Die Kommunikation zur Einstellung und Ablesung der Massenstromregler erfolgt über einen PC. Das Fließschema der Gemischaufbereitung ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Der Aufbau verfügt über vier Einlässe, die jeweils mit einem Partikelfilter und einem Kugelhahn versehen sind. Nach jedem Massenstromregler folgt ein Rückschlagventil, um Rückströmungen zu verhindern.

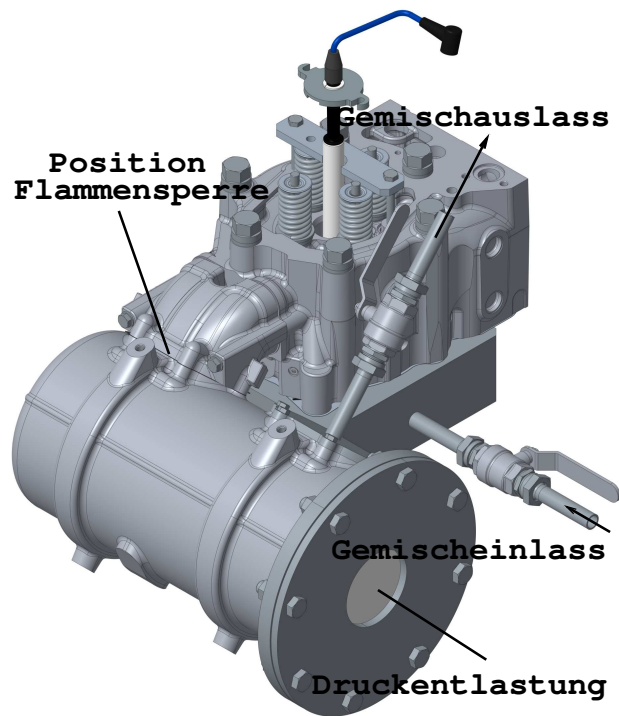


Abbildung 2.2.: Darstellung des Versuchsgefäßes



Abbildung 2.3.: Realisation des Versuchsgefäßes

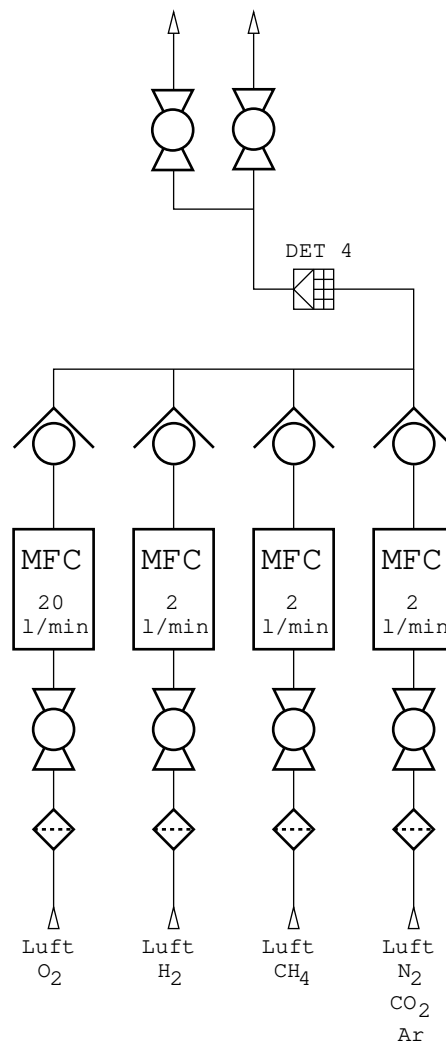


Abbildung 2.4.: Fließschema der Gemischaufbereitung mittels Massenstromreglern

Nach der Zusammenführung der Teilstränge folgt eine Detonationssicherung des Typs 4 (stabile Detonation ohne Querschnittsbeschränkung nach [1]). Es sind zwei, mit je einem Kugelhahn versehene, Gemischauslässe vorhanden.

Die Gemische werden mit den Komponenten Luft, Methan und Wasserstoff erzeugt. Die verwendete Druckluft aus der zentralen Druckluftversorgung der PTB wird der Gemischaufbereitung über einen Membrantrockner zugeführt und hat eine Restfeuchte von $\leq 0,8 \text{ gm}^{-1}$. Methan wurde mit einer Reinheit von 2.5 und Wasserstoff von 5.0 verwendet.

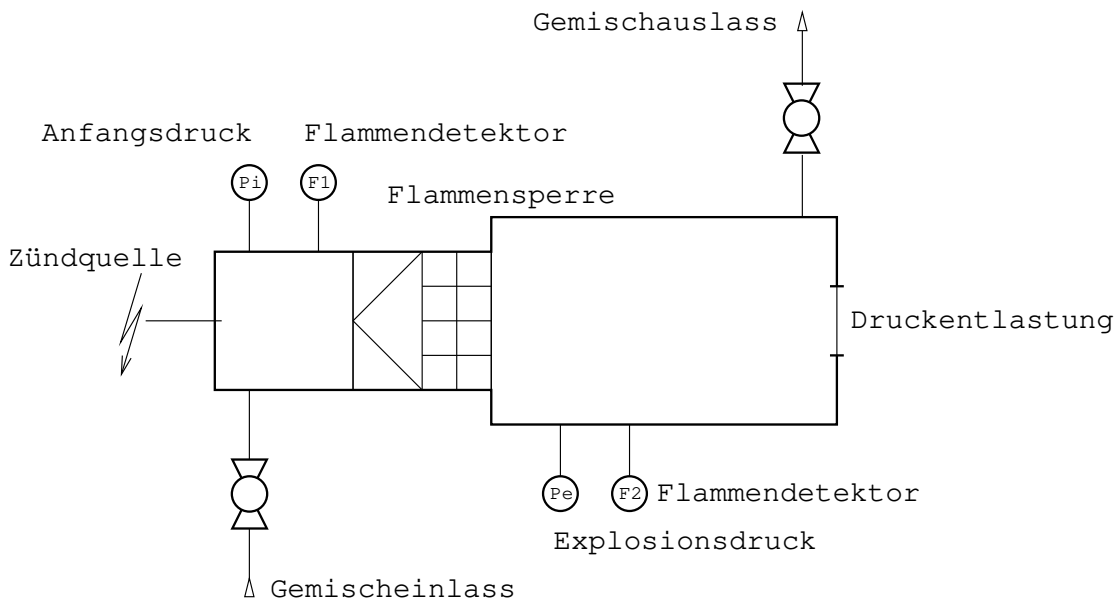


Abbildung 2.5.: Schema des Messaufbaus

2.3. Messtechnik

Für die Bestimmung der Wirksamkeit der Flammensperre ist es notwendig, einen Flammendurchschlag zuverlässig zu detektieren. Genauso ist es aber auch notwendig, zuverlässig zu erkennen, dass das vorgelegte explosionsfähige Gemisch gezündet wurde, wenn es keinen Flammendurchschlag gegeben hat. In Abbildung 2.5 ist der Messaufbau schematisch dargestellt.

Zur Erkennung eines Flammendurchschlages werden zwei Fotodioden eingesetzt, jeweils eine auf der geschützten (F1) und der ungeschützten Seite (F2). Bei erfolgtem Flammendurchschlag wird auch das explosionsfähige Gemisch auf der geschützten Seite entzündet, was zum Bersten der Explosionsdruckentlastung führt. Zusätzlich wird der Explosionsdruck mit einem dynamischen Drucksensor (Pe) des Typs 603CBA0035.0 der Firma Kistler gemessen. Zur Messung des Druckes zum Zeitpunkt der Zündung (Anfangsdruck) wird ein statischer Absolutdrucksensor (Pi) vom Typ PA-25/8735.1-200 der Firma Keller verwendet. Der aktuelle Wert dieses Sensors wird zur Einstellung des Anfangsdruckes zusätzlich angezeigt. Die Drucksensoren wurden als überwachte Messmittel geführt und wiesen daher aktuelle Kalibrierungen auf. Für den dynamischen Drucksensor ist eine Messunsicherheit von maximal ± 350 hPa anzunehmen. Beim statische Drucksensor ist eine Messunsicherheit von maximal ± 400 hPa anzunehmen.

Die Zündung des explosionsfähigen Gemisches auf der ungeschützten Seite erfolgt über die im Zylinderkopf befindliche Zündkerze. Mit einem Hochspannungszündgerät wird ein Zündfunke erzeugt und zugleich ein Triggersignal an die Daten-

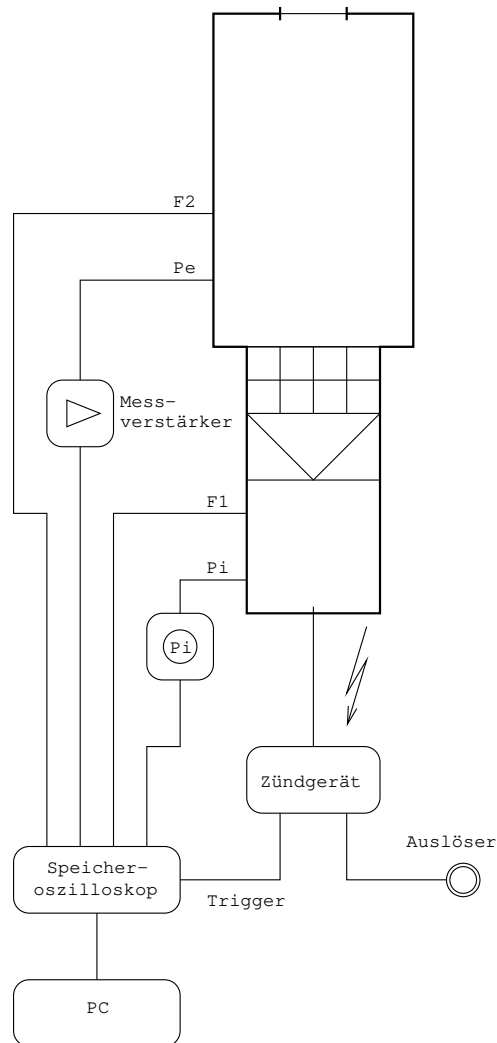


Abbildung 2.6.: Schema der Messwernerfassung

aufzeichnung gegeben. Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgt mit einem digitalen Speicheroszilloskop des Typs Picoscope 5444D. Das Gerät stellt bei einer Aufzeichnungsrate von 1 MSamples/s auf vier Kanälen eine Dynamik von 14 Bit pro Kanal zur Verfügung. Der Start der Aufzeichnung erfolgt über einen speziellen Triggereingang des Speicheroszilloskops. Die Steuerung des Speicheroszilloskop und die Datenaufzeichnung erfolgen über einen Standard-PCs. Die Aufzeichnung der Daten beginnt 100 ms vor dem Triggersignal. Es wird ein Zeitintervall von 1 s aufgezeichnet. Abgespeichert werden die Daten in zwei Klartextformaten, als Text-Datei und als CSV-Datei.

3. Versuchsprogramm

Für die im Folgenden beschriebenen Versuche wurden vier verschiedene Flammensperren, die als Typ I bis IV bezeichnet werden, verwendet. Diese Flammensperren stammen zwar aus unterschiedlichen Fertigungen, werden hier aber nach der Größe der freien Öffnungen unterschieden. Diese Größe wird mittels einer Düsenlehre bestimmt. Da die Art der Herstellung dieser Flammensperren Öffnungen erzeugt, die nicht einfach rund sind, sondern genähert einem Dreieck gleich kommen, wird in diesem Zusammenhang auch von der Dreieckshöhe gesprochen. Zu ihrer Bestimmung werden über die gesamte Fläche stichprobenhaft die Größen verschiedener Öffnungen bestimmt. Da die Düsenlehren nur in Größenintervallen von 0,05 mm zur Verfügung stehen, ergibt sich immer dieses Größenintervall zur Angabe der Dreieckshöhen. Tabelle 3.1 stellt die Werte zusammen, Abbildung 3.1 zeigt die verwendeten Flammensperren.

Tabelle 3.1.: Dreieckshöhen der untersuchten Flammensperren

Flammensperre Typ	Dreieckshöhe d in mm
I	$0,55 > d > 0,50$
II	$0,55 \geq d > 0,50$
III	$0,35 > d > 0,30$
IV	$0,30 > d > 0,25$

3.1. Versuchsdurchführung

Unabhängig von der Zielsetzung einer Versuchsreihe, folgen diese einem einheitlichen Ablauf. Dies gewährleistet zum einen eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche und zum anderen erhöht es die Sicherheit für die Durchführenden. Da Explosionsversuche einer stärkeren statistischen Streuung unterliegen ist es notwendig die Versuche für jede Konfiguration (Flammensperre, Gemischzusammensetzung, Anfangsdruck), bei der es keinen Flammendurchschlag gegeben hat, mehrfach zu wiederholen. Solange es zu keinem Flammendurchschlag kommt, wird der Versuch bis zu dreimal durchgeführt. Für die Bewertung der Flammendurchschlagsicherheit

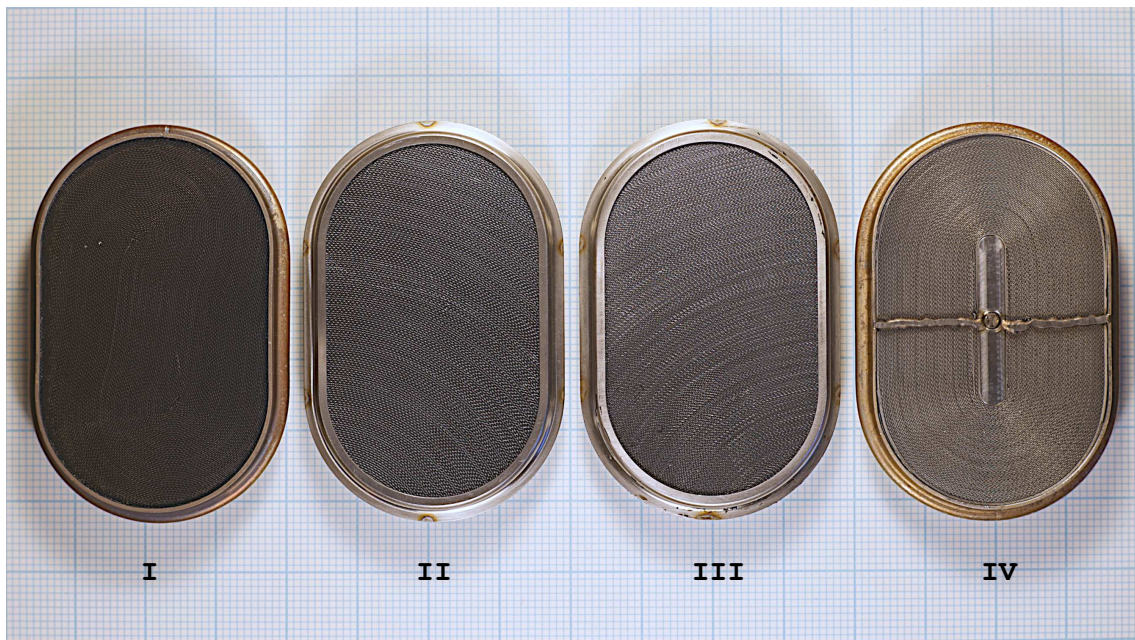


Abbildung 3.1.: Untersuchte Flammensperren

wurde ein konservativer Ansatz gewählt. Kommt es zu einem Flammendurchschlag, ist keine Wiederholung notwendig, die Leistungsfähigkeit der Flammensperre ist erreicht.

Der Ablauf gestaltete sich wie folgt:

1. Auswahl der Flammensperre
2. Voreinstellung des Gemisches
3. Spülen des Versuchsgefäßes mit Gemisch
4. Voreinstellung des Anfangsdrucks
5. Zündung
6. Speichern der Messdaten
7. Spülen des Versuchsgefäßes mit Luft
8. Flammendurchschlag:
 - ja, weiter mit 9.
 - nein, Versuch wiederholen (maximal 2 Wiederholungen, dann Anfangsdruck um 50 kPa erhöhen, weiter mit 4.)

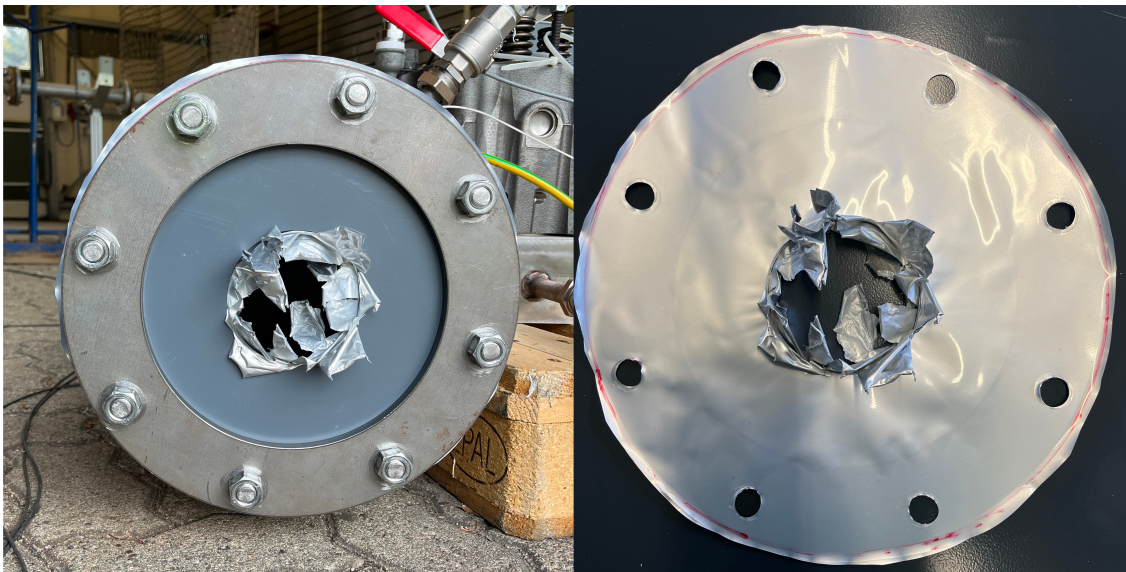


Abbildung 3.2.: Explosionsdruckentlastung nach einem Flammendurchschlag im eingebauten Zustand (links) und nach dem Ausbau (rechts.)

9. neues Gemisch einstellen und weiter mit 3.

Um das Versuchsgefäß homogen mit Gemisch zu füllen, ist es notwendig das Volumen mit dem fünf- bis zehnfachen des Volumens zu spülen. Mit der verwendeten Gemischaufbereitung dauert dies fünfzehn bis zwanzig Minuten. Danach wird der Gemischauslass geschlossen und im Versuchsgefäß der erforderliche Druck aufgebaut. Ist der erforderliche Anfangsdruck erreicht, wird die Gemischzuführung gestoppt und getrennt. Die Messdatenaufzeichnung wird bereit geschaltet und mit der Zündung gestartet.

Die Versuchsreihe für eine gewählte Gemischzusammensetzung ist beendet, wenn es zu einem Flammendurchschlag gekommen ist (siehe Abbildung 3.2) oder der maximale Anfangsdruck von $500 \text{ kPa}_{\text{abs}}$ erreicht wurde.

Das Flussdiagramm in Abbildung 3.3 zeigt den Versuchsablauf. Eine Versuchsreihe beginnt immer mit dem niedrigsten Druck. Die Erfahrung hat gezeigt, dass sich bei erfolgtem Flammendurchschlag die Leistungsgrenze absenkt. Erst eine Regenerationszeit von 12 – 24 h sorgt dafür, dass die Flammensperre ihre ursprüngliche Leistungsgrenze wieder erreicht.

3.2. Qualifizierungsversuche

Die Qualifizierungsversuche haben zum Ziel, den aktuellen Ist-Zustand zu beschreiben. Dazu wird der serienmäßig eingesetzte Typ I der Flammensperren für Gas-Luft-Gemische mit einem Wasserstoffanteil bis zu 20 Vol.-% Wasserstoff im Brenngas

3. Versuchsprogramm

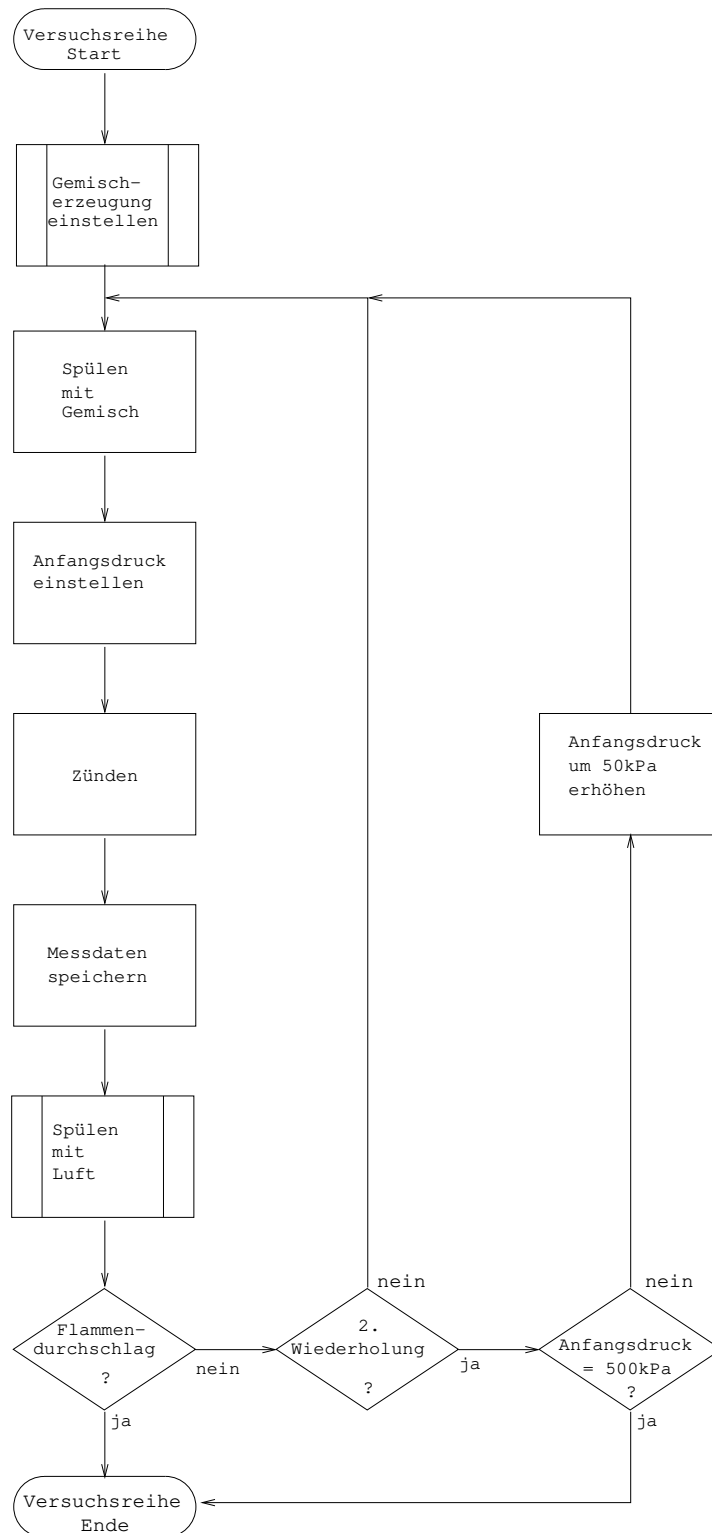


Abbildung 3.3.: Ablauf einer Versuchsreihe

getestet. Dabei wird nicht nur mit stöchiometrischen Gas-Luft-Gemischen mit einem Brenngas-Luft-Verhältnis von $\lambda = 1,0$, sondern auch mit mageren Gemischen bei $\lambda = 1,41$ gearbeitet. Der Wasserstoffgehalt des Brenngases wird in Schritten 5 Vol.-% variiert. Der Anfangsdruck wird in Schritten von 50 kPa erhöht. Diese Reihe beginnt bei 100 kPa_{abs} bzw. dem Umgebungsdruck und wird bei 150 kPa_{abs} fortgesetzt. Der maximale Druck vor der Zündung kann bei diesen Versuchen bis zu 500 kPa_{abs} betragen.

Mit diesen Versuchen galt es den maximalen sicheren Betriebsdruck für das jeweilige Gemisch zu ermitteln. Vergleichende Versuche wurden mit der Flammensperre Typ III gemacht.

3.3. Bestimmung von Leistungsgrenzen

Bei der Bestimmung der Leistungsgrenzen wird ermittelt, bis zu welchem Anfangsdruck mit welchem Gemisch die Flammensperre noch wirksam ist. Dabei werden zur Darstellung der höchsten Belastung ausschließlich stöchiometrische Brenngas-Luft-Gemische, $\lambda = 1,0$, eingesetzt. Der Wasserstoffgehalt wird in Schritten von 5 Vol.-% zwischen 0 Vol.-% und 100 Vol.-% variiert. Auch bei diesen Versuchen wird der Anfangsdruck in Schritten von 50 kPa erhöht, bis der maximale Druck von 500 kPa_{abs} erreicht ist oder die Flammensperre mit dem eingestellten Brenngas-Luft-Gemisch bereits bei Umgebungsdruck durchschlägt. Für eine gegebene Gemischzusammensetzung wird dementsprechend der maximale Druck bestimmt, bei dem es noch nicht zu einem Flammendurchschlag kommt und der kleinste Druck, bei dem ein Flammendurchschlag beobachtet wird. Diese Versuche konzentrierten sich vorwiegend auf die Flammensperren der Typen II und IV.

3. *Versuchsprogramm*

4. Auswertung und Ergebnisse

Die Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen die Art der bei den Versuchen aufgezeichneten Messdaten an zwei ausgewählten Beispielen. In ersten Fall (Abbildung 4.1) war die Flammensperre wirksam, im zweiten Fall (Abbildung 4.2) ist es zu einem Flammendurchschlag gekommen. Dargestellt sind die Signale der Flammendetektion, das Signal des statischen Drucksensors zu Messung des Anfangsdrucks und das Signal des dynamischen Drucksensors zur Messung des Überdruckes während der Explosion. Während der Flammensensor auf der geschützten Seite in Abbildung 4.1 kein Signal zeigt, ist in Abbildung 4.2 eindeutig eine Flamme detektiert. Darüber hinaus zeigt der Sensor für den Explosionsüberdruck im Falle des Flammendurchschlags ein deutliches Drucksignal, welches bis zur Öffnung der Druckentlastung deutlich ansteigt und dann schnell abfällt. Auf zwei Auffälligkeiten in den Signalen sei noch hingewiesen. Bei 0 ms ist in allen Signalen eine mehr oder weniger ausgeprägte Spitze zu sehen. Dies ist ein durch den Zündfunken verursachtes Störsignal. Die zweite Auffälligkeit ist im Signalverlauf des Anfangsdruck zu finden. Nach der Zündung, während der Phase des Druckanstieges, zeigt der statische Drucksensor ein starkes, gesättigtes Signal. Dieser Impuls ist eine Eigenschaft des Drucksensors und wird durch den schnellen Druckanstieg verursacht. Es ist quasi die Reaktion des Sensors auf das Eingangssignal. Dieser Impuls ist nicht bei allen Messungen zu beobachten.

Die Auswertung der Messungen erfolgt unter verschiedenen Gesichtspunkten, fokussiert sich aber auf die Beschreibung der Leistungsgrenze. Aus anderen Messungen ist bekannt, dass die Grenzspaltweite des verwendeten Gemisches beim verwendeten Anfangsdruck eine geeignete Größe ist (siehe S. Henkel et.al [7]; F. Stolpe, S. Bendada [8]) diese Leistungsgrenze zu beschreiben. Die Grenzspaltweite leitet sich aus der Normspaltweite ab.

4.0.1. Exkurs flammendurchschlagsichere Spaltweite

Die flammendurchschlagsichere Spaltweite (Normspaltweite NSW; maximum experimental safe gap MESG) ist der nach einem genormten Verfahren unter Normalbedingungen bestimmte Abstand eines Ringspaltes definierter Länge (25 mm), der bei jeder Konzentration des explosionsfähigen Brennstoff/Luft-Gemisches den Flammendurchtritt gerade noch verhindert. Die so bestimmte flammendurchschlagsichere Spaltweite ist in hohem Maße abhängig vom Aufbau der Apparatur. Eigenschaften wie ein konzentrischer Aufbau von Innen- und Außenvolumen, ein zirkularer Spalt und die Spaltlänge bestimmen den Messwert. Selbst bei identischen Abmessungen

4. Auswertung und Ergebnisse

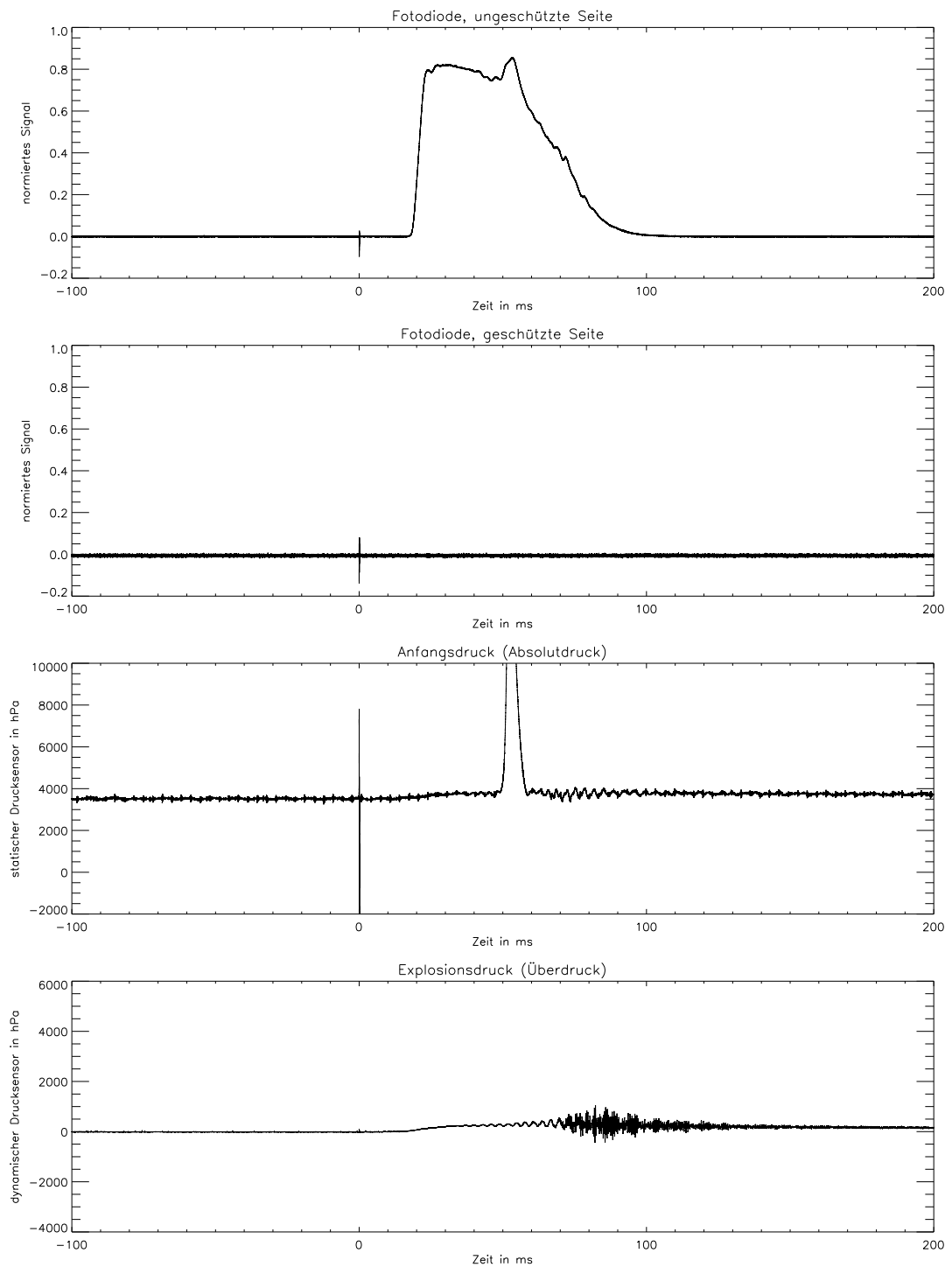


Abbildung 4.1.: Messung ohne Flammendurchschlag. Von Oben: Flammendetektion auf der ungeschützten Seite, Flammendetektion auf der geschützten Seite, Anfangsdruck (Absolutdruck), Explosionsdruck (Überdruck).

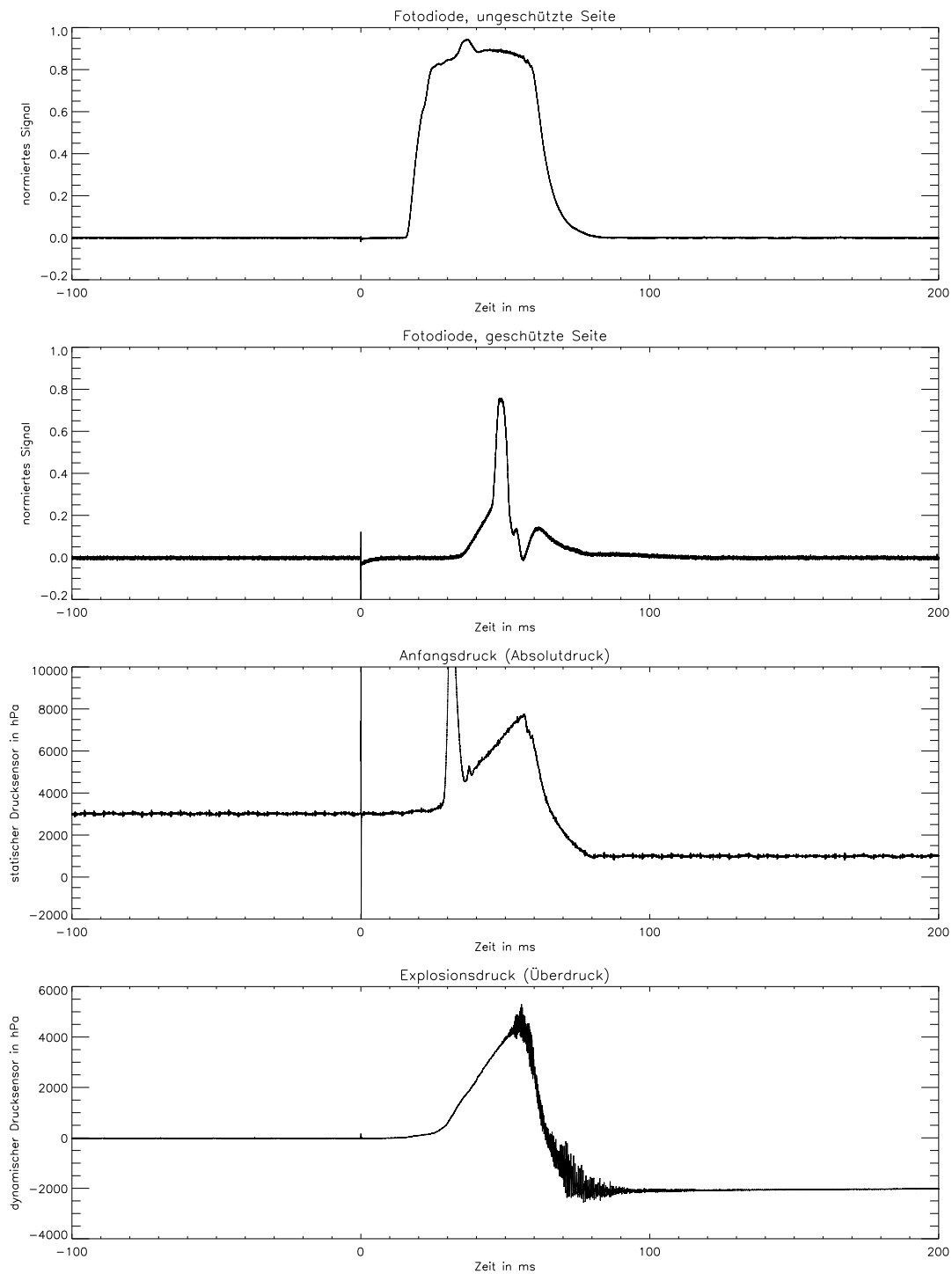


Abbildung 4.2.: Daten eines Flammendurchschlages. Von Oben: Flammendetektion auf der ungeschützten Seite, Flammendetektion auf der geschützten Seite, Anfangsdruck (Absolutdruck), Explosionsdruck (Überdruck).

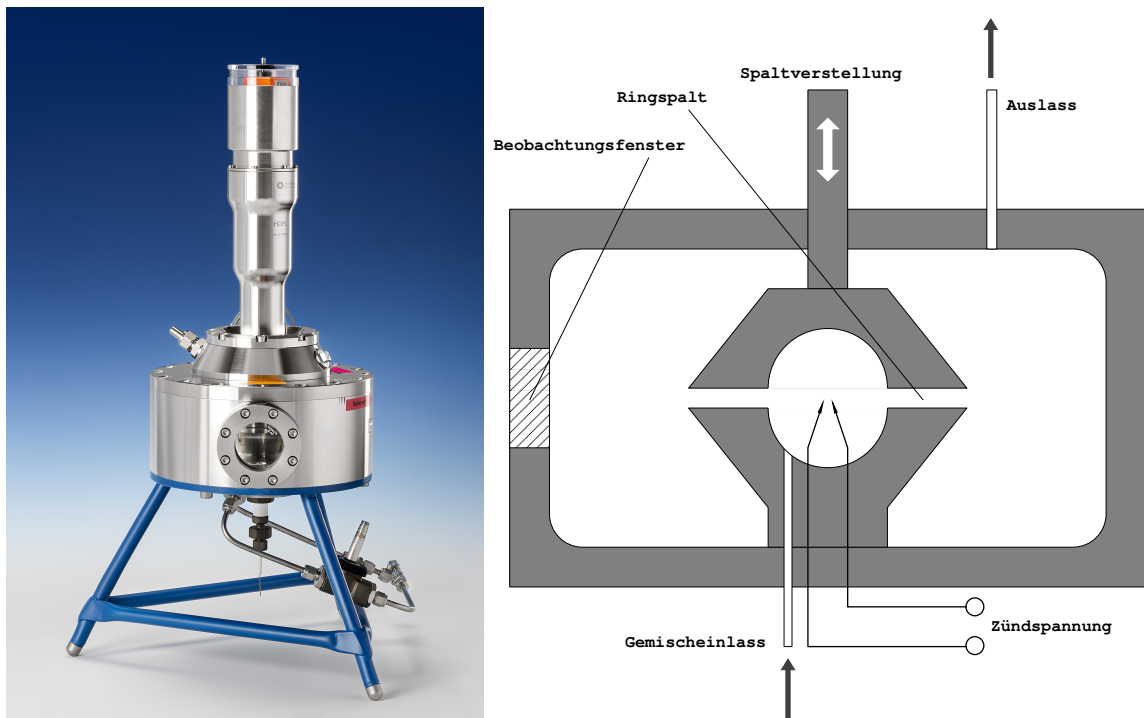


Abbildung 4.3.: Aufbau des Normspaltweitengeräts

machen sich die Oberflächenqualität des Spaltes und die Verrundungsradien der Spaltkanten bemerkbar.

Apparatur und Verfahren zur Bestimmung der Normspaltweite werden in der DIN EN ISO/IEC 80079-20-1 beschrieben[3]. Die Normspaltweite wird in mm angegeben.

Neben den apparativen Abhängigkeiten, zeigt die Normspaltweite verschiedene Abhängigkeiten bei nicht-atmosphärischen Bedingungen. Es sind Abhängigkeiten von Druck, Temperatur, Sauerstoffgehalt und Oxidationsmittel bekannt (W.Hirsch und E.Brandes [4]). Im Folgenden ist die Druckabhängigkeit von besonderer Relevanz. Spaltweiten, die nicht unter Normbedingungen bestimmt werden, werden oft als Grenzspaltweiten bezeichnet. Die Grenzspaltweite reagiert empfindlich auf den Druck. Für die bekannten Grenzspaltweiten (GSW), die bei abweichendem Druck bestimmt wurden, ist ein umgekehrt proportionales Verhalten zum Druck zu finden:

$$GSW(p) = GSW(p_0) \cdot p^n \quad (4.1)$$

n liegt im Bereich zwischen $-0,9$ und $-1,1$ bei Temperaturen zwischen 20°C und 120°C . Für die bekannten, untersuchten Stoffe wird bei W.Hirsch und E.Brandes [4] ein Mittelwert von $n = -0,97$ angegeben.

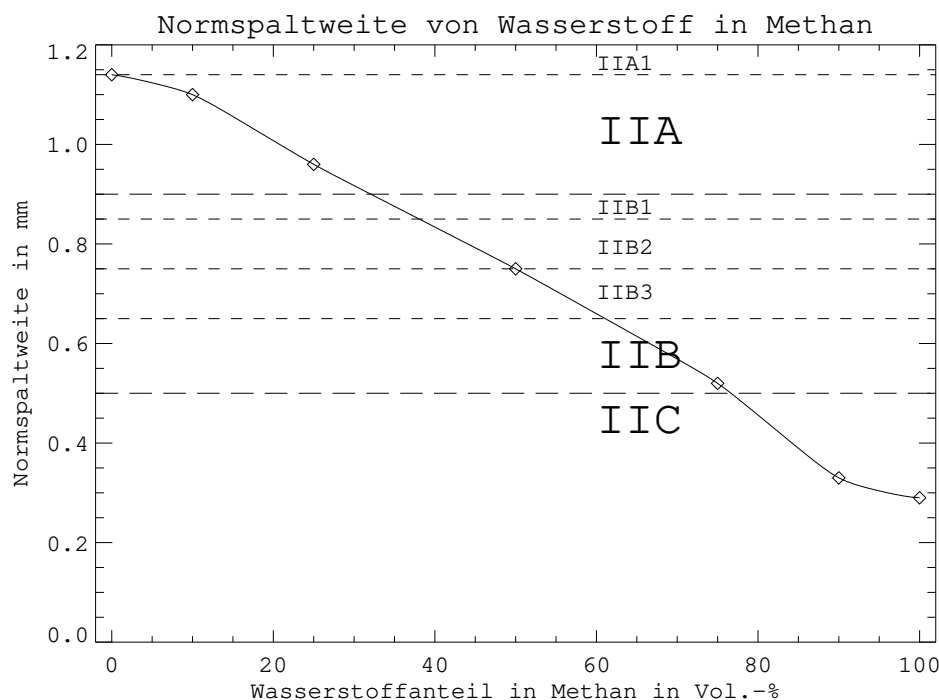


Abbildung 4.4.: Gemessene Normspaltweiten von Wasserstoff in Methan. Die Grenzen der Explosionsgruppen nach EN ISO 16852 [1] sind markiert.

Bei einem Brennstoffgemisch kann die resultierende Normspaltweite nicht einfach aus der Gemischzusammensetzung bestimmt werden. Hier ist eine Messung der jeweiligen Normspaltweite notwendig. Für Gemische aus Methan und Wasserstoff wurden an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Messungen durchgeführt und in chemsafe [2] eingepflegt. Diese Messungen wurden von V. Schröder et.al. [5] an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung mit repräsentativen Erdgasgemischen verglichen. Abbildung 4.4 zeigt den Verlauf der Normspaltweite von Wasserstoff in Methan. Der Verlauf zwischen den Messpunkten wurde durch eine Spline-Interpolation angepasst.

Abbildung 4.5 zeigt den Verlauf der Grenzspaltweite für verschiedene Methan-Wasserstoff-Gemische mit steigendem Druck. Messdaten für die Druckabhängigkeit der Grenzspaltweite sind nur bis zu einem Druck von $300 \text{ kPa}_{\text{abs}}$, bedingt durch die Eigenschaften der verwendeten Messapparatur, gemessen worden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Beschreibung der Druckabhängigkeit nach Gleichung 4.1 auch noch bis zu $500 \text{ kPa}_{\text{abs}}$ ohne größere Abweichungen anwendbar ist.

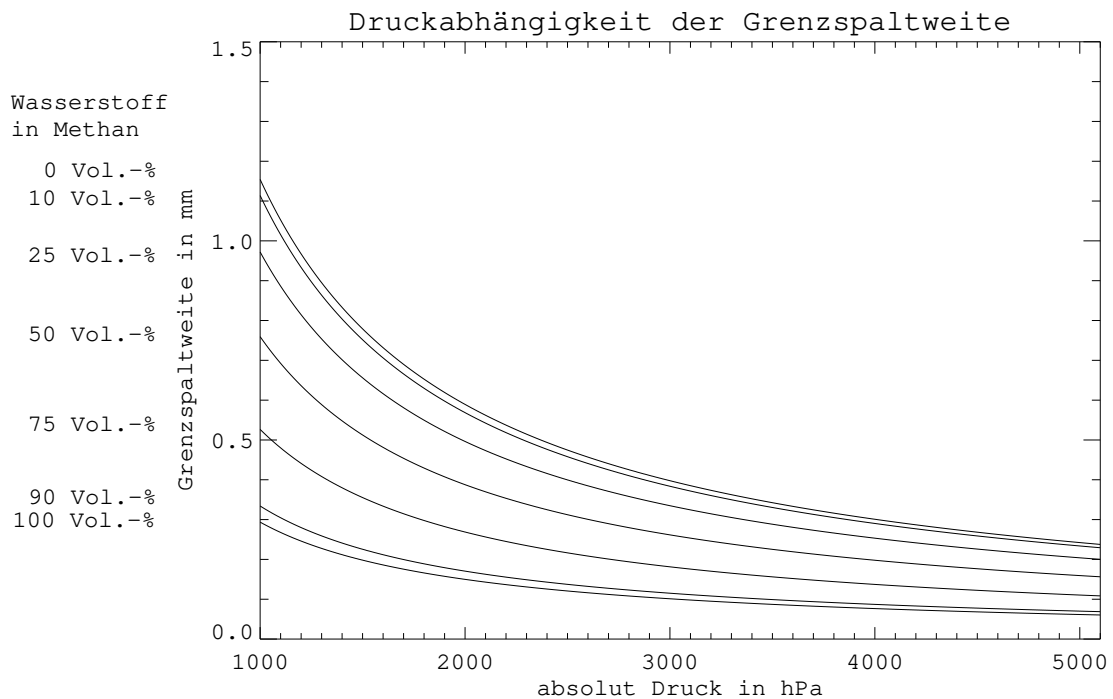


Abbildung 4.5.: Druckabhängigkeit der Grenzspaltweite verschiedener Methan-Wasserstoff-Gemische.

4.1. Qualifizierungsversuche

Die im Folgenden beschriebenen Versuche dienten, wie bereits beschrieben, der Qualifizierung der Flammensperren der Typen I und III für den Betrieb mit wasserstoffhaltigem Erdgas bzw. Biogas. Tabelle 4.1 gibt eine Übersicht zu den durchgeführten Versuchen.

Zur Festlegung des maximalen Betriebsdrucks für einen sicheren Betrieb ist zunächst die Leistungsgrenze der eingesetzten Flammensperre zu bestimmen. Für die in Tabelle 4.1 angegebenen Konzentrationen von Wasserstoff in Methan wird der Druck bestimmt, bei dem es zu einem Flammendurchschlag kommt. Für die Typ I Flammensperre wurden sowohl stöchiometrische Gemische ($\lambda = 1,0$) wie auch magere Gemische ($\lambda = 1,41$) eingesetzt. Da die höchste Belastung bei stöchiometrischen Gemischen auftritt, wurde für die Flammensperre des Typs III auf den Einsatz magerer Gemische verzichtet. Die Tabelle 4.2 stellt die ermittelten Daten für den Typ I zusammen. Die Flammensperre des Typs III wurde bis zu einem Wasserstoffgehalt von 40 Vol.-% und einem initialen Druck von 500 kPa_{abs} beaufschlagt. Dabei wurde in allen Fällen der festgelegte Maximaldruck erreicht (siehe Tabelle 4.3).

Der als sicher anzunehmende Betriebsdruck leitet sich als der Druck ab, bei dem es bei dreimaligem Versuch noch zu keinem Flammendurchschlag gekommen ist. Bei

Tabelle 4.1.: Übersicht der Qualifizierungsversuche

Flammensperre Typ	Luftzahl λ	H ₂ in CH ₄ in Vol.-%
I	1,0	5, 10, 15, 20
	1,41	10, 15, 20
III	1,0	10, 20, 30, 40

Tabelle 4.2.: Gemessene Leistungsgrenzen des Typs I

H ₂ in CH ₄ in Vol.-%	$\lambda = 1,0$		$\lambda = 1,41$	
	P _{abs} gehalten in hPa	P _{abs} versagt in hPa	P _{abs} gehalten in hPa	P _{abs} versagt in hPa
5	4518	4485	–	–
10	4029	4038	5283	–
15	3565	4043	4030	4019
20	3540	3550	4516	4050

der nächsthöheren Druckeinstellung kommt es zu einem Flammendurchschlag. Hier wird zur Vereinfachung auf den nächsten vollen Wert abgerundet. Die Tabelle 4.4 stellt diese Werte für den Typ I zusammen. Für den Typ III sind als Werte für den sicheren Betrieb ein Wasserstoffgehalt von 40 Vol.-% bei einem Absolutdruck von 500 kPa_{abs} anzunehmen.

Für ein Methan-Wasserstoff-Gemisch mit einem Wasserstoffgehalt von 40 Vol.-% ist bei einem Absolutdruck von 5021 hPa_{abs} bei Zugrundelegung der Daten aus chemsafe [2] und der verallgemeinerten Druckabhängigkeit der Grenzspaltweite nach W. Hirsch und E. Brandes [4] ein Wert von 0,177 mm anzunehmen.

4.2. Bestimmung von Leistungsgrenzen

Das durchgeführte Testschema ermittelt den maximalen Druck bei dem es nicht zum Flammendurchschlag gekommen ist und den minimalen Druck bei dem es zum Flammendurchschlag gekommen ist. Für die verwendete Gemischzusammensetzung (Wasserstoff in Methan) lässt sich aus den in chemsafe [2] hinterlegten Daten zur Normspaltweite, die Grenzspaltweite für die beiden ermittelten Drücke berechnen (siehe 4.0.1). Die Differenz zweier benachbarten Anfangsdrücke beträgt dem Testschema folgend 50 kPa. Die exakte Leistungsgrenze ist in diesem Intervall zu

Tabelle 4.3.: Gemessene Leistungsgrenzen des Typ III

H ₂ in CH ₄ in Vol.-%	$\lambda = 1,0$ P _{abs} gehalten in hPa
10	5087
20	5039
30	5065
40	5021

Tabelle 4.4.: Als sicher anzunehmende Leistungsgrenzen des Typ I

H ₂ in CH ₄ in Vol.-%	P _{abs-sicher} bei $\lambda = 1,0$ in hPa	P _{abs-sicher} bei $\lambda = 1,41$ in hPa
5	4000	5000
10	3500	4500
15	3000	3500
20	3000	3500

finden, wurde aber nicht präziser bestimmt.

Für die Flammensperre des Typ II wurden entsprechende Versuche mit Wasserstoffanteilen von 5 Vol.-% bis 35 Vol.-% durchgeführt. Tabelle 4.5 fasst die ermittelten Daten zusammen. Die Abbildungen 4.6 stellt diese Daten grafisch dar. An die aufgetragenen Messpunkte wurden jeweils eine Regressionsgerade angepasst. Die linearen Korrelationskoeffizienten nach Pearson r_{xy} betragen $r_{xy} = -0,91$ für die Messpunkte denen ein Flammendurchschlag zugrunde liegt und $r_{xy} = -0,92$ für jene Messpunkte bei denen die Flammensperre einen Flammendurchschlag noch verhindert hat.

Dabei stellt sich die Leistungsgrenze als der maximale Druck bei einem gegebenen Gemisch dar, bei dem es nicht zu einem Flammendurchschlag kommt. Damit wird die Leistungsgrenze in Abhängigkeit von zwei Parametern beschrieben, der Gemischzusammensetzung und dem Druck zum Zeitpunkt der Zündung.

Die Leistungsgrenze lässt sich in diesem Kontext auch in Bezug zur Grenzspaltweite des Gemisches bei gegebenem Druck setzen, siehe Abbildung 4.7. Damit wird die Leistungsgrenze als solche unabhängig von Druck und Gemischzusammensetzung darstellbar. Die Tabelle 4.5 stellt auch diese Werte zusammen. Die Grenzspaltweite beträgt im Mittel $0,344 \pm 0,042$ mm für den höchsten gehaltenen Druck und

Tabelle 4.5.: Leistungsgrenzen des Typs II mit Grenzspaltweiten

H ₂ in CH ₄ in Vol.-%	$\lambda = 1,0$			
	P _{abs} in hPa	gehalten Grenzspaltweite in mm	durchgeschlagen P _{abs} in hPa	Grenzspaltweite in mm
5	4051	0,297	4520	0,267
10	4013	0,295	4509	0,263
15	3073	0,375	3523	0,328
20	3554	0,314	4023	0,278
25	3023	0,350	3540	0,300
30	2520	0,397	3089	0,326
35	2526	0,379	3008	0,320

0,298 ± 0,028 mm für den kleinsten nicht gehaltenen Druck über alle getesteten Gemischzusammensetzungen. Damit ist die für diese Messungen ermittelte Streuung der Messwerte in Gestalt der Standardabweichung größer als die methodischen Messunsicherheit für die Bestimmung der Normspaltweite von ±0,02 mm.

Die linearen Korrelationskoeffizienten r_{xy} nach Pearson sind für die Messungen bei denen die Flammensperre gehalten hat $r_{xy} = -0,96$ und für die Messungen mit Flammendurchschlag $r_{xy} = -0,93$. Die negativen Vorzeichen zeigen die fallenden Geraden auf. Eine lineare Regression liefert für die Gerade der gehaltenen Messungen eine Steigung von $-0,000063 \text{ mm} \cdot \text{hPa}^{-1}$ und die an die Messungen mit Flammendurchschlag angepasste Gerade eine Steigung von $-0,000042 \text{ mm} \cdot \text{hPa}^{-1}$. Damit deutet sich eine schwache Abhängigkeit der Druckabhängigkeit der Grenzspaltweite der Flammensperre vom Wasserstoffgehalt des verwendeten Brennstoffgemisches an.

Bei der Typ IV Flammensperre wurden im Intervall von 65 Vol.-% bis 100 Vol.-% Wasserstoffanteil Flammendurchschläge beobachtet. Tabelle 4.6 stellt die dabei ermittelten Werte zur Leistungsgrenze zusammen, Abbildung 4.8 zeigt eine grafische Darstellung dieser Werte. Die eingezeichneten Geraden sind einfache Regressionsgeraden. Die linearen Korrelationskoeffizienten r_{xy} nach Pearson sind für die Messungen bei denen die Flammensperre gehalten hat $r_{xy} = -0,99$ und für die Messungen mit Flammendurchschlag $r_{xy} = -0,99$.

Abbildung 4.9 zeigt die ermittelten Leistungsgrenzen dargestellt als Grenzspaltweiten. Die eingetragenen Werte für „maximal gehalten“ und „minimal durchgeschlagen“ liegen auf einer nahezu horizontalen Geraden. Die Tabelle 4.6 fasst dies zusammen. Im Mittel beträgt die Grenzspaltweite $0,166 \pm 0,022 \text{ mm}$ für den höchst-

4. Auswertung und Ergebnisse

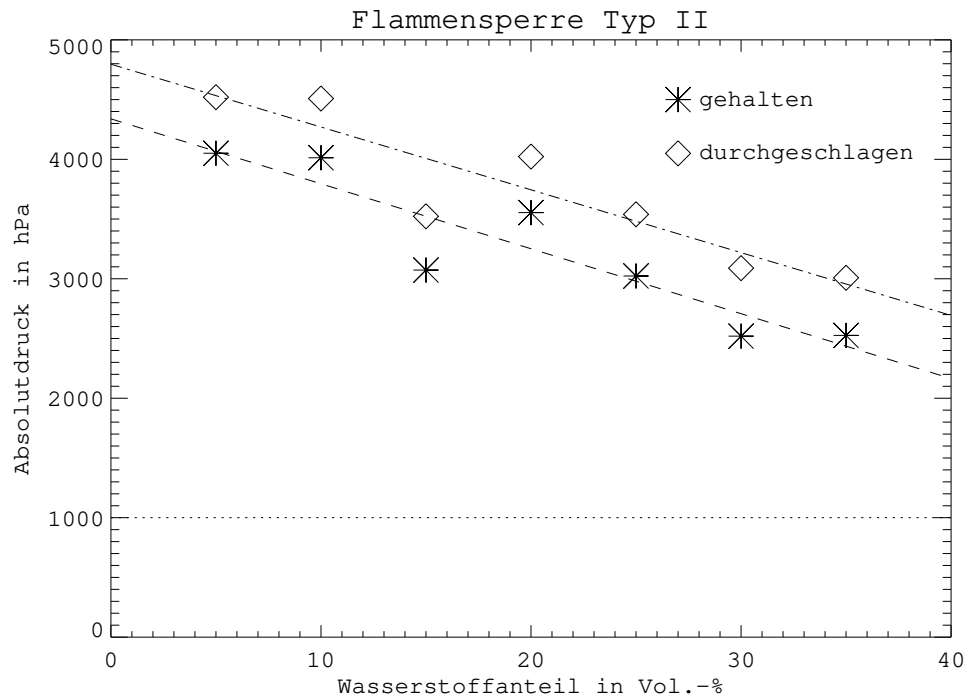


Abbildung 4.6.: Auftragung des Drucks als Leistungsgrenze gegen den Wasserstoffanteil.

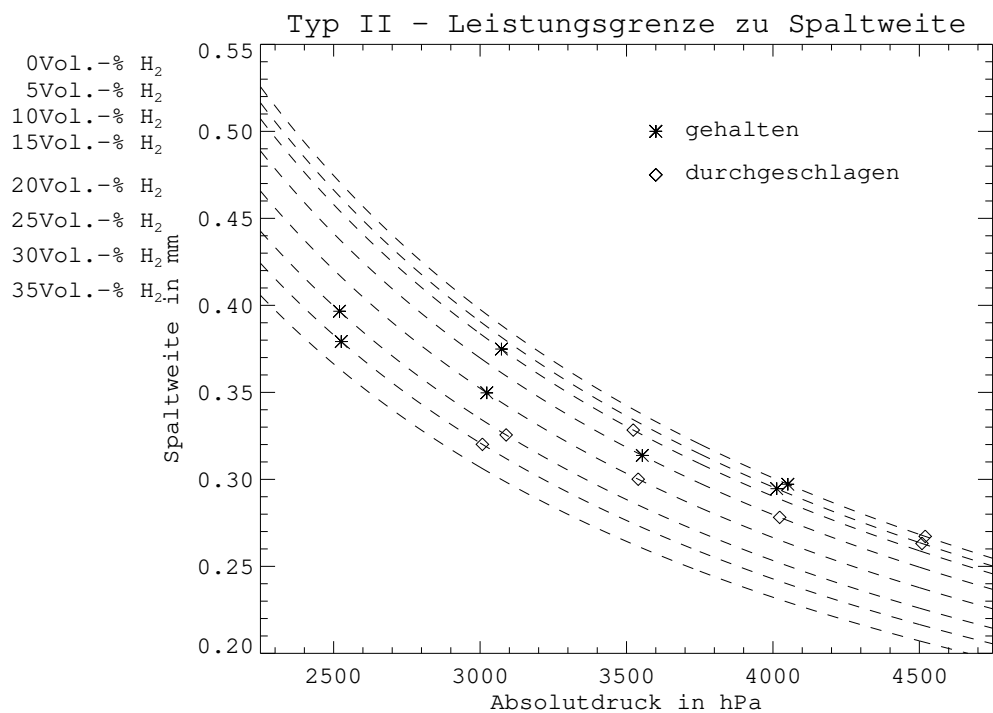


Abbildung 4.7.: Auftragung der Grenzspaltweite als Leistungsgrenze gegen den Druck. Zu den Kurven ist auf der linken Seite der Wasserstoffgehalt im Methan angegeben.

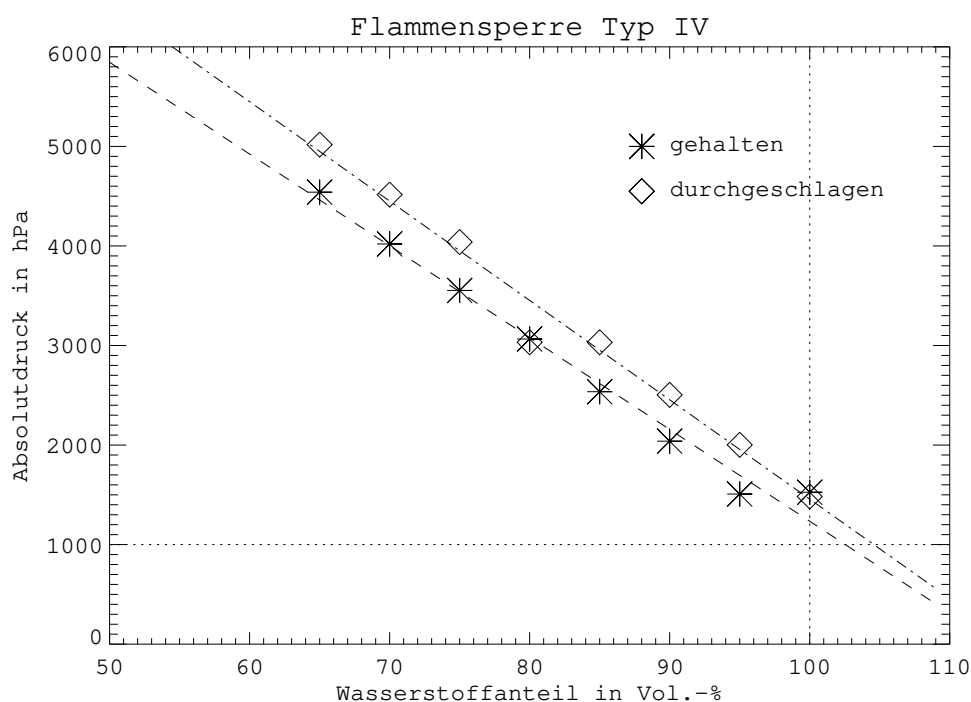


Abbildung 4.8.: Auftragung des Drucks als Leistungsgrenze gegen den Wasserstoffanteil.

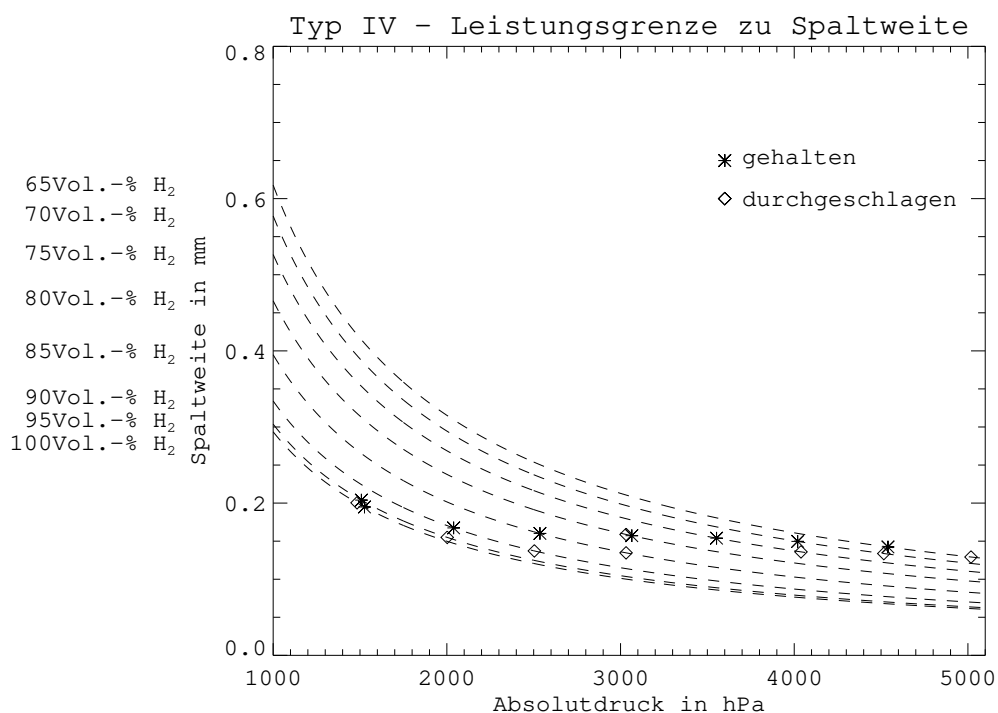


Abbildung 4.9.: Auftragung der Grenzspaltweite als Leistungsgrenze gegen den Druck. Zu den Kurven ist auf der linken Seite der Wasserstoffgehalt im Methan angegeben.

Tabelle 4.6.: Leistungsgrenzen des Typs IV mit Grenzspaltweiten

H ₂ in CH ₄ in Vol.-%	$\lambda = 1,0$			
	P _{abs} in hPa	gehalten	durchgeschlagen	
		Grenzspaltweite in mm	P _{abs} in hPa	Grenzspaltweite in mm
65	4540	0,142	5018	0,129
70	4020	0,150	4516	0,134
75	3553	0,154	4039	0,136
80	3065	0,157	3032	0,159
85	2536	0,160	3032	0,135
90	2039	0,167	2504	0,137
95	1508	0,204	2002	0,155
100	1526	0,195	1483	0,200

ten gehaltenen Druck und $0,148 \pm 0,024$ mm für den kleinsten nicht gehaltenen Druck über alle getesteten Gemischzusammensetzungen. Damit liegt die für diese Messungen ermittelte Streuung der Messwerte in Gestalt der Standardabweichung im Bereich der methodischen Messunsicherheit für die Bestimmung der Normspaltweite von $\pm 0,02$ mm.

Die linearen Korrelationskoeffizienten r_{xy} nach Pearson sind für die Messungen bei denen die Flammensperre gehalten hat $r_{xy} = -0,90$ und für die Messungen mit Flammendurchschlag $r_{xy} = -0,75$. Die negativen Vorzeichen zeigen die fallende Geraden auf. Eine lineare Regression liefert für die Gerade der gehaltenen Messungen eine Steigung von $-0,000017 \text{ mm} \cdot \text{hPa}^{-1}$ und die an die Messungen mit Flammendurchschlag angepasste Gerade eine Steigung von $-0,000014 \text{ mm} \cdot \text{hPa}^{-1}$. Damit deutet sich auch hier eine mögliche schwache Abhängigkeit der Druckabhängigkeit der Grenzspaltweite der Flammensperre vom Wasserstoffgehalt des verwendeten Brennstoffgemisches an. Diese liegt hier jedoch noch innerhalb der methodischen Messunsicherheit der Normspaltweite. Ferner gilt es zu beachten, dass der Exponent n in Gleichung 4.1 zur Beschreibung der Druckabhängigkeit der Spaltweite, für die verwendeten Gemische im einzelnen nicht näher bekannt ist und ein geeigneter Mittelwert angenommen wird.

4.3. Besondere Probleme und Beobachtungen

Während der Versuche konnte verschiedene Effekte und Begleiterscheinungen beobachtet werden, die aber keinen unmittelbaren Einfluss auf die Versuchsergebnisse hatten. Drei dieser Beobachtungen sollen hier kurz vorgestellt werden.

Reine Methan-Luft-Gemische ließen sich bereits bei leicht erhöhtem Druck oft nur mit mehreren Versuchen zünden. Zwar sinkt die Mindestzündenergie mit steigendem Druck exponentiell, allerdings sinkt auch die Funkenschlagweite elektrischer Funken mit zunehmendem Druck. Da die Zündenergie des verwendeten Zündgerätes relativ klein, aber für Zündungen unter Normaldruck ausreichend ist, sind mit zunehmendem Druck häufiger nicht erfolgte Zündungen zu beobachten. Sobald dem Gemisch Wasserstoff zugesetzt wird, erfolgt die Zündung wieder erheblich zuverlässiger. Bereits ein Wasserstoffanteil von 5 Vol.-% zeigt ein nahezu unproblematisches Zündverhalten, auch bei erhöhtem Druck.

Ein weiteres Phänomen, das mehrfach beobachtet werden konnte, war das Bersten der Druckentlastung während des Druckaufbaus oder noch vor der Zündung. Dies ist auf ein Ermüden der Folie durch Mehrfachbelastung zurückzuführen. Dieses Verhalten war insbesondere bei erhöhten Umgebungstemperaturen im Sommer ($> 30^{\circ}\text{C}$) zu beobachten. Begünstigt wurde dies auch durch Materialfehler (Vorschädigung) in der Folie in Bereichen mit hoher Belastung. Abbildung 4.10 zeigt zwei Beispiele geschädigter Membranen, die noch vor dem Bersten ersetzt wurden.

Bei einigen Versuchen ohne Flammendurchschlag, zumeist bei hohem Druck und höherem Wasserstoffgehalt, konnte ein akustischer Effekt beobachtet werden, der einem kurzen Heulton gleich kommt. In den aufgezeichneten Messdaten lassen sich allerdings keine eindeutigen Signaturen finden, die mit diesem Effekt in Verbindung gebracht werden können. In den meisten Fällen ist das Signal der Flamme auf der ungeschützten Seite zeitlich länger andauernd und das dynamische Drucksignal zeigt eine ausgeprägtere Schwingungsphase. Es ist zu vermuten, dass die Druckentlastungsmembran dieses Phänomen verstärkt oder gar erst ermöglicht. Abbildung 4.11 zeigt die Aufzeichnung einer solchen Messung. Trotz gleicher Anfangsbedingungen (Anfangsdruck vor der Zündung, Wasserstoffgehalt im Brenngas, gleiche Flammensperre) ist dieser Effekt bisher nicht gezielt reproduzierbar, sollte aber nicht unerwähnt bleiben.

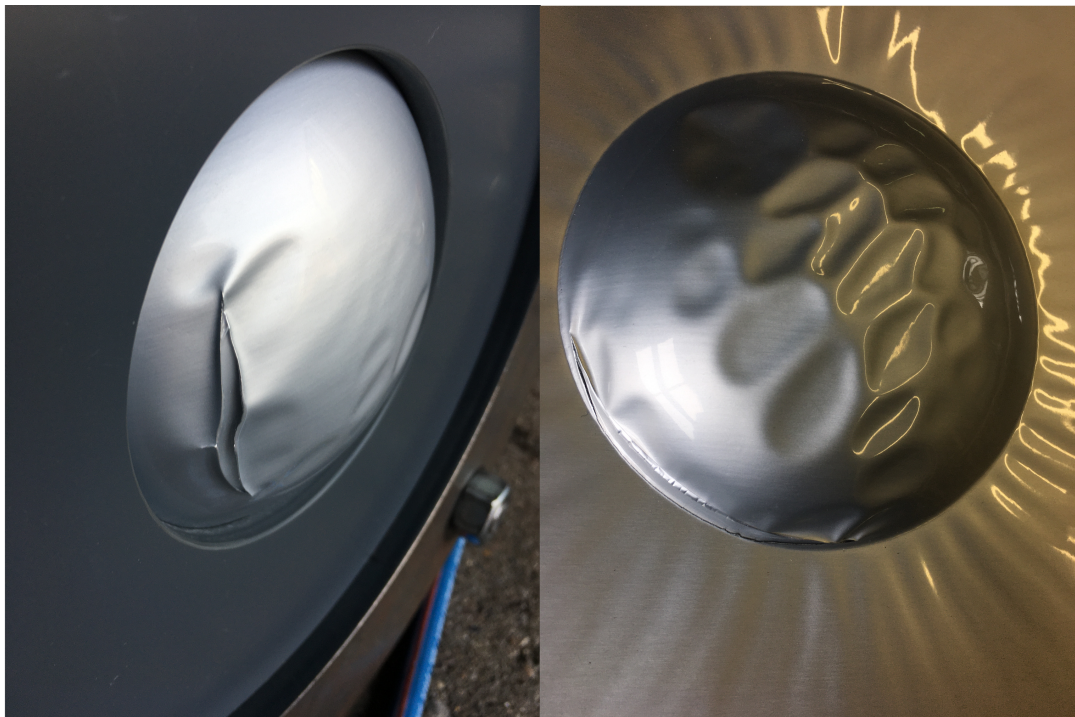


Abbildung 4.10.: Zwei Beispiele für vorgeschädigte Membranen nach wiederholten Belastungen.

4.3. Besondere Probleme und Beobachtungen

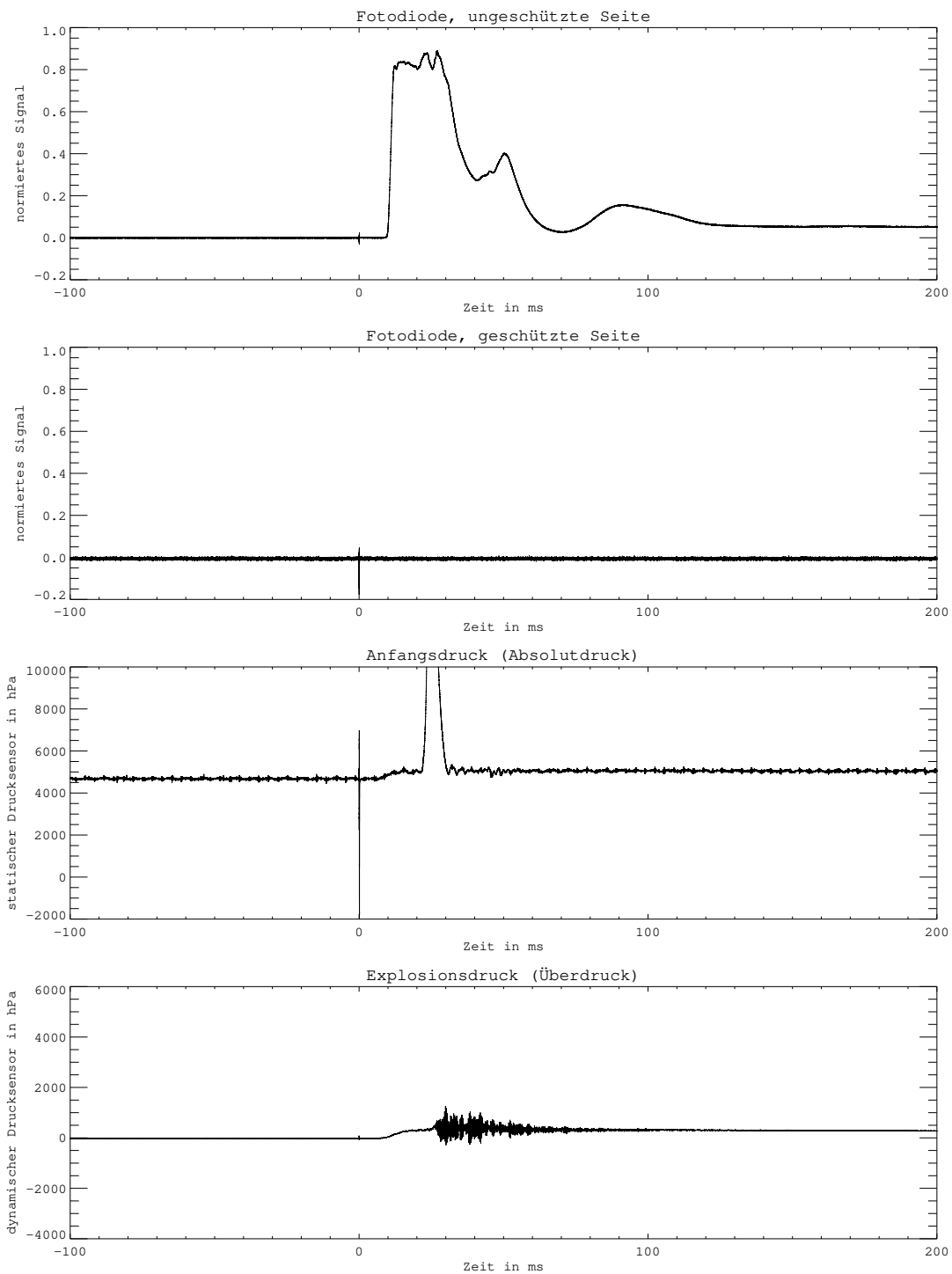


Abbildung 4.11.: Messung ohne Flammendurchschlag bei der ein Heulton auftrat. Der Anfangsdruck vor der Zündung betrug 452,7 kPa bei einem Wasserstoffgehalt von 65 Vol.-% im Brenngas (vergl. Abb.4.1).

5. Schlussfolgerungen

Aus den 298 durchgeführten Versuchen lassen sich eine Reihe von Schlussfolgerungen ziehen. Auch hier ist es sinnvoll zwischen den Qualifizierungsversuchen und der Bestimmung der Leistungsgrenzen zu differenzieren.

5.1. Qualifizierungsversuche

Die durchgeführten Qualifizierungsversuche hatten zum Ziel, die Betriebsgrenzen für die beiden Flammensperren der Typen I und III zu ermitteln und so die Beschreibung eines sicheren Betriebs zu ermöglichen. Für das vorgesehene Intervall an Brenngasgemischen mit Wasserstoff in Methan konnten die maximalen Betriebsdrücke bestimmt werden, bei denen es zu keinem Flammendurchschlag gekommen ist. In Abbildung 5.1 dies für die Flammensperre des Typs I dargestellt. Gegeneinander aufgetragen sind hier der Wasserstoffanteil in Methan des Brenngases und der Absolutdruck vor der Zündung (Anfangsdruck). Jedes der farbigen Felder markiert einen Messpunkt (Wasserstoffanteil, Anfangsdruck). Die Farbe des Feldes repräsentiert das Messergebnis. Ein rotes Feld steht für „unsicher“ bzw. einen Flammendurchschlag, ein grünes Feld steht für „sicher“ bzw. drei Versuche gehalten. Gelb sind jene Felder markiert, bei denen es im Bereich dieses Messpunktes sowohl einen Flammendurchschlag als auch gehaltene Versuche gab. Mit einem * sind jene Felder gekennzeichnet, die durchgeführte Messpunkte markieren.

Da der Anfangsdruck in Schritten von 50 kPa variiert wurde, ist auch für die sichere Seite eine entsprechende Staffelung anzunehmen, die auch einen als ausreichend anzunehmenden Sicherheitsabstand einschließt. In Tabelle 4.4 ist dies bereits zusammengefasst.

Für die Gestaltung eines Qualifizierungstests erscheint folgendes Vorgehen als sinnvoll:

1. Die Leistungsgrenze wird als maximaler, sicherer Betriebsdruck für mindestens eine repräsentative Gemischeinstellung ermittelt.
2. Für diese Bedingungen wird die Grenzspaltweite ermittelt, entweder durch Berechnung aus bekannten Daten oder durch Messung. In manchen Fällen kann die Kombination von beidem erforderlich sein.
3. Die Eignung einer solchen Flammensperre ist dann durch die bestimmte Grenzspaltweite zuzüglich eines Sicherheitszuschlages beschrieben.

Typ I		Wasserstoff in Methan in Vol.-%			
		20	15	10	5
Anfangsdruck in kPa	450				* *
	400		*	*	*
	350	* *	*	*	*
	300	*	*	*	

	durchgeschlagen		gehalten und durchgeschlagen im gleichen Druckintervall
	gehalten		

Abbildung 5.1.: Darstellung der Leistungsgrenze für die Typ I Flammensperre nach S. Henkel et.al. [7]

Damit lässt sich die Eignung für andere Gemische und Betriebsdrücke ermitteln.

5.2. Bestimmung der Leistungsgrenzen

Die erweiterte Bestimmung der Leistungsgrenzen für die Flammensperren des Typs II und Typs IV liefern deutliche Informationen zur allgemeineren Beschreibung der Leistungsgrenze. Die in der Tabellen 4.5 und 4.6 zusammengefassten und in den Abbildungen 4.6 bis 4.9 dargestellten Daten zeigen, dass sich die Leistungsgrenze einer Flammensperren als Grenzspaltweite beschreiben lässt, die sich jeweils unabhängig von Gemisch und Druck alleine darstellt. Wie die Abbildungen 5.2 und 5.3 erkennen lassen, fügt sich dies mit dem Bild aus den Qualifizierungsversuchen gut zusammen.

Aus vorangegangenen Untersuchungen ist bekannt, dass eine zu ermittelnde Grenzspaltweite ein gutes Maß zur Beschreibung der Leistungsgrenze einer Flammendurchschlagsicherung sein kann. Eine erste Untersuchung zu diesem Aspekt führte B. Kampe [6] im Rahmen einer Masterarbeit an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt durch. Bei S. Henkel et.al. [7] wird die Ermittlung der Leistungsgrenzen für explosionsfähige Gemische mit erhöhtem Sauerstoffgehalt beschrieben. Die ermittelten Leistungsgrenzen und die dazu bestimmten Grenzspaltweiten liegen innerhalb des Inter-

Typ II		Wasserstoff in Methan in Vol.-%						
		35	30	25	20	15	10	5
Anfangsdruck in kPa	450						*	*
	400				*		*	*
	350			*	*	*	*	
	300	*	*	*		*		
	250	*	*	*				
	200	*						
	150							
	100							

Abbildung 5.2.: Darstellung der Leistungsgrenze für die Typ II Flammensperre nach S. Henkel et.al. [7]

Typ IV		Wasserstoff in Methan in Vol.-%							
		100	95	90	85	80	75	70	65
Anfangsdruck in kPa	500								*
	450							*	*
	400						*	*	*
	350						*		
	300				*	**			
	250			*	*	*			
	200		*	*	*				
	150	**	*						
100	*								

Abbildung 5.3.: Darstellung der Leistungsgrenze für die Typ IV Flammensperre nach S. Henkel et.al. [7]

valls, dass als Messunsicherheit angenommen werden muss. Mit dem gleichen Versuchsaufbau untersuchten F. Stolpe und S. Bendada [8] die Leistungsgrenzen für explosionsfähige Gemische mit erhöhten Inertgasgehalten. Die Untersuchungen wurden mit verschiedenen Inertgasen (Argon, Stickstoff, Kohlenstoffdioxid) die einem Gas-Luft-Gemisch zugesetzt wurden durchgeführt. Auch hier wurde gefolgert, dass sich die Leistungsgrenze durch eine Grenzspaltweite beschreiben lässt, wobei sich ein Einfluss des verwendeten Inertgases erkennen lässt, der jedoch innerhalb des Intervalls der Messunsicherheit bleibt.

5.3. Weiterführende Schlussfolgerungen

Wie aus Abbildung 4.4 hervor geht, ist es mit Brenngasgemischen aus Wasserstoff und Methan möglich das gesamte Normspaltweitenintervall, das der Festlegung der Explosionsgruppen nach EN ISO 16852 [1] dient, darzustellen. Wie aus den Abbildungen 4.8 und 4.9 ersichtlich ist, wird die Leistungsgrenze einer Flammensperre in dieser Testkonfiguration sehr gut durch die kleinste Grenzspaltweite beschrieben, bei der es zu keinem Flammendurchschlag gekommen ist. Es deutet sich damit an, dass es mit einem Brenngasgemisch aus Methan und Wasserstoff möglich ist, für jede Explosionsgruppe ein geeignetes Prüfgemisch bereit zu stellen. Dabei sind allerdings noch spezielle Prüfanforderungen zu berücksichtigen (Deflagrationen, stabilisiertes Brennen, Detonationen, etc.). In einem Folgeprojekt soll zuerst das Verhalten bei Deflagrationen in Rohrleitungen näher untersucht werden.

Zum Schluss

Das Forschungsvorhaben FV 37066 ist eine Kooperation der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und der Rolls-Royce Solutions GmbH.

An dieser Stelle möchten die Autoren all jenen danken, die zu diesem Projekt und seinem Gelingen auf verschiedene Weisen beigetragen haben. Aus der PTB sind besonders zu erwähnen Herr Block und Herr Hübner für die handfeste Unterstützung bei Auf- und Abbau und der qualifizierten Unterstützung bei Auswahl und Betrieb der Messtechnik, Herr Hossein Salehi für seine engagierte Unterstützung bei der Durchführung der Messungen. Von Seiten der Rolls-Royce Solutions GmbH sind vor allem Herr Kläser-Jenewein und Herr Sobczyk zu erwähnen.

5. Schlussfolgerungen

Quellen und Verweise

- [1] Europäische Norm DIN EN ISO 16852:2010; Flammendurchschlagsicherungen – Leistungsanforderungen, Prüfverfahren und Einsatzgrenzen; Deutsche Fassung EN ISO 16852:2010; Beuth Verlag 2010, Berlin.
- [2] Datenbank bewerteter sicherheitstechnischer Kenngrößen chemsafe
<https://www.chemsafe.ptb.de/>
- [3] Europäische Norm DIN EN ISO/IEC 80079-20-1:2020-09; Explosionsfähige Atmosphären - Teil 20-1: Stoffliche Eigenschaften zur Klassifizierung von Gasen und Dämpfen - Prüfverfahren und Daten; Deutsche Fassung EN ISO/IEC 80079-20-1:2019, Beuth Verlag 2020, Berlin
- [4] W.Hirsch; E.Brandes; Sicherheitstechnische Kenngrößen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig 2014. Abrufbar unter:
<http://www.bgrci.de/exinfode/ex-schutz-wissen/aktuelle-forschung/>
- [5] V.Schröder, E.Askar, T.Tashqin, A.Habib; Sicherheitstechnische Eigenschaften von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 2539, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin 2016. Abrufbar unter:
<https://www.bgetem.de/redaktion/arbeits-sicherheit-gesundheitsschutz/dokumente-und-dateien/brancheninformationen/energie-und-wasserwirtschaft/gasversorgung/abschlussbericht-zum-forschungsvorhaben-2539-sicherheitstechnische-eigenschaften-von-erdgas-wasserstoff-gemischen>
- [6] B.Kampe; Die Normspaltweite als Kenngröße zur Charakterisierung von Flammendurchschlagsicherungen, Masterarbeit, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2011
- [7] S.Henkel, S.Zakel, F.Stolpe; Determination of the performance limits of flame arresters at increased oxygen concentrations; Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 58, S. 17–21, 2019
- [8] F.Stolpe; S.Bendada; The capabilities of flame arresters on explosive mixtures with increased inert gas content; 14th Symposium International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions Proceedings; S. 329–336, 2022

A. Gemischtabelen

Die für die Versuche erforderlichen Gemische werden wie in Abschnitt 2.2 beschrieben erzeugt. Die dazu erforderlichen Volumenströme werden wie folgt berechnet:

Gemischverhältnisse der Verbrennung von Wasserstoff und Methan :



Mit X dem Anteil von H₂ im Gemisch mit CH₄ folgt für den Sauerstoffanteil :

$$\frac{X}{2} + 2 \cdot (1 - X) = 2 - \frac{3}{2}X \quad (\text{A.3})$$

Berechnung des Bedarfs an trockener Luft zur stöchiometrischen Prozess :

$$\frac{\text{notwendiger Anteil O}_2}{\text{Anteil O}_2 \text{ in Luft}} = \frac{(2 - \frac{3}{2}X)}{0,20942} \quad (\text{A.4})$$

Berechnung des Luftbedarf zur Erreichung des Verbrennungsluftverhältniss (λ):

$$V_{\text{Luft-tatsächlich}} = \frac{(2 - \frac{3}{2}X) \cdot \lambda}{0,20942} \quad (\text{A.5})$$

Berechnung des Brennstoffgehalts für den tatsächlichen Luftbedarf :

$$\text{BSG} = \frac{1}{1 + V_{\text{Luft-tatsächlich}}} \cdot 100 \quad (\text{A.6})$$

Tabelle A.1.: Zusammensetzung der Methan-Wasserstoff-Luft Gemische für ein Verbrennungsluftverhältnis von $\lambda = 1,73$. Die Anteile sind als Mol- bzw. Volumenanteile zu verstehen.

CH ₄ Anteil (1,00 - 0,00)	H ₂ Anteil (0,00 - 1,00)	$\lambda = 1,73$	
		Anteile Luft	BSG
1,00	0,00	16,5218	5,71
0,95	0,05	15,9023	5,92
0,90	0,10	15,2827	6,14
0,85	0,15	14,6631	6,38
0,80	0,20	14,0435	6,65
0,75	0,25	13,4240	6,93
0,70	0,30	12,8044	7,24
0,65	0,35	12,1848	7,58
0,60	0,40	11,5653	7,96
0,55	0,45	10,9457	8,37
0,50	0,50	10,3261	8,83
0,45	0,55	9,7066	9,34
0,40	0,60	9,0870	9,91
0,35	0,65	8,4674	10,56
0,30	0,70	7,8479	11,30
0,25	0,75	7,2283	12,15
0,20	0,80	6,6087	13,14
0,15	0,85	5,9892	14,31
0,10	0,90	5,3696	15,70
0,05	0,95	4,7500	17,39
0,00	1,00	4,1305	19,49

Tabelle A.2.: Zusammensetzung der Methan-Wasserstoff-Luft Gemische für ein Verbrennungsluftverhältnis von $\lambda = 1,41$. Die Anteile sind als Mol- bzw. Volumenanteile zu verstehen.

CH ₄ Anteil (1,00 - 0,00)	H ₂ Anteil (0,00 - 1,00)	$\lambda = 1,41$	
		Anteile Luft	BSG
1,00	0,00	13,4658	6,91
0,95	0,05	12,9608	7,16
0,90	0,10	12,4558	7,43
0,85	0,15	11,9509	7,72
0,80	0,20	11,4459	8,03
0,75	0,25	10,9409	8,67
0,70	0,30	10,4360	8,74
0,65	0,35	9,9310	9,15
0,60	0,40	9,4260	9,59
0,55	0,45	8,9211	10,08
0,50	0,50	8,4161	10,62
0,45	0,55	7,9111	11,22
0,40	0,60	7,4062	11,90
0,35	0,65	6,9012	12,66
0,30	0,70	6,3962	13,52
0,25	0,75	5,8913	14,51
0,20	0,80	5,3863	15,66
0,15	0,85	4,8813	17,00
0,10	0,90	4,3764	18,60
0,05	0,95	3,8714	20,53
0,00	1,00	3,3664	22,90

Tabelle A.3.: Zusammensetzung der Methan-Wasserstoff-Luft Gemische für ein Verbrennungsluftverhältnis von $\lambda = 1,0$. Die Anteile sind als Mol- bzw. Volumenanteile zu verstehen.

CH ₄ Anteil (1,00 - 0,00)	H ₂ Anteil (0,00 - 1,00)	$\lambda = 1,0$	
		Anteile Luft	BSG
1,00	0,00	9,5500	9,48
0,95	0,05	9,1921	9,81
0,90	0,10	8,8339	10,17
0,85	0,15	8,4758	10,55
0,80	0,20	8,1177	10,97
0,75	0,25	7,7595	11,42
0,70	0,30	7,4014	11,90
0,65	0,35	7,0433	12,43
0,60	0,40	6,6851	13,01
0,55	0,45	6,3270	13,65
0,50	0,50	5,9689	14,35
0,45	0,55	5,6107	15,13
0,40	0,60	5,2526	15,99
0,35	0,65	4,8945	16,97
0,30	0,70	4,5363	18,06
0,25	0,75	4,1782	19,31
0,20	0,80	3,8201	20,75
0,15	0,85	3,4619	22,41
0,10	0,90	3,1038	24,37
0,05	0,95	2,7457	26,70
0,00	1,00	2,3875	29,52



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: (0531) 592-93 21
Fax: (0531) 592-30 08
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de