

Technische Universität München
Institut für Energietechnik

Lehrstuhl für Thermodynamik

Einfluss von Mischungsgradienten auf die Flammenbeschleunigung und die Detonation in Kanälen

Klaus Gerhard Vollmer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades
eines

DOKTOR – INGENIEURS

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Kremling

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer
2. Univ.-Prof. Dr. sc. techn. habil. Jörn Sesterhenn,
Technische Universität Berlin

Die Dissertation wurde am 12.01.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 13.07.2015 angenommen.

Kurzfassung

Kerntechnische Anlagen erfordern verlässliche Sicherheitskonzepte. Aus diesem Grund wurden und werden Versuche mit kleinskaligen Versuchsanlagen durchgeführt. Sie dienen dazu, die notwendigen Voraussetzungen für das Auftreten einer Flammenbeschleunigung oder Deflagration-Defonation-Transition (DDT) zu ermitteln und die jeweiligen Einflussgrößen besser zu verstehen. In dieser Arbeit wurde der Einfluss von Mischungsgradienten in einem Wasserstoff-Luft-Gemisch auf die Flammenausbreitung in einem eigens dafür aufgebauten Explosionskanal untersucht, wobei die Stärke des vertikalen Mischungsgradienten beliebig eingestellt werden konnte. Ein Ergebnis der experimentellen Untersuchung ist, dass bei Gemischen mit einem Mischungsgradienten eine stärkere Flammenbeschleunigung auftritt als in homogenen Gemischen. Außerdem kann durch einen Mischungsgradienten die Neigung zu DDT gegenüber einem homogenen Gemisch sowohl erhöht als auch erniedrigt werden. Für Gemische mit einem vertikalen Konzentrationsgradienten stellt das 7λ -Kriterium kein konservatives Konzept für die Sicherheitsbewertung dar. Diese Erkenntnisse sollten bei zukünftigen Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden.

Abstract

As nuclear facilities require reliable safety concepts, laboratory-scale experiments are conducted to identify the conditions for the occurrence of flame acceleration and deflagration-to-detonation transition (DDT) as well as the factors that influence these phenomena. In this work, the influence of mixture gradients of hydrogen-air mixtures on flame propagation was investigated in an explosion tube constructed particularly for this purpose. This facility allows to set the vertical mixture gradient at an arbitrary high value. The results of the experiments in a mixture with a gradient show a stronger flame acceleration than on homogeneous mixtures. Besides, the presence of a concentration gradient can increase or decrease the probability of DDT. For mixtures with a vertical concentration gradient, the 7λ criterion is not to be considered as a conservative approach while assessing safety. These results should be considered for safety assessments in the future.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xi
Nomenklatur	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	3
2 Grundlagen und Stand des Wissens	7
2.1 Wasserstoffverbrennung und Flammenausbreitung	7
2.2 Eindimensionale Betrachtung von Flammen	9
2.3 Deflagrative Flammenbeschleunigung	11
2.4 Detonation	13
2.5 Deflagrations-Detonations-Transition	16
3 Gemischaufbereitung	21
3.1 Prinzip der Gradientenbildung	21
3.2 Eindüsungsmodell	24
3.3 Visualisierung des Eindüsungsvorgangs	26
3.4 Quantitative Bestimmung des Gradientenverlaufs	27
3.4.1 Versuchsablauf	28
3.4.2 Gaschromatographie	29
3.4.3 Ergebnis der quantitativen Messungen	30
4 Versuchsanlage und Versuchsdurchführung	33
4.1 Gesamtaufbau	33
4.2 Peripherie	36
4.3 Versuchsdurchführung	37

5 Messtechnik	39
5.1 Konventionelle Messtechnik	39
5.1.1 Flammendetektion	39
5.1.2 Druckmessung	43
5.1.3 Datenerfassung	45
5.2 Optische Messtechnik	47
5.2.1 Schatten- und Schlierenverfahren	48
5.2.2 Chemilumineszenz	50
6 Ergebnisse der Explosionsversuche	53
6.1 Versuche mit homogenem Gasgemisch	54
6.1.1 Nachweis der Funktionalität der GraVent-Anlage	54
6.1.2 Einfluss der Hinderniskonfiguration	60
6.1.3 Flammenausbreitung im Explosionskanal mit rechteckigem Kanalquerschnitt	71
6.2 Gradienteneinfluss	77
6.2.1 Gradienteneinfluss auf den Geschwindigkeitsverlauf	77
6.2.2 Gradienteneinfluss auf die Flammenbeschleunigung	80
6.2.3 Gradienteneinfluss auf die Detonation	86
6.2.4 Gradienteneinfluss auf den Übergang von der Deflagration in die Detonation	90
7 Zusammenfassung	99
A Kennwerte von Wasserstoff-Luft-Gemischen	103
A.1 Geschwindigkeits- und Expansionsverhältnis-Werte	103
A.2 Detonationszellweiten	105
B Konzentrationsbestimmung	107
B.1 Aufbereitung der Gasproben	107
B.2 Berechnung der Gaszusammensetzung	109
B.3 Ergebnisse der Diffusionsversuche	109
C Wasserstoff- und Luft-Versorgungssystem	111
Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	115
Literaturverzeichnis	117

Abbildungsverzeichnis

1.1	Numerische Simulation der Wasserstoffverteilung in einem Kernkraftwerk.	3
1.2	Prinzipskizze eines Versuchskanals zur Untersuchung von Flammenbeschleunigungsvorgängen.	4
2.1	Strahlungsband einer Wasserstoffflamme.	8
2.2	Eindimensionales Kontrollvolumen.	9
2.3	Entdimensionierte p - v -Diagramme mit Rayleigh-Gerade und Hugoniot-Kurve.	10
2.4	Laminare Brenngeschwindigkeit von Wasserstoff-Luft-Flammen bei Standardbedingungen.	12
2.5	Rückkopplungsmechanismus zur Beschreibung der Flammenbeschleunigung.	13
2.6	Aufnahmen einer Detonationsfront in einem engen Kanal. . . .	14
2.7	Schematische Darstellung der Detonationsfront in einem rechteckigen Kanal sowie Bestimmung der Detonationszellgröße.	14
2.8	Charakteristisches Längenmaß L für das 7λ -Kriterium in blockierten Kanälen.	18
2.9	Zusammenfassung der Versuche für die Bestimmung des 7λ -Kriteriums.	19
3.1	Ergebnis der 1D-Berechnung des Gradientenabbaus.	23
3.2	Schematische Darstellung der Wasserstoffeindüsung.	23
3.3	Messaufbau mit Eindüsungsmodell.	24
3.4	Anordnung der Eindüsungsbohrungen.	25
3.5	Aufnahmesequenz des Gradientenabbaus mittels Farbschlierenverfahren.	27
3.6	Experimentell ermittelter Konzentrationsverlauf von Wasserstoff und Helium.	30

3.7	Zeitlicher Abbau des Konzentrationsgradienten.	31
4.1	Schematische Darstellung des Explosionskanals.	33
4.2	„GraVent“-Versuchsanlage.	35
5.1	Einbau der Fotodioden in die Deckplatte.	40
5.2	Bestimmung der Reaktionszeit des Flammensensors.	41
5.3	Instrumentierung der GraVent-Anlage.	41
5.4	Aufbereitung der Flammenpositions- und Flammengeschwindigkeitsverläufe aus den Rohdaten.	42
5.5	Ablaufdiagramm der Datenaufbereitung.	44
5.6	Aufbau der Steuer- und Messtechnik.	45
5.7	Steuerdiagramm des Versuchsablaufs.	47
5.8	Optisches Segment, eingebaut in der GraVent-Anlage.	48
5.9	Schematische Darstellung des Messaufbaus (Draufsicht) für optische Messungen an der GraVent-Anlage.	49
6.1	Wiederholbarkeitsstudie: Vergleich des Weg-Zeit-Verlaufs der Flammenfront.	54
6.2	Wiederholbarkeitsstudie: Vergleich der Flammengeschwindigkeit.	55
6.3	Vergleich der Druckverläufe eines Drucksensors.	56
6.4	Wiederholbarkeitsstudie: Druckverlauf einer schnellen Flamme.	57
6.5	Wiederholbarkeitsstudie: Druckverlauf einer Detonation.	58
6.6	Wiederholbarkeitsstudie: Ausbreitung der Druckwellenfront im Explosionskanal.	59
6.7	Verlauf der Flammengeschwindigkeit in vier verschiedenen Kanalkonfigurationen mit Variation des Wasserstoffanteils.	61
6.8	Charakteristische Geschwindigkeitsverläufe der Flammenfront in der GraVent-Anlage mit Hindernisstrecke.	65
6.9	Maximale Flammengeschwindigkeit bzw. Geschwindigkeit der stabilen Detonation in der GraVent-Anlage für verschiedene Kanalkonfigurationen mit Hindernisstrecke.	67
6.10	Anlauflänge der Flamme bis zum Auftreten von DDT in Abhängigkeit der Wasserstoffanteils für verschiedene Kanalkonfigurationen mit Hindernisstrecke.	68
6.11	Anlauflänge der Flamme bis zum Erreichen der Schallgeschwindigkeit der Produkte für Kanalkonfigurationen mit Hindernisstrecke.	69

6.12	Maximaldruck in der GraVent-Anlage für verschiedene Kanal- konfigurationen mit Hindernisstrecke.	72
6.13	Flammenankunft (entdimensioniert) in Abhängigkeit der Sen- sorposition in Querrichtung.	73
6.14	Schattenaufnahme der Kanalkonfiguration BR60-S300-VR00 mit 17,8 % H ₂	74
6.15	Schattenaufnahme der Kanalkonfiguration BR60-S300-VR00 mit 34,1 % H ₂	76
6.16	Verlauf der Flammengeschwindigkeiten für Mischungen mit un- terschiedlicher Stärke des Konzentrationsgradienten.	78
6.17	Zeitliche Flammenausbreitung für Gemische mit unterschiedli- chen Konzentrationsgradienten.	80
6.18	Flammenankunft am Sensor $x = 0,2$ m in Abhängigkeit des Was- serstoffanteils und des Konzentrationsgradienten.	81
6.19	Schlieren- und Chemilumineszenzaufnahmen einer schnellen Deflagration in einem homogenen Gemisch und in einem Ge- misch mit einem starken Mischungsgradienten.	82
6.20	Kritisches Expansionsverhältnis in Abhängigkeit von Kanalkon- figuration und Wartezeit.	84
6.21	Einfluss von vertikalen Mischungsgradienten auf die Anlaulän- ge X_s in der Kanalkonfiguration BR30-S100-VR00.	85
6.22	Einfluss von vertikalen Mischungsgradienten auf die Anlaulän- ge X_s in der Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00.	86
6.23	Schlieren- und OH [*] -Chemilumineszenzaufnahmen einer stabili- len Detonation mit unterschiedlich starken Mischungsgradienten.	87
6.24	Rußschrieb eines Versuchs mit vertikalem Konzentrationsgradi- enten.	89
6.25	Druck- und Impulsverlauf für Mischungen mit unterschiedli- chen Konzentrationsgradienten.	90
6.26	Drucklasten auf die obere und untere Wand bei Vorliegen eines Konzentrationsgradienten.	91
6.27	Maximale Flammengeschwindigkeit in Abhängigkeit vom mitt- leren Wasserstoffanteil und Wartezeit bei geringer Blockierrate (BR30).	92
6.28	Schlierenaufnahmen des Gradientenabbaus verursacht durch die Umströmung der Hindernisse mit geringer Blockierrate.	93

6.29 Anwendung des 7λ -Kriteriums auf die Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00.	94
6.30 Maximale Flammengeschwindigkeit in Abhängigkeit von mittlerem Wasserstoffanteil und Wartezeit bei hoher Blockierrate (BR60).	96
6.31 Schlierenaufnahmen des Gradientenabbaus verursacht durch die Umströmung der Hindernisse mit hoher Blockierrate.	97
6.32 Simultane Schatten- und Chemilumineszenzaufnahmen einer lokalen Explosion am oberen Hindernis.	98
A.1 Detonationszellweite für Wasserstoff-Luft-Gemische unter Umgebungsbedingungen.	105
B.1 Druckverlauf in der Gasmaus.	107
B.2 Skizze der Aufbereitungseinheit.	108
B.3 Abbau des Konzentrationsgradienten in Abhängigkeit von dem gemittelten Heliumanteils.	110
C.1 Wasserstoff- und Luft-Versorgungssystem der GraVent-Anlage. .	112
C.2 Gaszufuhreinheit.	113

Tabellenverzeichnis

3.1	Stoffwerte von Wasserstoff und Helium.	30
6.1	Untersuchte Kanalkonfigurationen.	53
6.2	Detonationsgeschwindigkeit für Gemische mit Konzentrations- gradienten	88
A.1	Kennwerte für Wasserstoff-Luft-Gemische.. . . .	104

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

a, b	[-]	Konstante
a	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
b	[m]	Hindernisdicke
BR	[%]	Blockierrate
c	[mol/m ³]	Stoffmengenkonzentration
d	[m]	Spalthöhe
D	[m ² /s]	Diffusionskonstante
D	[m]	Rohrdurchmesser
D	[m/s]	Detonationsgeschwindigkeit
h	[m]	Hindernishöhe
H	[m]	Kanalhöhe
I	[N s/m ²]	flächenbezogener Impuls
j	[mol/(m ² s)]	Fluss
k	[-]	Volumenverhältnis
L	[m]	Gesamtlänge Explosionskanal
M	[g/mol]	Molmasse
p	[bar]	Druck
q	[J/kg]	spezifische Wärmezufuhr
s	[m/s]	Brenngeschwindigkeit
S	[m]	Hindernisabstand
T	[K]	Temperatur
t	[s]	Zeit
u	[m/s]	Geschwindigkeit
U	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
v	[m ³ /kg]	spezifisches Volumen
VR	[%]	Abblasrate (Venting Ratio)

X	[m]	Anlauflänge
X	[-]	Molenbruch
y	[-]	Massenbruch
x, y, z	[m]	Ortskoordinaten

Griechische Symbole

β	[°]	Einfallswinkel
κ	[-]	Isentropenexponent
λ	[m]	Detonationszellweite
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ	[-]	Expansionsverhältnis

Tiefgestellte Indizes

0	Standardbedingungen, Zustand vor Wärmezufuhr / zu Beginn
1	Zustand nach Wärmezufuhr, Zustand nach Evakuierung
2	Zustand nach Gasprobenentnahme
3	Zustand vor Argon-Befüllung
4	Zustand nach Argon-Befüllung
b	Verbrennung
CJ	Chapman-Jouguet
dyn	dynamisch
D	Detonation
DS	Drucksensor
f	Flamme
FS	Flammensensor
i	innen
$krit$	kritisch
L	laminar
max	maximal
min	minimal
$mittel$	Mittelwert
p	Produkte
r	Reaktanden
s	Schallgeschwindigkeit
w	Wartezeit

Dimensionslose Kennzahlen

M Mach-Zahl

Akronyme

CAN	Controller Area Network
CJ	Chapman-Jouguet
DDT	Deflagration-to-Detonation Transition
DS	Drucksensor
eTE	externe Triggereinheit
FS	Flammensensor
GRS	Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH
IAEA	Internationale Atomenergiebehörde
LED	Light Emitting Diode
MV	Magnetventil
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
RUD	Run-Up Distance
SDT	Shock-to-Detonation Transition
V	Ventil
VRK	Ventilregelkreis
WLD	Wärmeleitfähigkeitsdetektor

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Der Sicherheitsaspekt ist von überragender Bedeutung bei der Weiterentwicklung bestehender Kernkraftwerkstechnologie sowie der Auslegung komplett neuer Kernkraftwerke. Dem Containment¹ kommt als letzte Schutzbarriere vor der endgültigen Freisetzung radioaktiver Strahlung hierbei eine besondere Rolle zu. Um ein Containment sicher auslegen zu können, bedarf es entsprechender Kenntnisse über alle vorkommenden Lastfälle. Hierunter fallen auch ungewollte Betriebszustände wie z. B. Störfälle.

Während eines Kühlmittelverluststörfalls können die Brennstäbe des Reaktors zum Teil freigelegt werden, wodurch sich deren über dem Kühlmittelstand frei liegender Bereich aufheizt. Sobald dort eine ausreichend hohe Temperatur erreicht ist, reagiert vorhandener Wasserdampf mit dem Zirkonium der Brennstoffhülle und es entsteht Wasserstoff [24]. Kommt es zudem zu einer Kernschmelze, bildet sich durch die Beton-Schmelze-Wechselwirkung eine große Menge an Wasserstoff (mehrere hundert Kilogramm) innerhalb des Containments [10, 37, 66]. Aufgrund der geringen Mindestzündenergie und des großen Zündbereichs eines Wasserstoff-Luft-Gemisches [7], kann das Gemisch an Zündquellen, wie z. B. elektrischen Schaltelementen, entzündet werden. Selbst unter der Einschränkung, dass ein großer Anteil von Wasserdampf vorliegt, bleibt die untere Zündgrenze nahezu gleich [13].

Während einer zunächst noch deflagrativen Verbrennung kommt es zu einem Druckanstieg im Containment. Sind bestimmte Voraussetzungen erfüllt, kann es aufgrund der Flammenbeschleunigung (FB) zum Übergang von der Deflagration in die Detonation (Deflagration-to-Detonation Transition, DDT) kommen, was mit einem starken Druckanstieg verbunden ist und damit ei-

¹Das Containment entspricht dem Sicherheitsbehälter eines Kernkraftwerks und ist als Stahl-Beton-Konstruktion ausgeführt. Da sich in der deutschsprachigen Fachliteratur über die letzten Jahrzehnten der englische Fachausdruck durchgesetzt hat, wird dieser auch in der hier vorliegenden Arbeit verwendet.

ne Gefahr für die mechanische Integrität des Containments darstellt. In der Vergangenheit gab es bereits in Harrisburg in den USA (1979) [28, 69] sowie in Fukushima in Japan (2011) [9, 28] Vorfälle dieser Art. Diese Unfälle zeigen, dass eine Wasserstoffverbrennung nicht nur eine theoretische, sondern eine reale Gefahr für ein Kernkraftwerk und somit auch für die Bevölkerung sein kann. Aus diesem Grund ist die genaue Kenntnis der Flammenausbreitung in Wasserstoff-Luft-Gemischen erforderlich. Sie hilft, verlässliche Sicherheitskonzepte für neue kerntechnische Anlagen zu erarbeiten und für bestehende Kernkraftwerke kritisch zu bewerten. Hierzu wurde in den vergangenen Jahrzehnten eine Vielzahl an Untersuchungen in kleinskaligen Versuchsanlagen durchgeführt und mehrere Einflussgrößen sowie Voraussetzungen für das Auftreten einer Flammenbeschleunigung oder eines DDT-Übergangs gefunden. Insbesondere sind die Art des Gasgemischs, Temperatur, Druck, Blockierate, Hindernisabstand und Abblasrate von Bedeutung. Eine Zusammenfassung experimenteller aber auch numerischer Ergebnisse findet sich in Breitung et al. [13], Ciccarelli und Dorofeev [15] und Lee [60].

Nahezu alle bisherigen Arbeiten basieren auf Versuchen mit homogenen Gasgemischen. Da allerdings die Dichte von Wasserstoff geringer ist als die von Luft, sammelt sich Wasserstoff aufgrund des Auftriebs an der höchsten Stelle des Raumes (s. Abb. 1.1), sodass es zu einer Schichtung, d. h. einem vertikalen Konzentrationsgradienten, kommt [2, 45, 72]. Der Abbau einer solchen Schichtung durch Diffusion kann in größeren Räumen, wie z. B. in dem Containment eines Kernreaktors, mehrere Stunden dauern. Numerische Simulationen von Slide und Redlinger [72] zeigen, dass das Wasserstoffgas auch nach über zwei Stunden nach Freisetzung nur im oberen Bereich des Raumes zu finden ist. So ist unter anderem nach einem Bericht der OECD Nuclear Energy Agency [13] zu klären, welchen Einfluss ein vertikaler Konzentrationsgradient auf die Flammenbeschleunigung und den Übergang von einer Deflagration in die Detonation hat und ob das Gefahrenpotential dadurch ansteigt. Dies wird mit der hier vorliegenden, experimentellen Arbeit angegangen.

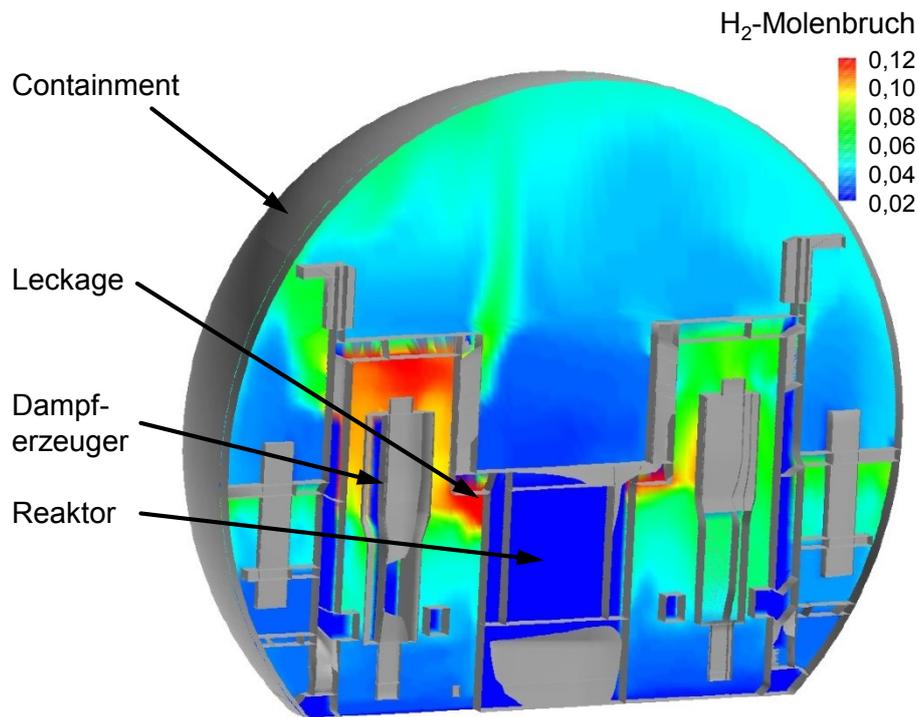


Abbildung 1.1: Numerische Simulation der Wasserstoffverteilung in einem Kernkraftwerk [45].

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Experimentelle Untersuchungen zur Flammenbeschleunigung und des DDT-Prozesses im Maßstab 1:1 sind aufwändig. Aus diesem Grund wurde in der Vergangenheit eine Reihe von Arbeiten in kleinskaligen, meist geschlossenen Anlagen durchgeführt. Zumeist wurde dabei ein brennbares Gemisch in einen Kanal mit einem konstanten Kanalquerschnitt eingebracht und von einer Seite gezündet. Hierbei breitet sich die Flamme nach der Zündung in das unverbrannte Gemisch hinein aus. Auch wenn sich das Gemisch zum Zündzeitpunkt in Ruhe befindet, kommt es aufgrund der Expansion der heißen Verbrennungsprodukte zu einer Gasbewegung in das unverbrannte Gasgemisch hinein, wodurch es zum Turbulenzeintrag in das Gemisch kommt. Es kommt zu einem sich selbst verstärkenden Prozess, bei dem die Umsatzrate unter anderem durch die Zunahme der Turbulenzintensität sowie durch gasdynamische Instabilitäten ansteigt. Die Flamme wird in dem Kanal beschleunigt.

Oft werden Experimente in einem Kanal durchgeführt, in den periodisch Strömungshindernisse eingebaut sind. Die Strömungshindernisse bewirken einen starken Turbulenzeintrag in das Gemisch und führen zu einer wesentlich stärkeren Flammenbeschleunigung als dies in einem glatten Kanal der Fall wäre. Somit kann die Flamme auch in relativ kurzen Kanälen bis auf die Schallgeschwindigkeit der Produkte und darüber hinaus beschleunigt werden. Aus früheren Arbeiten ist bekannt, dass eine auf die Schallgeschwindigkeit der Produkte beschleunigte Flamme notwendig ist, um einen Übergang von der Deflagration in die Detonation herbeizuführen [15, 27].

In dieser Arbeit wird mit Hilfe der GraVent-Anlage², die einen 5,4 m langen Kanal besitzt (s. Prinzipskizze in Abb. 1.2), der Einfluss von Mischungsgradienten auf die Flammenbeschleunigung und den Übergang von der Deflagration in die Detonation untersucht. Dieser konzeptionelle Aufbau soll helfen, den Vorgang nachzubilden, wo sich eine Flamme in einem Raum bzw. Containment in horizontaler Richtung ausbreitet, wobei im oberen Bereich eine höhere Wasserstoffkonzentration als im darunterliegenden Bereich vorliegt. Dies entspricht einem Konzentrationsgradienten quer zur Ausbreitungsrichtung.

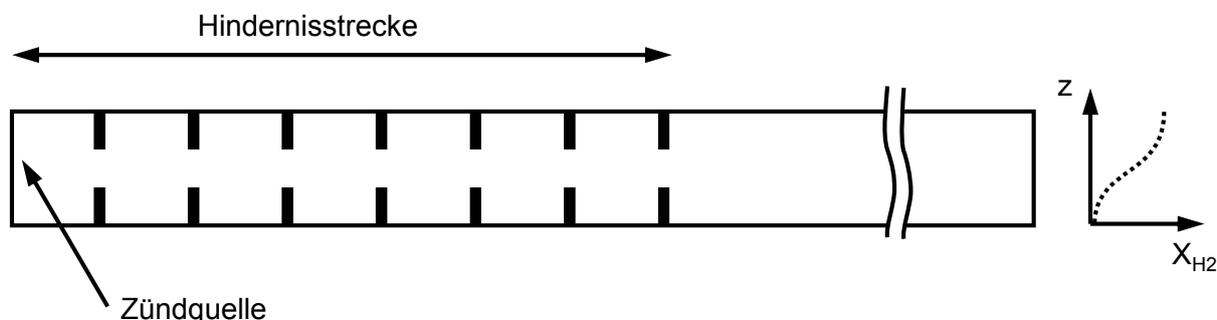


Abbildung 1.2: Prinzipskizze eines Versuchskanals zur Untersuchung von Flammenbeschleunigungsvorgängen.

Anhand von Versuchsergebnissen mit Mischungsgradienten soll geprüft werden, ob bestehende, sicherheitsrelevante Kriterien auch in dieser Versuchskonfiguration gültig sind. Durch den Einsatz von optischer Messtechnik soll die Ausbreitung sowie die Form der Stoß- und Flammenfront für die unterschiedlichen Konfigurationen näher untersucht werden. Dadurch sollen

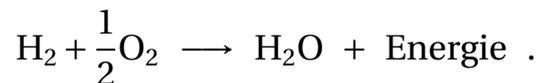
² Der Name „GraVent“ setzt sich aus den Worten Gradient und Venting zusammen, den beiden Einflussgrößen, die mit dieser Anlagen untersucht werden können.

zum einen die während der Flammenausbreitung ablaufenden Prozesse besser verstanden und zum anderen analytische und numerische Berechnungen überprüft werden.

2 Grundlagen und Stand des Wissens

2.1 Wasserstoffverbrennung und Flammenausbreitung

Die Verbrennung ist ein chemischer Vorgang, währenddessen ein Brennstoff mit einem Oxidator reagiert und thermische Energie freigesetzt wird. Die Bruttoreaktionsgleichung für die Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff lautet:



Diese Reaktion steht für eine Vielzahl von Elementarreaktionen [38, 50, 82]. Diese Elementarreaktionen bilden mehrere Zwischenprodukte (Radikale), die im Fall einer vollständigen Verbrennung durch weitere Reaktionen in Wasser umgewandelt werden. In der Reaktionszone kommt es aufgrund der Strahlung des Hydroxyl-Radikals zu einer Lichtemission im UV-Bereich (Strahlungsband um 306 nm). Heißer Wasserdampf, der während der Wasserstoff-Verbrennung entsteht, emittiert Licht im sichtbaren Bereich (ca. 585 nm) [25, 36]. Das Strahlungsband einer Wasserstoffflamme ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Damit ein Gasmisch brennbar ist, muss das Mischungsverhältnis von Brennstoff und Oxidator zwischen der unteren und oberen Zündgrenze liegen. Für ein Wasserstoff-Luft-Gemisch ist der brennbare Bereich zwischen 4 und 75 %¹ H₂ ($T_0 = 273 \text{ K}$, $p_0 = 1,013 \text{ bar}$) vorzufinden [7]. Ein stöchiometrisches Gemisch liegt bei $X_{\text{H}_2} = 29,6 \%$ vor.

Deflagrative und detonative Flammenausbreitung

Grundsätzlich kann die Verbrennung eines Gasmischs deflagrativ und detonativ erfolgen, wobei sich diese zwei Ausbreitungsmechanismen wesentlich voneinander unterscheiden.

¹ In dieser Arbeit wird stets der prozentuale Volumenanteil (Molenbruch) angegeben.

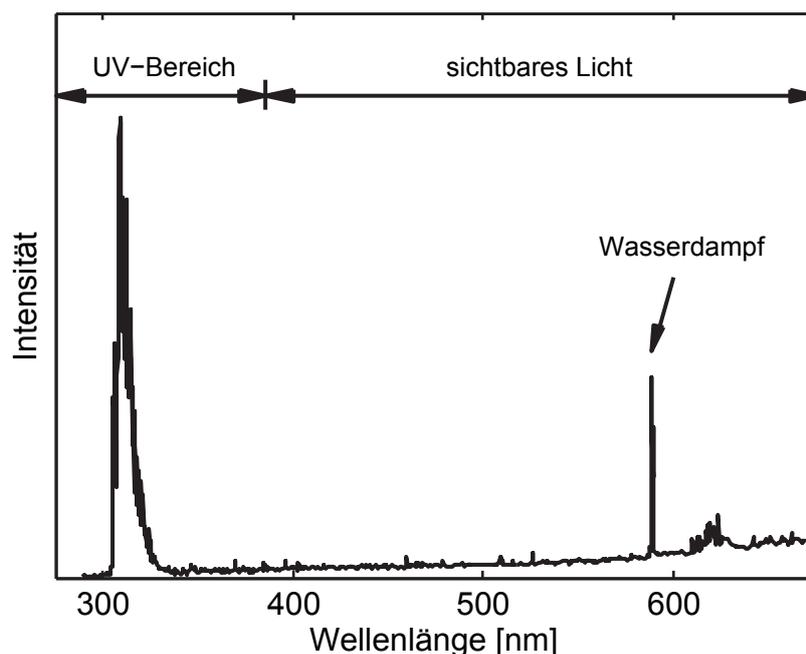


Abbildung 2.1: Strahlungsband einer Wasserstoffflamme. Aufbereitetes Diagramm nach [25].

Während einer Deflagration breitet sich die Flamme durch Wärme- und Stofftransport an der Flammenfront aus. Den kalten Reaktanden wird durch Strahlung sowie konvektiven und diffusiven Wärmetransport – von den heißen Produkten in die Reaktionszone – die notwendige Aktivierungsenergie zugeführt, sodass eine exotherme Reaktion ablaufen kann. Die in der Reaktionszone vorhandenen Radikale diffundieren in Richtung der Reaktanden und können währenddessen eine Elementarreaktion starten. Der Bereich vor der Reaktionszone, in dem die Reaktanden aufgewärmt werden, wird Vorwärmzone genannt.

In einem geschlossenen Kanal, wie in Abbildung 1.2 skizziert, bildet sich aufgrund der Expansion der heißen Verbrennungsprodukte eine Strömung aus, die sich in Richtung der Flammenausbreitung bewegt. Für einen Beobachter von außen breitet sich die Flammenfront dadurch mit einer Geschwindigkeit aus, die sich aus der Überlagerung von Brenngeschwindigkeit u_b mit der Strömungsgeschwindigkeit U ergibt. Diese Geschwindigkeit wird in dieser Arbeit als Flammengeschwindigkeit u_f bezeichnet:

$$u_f = u_b + U \quad . \quad (2.1)$$

Das Geschwindigkeitsspektrum einer Deflagration reicht von wenigen Meter pro Sekunde bis in den Überschallbereich (>1000 m/s). Im Fall einer schnellen

Deflagration (Flammengeschwindigkeit größer als die Schallgeschwindigkeit der Reaktanden, $u_f > a_r$) entstehen starke Druckwellen (Stöße), die zwar die Verbrennung beeinflussen, das Gemisch jedoch nicht zünden.

Die Detonation unterscheidet sich in ihrem Ausbreitungsmechanismus grundsätzlich von der Deflagration. Die Zündung des Gemischs erfolgt durch einen Verdichtungsstoß, der der Reaktionszone vorausläuft und die Reaktanden ausreichend erwärmt, sodass sich das Gemisch selbst zündet. Verdichtungsstoß und Reaktionszone sind eng gekoppelt und laufen mit mehrfacher Schallgeschwindigkeit in das unverbrannte Gemisch hinein. Dabei treten über die Detonationsfront Druckverhältnisse von 10 bis 20 bezogen auf den Anfangsdruck auf.

2.2 Eindimensionale Betrachtung von Flammen

Die einzelnen Verbrennungsmechanismen sowie die Herleitung der Lösungen für den eindimensionalen Fall haben bereits mehrere Autoren beschrieben [12, 13, 15, 27, 61]. An dieser Stelle wird deshalb nur auf das Ergebnis und die damit verbundenen Schlussfolgerungen, die für das Verständnis der Versuchsauswertung in Kapitel 6 notwendig sind, eingegangen.

Mit den Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie und einer Bilanzierung ausreichend vor und hinter der Reaktionsfront kann für den eindimensionalen Fall die sich einstellende Zustandsänderung berechnet werden. Abbildung 2.2 zeigt das Kontrollvolumen, in dem es zur Wärmefreisetzung kommt. In diesem Kontrollvolumen kann vor der Flammenfront auch eine Druckwelle vorliegen.

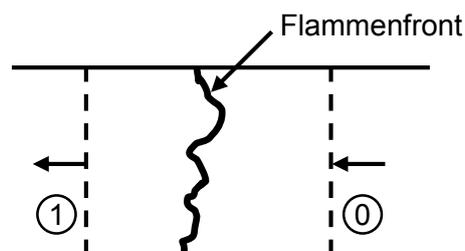


Abbildung 2.2: Eindimensionales Kontrollvolumen.

Aus der Massen- und Energieerhaltung sowie dem idealen Gasgesetz kann die Hugoniot-Kurve hergeleitet werden [61]:

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} \frac{v_1}{v_0} + \frac{2\kappa}{\kappa - 1} \frac{q}{p_0 v_0}}{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} \frac{v_1}{v_0} - 1} . \quad (2.2)$$

Aus der Massen- und Impulserhaltung wird die Rayleigh-Gerade gebildet:

$$\frac{p_1}{p_0} = 1 + \kappa M_0^2 \left(1 - \frac{v_1}{v_0} \right) . \quad (2.3)$$

Die Hugoniot-Kurve und die Rayleigh-Gerade sind qualitativ in den beiden Diagrammen in Abbildung 2.3 dargestellt. Die Rayleigh-Gerade hat ihren Ursprung bei $p_1/p_0 = 1$ und $v_1/v_0 = 1$ (Punkt (1, 1)). Durch diesen Punkt geht ebenfalls die Hugoniot-Kurve, falls ein inerte Stoß, d. h. ohne Wärmezufuhr, vorliegt. Der Bereich $p_1/p_0 > 1$ ist der Detonationsast, der Bereich $p_1/p_0 < 1$ der Deflagrationsast. Die Schnittpunkte der Hugoniot-Kurve und der Rayleigh-Geraden sind gültige Lösungen. Die relevanten Lösungen sind die starke Detonation und die schwache Deflagration. Diese sind im linken Diagramm der Abbildung 2.3 dargestellt. Die Lösung der schwachen Detonation bzw. starken Deflagration können in einer bewegten Reaktionsfront nicht erreicht werden [12, 61].

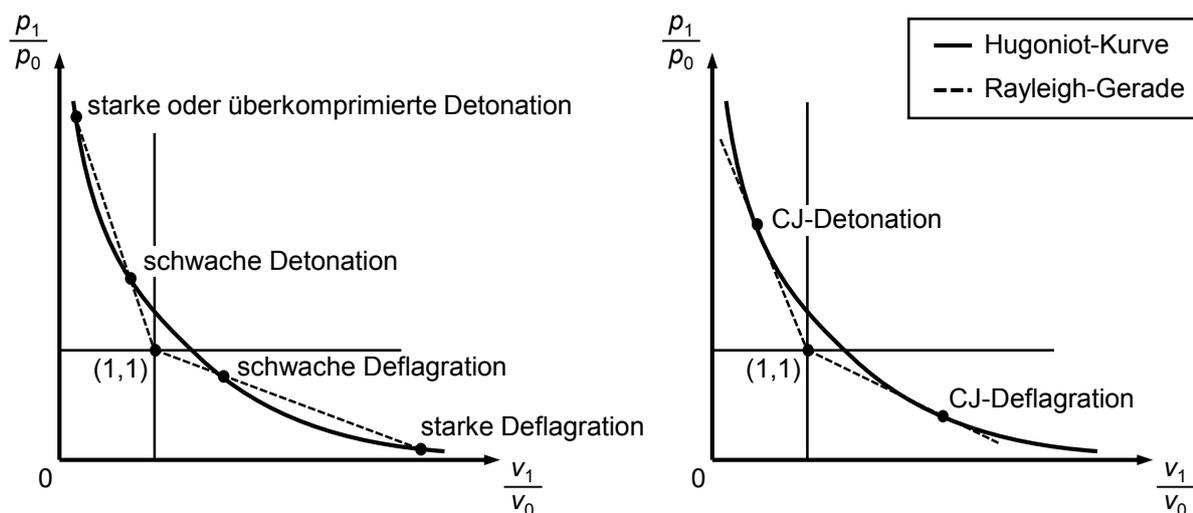


Abbildung 2.3: Entdimensionierte p - v -Diagramme mit Rayleigh-Geraden und Hugoniot-Kurve. p_1/p_0 gibt das Druckverhältnis von Abgas und Frischgas an, v_1/v_0 das Verhältnis der spezifischen Volumina von Abgas zu Frischgas. Die Bilanzierung erfolgt jeweils ausreichend vor und hinter der Flammenfront.

Lee [61] hat gezeigt, dass im stationären Fall für jeden Ast (Deflagrations- und Detonationsast) genau eine Lösung existiert. Das bedeutet, dass eine überkomprimierte Detonation in eine Chapman-Jouguet (CJ)-Detonation übergeht. Hierbei berührt die Rayleigh-Gerade die Hugoniot-Kurve tangential. Das Abgas bewegt sich bei beiden Lösungen relativ zur Flammenfront mit Schallgeschwindigkeit. Für die Detonationslösung ist in diesem Fall die Abströmgeschwindigkeit (relativ zur Reaktionsfront) minimal, für die Deflagration maximal. Diese zwei Lösungen werden nach den Begründern der Detonationstheorie und somit als Chapman-Jouguet-Lösungen bezeichnet [61]. In Anhang A sind für Wasserstoff-Luft-Gemische die Geschwindigkeiten dieser Lösungen (a_p und D_{CJ}) angegeben.

2.3 Deflagrative Flammenbeschleunigung

Ebenso wie in der Fachliteratur zur deflagrativen Flammenbeschleunigung wird auch in dieser Arbeit ein ruhendes Gasgemisch in einem geschlossenen Explosionskanal gezündet. Da die Art der Flammenausbreitung von der Strömung bestimmt wird, brennt das Gemisch unmittelbar nach der Zündung laminar ab [79]. Die laminare Brenngeschwindigkeit s_L der Flamme relativ zum unverbrannten Gemisch ist abhängig von Temperatur, Druck und Gemischzusammensetzung [23, 53, 54]. Unter Standardbedingungen beträgt die laminare Brenngeschwindigkeit für eine Wasserstoff-Luft-Gemisch je nach Gemischzusammensetzung wenige Zentimeter pro Sekunde bis maximal drei Meter pro Sekunde. Das Maximum liegt im überstöchiometrischen Bereich (40 bis 45 % H_2), wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist.

Eine ebene Flammenfront ist an sich sehr instabil. Durch hydrodynamische und diffusive Instabilitäten, die in Ciccarelli und Dorofeev [15] näher beschrieben sind, wird die Flammenfront gefaltet. Dies führt zu einer Zunahme der Flammenoberfläche und somit zu einer Zunahme der Flammengeschwindigkeit. Diese Veränderung oder Störung bewirkt, dass eine Druckwelle in das vor der Flammenfront befindliche Frischgas gesendet wird. Schwache Druckwellen breiten sich hierbei immer mit der lokalen Schallgeschwindigkeit aus. Durch sie wird das Frischgas vorkomprimiert und bewirkt eine Erwärmung der Reaktanden. Dadurch steigt die Verbrennungstemperatur und damit auch die Brenngeschwindigkeit an. Die Expansionsströmung generiert Turbulenz

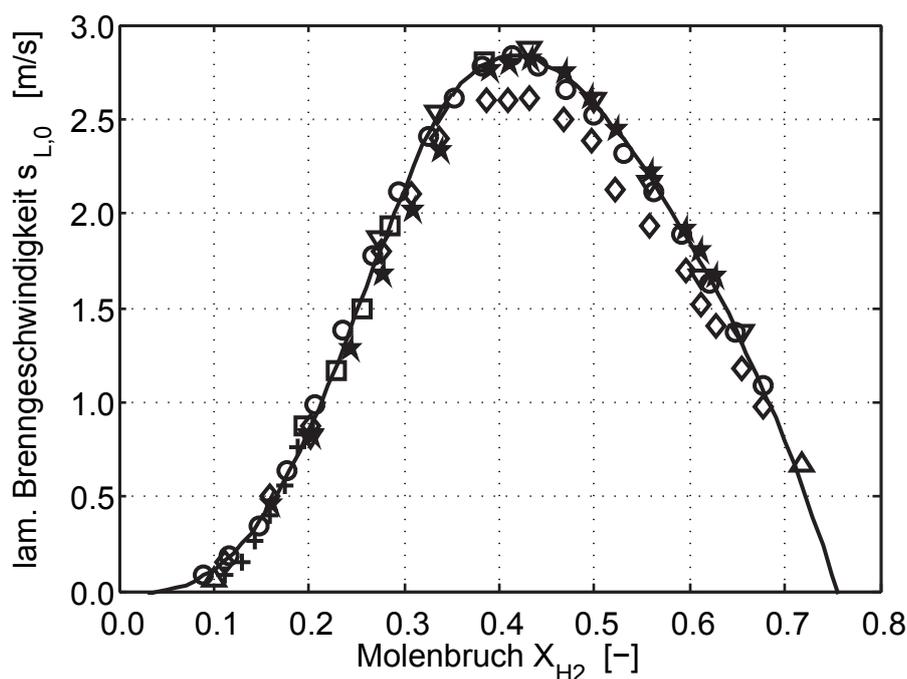


Abbildung 2.4: Laminare Brenngeschwindigkeit von Wasserstoff-Luft-Flammen bei Standardbedingungen. Die experimentellen Ergebnisse stammen aus Aung et al. [3, 4] (\diamond), Dowdy et al. [22] (\circ), Karpov et al. [49] (\triangle), Kwon und Faeth [58] (∇), Tse et al. [77] (\star), Vagelopoulos et al. [78] ($+$) und Wu und Law [85] (\square). Zusammenstellung nach Konnov [53], aufbereitet von Ettner [29].

im Frischgas. Die Turbulenz wiederum bewirkt eine Steigerung der Brenngeschwindigkeit [1, 12].

Durch gasdynamische und fluiddynamische Effekte kommt es zu einem Umschlag von der laminaren in die turbulente Flammenausbreitung. Die Turbulenz führt an der Flammenfront zu einem verbesserten Wärme- und Stofftransport und bewirkt eine weitere Faltung der Flamme und somit eine weitere Erhöhung der Brenngeschwindigkeit. Die Turbulenzintensität im Frischgas sowie an der Flammenfront nimmt durch Instabilitäten, der Expansionsströmung und in besonderem Maße durch in den Kanal eingebaute Hindernisse zu [1, 8, 12]. Durch die kontinuierliche Vorkompression des Frischgases kommt es zu einem Auflaufen der von der Flamme generierten Druckwellen und es bildet sich ein Stoß. Der Stoß bewirkt eine weitere Erhöhung der Brenngeschwindigkeit. Exakt dieser gas- und fluiddynamische Rückkopplungsmechanismus ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

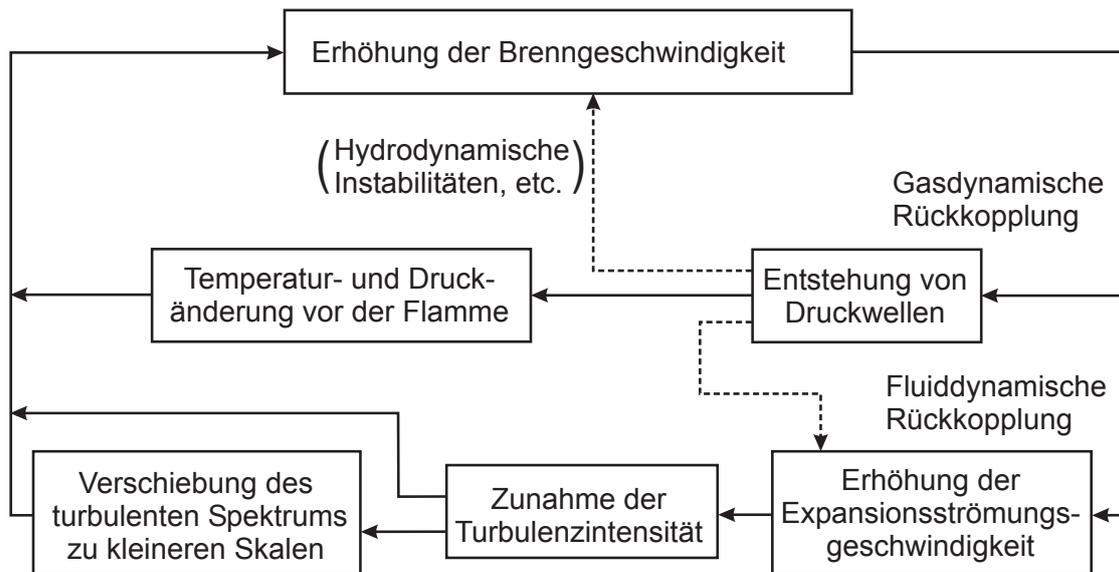


Abbildung 2.5: Rückkopplungsmechanismus zur Beschreibung der Flammenbeschleunigung [27].

In dieser Phase der Flammenbeschleunigung dominiert der Stoß die Flammenausbreitung. Die maximal mögliche Ausbreitungsgeschwindigkeit ist erreicht, wenn das System Stoß-Flamme auf die Schallgeschwindigkeit der Produkte einer isobaren Verbrennung beschleunigt wurde (choking regime). Dies entspricht der CJ-Deflagration (s. Abb. 2.3).

2.4 Detonation

Bei der Detonation wird das Gemisch durch einen Verdichtungsstoß, der der Reaktionszone vorausläuft, gezündet. Allerdings ist die Detonation kein eindimensionales Phänomen, wie aus Abbildung 2.6 ersichtlich ist. Flammenfront und Stoßwelle sind durch ein System von Hauptstoß und Transversalwellen eng miteinander gekoppelt. Die Transversalwellen tragen zur Stabilität der Detonationsfront bei, indem sie die Störung in der Detonationsfront ausgleichen. Eine ausführliche Diskussion der Stoßstruktur und deren Ausbreitung findet sich in der Arbeit von Austin [5].

Abbildung 2.7 zeigt die schematische Darstellung der Detonationsfront in einem Explosionsrohr mit rechteckigem Querschnitt, die qualitativ gut mit den Ergebnissen einer numerischen Berechnung in einem quadratischen Rohr übereinstimmen [21]. Das Stoßsystem kann experimentell durch Rußschrie-

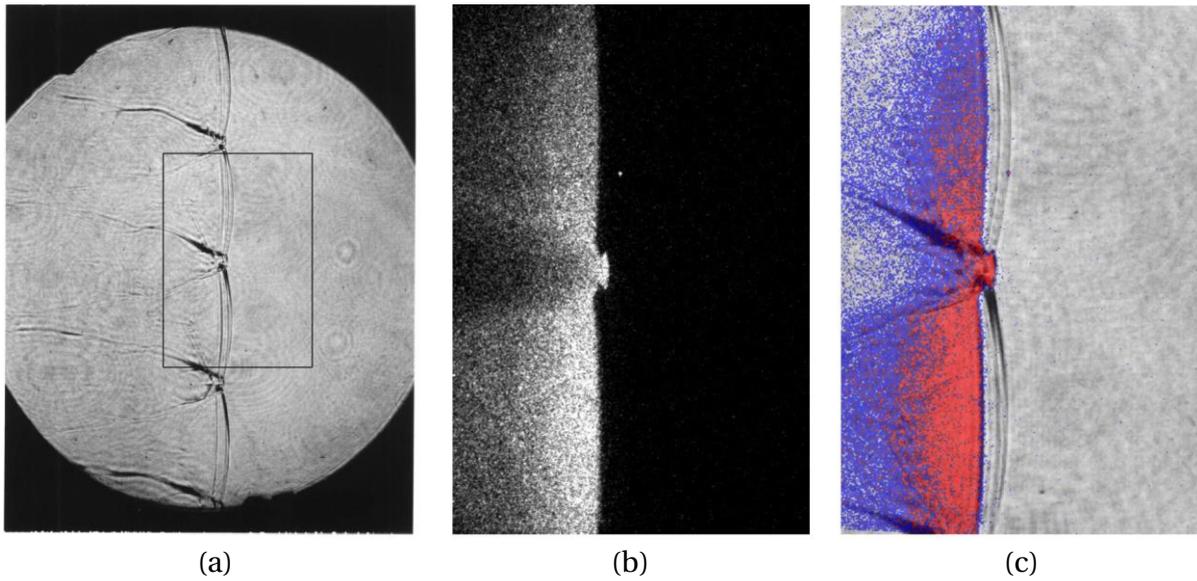


Abbildung 2.6: Aufnahmen einer Detonationsfront in einem engen Kanal [5]. Bild (a) zeigt eine Schlierenaufnahme, in der sich die Detonationsfront nach rechts ausbreitet. Der eingezeichnete Rahmen zeigt den Ort der dazugehörigen OH-Chemilumineszenzaufnahme (Bild (b)). In Bild (c) ist die Fluoreszenzaufnahme über die Schlierenaufnahme gelegt.

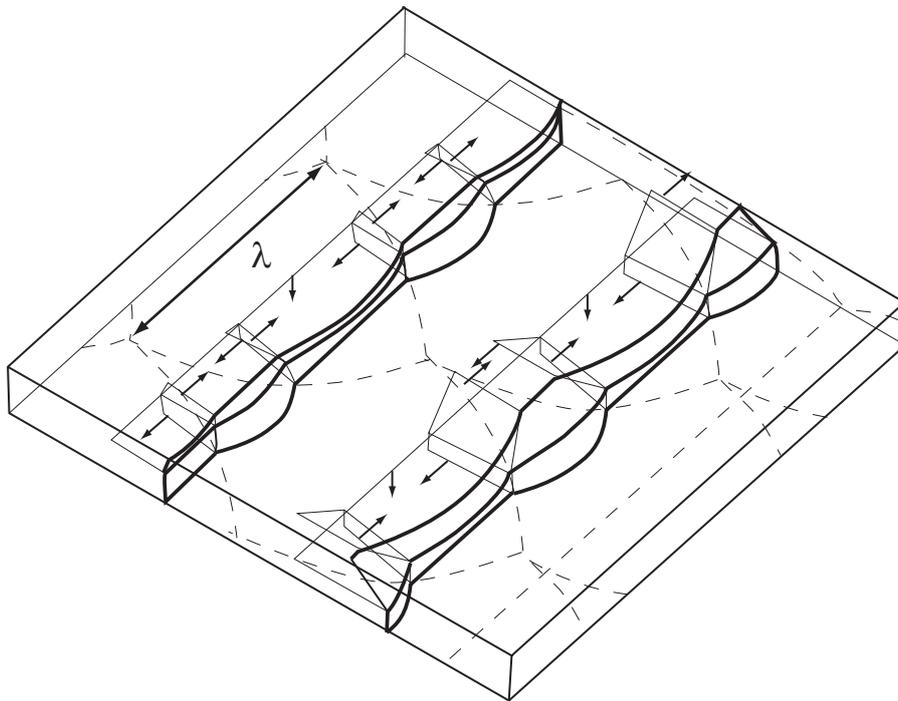


Abbildung 2.7: Schematisches Darstellung der Detonationsfront in einem rechteckigen Kanal sowie Bestimmung der Detonationszellgröße [5].

be sichtbar gemacht werden, welche die dominanten Moden der Druckstörungen wiedergeben. Hierbei entstehen rautenförmige Muster, die Detonationszellen genannt werden. Das rautenförmigen Muster sowie das charakteristische Längenmaß dieses Musters, die Detonationszellweite λ , sind in Abbildung 2.7 auf der Unterseite des Kanals dargestellt. Die Detonationszellweite λ ist ein Maß für die Detonationsfähigkeit eines Gemisches. Je kleiner die Detonationszellweite, desto stärker ist die Detonationsneigung [18].

Untersuchungen zum Einfluss der Gemischzusammensetzung und der thermodynamischen Anfangsbedingungen auf die Detonationszellweite wurden von mehreren Forschungsgruppen durchgeführt [40, 41, 75]. Die Detonationszellweite ist unter anderem eine eindeutige Funktion des Mischungsverhältnisses (s. Abb. A.1 in Anh. A.2). Typische Werte von Detonationszellweiten reichen von 10 bis 1000 mm.

Eine Detonation kann durch eine direkte Initiierung oder einen DDT-Prozess herbeigeführt werden [15]. Eine direkte Initiierung wird durch eine starken Zünder, wie z. B. Sprengstoff oder Laserzündung, herbeigeführt, indem ein Stoß in dem Gemisch erzeugt wird, dessen Stärke für eine Selbstzündung des Gemischs ausreicht (Shock-to-Detonation Transition, SDT). Die hierfür benötigte Initialenergie ist abhängig von Gemisch (Art und Zusammensetzung) und Anfangszustand (Druck und Temperatur) [61]. Wird das Gemisch mit einer energiearmen Zündquelle gezündet, kann die Flamme aufgrund von Instabilitäten und Turbulenz beschleunigt werden und durch eine DDT in eine Detonation übergehen. In dieser Arbeit wird nur diese Art der Detonationsinitiierung untersucht, da die SDT für Unfallszenarien kaum relevant ist.

2.5 Deflagrations-Detonations-Transition

Der in Abbildung 2.5 bereits beschriebene Rückkopplungsmechanismus bildet eine Grundvoraussetzung für die DDT. Die Einleitung des DDT-Vorgangs erfordert dabei zunächst eine ausreichende Beschleunigung der Flamme, wodurch starke Druckstöße entstehen [13, 15] und lokal die Selbstzündtemperatur des Gemischs überschritten wird. Die Entstehung dieser starken Stöße kann auf zwei Arten erfolgen [13]:

1. Ein vorseilender Stoß, der selbst zu schwach ist, um die Reaktanden direkt zu zünden, wird an einer Wand reflektiert oder auf einen Punkt fokussiert (Stoßfokussierung). Dadurch entsteht ein ausreichend starker Stoß, der das Gemisch zünden kann [74]. Es kommt zur Bildung einer Detonationsfront, die sich in das noch unverbrannte Gemisch ausbreitet. Diese Detonationsinitiierung wird nach Breitung et al. [13] als starke Lösung bezeichnet.
2. Unter einer schwachen Lösung wird ein DDT-Prozess verstanden, der aufgrund von einem der folgenden Mechanismen in Gang gebracht wird: Flammenwechselwirkung mit einer Druckwelle bzw. der Turbulenz der Strömung [12, 61, 73] oder Wiederzündung von zuvor gequenchten Radikalen [48].

Ergebnisse bisheriger Arbeiten

Der Übergang von der Deflagration in die Detonation wird seit mehreren Jahrzehnten intensiv untersucht. Ciccarelli und Dorofeev [15] haben versucht, die wichtigsten Ergebnisse zusammenzufassen. Da die DDT ein komplexer Vorgang ist, der von vielen Einflussparametern wie die Gemischzusammensetzung, Reaktion, Turbulenz und den geometrischen Randbedingungen abhängt, existiert auch heute noch immer kein Ansatz zur Vorhersage von DDT für eine gegebene Konfiguration (Gemisch und Geometrie). Anhand vorhandener Messergebnisse wurden empirische Kriterien für eine konservative Vorhersage des Flammenausbreitungsregimes (langsame oder schnelle Flamme, Detonation) hergeleitet, damit eine Gefahrenbeurteilung durchgeführt werden kann. Folgende Kriterien geben die Voraussetzungen zum Erreichen der

angegeben Flammenregimes an. Sie stellen eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung dar [13, 18]:

1. Notwendige Voraussetzung für die Flammenbeschleunigung:

Kuznetsov et al. [56] haben mit dem Expansionsverhältnis σ ein Kriterium hergeleitet, das allein aufgrund von chemischen Größen vorher sagt, ob eine Flamme über die Schallgeschwindigkeiten der Reaktanden beschleunigt wird. Das Expansionsverhältnis ist das Verhältnis der spezifischen Volumina von isobar verbrannten und unverbrannten Gasgemisch:

$$\sigma = \frac{v_1}{v_0} = \frac{\rho_0}{\rho_1} . \quad (2.4)$$

Das sogenannte σ -Kriterium besagt, dass eine für DDT nötige Flammenbeschleunigung nur eintreten kann, wenn das Expansionsverhältnis einen kritischen Wert überschreitet:

$$\sigma > \sigma_{krit} . \quad (2.5)$$

Das kritische Expansionsverhältnis beträgt für ein Wasserstoff-Luft-Gemisch unter Normalbedingungen $\sigma_{krit} = 3,75$. Dies entspricht einem Gemisch mit einem Wasserstoffanteil von 10,8 % H_2 (s. Tab. A.1 in Anhang A.1). Näheres hierzu sowie zu den Einflussfaktoren auf das Expansionsverhältnis kann in Dorofeev et al. [20] nachgelesen werden.

2. Notwendige Voraussetzung für den Eintritt einer DDT:

Dorofeev et al. [18] geben in Abhängigkeit von der Detonationszellweite λ und einem charakteristischen Längenmaß L an, ob DDT eintreten wird. Ausgedrückt wird dies durch das 7λ -Kriterium:

$$L > 7\lambda . \quad (2.6)$$

Für geschlossene Kanäle mit regelmäßigen Hindernissen wurde von Dorofeev et al. [18] für das charakteristische Längenmaß eine Korrelation entwickelt, in die die Kanalhöhe H , die Spalthöhe zwischen den Hindernissen d und der Hindernisabstand S einfließen:

$$L = \frac{(H + S/2)}{1 - d/H} . \quad (2.7)$$

Abbildung 2.8 verdeutlicht das charakteristische Längenmaß L .

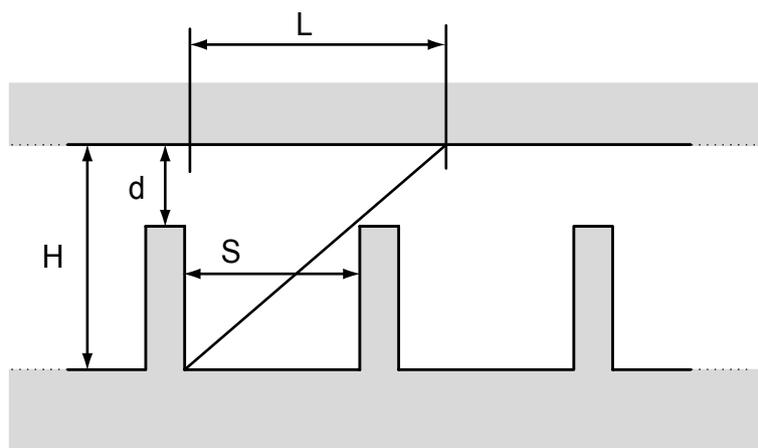


Abbildung 2.8: Charakteristisches Längenmaß L für das 7λ -Kriterium in blockierten Kanälen [18].

Ist das charakteristische Längenmaß L einer Konfiguration bekannt, so kann anhand des 7λ -Kriteriums vorhergesagt werden, mit welcher Gemischzusammensetzung – die Detonationszellweite ist u. a. eine Funktion der Gemischzusammensetzung, s. Kap. A.2) – ein DDT möglich ist (s. Abb. 2.9). Das 7λ -Kriterium hat allerdings eine gewisse Ungenauigkeit, die Dorofeev et al. [18] mit 30% angeben. Der Bereich, in dem DDT eintritt, ist in Abbildung 2.9 durch zwei gestrichelte Linien eingegrenzt. Die Angabe einer Ungenauigkeit ist notwendig, da die Detonationszellweite für ein Gemisch schwierig zu bestimmen ist [41]. Desweiteren ist die Bestimmung des charakteristischen Längenmaßes in komplexen Anlagen schwierig. Hier müssen zum Teil Vereinfachungen gemacht werden.

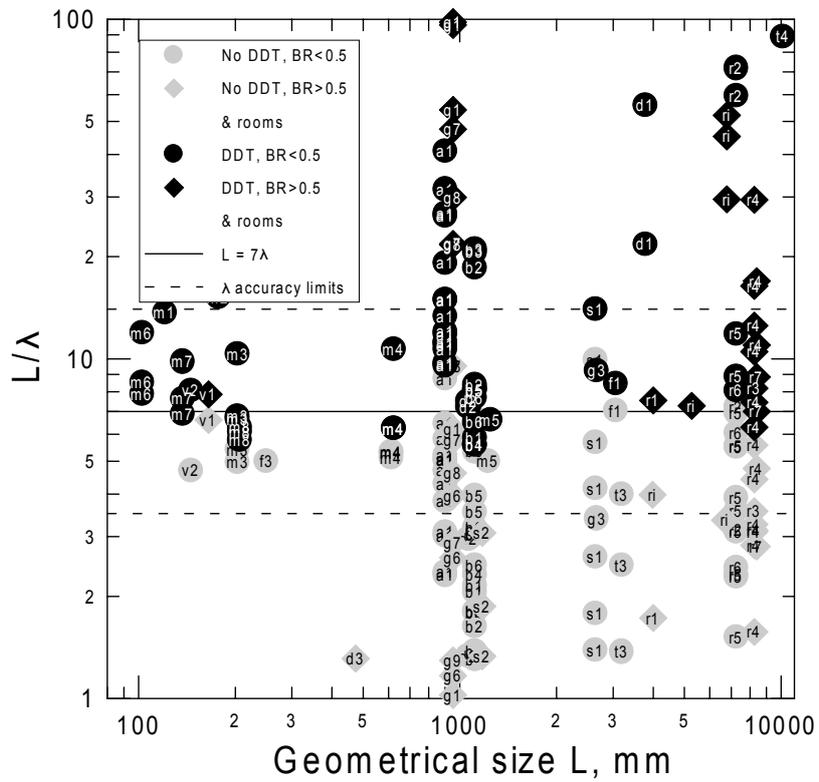


Abbildung 2.9: Zusammenfassung der Versuche für die Bestimmung des 7λ -Kriteriums [18].

3 Gemischaufbereitung

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss von Konzentrationsgradienten in einem Wasserstoff-Luft-Gemisch auf die Flammenausbreitung zu bestimmen. Dazu war es notwendig, einen Mechanismus für die Gemischaufbereitung zu entwickeln. Dieser muss sowohl homogene Mischungen als auch Mischungen mit vertikalem Konzentrationsgradienten mit unterschiedlicher Stärke in einem Explosionskanal erzeugen können. In diesem Kapitel wird zunächst das Prinzip der Gemischaufbereitung beschrieben. Anschließend werden die mit einem Eindüsungsmodell gewonnenen Ergebnisse vorgestellt. Die Voruntersuchung mit einem Eindüsungsmodell war notwendig, um die Funktionsweise des Eindüsungsmechanismus zu überprüfen sowie den zeitlichen Abbau des Konzentrationsgradienten zu ermitteln. Nur durch Kenntnis des Profils des Konzentrationsgradienten zum Zündzeitpunkt ist eine differenzierte Auswertung der Explosionsversuche in Kapitel 6 möglich.

3.1 Prinzip der Gradientenbildung

Eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung eines Eindüsungsmechanismus bestand darin, in der Hauptkammer der GraVent-Anlage Gemische mit einem fest einstellbaren Konzentrationsgradienten zu erzeugen. Der Konzentrationsgradient musste folgende Anforderungen erfüllen:

- Gradient nur in vertikaler Richtung
- kein Gradient in horizontaler Richtung
- einstellbar
- reproduzierbar

Stoffdiffusion

Existiert ein Gemisch mit Konzentrationsgradient, so wird durch Stoffdiffusion dieser Gradient abgebaut. Eine quantitative Beschreibung der Stoffdiffusion hat Fick bereits im Jahre 1855 entwickelt [34]. Er erkannte, dass der Diffusionsfluss j_A proportional zum Konzentrationsgradienten und in Richtung abnehmender Konzentration gerichtet ist. Für ein binäres Gemisch mit den Komponenten A und B gilt

$$j_A = -D_{AB} \nabla c_A \quad \underbrace{\left(= -D_{AB} \left(\frac{dc_A}{dz} \right) \right)}_{\text{eindimensional}} . \quad (3.1)$$

Hierbei ist D_{AB} die Diffusionskonstante und c_A die Stoffmengenkonzentration. Mit der Gleichung für die Massenerhaltung

$$\nabla j_A = -\frac{\partial c_A}{\partial t} \quad (3.2)$$

kann der Fluss j in Gleichung (3.1) eliminiert werden und man erhält das zweite Ficksche Gesetz [34]:

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} = \nabla (D_{AB} \nabla c_A) \quad \underbrace{\left(= D_{AB} \frac{\partial^2}{\partial z^2} c_A \right)}_{\text{eindimensional}} . \quad (3.3)$$

Mithilfe der Gleichung (3.3) wird für den eindimensionalen Fall der instationäre Vorgang des Gradientenabbaus berechnet. In Abbildung 3.1 wurde die Berechnung beispielhaft für ein Wasserstoff-Luft-Gemisch mit einem mittleren Wasserstoffanteil von 20 % durchgeführt. Die Diffusionskonstante wurde als konstant zu $D_{H_2, Luft} = 0,75 \text{ cm}^2/\text{s}$ [31] angenommen. Für die Berechnung wurde zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ ein Sprung in der Anfangsverteilung angenommen. Es ist zu erkennen, dass Konzentrationsunterschiede schnell abgebaut werden. Nach $t = 60 \text{ s}$ ist kein Konzentrationsunterschied mehr erkennbar, d.h. es liegt ein homogenes Gemisch vor.

Eindüsungsmethode

Ergänzend zur analytischen Untersuchung wurden numerischen Berechnungen von Ettner et al. [31] durchgeführt. Diese führten letztlich zu einer Eindüsungsmethode, bei der Wasserstoff durch gleichmäßig in der Deckplatte ange-

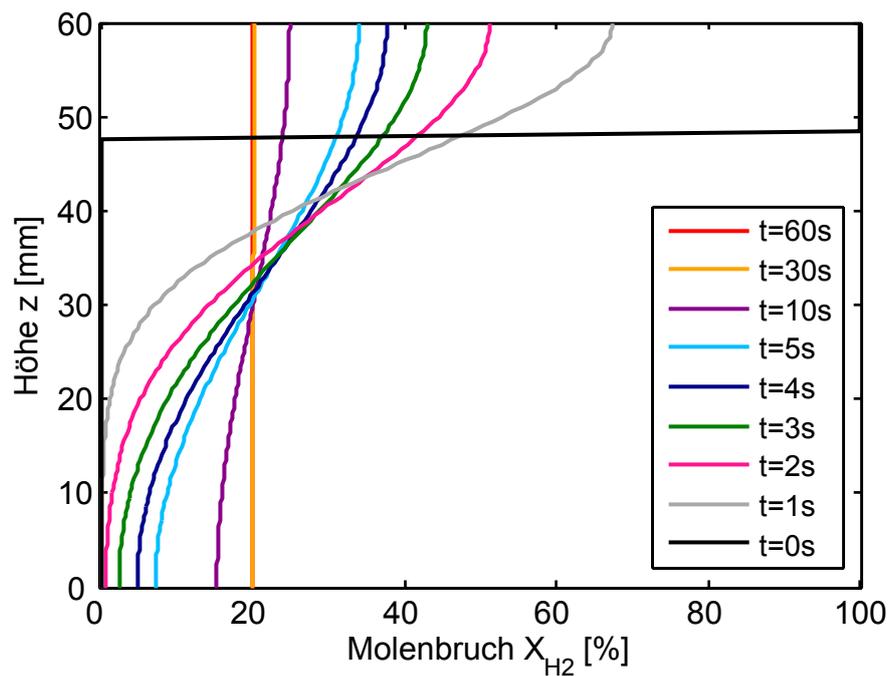


Abbildung 3.1: Ergebnis der 1D-Berechnung des Gradientenabbaus. Der mittlere Wasserstoffanteil beträgt 20%. Die Diffusionskonstante beträgt $D_{H_2, Luft} = 0,75 \text{ cm}^2/\text{s}$ [31]. Die Legende gibt die Zeitdauer des Diffusionsvorgangs an.

ordnete Eindüsungsbohrungen in die mit Luft gefüllten Versuchskammer zugeführt wird. Der vertikal eingedüster Wasserstoff wird durch eine Prallplatte, realisiert durch eine Aussparung im Hindernis bzw. einen Deckplatteneinsatz, in horizontaler Richtung umgelenkt (s. Abb. 3.2).

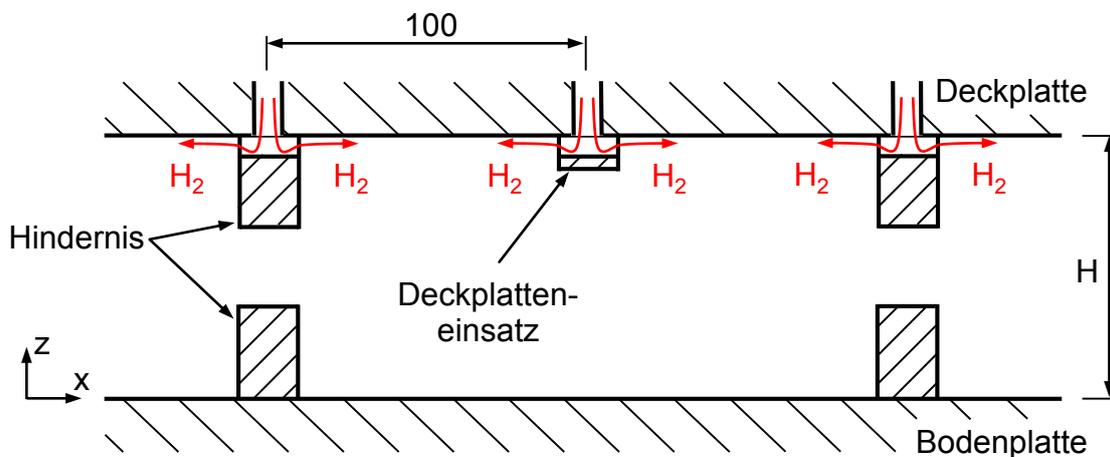


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Wasserstoffeindüsung.

Nach Ende der Wasserstoffeindüsung wird das Gemisch sich selbst überlassen, wobei sich der unmittelbar nach der Eindüsung vorhandene Konzentrationsgradient durch Diffusion allmählich abbaut. Das heißt, dass nach einer ausreichend langen Wartezeit ein vollständig homogenes Gemisch vorliegt. Das Gemisch kann zu einem beliebigen Zeitpunkt – auch schon während des Gradientenabbaus – gezündet werden. Durch die Wartezeit t_w kann somit die Stärke des vertikalen Konzentrationsgradienten zum Zeitpunkt der Zündung eingestellt werden. Die Wartezeit entspricht der Zeitdauer zwischen Eindüsungsende und Zündzeitpunkt.

3.2 Eindüsumgsmodell

Vor Fertigung des eigentlichen Versuchskanals wurde an einem Versuchsmodell die Funktionsweise des Eindüsumgsmechanismus überprüft. Hierzu wurden mit dem in Abbildung 3.3 dargestellten Versuchsaufbau qualitative und quantitative Messungen durchgeführt. Der Versuchsaufbau besteht aus dem Eindüsumgsmodell und einer Gaszufuhreinheit. Das Eindüsumgsmodell entspricht hierbei in Höhe und Breite den Maßen des Explosionskanals der GraVent-Anlage ($H = 60 \text{ mm}$, $B = 300 \text{ mm}$, s. Kap. 4). Die Gaszufuhreinheit besteht aus einem Magnetventil, einer Düse (Drossel), einem Endverteiler und neun Edelstahlrohren. Die Rohrleitungen stellen hierbei die Verbindung

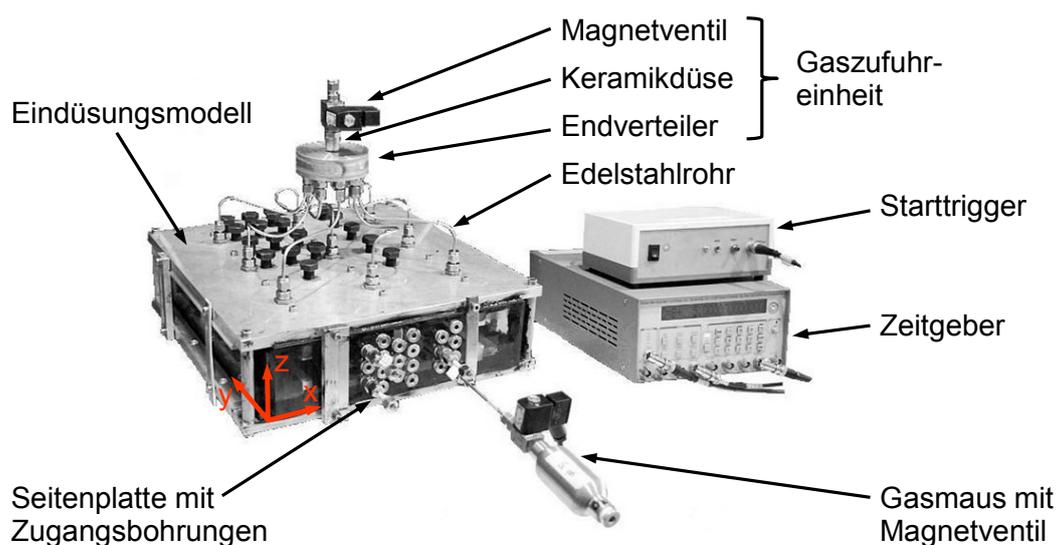


Abbildung 3.3: Messaufbau mit Eindüsumgsmodell.

vom Endverteiler zu den neun Eindüsungsbohrungen in der Deckplatte des Eindüsungsmodells her (s. Abb. C.2 in Anh. C). Um eine möglichst gleichmäßige Schichtung zu gewährleisten, wurden die Eindüsungsbohrungen eng zueinander angeordnet. Der Abstand von einer Eindüsungsbohrung zur anderen beträgt 100 mm, so dass über die Kanalbreite von $B = 300$ mm insgesamt drei Bohrungen vorhanden sind (s. Abb. 3.4).

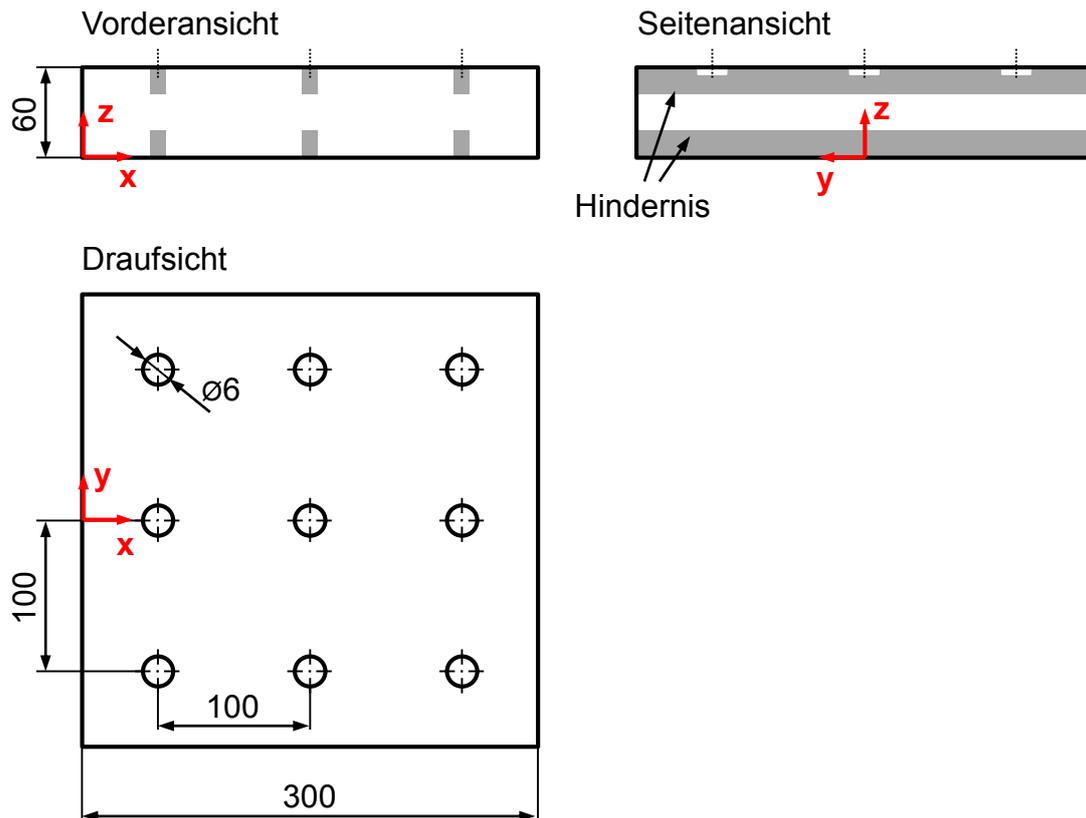


Abbildung 3.4: Anordnung der Eindüsungsbohrungen.

Mit dem Magnetventil¹ in der Gaszufuhreinheit wird das Gas einer Düse² zugeführt. Im Endverteiler teilt sich der Massenstrom auf und das Gas wird durch die Eindüsungsbohrungen in die zuvor nur mit Luft gefüllte Versuchskammer eingebracht. Anschließend bildet sich, wie zuvor beschrieben, ein vertikaler Konzentrationsgradient.

Die gewünschte Gasmenge kann über eine definierte Öffnungszeit des Magnetventils in Abhängigkeit vom Druckunterschied zwischen Zuleitung und

¹ Bürkert Typ 6011. Die Schaltzeiten für das Öffnen und Schließen des Ventils betragen laut Herstellerangaben ca. 10 ms.

² Lechler Typ 2TR.345.C6: Hohlkegeldüse mit Keramikeinsatz. Der Düsendurchmesser beträgt $D = 0,9$ mm.

Versuchskammer eingestellt werden. Das Magnetventil wurde bei den Versuchen mit einem Zeitgeber³ gesteuert. Die Eindüsungsdauer betrug für alle untersuchten Konzentrationsbereiche eine halbe bis maximal eine Sekunde. Die gesamte eingedüste Gasmenge wurde mithilfe der Partialdruckmethode ermittelt. An dieser Stelle sei erwähnt, dass für den Großteil der Versuche mit dem Eindüsumodell aus Sicherheitsgründen Helium statt Wasserstoff eingedüst wurde. In Kapitel 3.4.3 wird noch gezeigt, dass dies nur eine geringe Auswirkung auf das Ergebnis hat.

In Abbildung 3.3 ist eine Seitenplatte mit 21 Zugangsbohrungen zu sehen. Diese Seitenplatte ermöglicht die Entnahme von Gasproben aus der Versuchskammer und wurde zur Bestimmung des Gradientenverlaufs (Kap. 3.4) benötigt. Für die zuvor durchgeführten Versuche mit optischer Messtechnik (Kap. 3.3) wird anstatt dieser Seitenplatte eine Quarzglasscheibe verwendet.

3.3 Visualisierung des Eindüsumvorgangs

Um einen genaueren Einblick in den Eindüsumvorgang und den Abbau des Mischungsgradienten zu erhalten, wurden optische Untersuchungen mit dem Eindüsummodell durchgeführt. Hierbei kam das Farbschlierenverfahren zum Einsatz. Mit diesem Messverfahren können Dichtegradienten innerhalb des Gemischs sichtbar gemacht werden [55].

Abbildung 3.5 zeigt die Aufnahmesequenz eines Eindüsumvorgangs (Eindüsum von Helium) mit anschließendem Gradientenabbau. Die Eindüsum beginnt zum Zeitpunkt $t = 0,0$ s und endet bei $t = 0,8$ s. Das Einströmen des Gases ist besonders gut zum Zeitpunkt $t = 0,1$ s erkennbar. Hier strömt das Helium aus den Aussparungen der Hindernisse in horizontaler Richtung in das Eindüsummodell hinein. Zum Zeitpunkt $t = 0,3$ s treffen sich die aufeinander zuströmenden Fronten der Heliumschwaden und breiten sich anschließend nach unten hin aus. Nach Ende der Eindüsum ($t = 0,8$ s) baut sich der Gradient allmählich ab. Hierbei verringert sich die Stärke des Dichtegradienten – erkennbar an der Farbcodierung – nach unten hin immer mehr. Nach ca. 1,5 s bildet sich bereits ein Gemisch mit einer sehr gleichmäßigen, horizontalen Schichtung. Über den quantitativen Verlauf des vertikalen Konzen-

³ Fa. Stanford Research Systems, Modell DG535.

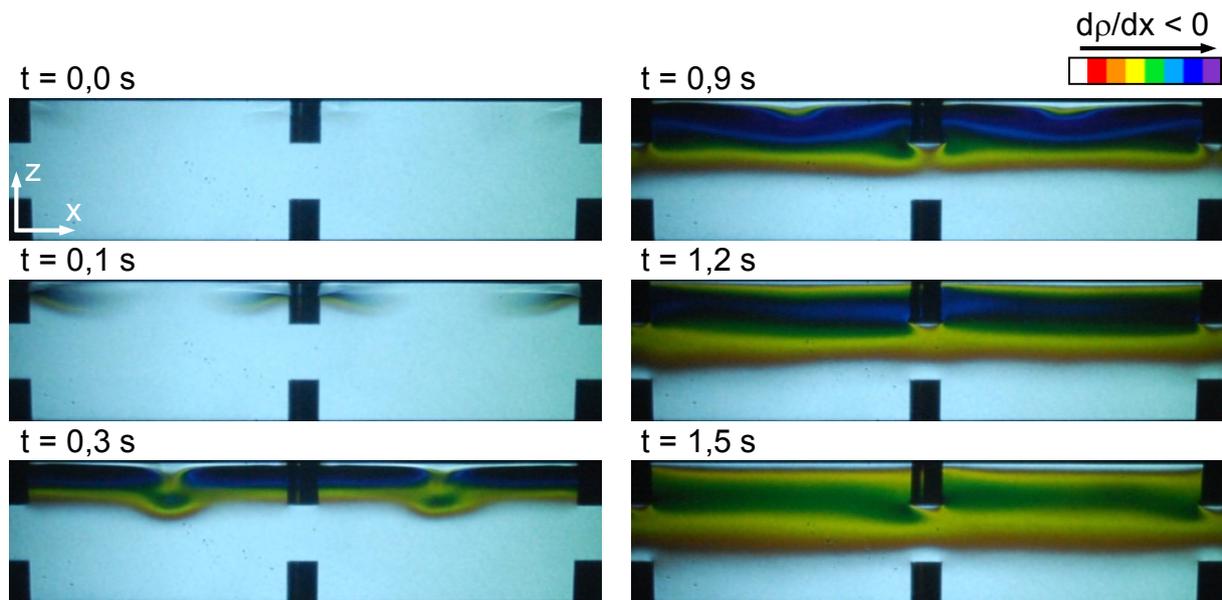


Abbildung 3.5: Aufnahmesequenz des Gradientenabbaus mittels Farbschlierenverfahren.
Die Eindüsung von Helium beginnt zum Zeitpunkt $t = 0,0$ s und dauert 0,8 s.

trationsgradienten kann aus den Farbschlierenaufnahmen keine Aussage getroffen werden. Nach ca. 15 s ist keine Änderung des Dichtegradienten mehr erkennbar. Dies bedeutet jedoch nicht, dass zu diesem Zeitpunkt der vertikale Konzentrationsgradient bereits vollständig abgebaut ist. Versuche mit einem um 90° um die z -Achse gedrehten Eindüsungsmodell zeigen ebenfalls, dass nach einer Zeit von $t \leq 1,5$ s eine gleichmäßige, horizontale Schichtung vorliegt.

3.4 Quantitative Bestimmung des Gradientenverlaufs

Für die quantitative Bestimmung des Gradientenverlaufs wurden an unterschiedlichen Stellen im Eindüsungsmodell Gasproben entnommen, welche anschließend mit einem Gaschromatographen (GC) analysiert wurden. Für die Gasprobenentnahme sind in einer Seitenplatte des Eindüsungsmodells insgesamt 21 Zugangsbohrungen an verschiedenen Positionen (x - und z -Richtung) angeordnet (s. Abb. 3.3). Die Sonden (Edelstahlrohre mit $D_i = 1,6$ mm, mit denen das Gas in die Gasmäuse gezogen wird) können zudem unterschiedlich tief in das Eindüsungsmodell hinein reichen (y -Richtung). Dadurch ergeben sich ausreichend Stützstellen für die Bestimmung des vertika-

len Konzentrationsgradienten sowie für den Nachweis einer gleichmäßigen, horizontalen Verteilung.

3.4.1 Versuchsablauf

In das Eindüsenmodell wird Helium oder Wasserstoff eingedüst und es bildet sich ein vertikaler Konzentrationsgradient. Nach einer definierten Wartezeit werden gleichzeitig sieben Gasproben entnommen. Die Probenentnahme erfolgt durch das Öffnen der Magnetventile an den Gasmäusen. Hierbei wird das lokal an der Entnahmestelle vorliegende Gasgemisch in die zuvor evakuierten Gasmäuse angesaugt. Um den Versuchsablauf zu steuern, wird auf den Zeitgeber zurückgegriffen, welcher das Magnetventil der Gaszufuhr steuert.

Für die Ermittlung der Gaszusammensetzung an der Entnahmestelle ist es wichtig, dass bei der Gasprobenentnahme nur eine kleine Gasmenge entnommen wird, damit möglichst wenig Gas aus der darüber- bzw. darunterliegenden Schicht angesaugt wird. Aus diesem Grund wurden einerseits Gasmäuse mit geringem Volumen (50 cm^3) verwendet, andererseits die Entnahmedauer kurz gehalten ($t = 0,5 \text{ s}$). Die Konsequenz ist, dass der Druck in der Gasmaus nach Ende der Gasprobenentnahme unterhalb des Umgebungsdrucks liegt. Da für die anschließende Gasanalyse mit dem Gaschromatographen ein Überdruck in der Gasmaus vorliegen muss, wird der Druck in der Gasmaus durch Zugabe von Argon auf $p_4 \approx 1,5 \text{ bar}$ (absolut) erhöht. Das Gas aus der Gasmaus kann dadurch in den Gaschromatographen strömen. Durch die Verdünnung der Gasprobe mit Argon muss im Anschluss auf die tatsächlich entnommene Gaszusammensetzung zurückgerechnet werden. Die Vorrichtung und der Ablauf für die Aufbereitung der Gasprobe ist in Anhang B.1 beschrieben.

Der Versuchsablauf für die quantitative Bestimmung des Gradientenverlaufs erfolgt in acht Schritten:

1. Gasmäuse evakuieren
2. Schließen der Spülventile
3. Montage Gasmäuse an Seitenplatte

4. Eindüsung von Helium bzw. Wasserstoff
5. Probeentnahme nach definierter Wartezeit
6. Spülung des Eindüsungsmodells mit Druckluft (Öffnen der Spülventile)
7. Aufbereitung aller Gasproben mit Argon
8. Analyse der Gasprobe (Gaschromatographie)
9. Berechnung der Gaszusammensetzung an der Probeentnahmestelle

Mit jeder Versuchskonfiguration (mittlerer Wasserstoffanteil und Wartezeit bleiben identisch) wurden mindestens drei Versuche durchgeführt, um die Wiederholbarkeit der Versuche und somit die Robustheit des Eindüsungsmechanismus zu bestätigen.

3.4.2 Gaschromatographie

Die Analyse der Gasproben erfolgt durch die Gaschromatographie. Bei der Gaschromatographie wird eine Mischung in einer Trennsäule in die einzelnen Komponenten getrennt. Die Komponenten werden zeitlich versetzt einem Detektor zugeführt. Im Gaschromatographen der Firma Perkin Elmer (Typ Autosys XL) ist ein Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) eingebaut. Die Funktionsweise des Wärmeleitfähigkeitsdetektors ist in [70] näher beschrieben. Mit diesem Detektor wird die jeweilige Gasmenge der Komponenten N_2 , O_2 , H_2 und He bestimmt. Es ist theoretisch möglich, die einzelnen Gasanteile einer Gasprobe zu ermitteln. Es hat sich gezeigt, dass die Bestimmung der einzelnen Gasmengen von N_2 , O_2 und He bzw. H_2 zum Teil dadurch erschwert wird, dass die Signalverläufe nicht aufgelöst werden können (Signale von O_2 und He laufen ineinander) bzw. das Signal einer Komponente in Sättigung geht. Aus diesem Grund wird für alle Gasproben jeweils nur der Stickstoffanteil ermittelt. Mittels der Partialdruckmethode können unter Berücksichtigung der zusätzlichen Argon-Befüllung der Gasprobe die gewünschten Anteile der anderen Komponenten berechnet werden (s. Anh. B).

3.4.3 Ergebnis der quantitativen Messungen

Zur Bestimmung des quantitativen Gradientenverlaufs wird Helium statt Wasserstoff in das Eindüsungmodell eingedüst. In Tabelle 3.1 sind die relevanten Kennwerte von Wasserstoff und Helium aufgeführt, wobei der dominierende Parameter für den Gradientenabbau die Diffusionskonstante ist.

	Wasserstoff H ₂	Helium He
Dichte ρ [kg/m ³]	$83,8 \times 10^{-3}$	$166,4 \times 10^{-3}$
Molmasse M [g/mol]	2,02	4,00
Diffusionskoeffizient D [m ² /s]	$74,9 \times 10^{-6}$	$57,9 \times 10^{-6}$

Tabelle 3.1: Stoffwerte von Wasserstoff und Helium. Die angegebenen Diffusionskoeffizienten gelten jeweils in Kombination mit Luft. Alle Stoffwerte beziehen sich auf den Zustand $T = 293$ K und $p = 1,013$ bar [31, 46, 63, 84].

Vorversuche sollen aufzeigen, wie groß der Unterschied der Konzentrationsgradienten in Realität ist, wenn Helium statt Wasserstoff eingedüst wird. Abbildung 3.6 zeigt das Profil des vertikalen Konzentrationsgradienten mit Helium im Vergleich mit Wasserstoff (Wartezeit von $t_w = 3$ s). Mit dieser relativ kurzen Wartezeit ist ein Unterschied der Konzentrationsgradienten noch sehr

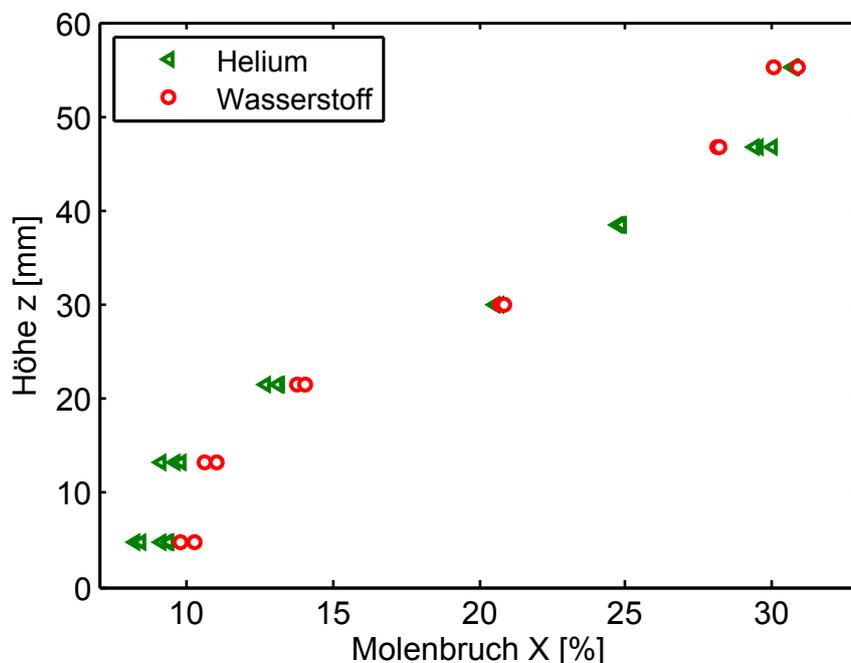


Abbildung 3.6: Experimentell ermittelter Konzentrationsverlauf von Wasserstoff und Helium. Der mittlere Wasserstoffanteil beträgt jeweils 20 %, die Wartezeit $t_w = 3$ s.

gut erkennbar. Der Wasserstoff- bzw. Heliumanteil zum Zeitpunkt der Gasprobenentnahme beträgt jeweils 20 % (gemittelt). Die Form der Konzentrationsprofile ist vergleichbar mit der aus der 1D-Berechnung, auch wenn die Absolutwerte von Experiment und analytischer Berechnung aufgrund der Vereinfachungen in der Rechnung (u.a. Konzentrationsverteilung zum Zeitpunkt t_0 stark vereinfacht, ruhendes Gemisch) abweichen (vgl. Abb. 3.6 mit Abb. 3.1). Wie zu erwarten, baut sich der Gradient in einem Wasserstoff-Luft-Gemisch aufgrund einer größeren Diffusionskonstante schneller ab (s. Gl. (3.1) und Tab. 3.1). Die Unterschiede der experimentell ermittelten Konzentrationswerte sind im unteren Bereich des Eindüsungsmodells am größten.

Die weiteren Versuche wurden mit Helium durchgeführt, wobei der mittlere Heliumanteil X_{He} (13,5 %, 20,0 %, 24,5 %, 30,0 % und 36,0 %) sowie die Wartezeit t_w (60 s, 30 s, 10 s, 7,5 s und 3 s) variiert wurde. Abbildung 3.7 zeigt die Messergebnisse mit 20,0 % He. Die Vielzahl von Punkten an einer Messstel-

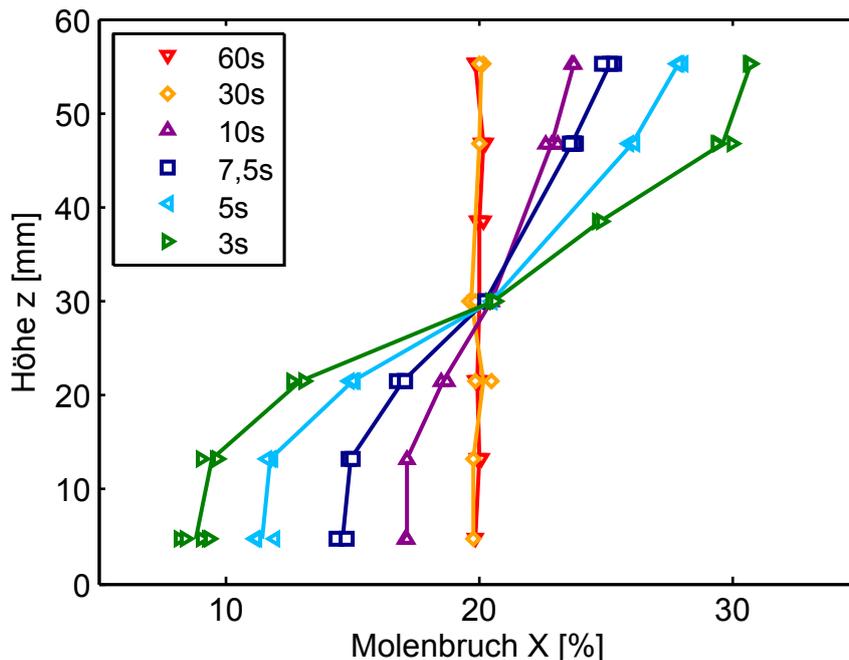


Abbildung 3.7: Zeitlicher Abbau des Konzentrationsgradienten. Die Wartezeit entspricht der Zeit zwischen Beginn der Eindüsung und der Gasprobeentnahme. Der globale Heliumanteil beträgt 20,0 %.

le rührt daher, dass bei jeder Höhenkoordinate (z -Achse) an mehreren Punkten innerhalb des Versuchsvolumens gemessen wurde (verschiedene x - und y -Koordinaten, s. Abb. 3.3). Die Messgenauigkeit des Gaschromatographen beträgt $\pm 0,5$ % (absolut).

Die Messergebnisse zeigen eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche. Aufgrund der geringen Abweichung der Messwerte für eine Höhenkoordinate kann die qualitative Erkenntnis aus dem Farbschlierenverfahren, dass nach $t_w = 3$ s bereits eine gleichmäßige, horizontale Schichtung vorliegt, bestätigt werden. Nach $t_w = 30$ s liegt im Eindüsungsmodell ein nahezu homogenes Gemisch vor. Die Ergebnisse der Versuche mit anderen Heliumgehalten sind in Abbildung B.3 in Anhang B.3 abgebildet.

Die durchgeführten Versuche bestätigen, dass mit diesem Eindüsungsmechanismus der vertikale Konzentrationsgradient im Versuchsvolumen in Abhängigkeit von der Wartezeit eingestellt werden kann. Je kürzer die Wartezeit ist, desto stärker ist der Gradient.

4 Versuchsanlage und Versuchsdurchführung

4.1 Gesamtaufbau

Für die Untersuchung der Flammenbeschleunigung und DDT in Gemischen mit Konzentrationsgradienten wurde eine neue Versuchsanlage konstruiert und aufgebaut. Hauptbestandteil der GraVent-Anlage ist der Explosionskanal. Abbildung 4.1 zeigt den schematischen Aufbau des Kanals. Der Kanal besteht aus einer Hauptkammer und einer Überströmkammer (s. Abb. 4.1 und Abb. 4.2). Die Hauptkammer hat eine Höhe von $H = 60$ mm, ist 300 mm breit und erstreckt sich über die gesamte Kanallänge. Die Überströmkammer, welcher sich unterhalb der Hauptkammer befindet, hat das 2,4-fache Volumen der Hauptkammer. Der Kanal wird auf beiden Seiten durch zwei Endplatten geschlossen.

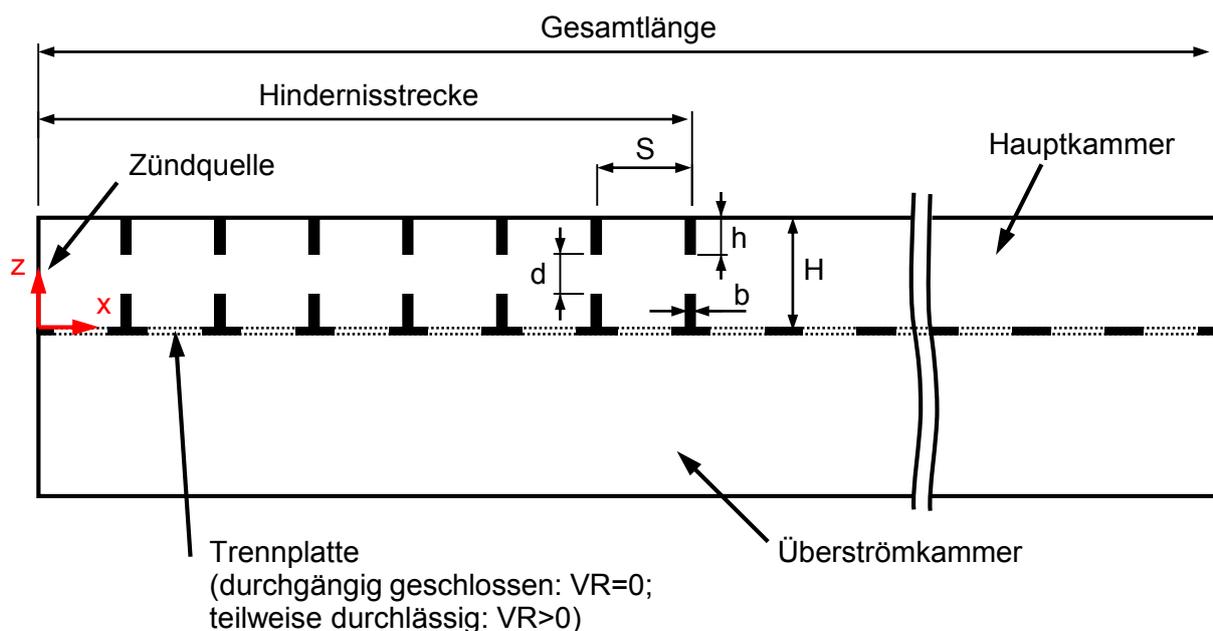


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Explosionskanals.

Im ersten Teil der Untersuchungen mit rein konventioneller Messtechnik wurde der Kanal aus sechs Segmenten, die jeweils eine Länge von 90 cm haben, zusammengesetzt. Die Gesamtlänge des Kanals betrug somit 5,4 m. Im zweiten Teil der Untersuchungen wurden zusätzlich auch optische Messverfahren eingesetzt (s. Kap. 5.2). Hierzu wurde der Kanal um ein 60 cm langes, optisch zugängliches Segment erweitert. Dieses konnte zwischen zwei beliebigen anderen Segmenten positioniert werden, sodass Untersuchungen an beliebigen Positionen durchgeführt werden konnten.

Jedes Segment besteht aus einem Unterteil aus Kugelgraphit (EN-GJS-400-18) und einer Deckplatte aus unlegiertem Baustahl (S355). Zwischen Hauptkammer und Überströmkammer befinden sich Trennplatten, die einen Einschluss des Gemisches in der Hauptkammer ermöglichen. Durch Austausch der Trennplatten mit teilweise offenen Platten können verschiedene Ventingraten, nämlich 10 %, 20 % oder 30 %, realisiert werden. Aus Festigkeitsgründen sind die Trennplatten von zusätzlichen Stützen unterbaut. Beide Enden des Kanals sind mit einer Endplatte verschlossen. Eine Ansicht des zusammgebauten Kanals ist in Abbildung 4.2 oben zu sehen, die einzelnen Einbauten sind in dem darunter angeordneten Bild zu erkennen.

In der Hauptkammer befindet sich im ersten Teil des Explosionskanals eine Hindernisstrecke (Abb. 4.1). Die Hindernisse sind Platten, die oben an der Deckplatte und unten an der Trennplatte befestigt sind. Die Hindernisse sind jeweils $b = 12$ mm dick und erstrecken sich über die ganze Kanalbreite (300 mm). Durch diese Anordnung ergibt sich ein Spalt zwischen den Hindernissen mit der Abmessung d . Die Hindernisse im Kanal ermöglichen Blockieraten von 30 % oder 60 % der Kanalquerschnittsfläche. Die Blockierrate BR ist dabei wie folgt definiert:

$$BR = \frac{\text{blockierte Querschnittsfläche}}{\text{gesamte Querschnittsfläche}} = 1 - \frac{d}{H} \quad . \quad (4.1)$$

Bei einer Blockierrate von 30 % beträgt die Hindernishöhe $h = 9$ mm, bei $BR = 60$ % 18 mm. Die Hindernisse werden in Abständen von $S = 100$ mm oder 300 mm zueinander platziert. Die Anordnung erfolgt dabei immer so, dass das letzte Hindernis in einem Abstand von $x = 2,05$ m von der Zündquelle platziert ist. Der restliche Teil der Hauptkammer ($x > 2,05$ m) ist nahe-

zu glatt¹. Somit kann die detonative Ausbreitung auch in einen unblockierten Kanalabschnitt untersucht werden.

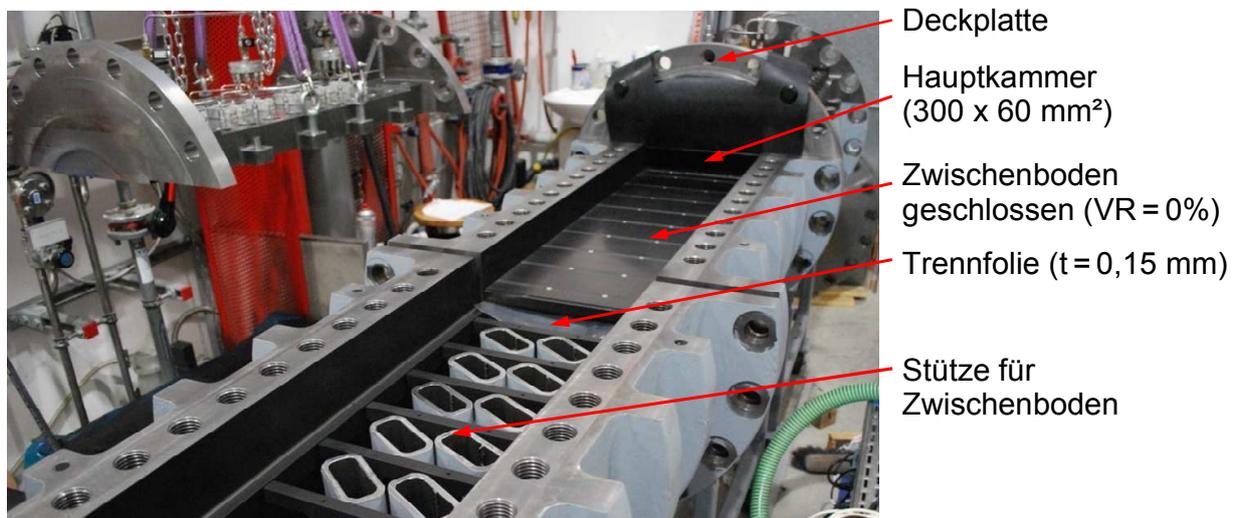


Abbildung 4.2: „GraVent“-Versuchsanlage.

¹ Durch die Deckplatteneinsätze (s. Abb. 3.2) wird der Kanal um 2 % versperrt.

Die Nomenklatur der in der GraVent-Anlage untersuchten Kanalkonfigurationen erfolgt in dieser Arbeit folgendermaßen:

$$BR_{xx}\text{-}S_{yyy}\text{-}VR_{zz}$$

Dabei entspricht xx der Blockierrate in Prozent, yyy dem Hindernisabstand in mm und zz der Ventingrate in Prozent. In dieser Arbeit wird nur auf den Einfluss des vertikalen Mischungsgradienten eingegangen. Aus diesem Grund gilt: $VR = 0\%$.

4.2 Peripherie

Die Wasserstoff-Versorgung erfolgt durch einen Zwischenspeicher mit 5 bar (absolut) Vordruck (s. Abb. C.1 in Anh. C). Von dort münden Rohrleitungen in 18 Verteiler², von denen jeder wiederum neun Eindüsungsstellen versorgt. Alle Rohrleitungen sind gleich lang, um eine simultane Eindüsung sicherzustellen. Insgesamt wird der Wasserstoff somit simultan an 162³ Stellen eingedüst. Eine aufgrund des Druckunterschieds kritisch durchströmte Düse stellt in jedem Verteiler einen konstanten Massenstrom sicher. Beginn und Ende der Eindüsung können über schnelle Magnetventile (Öffnungszeit ca. 10 ms) getaktet werden. Die genannten Bauteile sind in Abbildung C.2 dargestellt. Die detaillierte Funktionsweise des Eindüsungsmechanismus ist in Kapitel 3 erläutert. Vor Beginn der Eindüsung wird mittels einer Vakuumpumpe im Kanal ein Unterdruck erzeugt, sodass sich nach Eindüsung der erforderlichen Wasserstoffmenge wieder Umgebungsdruck im Kanalinneren einstellt. Zur Steuerung der gewünschten Randbedingungen ist der Kanal sowie die Leitung der Wasserstoffzufuhr mit Druck- und Temperatursensoren ausgestattet. Durch die Messung des Kanalinnendrucks vor und nach der Wasserstoffeindüsung kann der Brennstoffgehalt mittels der Partialdruckmethode bei jedem Versuch bestimmt werden.

² Bei Einbau des optischen Segments sind es 20 Verteiler.

³ Bei Einbau des optischen Segments sind es 180 Stellen.

4.3 Versuchsdurchführung

Die gesamte Versuchssteuerung wurde in LabView [68] programmiert und vollständig automatisiert. Der Experimentator gibt am Bildschirm die gewünschte Eindüsungszeit und Wartezeit zwischen Eindüsungsende und Zündung vor. Anschließend wird der Versuch automatisch durchgeführt. Nach Versuchsende wird eine erste Ergebnisübersicht in Visual Basic [67] generiert und in Microsoft Excel dargestellt. Das weitere Post-Processing erfolgt in Matlab. Nach Versuchsende wird der Kanal für mehrere Minuten mit Druckluft gespült, um Rückstände von Verbrennungsprodukten zu beseitigen⁴. Anschließend ist die Anlage bereit für den nächsten Versuch.

Im Einzelnen gliedert sich der Versuchsablauf in folgende Schritte:

1. Schließen der Spülventile
2. Absenkung des Innendrucks im Versuchsvolumen
3. Wasserstoff-Eindüsung
4. Gradientenbildung (abhängig von der Wartezeit)
5. Zündung
6. Erfassung der Messgrößen (Fotodioden und Drucksensoren)
7. Auslesen der Messdaten und Erstellung der Versuchsdatei
8. Auswertung der Daten (Bestimmung Wasserstoffgehalt, Signalverlaufdiagramme)
9. Spülung des Kanals mit Druckluft

Kapitel 5.1.3 geht auf den zeitlichen Ablauf, insbesondere der Steuersignale, näher ein.

⁴Vorversuche zur Untersuchung des Einflusses der Spüldauer haben ergeben, dass eine gute Wiederholbarkeit der Versuche nur bei einer ausreichenden Spülung des Kanals (mindestens 3 min lang) erreicht wird.

5 Messtechnik

5.1 Konventionelle Messtechnik

Um den Einfluss von Konzentrationsgradienten und Hinderniskonfiguration auf die Flammenbeschleunigung und den Übergang in die Detonation zu untersuchen, wurde der Explosionskanal mit 40 Flammensensoren (FS) und acht Drucksensoren (DS) versehen. Mit den Messsignalen wurde, wie schon in früheren Untersuchungen, eine 1D-Auswertung durchgeführt [1, 8, 12, 27]. In den Versuchen werden Flammen- und Stoßgeschwindigkeiten von über 2000 m/s erwartet, so dass dies eine besondere Herausforderung an die Dynamik der Sensoren sowie an das Datenerfassungssystem darstellt.

5.1.1 Flammendetektion

Wasserstoffflammen emittieren Licht nur in einem gewissen Wellenlängenspektrum (s. Abb. 2.1 in Kap. 2.1). Zur Detektion der Flamme wurden deshalb Fotodioden der Firma Hamamatsu (Typ S1336-18BQ) in den Explosionskanal eingebaut. Dieser Fotodiodentyp eignet sich aufgrund des großen spektralen Messbereichs – auch im UV-Bereich – und der kurzen Ansprechzeit für die Untersuchung von Wasserstoff-Luft-Flammen [42]. Der Einbau der Fotodiode in die Deckplatte ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Abdichtung des Kanals an dem Flammensensor erfolgt durch eine Quarzglasplatte und einen Kunststoffeinsatz, welcher durch einen Einschrauber über die Quarzglasplatte an die Dichtfläche der Deckplatte angedrückt wird.

Die örtliche Auflösung des Flammensensors ergibt sich aus dem Abstand der Sensoren zueinander. Der minimale Abstand der Flammensensoren zueinander ist 10 cm, der maximale Abstand 30 cm. Im Vergleich zu anderen Versuchsanlagen [1, 27] sind die Flammensensoren in einem kürzeren Abstand zueinander angeordnet. Der Flammensensor hat in der beschriebenen Anordnung

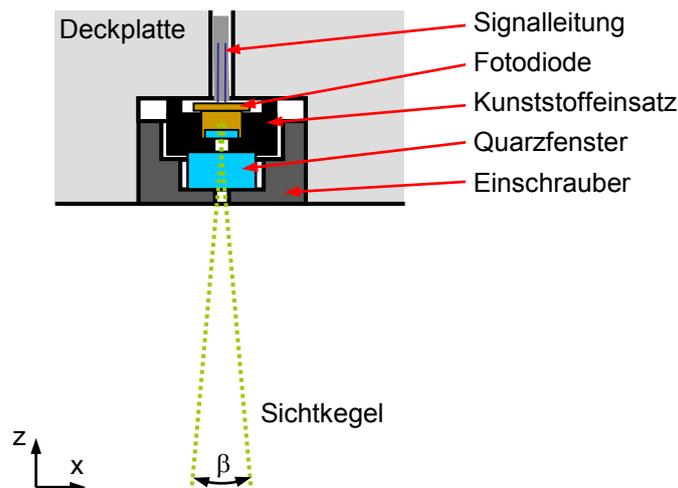


Abbildung 5.1: Einbau der Fotodioden in die Deckplatte.

einen gemessenen Einfallswinkel von $\beta_{\text{exp.}} \approx 6^\circ$ ¹. Auf der dem Sensor gegenüberliegenden Kanalwand ($z = 0$ mm) kann eine gerade Flammenfront ca. 3 mm früher detektiert werden als an der Kanalwand, in der der Flammensensor verbaut wurde ($z = 60$ mm).

Das Signal der Fotodiode wird um den Faktor $2,2 \cdot 10^6$ verstärkt. Um die Reaktionszeit des Flammensensors (Fotodiode mit nachgeschaltetem Verstärker) zu bestimmen, wurde das Lichtsignal einer gepulsten LED mit dem Flammensensor detektiert. Abbildung 5.2 zeigt den relativen Anstieg der Lichtintensität der LED-Leuchte² sowie den Spannungsverlauf des Flammensensors. Es ist erkennbar, dass der Verstärker des Flammensensors bei einem Schwellwert von 0,5 V eine Verzögerung von $2,78 \mu\text{s}$, bei einem Schwellwert von 4,0 V von $10,24 \mu\text{s}$ zur LED-Leuchte hat. Die Aufnahmezeit der zehn Messkanäle je FS-Messkarte beträgt $247,415 \text{ kS/s}$ (simultane Abtastung aller zehn Messkanäle), d. h. die Zeitdifferenz zwischen den Abtastungen liegt bei ca. $4,04 \mu\text{s}$. Um den Fehler gering zu halten, wurde für die Bestimmung der Flammenankunft am Flammensensor ein Schwellwert von 0,5 V herangezogen.

Die Positionierung der Flammensensoren ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Gerade im Anfangsbereich wurden auf gleicher Länge mehr Flammensensoren angeordnet als im hinteren Teil des Explosionskanals. Damit kann die anfäng-

¹ Der Abstand Kanalinnenwand zur aktiven Fläche der Fotodiode in Kombination mit der Größe des aktiven Fläche der Fotodiode und dem Bohrungsdurchmesser im Einschrauber ergeben einen theoretischen Einfallswinkel von $\beta_{\text{theor.}} = 23^\circ$ und ist somit größer als der experimentell gemessene Wert.

² Es wird zur Vereinfachung angenommen, dass der relative Spannungsanstieg an der LED-Leuchte der Intensität der Lichtemission entspricht (konservative Annahme).

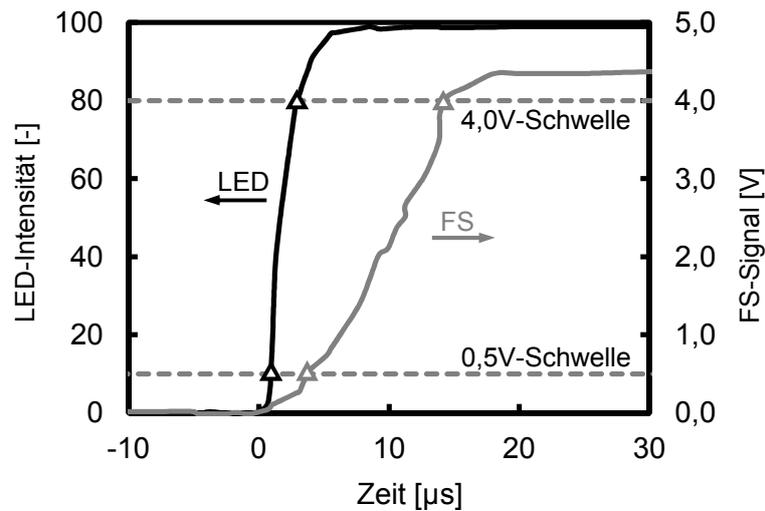


Abbildung 5.2: Bestimmung der Reaktionszeit des Flammensensors.

liche Beschleunigungsphase besser aufgelöst werden. Aus den Flammenankunftszeiten (Schwellwert des FS-Signals von 0,5 V wird überschritten) und der dazugehörigen FS-Positionen wird die lokale Geschwindigkeit der Flamme im Kanal errechnet. Die Geschwindigkeitswerte sind als gemittelte Größen zwischen zwei Flammensensoren (i und $i + 1$) zu verstehen:

$$u_f \left(x = \frac{x_i + x_{i+1}}{2} \right) . \quad (5.1)$$

Da die Flammensensoren zum Teil in einem kurzen Abstand (10 cm) zueinander angeordnet sind, kann eine Differenz zwischen tatsächlicher und anhand des FS-Signals ermittelter Flammenankunftszeit sich erheblich auf die Geschwindigkeitswerte auswirken. Insbesondere bei hohen Geschwindigkei-

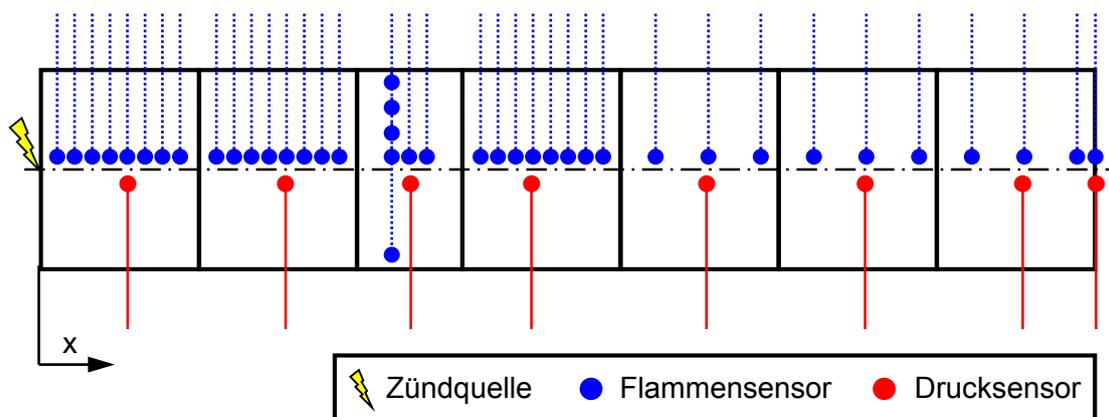


Abbildung 5.3: Instrumentierung der GraVent-Anlage.

ten führt dies zu Ausreißern, die physikalisch nicht sinnvoll erscheinen (s. Abb. 5.4, Signalverlauf der Rohdaten). Ardey [1] hat dies ebenfalls festgestellt

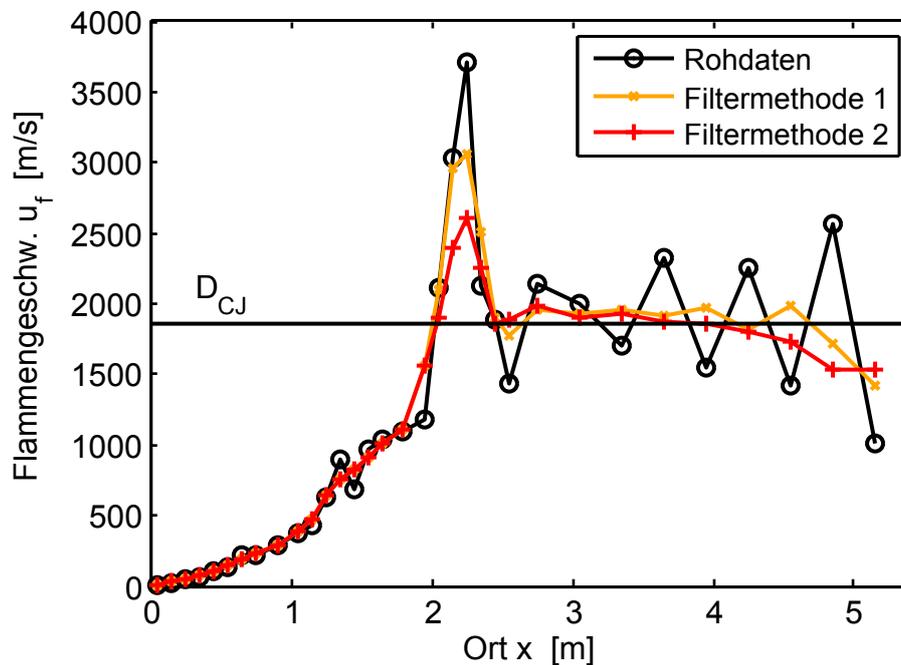


Abbildung 5.4: Aufbereitung der Flammenpositions- und Flammengeschwindigkeitsverläufe aus den Rohdaten.

und aus diesem Grund vorgeschlagen, die Messdaten zu glätten, jedoch unter der Prämisse, nur die Ausreißer und nicht den eigentlichen Verlauf zu glätten.

Eine Differenz zwischen tatsächlicher und gemessener Flammenankunftszeit ist durchaus möglich. Die Quarzfenster werden aufgrund von Wasser- und Schmutzablagerungen mit der Zeit immer lichtundurchlässiger, sodass das FS-Signal im direkten Vergleich mit einem FS mit sauberem Quarzglas langsamer ansteigt. Darüber hinaus können die Messergebnisse durch den nachgeschalteten Verstärker – aufgrund von Fertigungstoleranzen der elektronischen Bauteile oder durch elektrische Störsignale – negativ beeinflusst werden.

Aufgrund der großen Anzahl von Messsignalen und Versuchen wurde die Bestimmung der Flammenankunftszeit automatisiert. Hierbei konnten nicht immer alle unbrauchbaren Signalverläufe durch den Auswertalgorithmus aussortiert werden. Aus den zuvor genannten Gründen wurden die Messdaten aufbereitet. Es wurden verschiedene Glättungsverfahren untersucht. Letztlich ergab sich der beste Kompromiss aus Messwerttreue und Datenbereinigung durch einen „moving average filter“, wobei eine lokale Regression anhand ei-

nes linear gewichteten Modells der kleinsten Quadrate mit einem Polynom erster Ordnung verwendet wurde [64].

Die Aufbereitung der Geschwindigkeitsverläufe der Flammenfront wurde wie folgt durchgeführt (s. Abb. 5.5): Aus den Rohdaten des Weg-Zeit-Verlaufs wurden die Geschwindigkeitswerte berechnet und anschließend mit dem oben genannten Glättungsverfahren bereinigt. Liegt die maximale Flammengeschwindigkeit des geglätteten Geschwindigkeitsverlaufs unterhalb der CJ-Geschwindigkeit des betrachteten Gemischs³, so ist die Datenbereinigung bereits abgeschlossen (Filtermethode 1).

Liegt die maximale Flammengeschwindigkeit oberhalb der CJ-Geschwindigkeit, erfolgt eine Schleife. Zunächst wird die Anlaufänge X_D (Ort, an dem DDT eintritt) aus dem geglätteten Geschwindigkeitsverlauf ermittelt. Der Weg-Zeit-Verlauf wird nun ab dem vorletzten Sensor vor dem DDT-Übergang bis zum letzten Sensor hin ebenfalls mit der oben genannten Methode geglättet. Da eine Detonation sich nahezu mit konstanter Geschwindigkeit ausbreitet, liegt dieser geglätteter Verlauf näher an der Realität. Dieser aufbereitete Datensatz wird zur Bestimmung des Geschwindigkeitsverlauf nach der Zeit abgeleitet und anschließend wieder geglättet (Filtermethode 2). Starke Ausreißer, gerade im Bereich des Übergangs von der Deflagration in die Detonation, werden dadurch vermieden.

5.1.2 Druckmessung

Zur Messung des Drucks kamen acht piezo-resistive Drucksensoren (Kistler Typ 601A) zum Einsatz⁴. Diese Drucksensoren haben einen Messbereich von 0 bis 250 bar (relativ). Über eine Membran wirkt der am Sensor anliegende Druck auf ein Quarzkristall-Messelement, wodurch proportional zum Druck eine elektrische Ladung erzeugt wird. Die Ladung wird von einem Ladungsverstärker (Kistler Typ 5011) in ein Spannungssignal umgewandelt. Das Spannungssignal wird mit einer Abnahmerate von 250 kS/s (simultane Abtastung aller Drucksensoren) erfasst.

³ Bei inhomogenen Gemischen wurde hierbei die CJ-Geschwindigkeit basierend auf dem mittleren H₂-Gehalt berechnet. Die Werte können der Tabelle A.1 in Anhang A entnommen werden.

⁴ Vergleichbare Sensoren wurden schon in früheren Untersuchungen eingesetzt [1, 27].

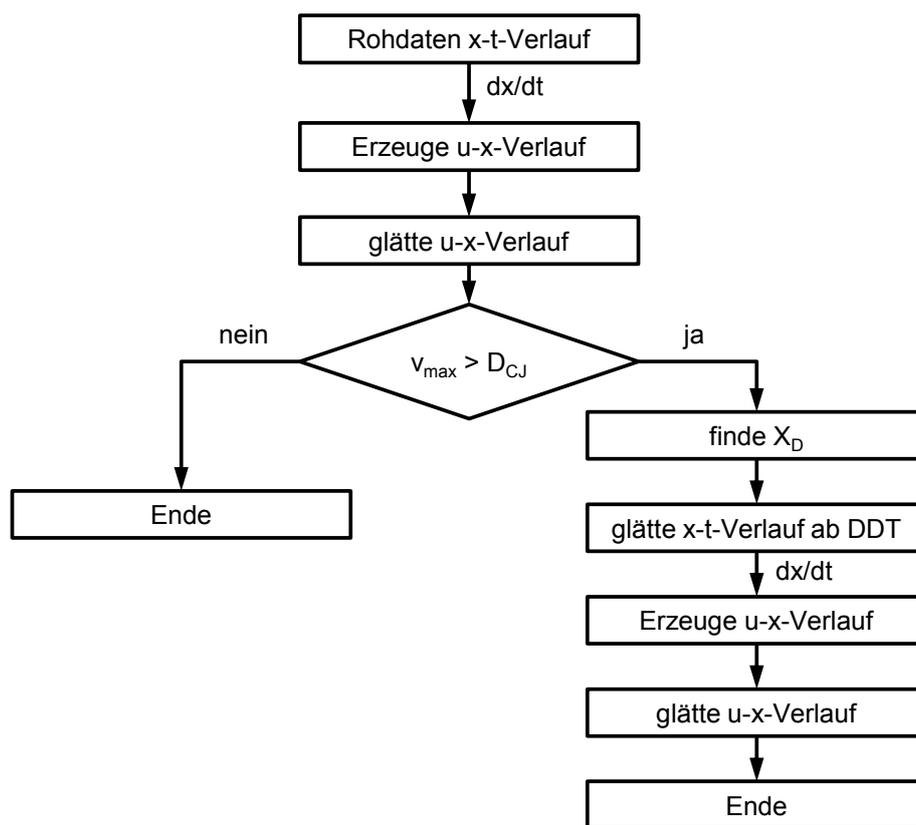


Abbildung 5.5: Ablaufdiagramm der Datenaufbereitung.

Aufgrund der Thermoschockempfindlichkeit der Sensoren werden diese mit einem hitzebeständigen Schmierfett geschützt. Hierzu sind die Drucksensoren um 0,1 mm gegenüber der Innenwand des Explosionskanals nach hinten versetzt und der Zwischenraum zwischen Kanalinnenwand und Sensor wird mit Fett gefüllt. Das Fett bewirkt zwar eine Dämpfung des Messsignals, muss jedoch in Kauf genommen werden, um das Abdriften des Signals nach Flammenankunft (Thermoschock) zu vermeiden. Die Auswirkungen des Fetts auf den Signalverlauf wurde von Dumitrescu et al. [26] untersucht. Es wurde gezeigt, dass sich die zusätzliche Dämpfung auf den zeitlichen Druckanstieg auswirkt (Anstieg erfolgt geringfügig langsamer), die Maximalwerte dennoch erreicht werden. Neben dem Druckwert können durch die annähernd gleichmäßig über die Kanallänge verteilten Drucksensoren (s. Abb. 5.3) auch Aussagen über die Stoßwellengeschwindigkeit gemacht werden.

5.1.3 Datenerfassung

Die Steuer- und Messsignale werden mit einem Messrechner erfasst und ausgegeben. Dabei kamen Multifunktions-Messkarten (National Instruments Typ PCI-6220 (Steuer- und Messkarte) und PCI-6123 (DS-Messkarte)) sowie eine CAN-Karte (IXXAT) zum Einsatz (s. Abb. 5.6). Letztere kommuniziert über einen CAN-Bus mit fünf von der Firma InNiTeC entwickelte Messkarten [70]. Die Versuche wurden mit einem in LabView erstellten Programm gesteuert.

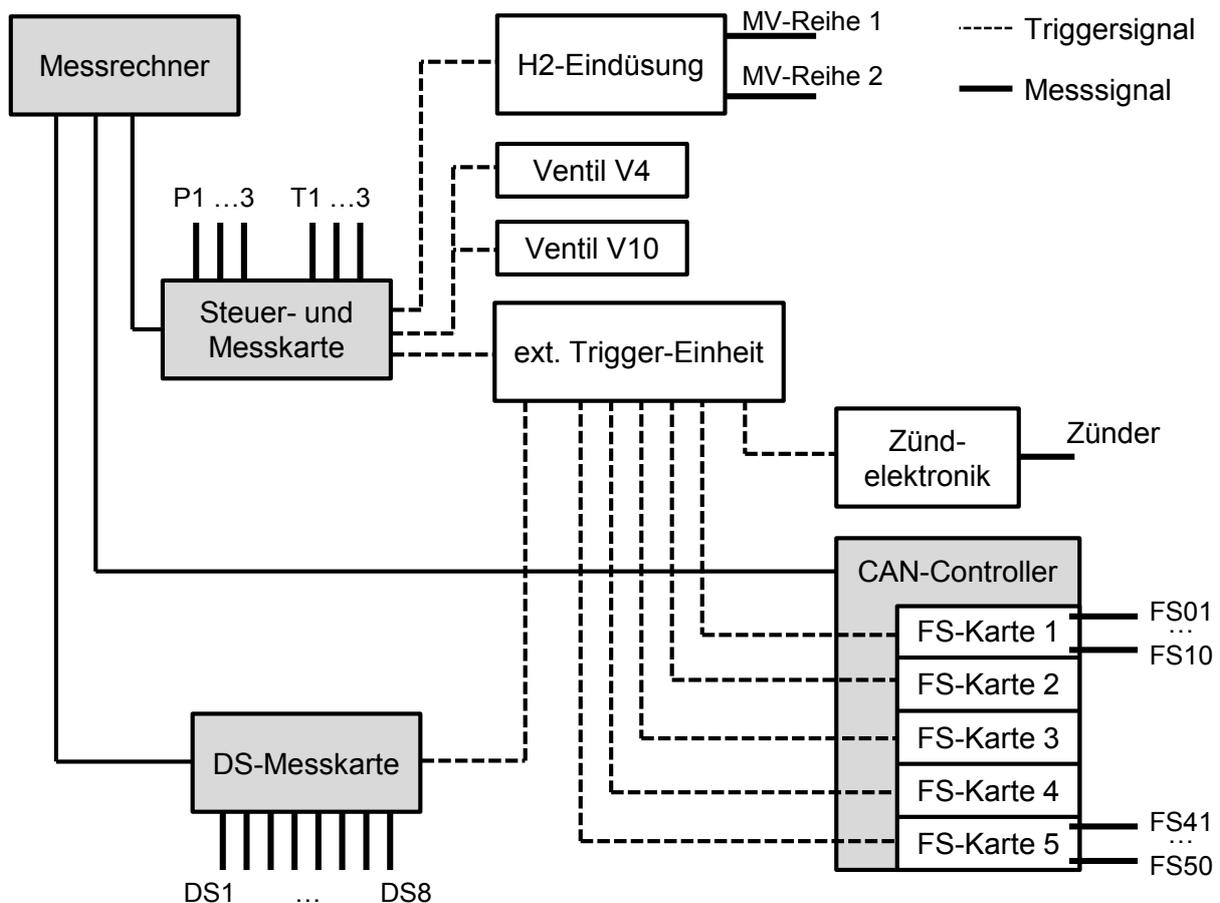


Abbildung 5.6: Aufbau der Steuer- und Messtechnik.

In der Anlage wurden je drei Druck- und Temperatursensoren eingebaut, damit die Bedingungen im Wasserstoffverteilungssystem sowie im Explosionskanal vor, während und nach der Eindüsung sowie zum Zündzeitpunkt festgehalten werden. Die eingedüste Wasserstoffmenge wird mittels der Partialdruckmethode berechnet, wozu die Werte der Drucksensoren P2 und P3 herangezogen werden (Abb. C.1 in Anh. C). Es werden Drucksensoren (Sensor-Technik Wiedemann Typ C01) eingesetzt, die einen Messbereich von 0 bis

2,5 bar (absolut) haben. Die Temperatursignale werden mit Thermoelementen Typ K erfasst. Als Messverstärker kommen Messumformer (Jumo Typ dTrans T02 LCD) zum Einsatz. Die Abtastrate der Druck- und Temperatursensoren beträgt 50 S/s.

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Synchronität der Messsignale werden die Messkarten für die Erfassung der Flammen- und Drucksignale mit einer externen Trigger-Einheit (eTE) getriggert, die speziell für diesen Messaufbau entwickelt wurde. Die Reihenfolge der Steuersignale ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Der in Kapitel 4.3 grundlegend beschriebene Versuchsaufbau läuft im Detail folgendermaßen ab: Nachdem der Explosionskanal für den Versuch vorbereitet wurde, wird durch Betätigen des Startknopfes die statische Messdatenerfassung⁵ gestartet. Anschließend wird Wasserstoff in den Explosionskanal eingedüst. Die Eindüsungszeit ist für den Kanalabschnitt mit Hindernissen kürzer als für den glatten Kanalabschnitt (unterschiedliche Volumina). Aus diesem Grund gibt es zwei Trigger-Signale (Magnetventil-Reihe 1 und 2). Nach Ende der Eindüsung wird die eingestellte Wartezeit abgewartet, bevor ein Triggersignal der eTE zugesendet wird. Kurz zuvor werden die Ventile V4 und V10 geschlossen, damit die Drucksensoren für die statische Druckmessung durch den hohen Druck, welcher während des Explosionsversuchs entstehen kann, nicht beschädigt werden.

Sobald der Eingangstrigger in der eTE eintrifft, schickt diese mit der nächsten positiven Flanke des Taktgebers⁶ ein Triggersignal an die Zündelektronik sowie an die Messkarte der Drucksensoren. Die FS-Messkarten werden zeitverzögert getriggert. Dies liegt daran, dass die Messkarten die Signale der Flammsensoren mit einer Aufnahmerate von 247,415 kS/s (simultan) aufzeichnen, die Anzahl der Messwerte aber auf 6000 Werte beschränkt ist. Die Aufnahmedauer beträgt somit 24 ms. Da einige Versuche länger dauern, müssen die Messkarten zeitversetzt getriggert werden.

⁵ Hierunter wird die Erfassung der Messsignale der Druck- und Temperatursensoren der Wasserstoff- und Luft-Versorgungssystem verstanden.

⁶ Der Zeitverzug zwischen Triggereingang und positiver Flanke des Taktgebers beträgt nur wenige μs und ist somit vernachlässigbar gegenüber der Wartezeit t_w .

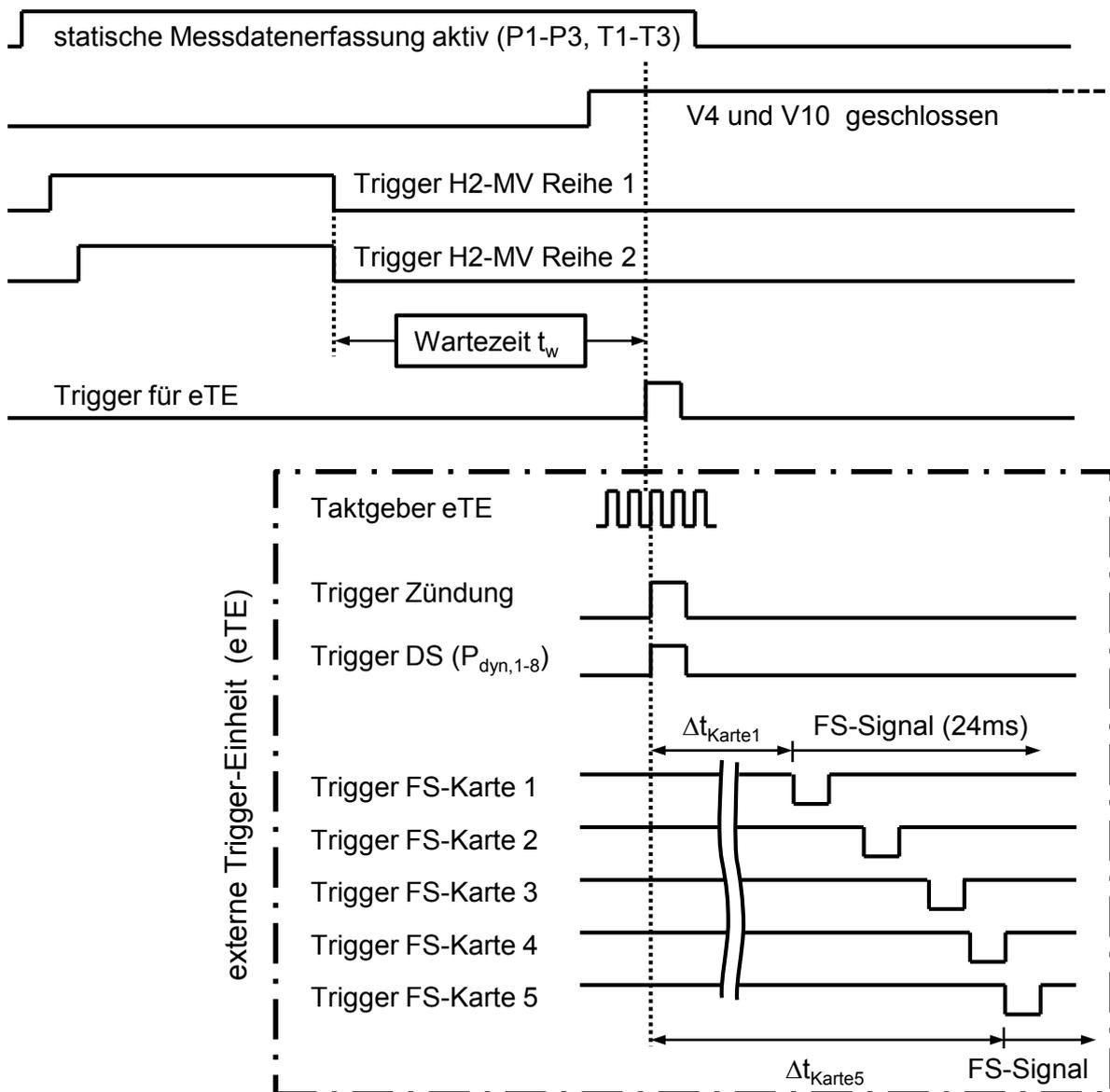


Abbildung 5.7: Steuerdiagramm des Versuchsablaufs.

5.2 Optische Messtechnik

Neben den Messungen mit konventioneller Messtechnik wurden auch optische Messverfahren zur Untersuchung der Flammenausbreitung angewendet. Um die Anwendung der weiter unten aufgeführten Messverfahren in der GraVent-Anlage zu ermöglichen, wurde ein optisches Segment von 60 cm Länge konstruiert (s. Abb. 5.8). Es ermöglicht nicht nur einen Einblick in die Hauptkammer des Explosionskanals, sondern auch in die darunter liegende Überströmungskammer. Da während der Versuche hohe Drücke im Explosionska-

nal zu erwarten sind [27], waren Quarzglasscheiben von 120 mm Dicke erforderlich. Durch den modularen Aufbau des Kanals konnte das optische Segment an unterschiedlichen Positionen in der GraVent-Anlage eingebaut werden, um z. B. die Flammenausbreitung in der Hindernisstrecke oder im unversperrten Kanalabschnitt näher zu untersuchen.

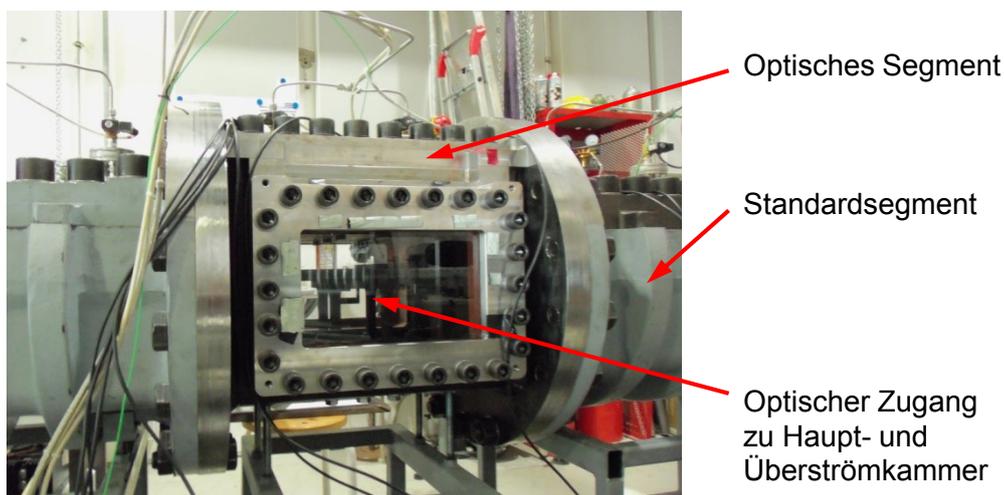


Abbildung 5.8: Optisches Segment, eingebaut in der GraVent-Anlage. Die Abmessungen des optischen Zugangs sind 300 mm × 180 mm.

5.2.1 Schatten- und Schlierenverfahren

Schatten- sowie Schlierenverfahren sind Visualisierungstechniken, die in einem transparenten Medium eine Änderung des Brechungsindex infolge eines Dichtegradienten zeigen. Dichtegradienten existieren z. B. über einen Verdichtungsstoß, über die Flammenfront (zwischen den kalten Reaktanden und heißen Verbrennungsprodukte) sowie auch während der Mischung von Medien unterschiedlicher Dichte.

Beide Messverfahren beruhen darauf, dass parallel zueinander verlaufende Lichtstrahlen an einem Dichtegradienten abgelenkt werden⁷. Dies verursacht bei der Projektion der Lichtstrahlen auf einen Bildschirm eine Verschiebung der Lichtintensitäten aufgrund der Überlagerung von unterschiedlich stark abgelenkten Lichtstrahlen [6, 43, 65, 71, 76].

⁷ Das Brechungsgesetz besagt, dass beim Eintreten eines Lichtstrahls in ein Medium mit größerem Brechungsindex der Weg dieses Strahles, im Bezug zum Lot der Mediengrenze, nach innen abgelenkt wird [43].

Der Messaufbau für die Visualisierung der Dichtegradienten ist in Abbildung 5.9 skizziert. Aus Platzgründen wurde ein modifizierter Z-Aufbau verwendet. Um die Abbildungsfehler⁸ möglichst gering zu halten, wurde der Winkel zwischen Lichtquelle und Hohlspiegel 1 sowie zwischen Hohlspiegel 1 und Planspiegel 1 minimiert und ein symmetrischer Aufbau gewählt [71]. Als Lichtquelle dient eine 350 W-Hg(Xe)-Kurzbogenlampe (LOT-Oriel Typ LSB731), die kontinuierlich Licht aussendet. Die Lampe hat ein Wellenlängenspektrum von 200 nm bis in den Infrarot-Bereich. Für eine saubere Unterscheidung vom Chemilumineszenz-Signal wurde ein Langpassfilter unmittelbar nach dem Kondensator angebracht, der den Bereich des Lichtspektrums unterhalb von 350 nm nahezu vollständig herausfiltert. Ein vor der Lampe angebrachter Lichtquellenspalt erzeugt eine näherungsweise punktförmige Licht-

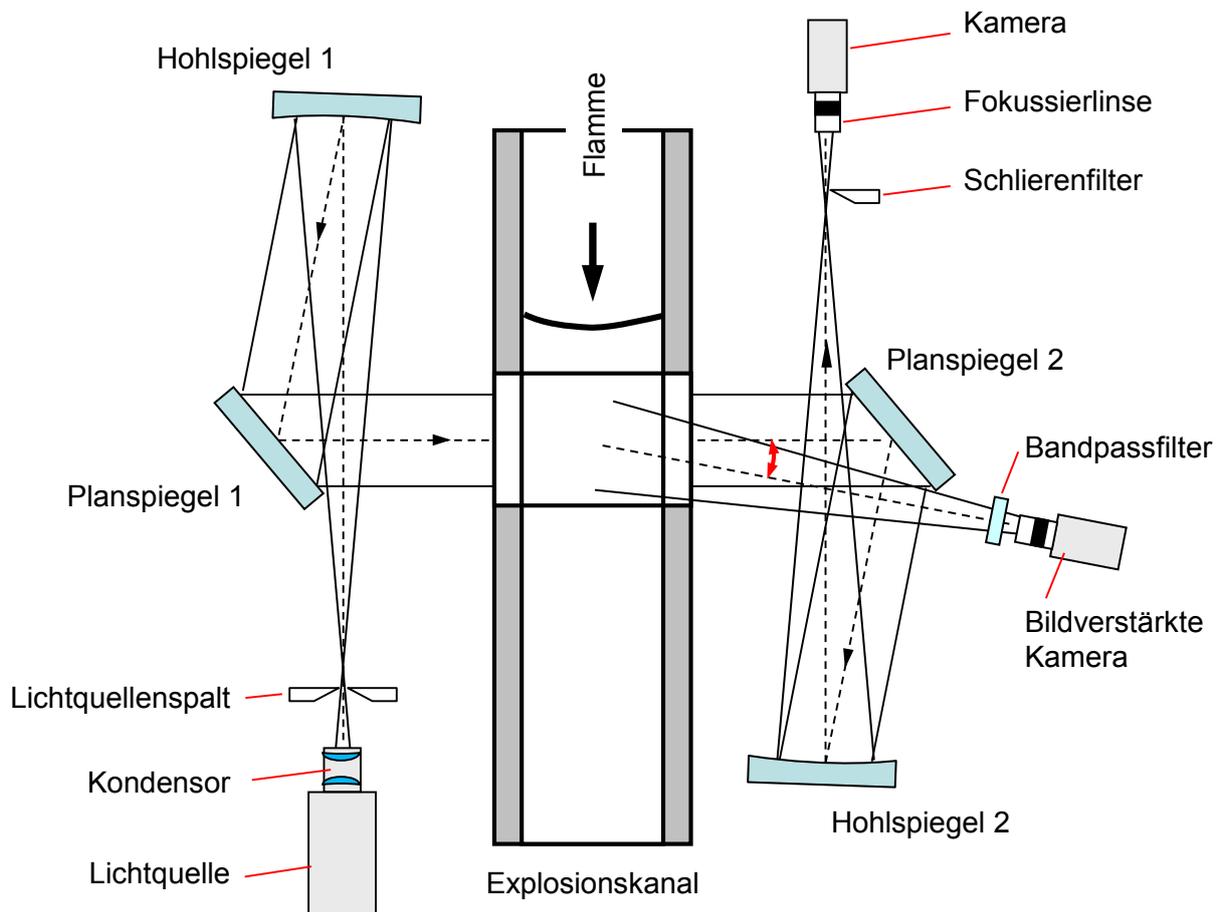


Abbildung 5.9: Schematische Darstellung des Messaufbaus (Draufsicht) für optische Messungen an der GraVent-Anlage.

⁸ Abbildungsfehler können in diesem Zusammenhang die chromatische Aberration, die sphärische Aberration oder ein Astigmatismus eines schiefen Bündels sein [71].

quelle. Im Hohlspiegel 1 wird der Lichtstrahl parallelisiert und mittels Planspiegel 1 durch die Messstrecke geschickt, danach vom Planspiegel 2 umgelenkt und durch den Hohlspiegel 2 wieder fokussiert. Genau im Brennpunkt dieses Lichtstrahl sitzt ein Schlierenfilter, hier eine Schlierenkante. Das dabei entstehende Bild wird von einer Highspeed-Kamera (Photron Typ Fastcam SA5) aufgenommen. Die maximale Aufnahmezeit beträgt 50 μs bei einer Auflösung von 512×272 Pixeln. Für die Aufnahme scharfer Stoßkonturen einer Detonationsfront muss eine möglichst kurze Belichtungszeit gewählt werden. Diese betrug in den Versuchen jeweils $1,0 \mu\text{s}$. Die Kamera zeichnet die Lichtintensität als monochromatisches Bild auf.

Durch Weglassen des Schlierenfilters sind mit diesem Versuchsaufbau außerdem Schattenaufnahmen möglich. Während beim Schlierenverfahren der am Dichtegradienten in Richtung Schlierenkante abgelenkte Strahl ausgeblendet wird, ändert sich beim Schattenverfahren an jeder Unstetigkeit des Dichtegradienten die Lichtintensität in der Abbildung. Sie zeigt somit die zweite Ableitung der Dichte nach dem Ort [71, 76].

Beide Verfahren liefern tiefenintegrierte Abbildungen der Gradienten. Aus diesem Grund sind in dem 30 cm tiefen Kanal nur der Flamme vorausseilende Stöße sowie die maximalen Ausmaße der Flammenfront als aufgelöste Konturlinien zu erkennen. Dennoch wurden und werden auch weiterhin diese Messverfahren in vielen Untersuchungen zur deflagrativen und detonativen Flammenausbreitung eingesetzt [1, 5, 15, 27, 47, 61, 73, 83], da sie ohne größeren Messaufwand die Konturen sowie auch fluiddynamische Effekte aufzeigen können.

5.2.2 Chemilumineszenz

Die Aufnahme des Chemilumineszenz-Signals wurde zur Visualisierung der Flamme und der Form der Flammenfront herangezogen. Die Methode basiert auf dem Prinzip der Visualisierung charakteristischer Verbrennungsradikale. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, emittieren angeregte OH-Radikale, die als Zwischenprodukte während der Verbrennung entstehen, ein Chemilumineszenzsignal im Wellenlängenbereich von 300 bis 330 nm, wobei das Maximum bei 306 nm liegt. Die angeregten OH^{*}-Radikale haben eine sehr kurze Lebensdauer von lediglich 600 ns und gehen durch die Emission eines Pho-

tons bei einer Wellenlänge von ca. 306 nm in ihren Grundzustand über [11]. Daher können Sie auch bei schnellen Flammen praktisch am Ort ihres Entstehens beobachtet werden. Die Chemilumineszenz der OH^{*}-Radikale tritt jedoch nicht nur innerhalb der Reaktionszone, sondern auch im Bereich nach der eigentlichen Wärmefreisetzung auf. Dadurch sind Aussagen zur Form der Flammenfront möglich, Aussagen über die Dicke der Reaktionszone können jedoch nicht gemacht werden. Dieses Messverfahren integriert ebenfalls das Messsignal über die komplette Kanaltiefe. Weitere Details zu dem Messverfahren sind in [27, 59, 71] aufgeführt.

Da in Wasserstoff-Luft-Flammen keine anderen an der Verbrennung teilnehmenden Moleküle und Radikale ähnlich intensive Chemilumineszenzsignale emittieren, gibt die Aufnahme der OH-Chemilumineszenz den ungefähren Ort der Wärmefreisetzung wieder. Hierzu wird eine bildverstärkte CMOS-Hochgeschwindigkeitskamera (Photron Typ Fastcam Ultima APX) eingesetzt. Die Brennweite des verwendeten UV-Objektivs beträgt $f = 105$ mm bei einer maximalen Lichtstärke von 1:4,5. Die Aufnahmezeit beträgt 12,5 μ s bei einer Auflösung von 512×256 Pixeln. Für Detailuntersuchungen in der Hinderisstrecke wird die Aufnahmezeit auf 30 μ s erhöht, wobei sich die Auflösung auf 256×128 Pixel reduziert. Das Chemilumineszenzsignal wird mit einer UV-intensivierten CCD-Kamera aufgezeichnet. Ein Bandpassfilter (AHF Analysetechnik Typ Brightline HV320/40), welcher vor der bildverstärkten Kamera angebracht wird, lässt nur das Licht im Strahlungsbereich der angeregten OH-Radikale passieren. Er filtert unter anderem das Umgebungslicht (Laborbeleuchtung), das Eigenleuchten der Flamme sowie – im Fall der simultanen Messung von Schlieren und Chemilumineszenz – das Licht der Kurzbogenlampe heraus. Die Intensität des Signals ist von der Menge der OH^{*}-Radikale, aber auch von Druck und Temperatur abhängig [44]. Aus diesem Grund kann dieses Messverfahren nicht für quantitative Bestimmung der Wärmefreisetzung herangezogen werden.

Für die Aufnahmen des Chemilumineszenzsignals wurde die Kamera im Normalfall (Einzelanwendung) senkrecht zum Explosionskanal und somit zur Flammenausbreitungsrichtung positioniert. Für den Fall einer simultanen Messung (Schlieren- und Chemilumineszenzaufnahmen) war durch den Messaufbau für die Schlierenmesstechnik ein kleiner Anstellwinkel gegenüber der senkrechten Anordnung erforderlich (s. Abb. 5.9), sodass die

Chemilumineszenzaufnahmen gegenüber den Schlierenaufnahmen leicht verzerrt sind.

6 Ergebnisse der Explosionsversuche

Die GraVent-Anlage hat im Gegensatz zu vielen anderen Versuchsanlagen ein hohes Breite-zu-Höhe-Verhältnis. In Kapitel 2 wurde beschrieben, dass die Flammenausbreitung – insbesondere die detonative – in einem Rohr von den geometrischen Randbedingungen (Größe, Form des Kanalquerschnitts, Hindernisgeometrie und -anordnung) abhängig ist. Aus diesem Grund wird in Kapitel 6.1 aufgezeigt, dass mit der GraVent-Anlage vergleichbare charakteristische Verläufe und Werte erzielt werden können, wie sie aus der Literatur bekannt sind. Hierzu wurden mit der GraVent-Anlage Versuche mit homogenen Wasserstoff-Luft-Gemischen durchgeführt. In Kapitel 6.2 folgt die Untersuchung der Flammenausbreitung in Mischungen mit einem vertikalen Mischungsgradienten. Tabelle 6.1 zeigt eine Übersicht über die in dieser Arbeit untersuchten vier Kanalkonfigurationen der GraVent-Anlage. Alle Versuche wurden mit einem Kanal mit Hindernisstrecke durchgeführt. Das letzte Hindernis der Hindernisstrecke war jeweils bei $x = 2,05$ m positioniert. Die Blockierrate betrug $BR = 30\%$ oder 60% .

BR [%]	S [mm]	VR [%]	Anzahl Hindernisse	Position letztes Hindernis [m]	homogenes Gemisch	inhomogenes Gemisch
30	100	0	20	2,05	12...36% H ₂	11...36% H ₂
30	300	0	7	2,05	12...30% H ₂	10...30% H ₂
60	100	0	19	2,05	11...42% H ₂	10...30% H ₂
60	300	0	7	2,05	12...35% H ₂	10...35% H ₂

Tabelle 6.1: Untersuchte Kanalkonfigurationen. Zu jeder Kanalkonfiguration ist der H₂-Anteil angegeben, der untersucht wurde.

6.1 Versuche mit homogenem Gasgemisch

6.1.1 Nachweis der Funktionalität der GraVent-Anlage

Die Wiederholung einzelner Explosionsversuche in der GraVent-Anlage soll zeigen, ob die Versuche reproduzierbar sind oder nicht. Dies erfolgt u. a. anhand des Weg-Zeit-Diagramms sowie des Geschwindigkeitsverlaufs der Flammenfront (s. Abb. 6.1 und Abb. 6.2).

Im Weg-Zeit-Diagramm in Abbildung 6.1 sind für drei Versuchskonfigurationen jeweils drei Versuche mit identischem Wasserstoffgehalt (17,9 %, 20,0 % und 24,4 % H₂) dargestellt. Die Ankunftszeit der Flammen am ersten Flam-

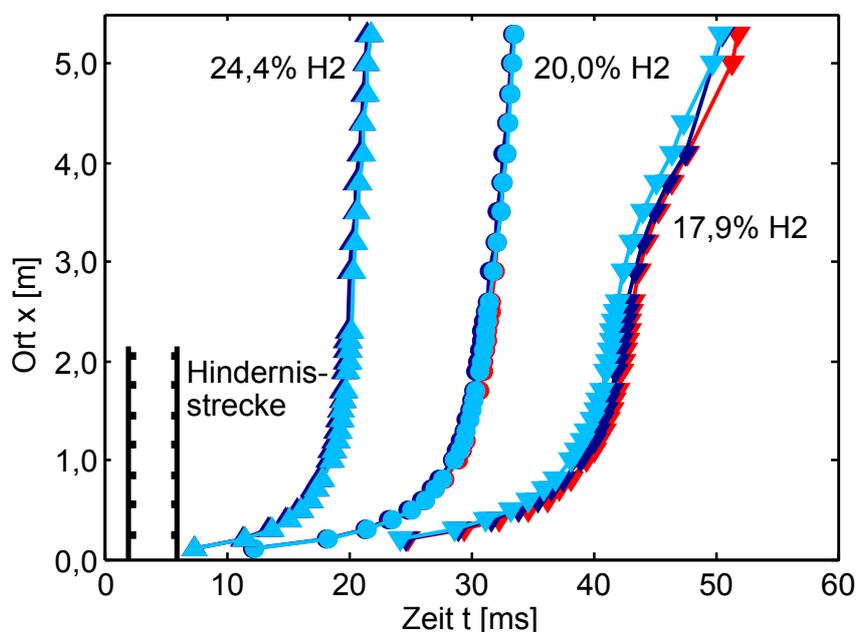


Abbildung 6.1: Wiederholbarkeitsstudie: Vergleich des Weg-Zeit-Verlaufs der Flammenfront. Die Versuche wurden mit der Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00 und homogenem Gasgemisch durchgeführt. Der Wasserstoffanteil beträgt 17,9 %, 20,0 % und 24,5 %.

mensensor (0,1 m bzw. 0,2 m) ist bei den Versuchen nahezu gleich. Nur mit magerem Gemisch (17,9 % H₂) ist eine zeitliche Abweichung der Flammenankunft erkennbar. Hierauf wird weiter unten bei der Beschreibung der Druckverläufe noch näher eingegangen. Ansonsten sind die Verläufe der Flammenfront sowohl in der Hindernisstrecke ($x \leq 2,05$ m) als auch im anschließenden glatten Kanal deckungsgleich. Dies kann auch aus den aus den $x-t$ -Werten

abgeleiteten Geschwindigkeitsverläufen entnommen werden (Abb. 6.2). Zur besseren Unterscheidbarkeit sind in der Abbildung 6.2 nur die Geschwindigkeitsverläufe der Versuche mit 17,9 % und 24,5 % dargestellt.

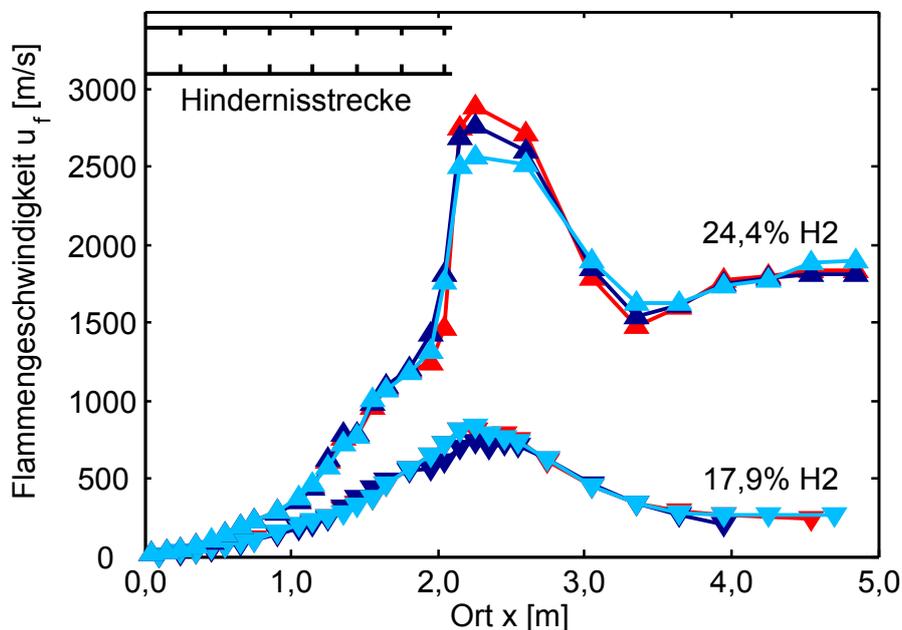


Abbildung 6.2: Wiederholbarkeitsstudie: Vergleich der Flammengeschwindigkeit. Die Versuche wurden mit der Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00 und einem homogenen Gasgemisch durchgeführt. Der Wasserstoffanteil beträgt 17,9 % und 24,5 %.

Im u_f - x -Diagramm ist zu erkennen, dass in den Versuchen mit 17,9 % H₂ die Flamme bis kurz nach der Hindernisstrecke ($x = 2,2$ m) auf die Geschwindigkeit um die Schallgeschwindigkeit der Produkte (a_p (17,9% H₂) = 823 m/s) beschleunigt wird. Es liegt somit per Definition eine schnelle Flamme vor. Mit 24,4 % H₂ werden maximale Flammengeschwindigkeiten oberhalb der CJ-Geschwindigkeit (D_{CJ} (24,4% H₂) = 1854 m/s) erreicht. Die Flamme breitet sich nach der Hindernisstrecke detonativ aus. Eine nähere Beschreibung der Geschwindigkeitsverläufe – auch für andere Hinderniskonfigurationen – erfolgt in Kapitel 6.1.2. Die relative Abweichung der Geschwindigkeitswerte beträgt im Mittel 5,7 % bei 17,9 % H₂, 2,6 % bei 24,4 % H₂. Die Abweichung steigt im Umschlagbereich Deflagration zur Detonation ($x = 2,0 \dots 2,2$ m) lokal auf bis zu 11,8 % an.

Abbildung 6.3 zeigt die Druckverläufe eines Drucksensors für die zwei zuvor beschriebenen Versuchskonfigurationen mit 17,9 % H₂ und 24,4 % H₂. Der

Drucksensor war an der Position $x = 3,2$ m und somit in einem Abstand von 1,15 m hinter dem letzten Hindernis der Hindernisstrecke positioniert. An dieser Stelle hat sich für die zwei dargestellten Versuchskonfigurationen bereits eine starke Stoßwelle gebildet (s. Abb. 6.3). Die zeitliche Abweichung der Versuche ist durch den plötzlichen Druckanstieg am Drucksensor deutlich zu erkennen. Die zeitliche Abweichung zwischen den Versuchen beträgt bei einem Wasserstoffgehalt von 17,9 % maximal 1,31 ms, bei 24,4 % nur 0,20 ms.

Die drei Signalverläufe einer Versuchskonfiguration sind jedoch bis auf die zeitliche Verschiebung sehr ähnlich. Der maximale Druck schwankt bei den Versuchen mit 24,4 % H_2 zwischen 18,3 und 19,2 bar (Ankunft der Detonationswelle zwischen $t = 20,4...20,7$ ms), bei der reflektierte Druckwelle ($t = 23,5...23,7$ ms) zwischen 6,47 und 6,89 bar. Die relative Abweichung des Maximalwertes zum Mittelwert beträgt 3,6 % (1. Druckanstieg, $p_{mittel} = 18,5$ bar) und 4,0 % (reflektierte Druckwelle, $p_{mittel} = 5,97$ bar).

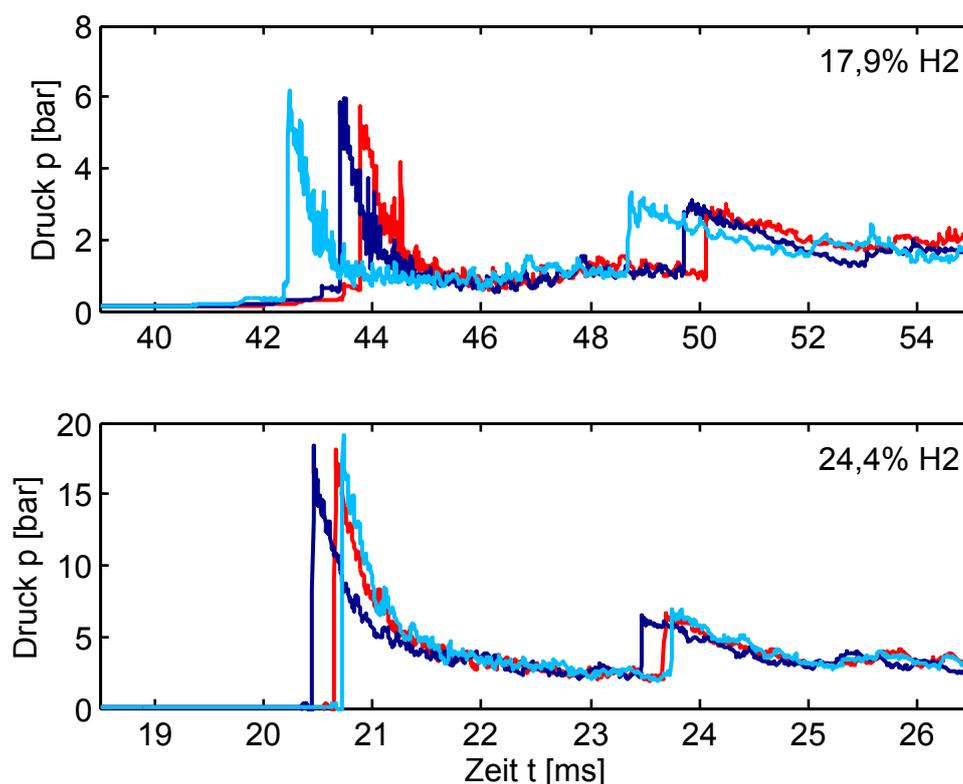


Abbildung 6.3: Vergleich der Druckverläufe eines Drucksensors. Die Versuche wurden mit der Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00 und einem homogenen Gasgemisch durchgeführt. Die Einbauposition des Drucksensors ist bei $x = 3,2$ m (Deckplatte).

Abbildung 6.4 und 6.5 zeigen die Druckverläufe der Drucksensoren, die entlang des Kanals sowie in der Endplatte positioniert sind. Im jeweiligen Diagramm ist die Position des Drucksensors angegeben. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Druckverläufe aller Wiederholungen am ersten Versuch ausgerichtet. Die Zeitabweichung wurde anhand der Stoßwellenankunft am Drucksensor der Endplatte ($x = 5,4$ m) ermittelt. Anhand dieser Druckverläufe ist die Ausbreitung der Stoßwelle bis zur Endplatte sowie die Reflektion

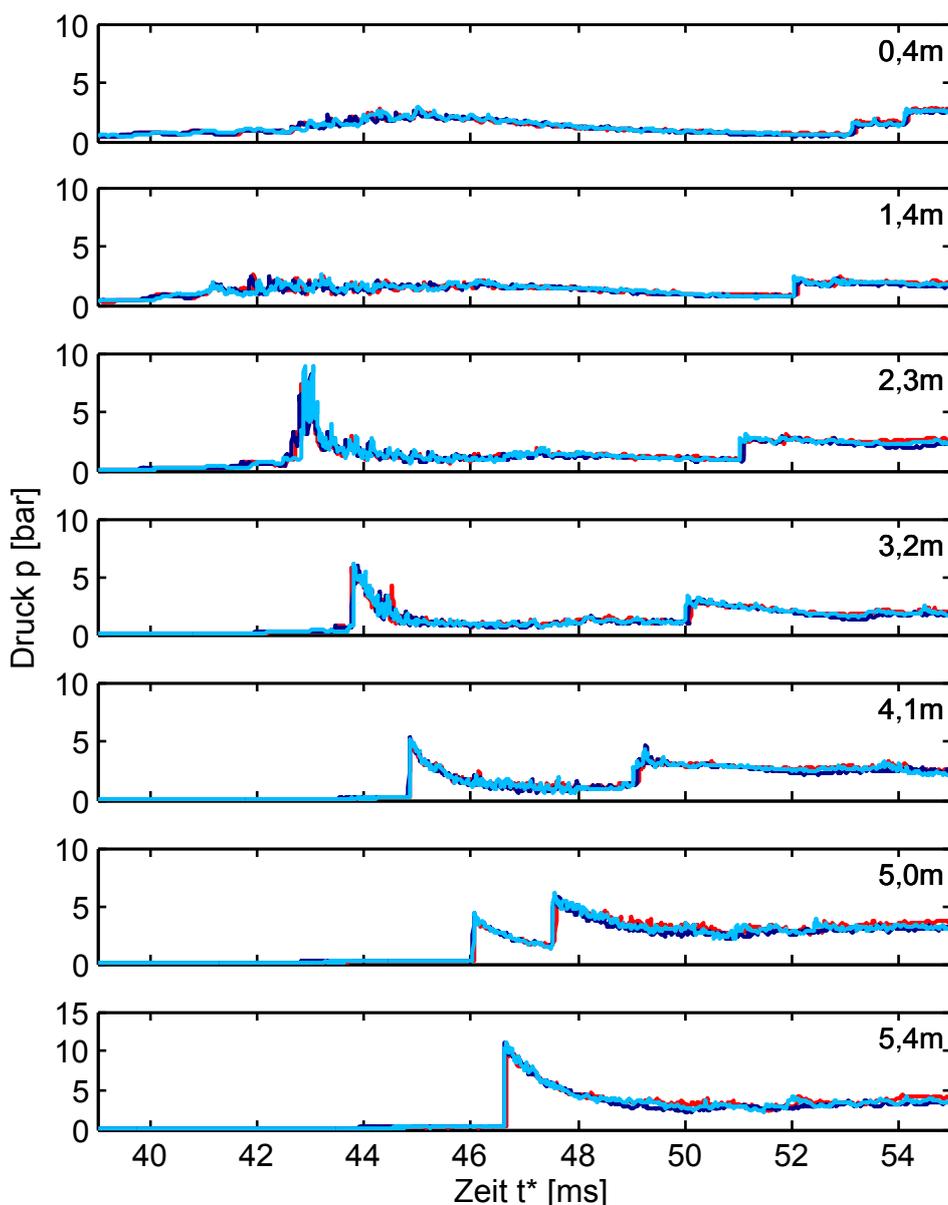


Abbildung 6.4: Wiederholbarkeitsstudie: Druckverlauf einer schnellen Flamme. Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00 mit 17,9 % H_2 .

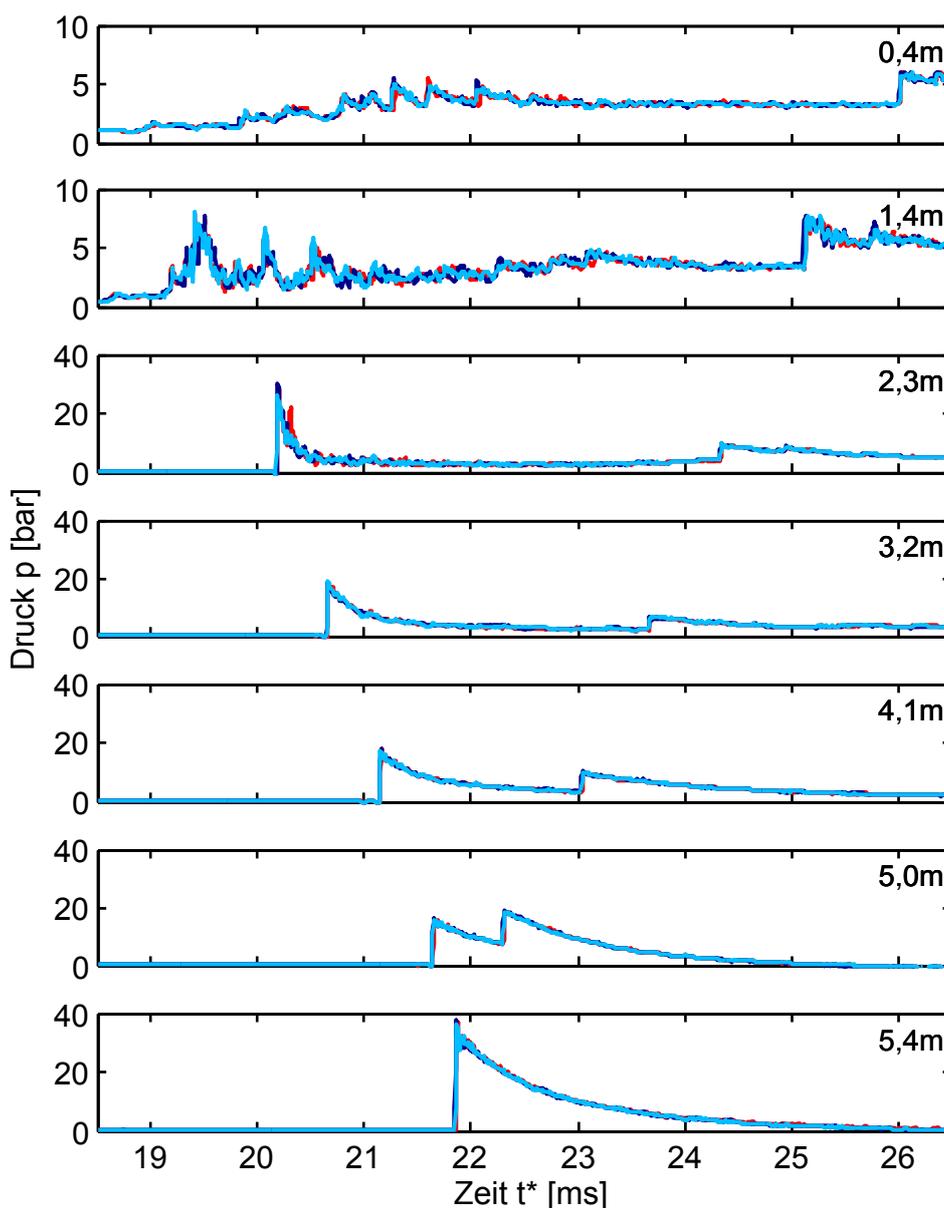


Abbildung 6.5: Wiederholbarkeitsstudie: Druckverlauf einer Detonation. Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00 mit 24,4 % H₂.

gut zu erkennen. Die Signalverläufe der einzelnen Drucksensoren sind für alle drei Versuchswiederholungen bezüglich Ankunftszeit der Druckwelle sowie Maximaldruck nahezu identisch.

Aus dem Abstand zwischen zwei Drucksensoren sowie der Zeitdifferenz zwischen der Ankunftszeitpunkt der Stoßwelle am jeweiligen Drucksensor lässt sich die Geschwindigkeit der Stoßwelle berechnen. Abbildung 6.6 zeigt für die zwei Versuchskonfigurationen mit 17,9 % und 24,4 % H₂ (BR30-S300-VR00)

den Geschwindigkeitsverlauf der Stoßwelle im hinteren Kanalabschnitt ($x \geq 2,3$ m). Mit magerem Gemisch (17,9 % H₂) wird die Druckwelle zunächst auf

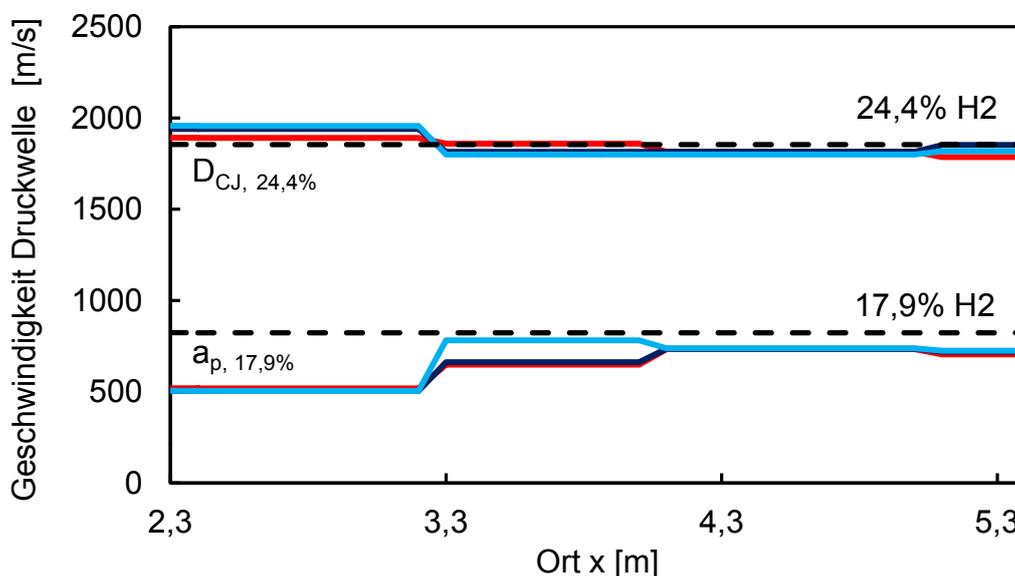


Abbildung 6.6: Wiederholbarkeitsstudie: Ausbreitung der Druckwellenfront im Explosionskanal. Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00 mit 17,9 % und 24,4 % H₂.

die Schallgeschwindigkeit der Produkte (a_p (17,9%) = 823 m/s) beschleunigt und breitet sich bis zum Ende des Kanals nahezu konstant mit dieser Geschwindigkeit aus. Die Flammgeschwindigkeit nimmt im Gegensatz dazu im hinteren Kanalabschnitt ab (vgl. Abb. 6.2 mit Abb. 6.6). Die Flammenfront entkoppelt sich bei dieser Versuchskonfiguration ab einem Abstand von $x \geq 2,5$ m von der Stoßfront. Grund hierfür ist der fehlende Turbulenzeintrag durch die Hindernisse. Hierauf wird in Kapitel 6.1.2 noch näher eingegangen. Bei der detonativen Verbrennung mit 24,4 % H₂ entspricht die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Stoßfront nahezu der CJ-Geschwindigkeit (D_{CJ} (24,4%) = 1854 m/s). Die zugehörige relative Abweichung der Druckwellengeschwindigkeit eines Versuchs zum Mittelwert liegt in einem Bereich von 0,3 % bis 2,0 %.

Als Erklärung für geringe Schwankungen in den Versuchsergebnissen können folgende Ursachen herangezogen werden:

- Unzureichende Spüldauer zwischen den Versuchen
- Druck im Explosionskanal zum Zündzeitpunkt schwankt von Versuch zu Versuch

- Gemischzusammensetzung in unmittelbarer Nähe der Zündquelle variiert (lokal mageres/fetteres Gemisch)
- Zugeführte Zündenergie durch die Zündelektrode sowie Ort des Zündfunken variiert
- Bestimmung der eingedüsten Wasserstoffmenge wird durch Messfehler beeinflusst
- Lokale Explosionen treten an unterschiedlichen Orten im Explosionskanal, mit unterschiedlicher Stärke und Häufigkeit auf
- Messfehler von Flammen- und Drucksensoren und automatisierte Auswerterroutine (s. auch Kap. 5.1)

Insbesondere eine unzureichende Spüldauer sowie die Auswertung der Messsignale haben hierbei einen erhöhten Einfluss auf die Ergebnisse. Zusammenfassend kann jedoch anhand der vorgestellten Ergebnisse eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Versuche festgestellt werden.

6.1.2 Einfluss der Hinderniskonfiguration

Versuche in Kanälen mit Hindernisstrecke wurden bereits von vielen Autoren eingehend untersucht. Hierbei wurden unter anderem Kriterien für das Auftreten der einzelnen Verbrennungsregimes (schnelle Flamme, DDT) abgeleitet. Diese sollen auch zur Einordnung der GraVent-Anlage herangezogen werden. Hierzu werden zunächst für vier Kanalkonfigurationen eine Auswahl repräsentativer Geschwindigkeitsverläufe dargestellt und diskutiert. Im Anschluss daran wird überprüft, ob das 7λ -Kriterium auch für die GraVent-Anlage gültig ist.

Geschwindigkeitsverläufe der Flammenfront

Abbildung 6.7 zeigt eine Auswahl von Geschwindigkeitsverläufen der Flammenfront über der Kanallänge für die Kanalkonfigurationen BR30-S100-VR00, BR30-S300-VR00, BR60-S100-VR00 und BR60-S300-VR00. Anhand der ausgewählten Versuche ist zu erkennen, dass grundsätzlich bei höherem Wasserstoffgehalt höhere Ausbreitungsgeschwindigkeiten erreicht werden können, wobei der Zusammenhang aufgrund der möglichen Ausbreitungsregimes hochgradig nichtlinear sein kann.

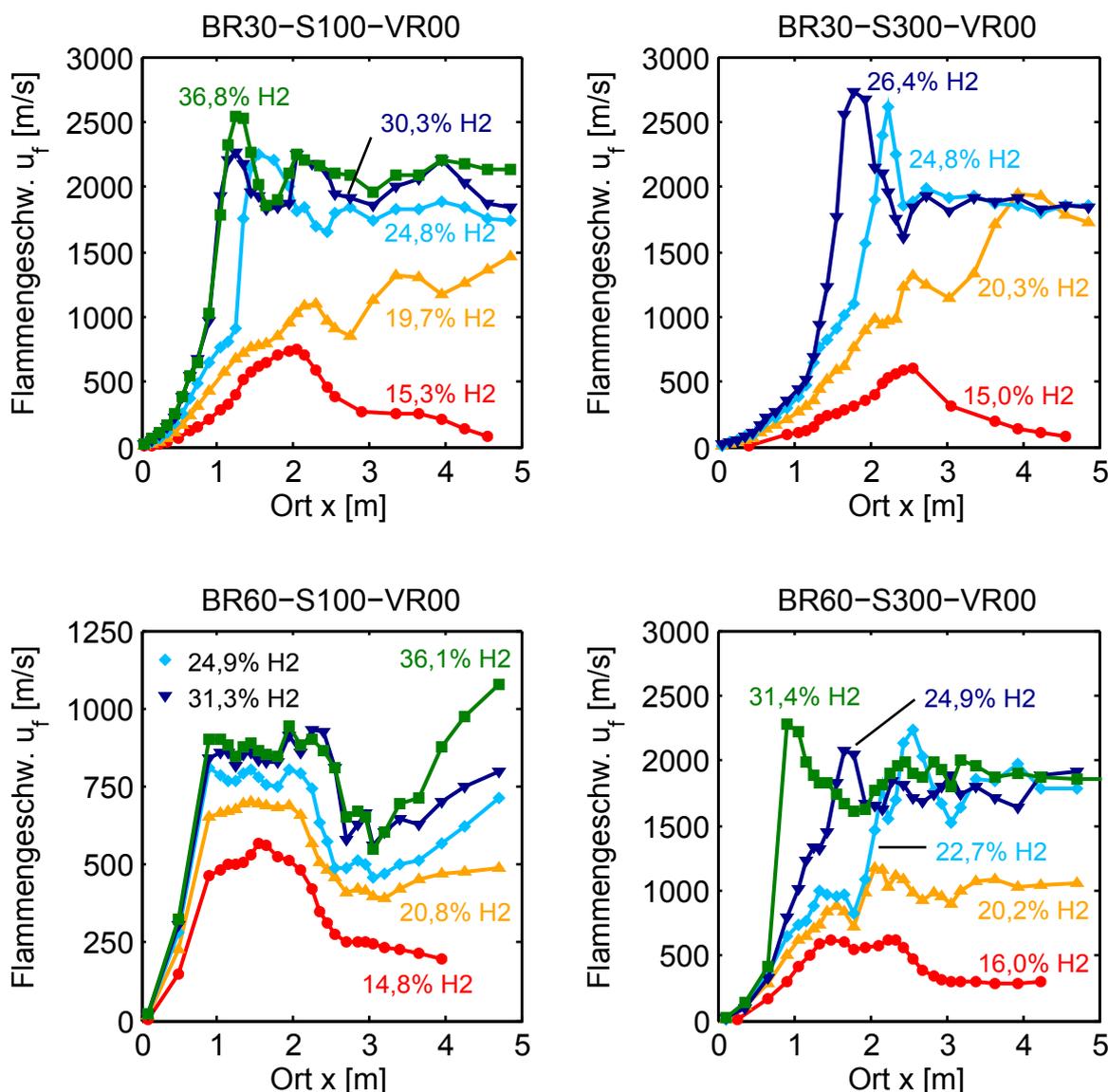


Abbildung 6.7: Verlauf der Flammengeschwindigkeit in vier verschiedenen Kanalkonfigurationen mit Variation des Wasserstoffanteils. Alle Versuche wurden mit einem homogenen Gasgemisch ($t_w = 60$ s) und geschlossenem Kanal durchgeführt. Die Hindernisstrecke erstreckt sich bis zu einem Abstand von $x = 2,05$ m von der Zündquelle.

Bei kleinen Hindernissen und engem Hindernisabstand (BR30-S100-VR00) und geringem Wasserstoffanteil ($\leq 22,5\%$ H₂) tritt in der Hindernisstrecke eine kontinuierliche Flammenbeschleunigung auf. Bei einem Wasserstoffgehalt von $15,3\%$ H₂ wird am Ende der Hindernisstrecke eine Flammengeschwindigkeit von maximal 752 m/s erreicht. Sie liegt somit nur unwesentlich unterhalb der Schallgeschwindigkeit der Produkte (a_p). Die charakteristischen

Werte a_p und D_{CJ} für verschiedene H_2 -Anteile sind in Tabelle A.1 in Anhang A aufgelistet. Nach Austritt aus der Hindernisstrecke entkoppelt sich die Flamme aufgrund des fehlenden Turbulenzeintrags durch die Hindernisse von der voraus laufenden Druckwelle. Die Druckwelle, welche im unversperrten Kanalabschnitt nur aufgrund von Reibungsverlusten langsamer wird, wird an der Endplatte reflektiert und kann eine der Flammenausbreitung entgegengesetzte Strömung ausbilden. Hierdurch wird die Expansionsströmung nahezu kompensiert. Die Flamme wird dadurch zunächst auf 250 m/s abgebremst, ab $x \geq 3,7$ m sinkt die Flammengeschwindigkeit noch weiter ab.

Mit einem Wasserstoffanteil von mehr als 19,0% H_2 wird die Flamme in der Hindernisstrecke über die isobare Schallgeschwindigkeit der Produkte beschleunigt. Eder [27] hat festgestellt, dass es in diesem Fall ($u_f > a_p$) drei Möglichkeiten gibt, wie sich die Flamme im anschließenden unblockierten Kanalabschnitt weiter ausbreiten kann. Die erste Möglichkeit ist, dass es nach dem letzten Hindernis zu einer Entkopplung der Flamme von der Druckwelle kommt. Durch die entgegenlaufende Druckwelle wird die Flamme abgebremst. Die zweite Möglichkeit ist, dass sich die Flamme im Anschluss an die Hindernisstrecke nahezu konstant mit der Schallgeschwindigkeit der Produkte ausbreitet. Dies konnte in dieser Kanalkonfiguration für Gemische mit einem Wasserstoffanteil von 17,5% bis 18,5% H_2 beobachtet werden, wobei es zwischen $x = 2,3$ m bis 2,5 m aufgrund des fehlenden Turbulenzeintrags durch die Hindernisse zu einem kurzzeitigen Abfall der Flammengeschwindigkeit kommt. Mit einem Wasserstoffanteil von 19,7% H_2 kommt es nach der Hindernisstrecke ($x = 2,3$ m bis 2,75 m) ebenfalls zu einem Geschwindigkeitsabfall auf a_p (s. Abb. 6.7). Im Anschluss wird die Flamme jedoch weiter beschleunigt, bis es bei $x = 4,95$ m zu einem Übergang von der Deflagration in die Detonation kommt. Dieser Übergang ist in Abbildung 6.7 nicht mehr dargestellt. Hierbei entstehen sehr hohe Drücke, wie in Abbildung 6.12 auf S. 72 zu sehen ist. Die dritte Möglichkeit ist, dass es unmittelbar nach der Hindernisstrecke zu einem Übergang von der Deflagration in die Detonation kommt. Dies wurde bei der Kanalkonfiguration BR30-S100-VR00 für Mischungen mit einem Wasserstoffanteil von 21,5% bis 22,5% H_2 ebenfalls beobachtet (nicht in Abb. 6.7 dargestellt). Mit einem Wasserstoffanteil von 24,8% findet bereits in der Hindernisstrecke ein Übergang von der Deflagration in eine überkomprimierte Detonation statt ($x = 1,35$ m). Im Anschluss daran brennt das Gemisch mit einer Geschwindigkeit geringfügig unterhalb

der CJ-Geschwindigkeit (D_{CJ} (24,8 %) = 1865 m/s) ab, was ein klares Indiz für das Erreichen einer Detonation ist. Dass es während eines DDT-Übergangs zu einer überkomprimierten Detonation kommt, wurde auch in anderen Untersuchungen beobachtet [27, 41, 62]. Wird der Wasserstoffanteil weiter erhöht, so verkürzt sich zunächst die Anlaulänge X_D bis zum Auftreten von DDT (engl.: run-up distance, RUD). Dies ist anhand der Versuche mit 24,8 % H₂ und 30,3 % H₂ gut zu erkennen (Abb. 6.7). Eine weitere Verkürzung der Anlaulänge X_D ist ab einem Wasserstoffanteil von ca. 30 % H₂ nicht mehr möglich (s. auch Abb. 6.10 auf Seite 68). Es ist zu erwarten, dass mit weiterer Zunahme des Wasserstoffanteils die Anlaulänge X_D wieder zunimmt [62].

Wird der Hindernisabstand vergrößert (Kanalkonfiguration: BR30-S300-VR00) können vergleichbare Geschwindigkeitsverläufe wie in der Kanalkonfiguration mit kurzem Hindernisabstand (BR30-S100-VR00) beobachtet werden. Neben den von Eder [27] beschriebenen drei Möglichkeiten konnte für den Versuch mit 20,3 % H₂ ein zusätzlicher Geschwindigkeitsverlauf beobachtet werden. Zunächst wird die Flamme bis zum Ende der Hindernisstrecke ($x = 2,05$ m) stetig auf eine Geschwindigkeit von 975 m/s beschleunigt, breitet sich im Anschluss bis $x = 2,35$ m konstant mit dieser Geschwindigkeit aus. Nach einem plötzlichen Geschwindigkeitsanstieg auf 1310 m/s kommt es bei $X_D = 3,95$ m schließlich zu einem DDT-Übergang.

Im Gegensatz hierzu wird bei größeren Hindernissen und engem Hindernisabstand (BR60-S100-VR00) bereits in der Hindernisstrecke eine konstante Geschwindigkeit erreicht. Diese bleibt allerdings unter der Schallgeschwindigkeit der Produkte. Unmittelbar nach Ende der Hindernisstrecke kommt es aufgrund des fehlenden Turbulenzeintrages durch die Hindernisse zu einem deutlichen Geschwindigkeitsabfall. Bei Gemischen mit einem Wasserstoffanteil von mehr als 20,5 % wird anschließend wieder ein Geschwindigkeitsanstieg beobachtet. Dieser ist umso größer, je höher der Wasserstoffanteil ist. Mit einem überstöchiometrischen Gemisch (36,1 % H₂) wird die Flamme im hinteren Kanalabschnitt schließlich bis auf die Schallgeschwindigkeit der Produkte beschleunigt und erzielt somit eine höhere Geschwindigkeit als in der Hindernisstrecke. Anhand der Flammensensoren konnte kein Übergang in die Detonation beobachtet werden.

In der Kanalkonfiguration BR60-S300-VR00 können mehrere Beobachtungen gemacht werden. Bei einem Gemisch mit 16,0 % H₂ wird ebenfalls eine

konstante Flammengeschwindigkeit in der Hindernisstrecke von 585 m/s (gemittelt) erreicht. Nach dem letzten Hindernis fällt die Geschwindigkeit auf 300 m/s ab und breitet sich anschließend konstant mit dieser Geschwindigkeit aus (Abb. 6.7). Bei den Versuchen mit 20,2 % H₂ bzw. 22,7 % H₂ wird in der Hindernisstrecke die Flamme auf die Schallgeschwindigkeit der Produkte beschleunigt. Unmittelbar nach der Hindernisstrecke breitet sich die Flamme im ersten Fall (20,2 % H₂) konstant mit 1020 m/s aus. Im zweiten Fall (22,7 % H₂) findet unmittelbar nach dem letzten Hindernis ein Übergang von der Deflagration in die Detonation statt und die Reaktion läuft auch bis zum Kanalende hin detonativ ab. Mit Erhöhung des Wasserstoffanteils wird die Anlaufänge bis zum erstmaligen Erreichen der CJ-Geschwindigkeit weiter verkürzt. Nach einem Übergang von der Deflagration in die überkomprimierte Detonation (24,9 % H₂: $X_D = 1,55$ m; 31,4 % H₂: $X_D = 0,9$ m) fällt die Flammengeschwindigkeit jeweils auf die ca. 0,8-fache CJ-Geschwindigkeit ab. Es liegt somit eine Quasi-Detonation vor [13, 14, 27]. Unmittelbar nach Austritt aus der Hindernisstrecke breitet sich die Flamme mit der jeweiligen CJ-Geschwindigkeit aus. Für die weitere Betrachtung wird die Anlaufänge X_D wie folgt definiert: Die gemessene Flammengeschwindigkeit erreicht erstmalig den Wert der theoretischen CJ-Geschwindigkeit, wenn sich die Flamme im weiteren Verlauf als Detonation, in der Hindernisstrecke ggfs. zunächst auch als Quasi-Detonation ausbreitet. Hierbei ist ein kurzzeitiger Abfall der Flammengeschwindigkeit unter die CJ-Geschwindigkeit durchaus gestattet. Die Druckwerte werden zur Plausibilitätsprüfung ebenfalls herangezogen. Der Geschwindigkeitsabfall auf deutlich unter die CJ-Geschwindigkeit zwischen dem DDT-Punkt und dem Ende der Hindernisstrecke ($x = 2,05$ m) lässt sich wie folgt erklären: Aufgrund der wiederholten transversalen Expansion der Detonationsfront in der Hindernisstrecke kommt es zu einem Impulsdefizit gegenüber einer analytisch betrachteten 1D-Detonation, das sich in einem Geschwindigkeitsdefizit äußert. Nach Verlassen der Hindernisstrecke fällt dieser hemmende Effekt weg und es kann ein erneuter Geschwindigkeitsanstieg auf die CJ-Geschwindigkeit beobachtet werden. Dieses Phänomen wurde sowohl in experimentellen Arbeiten [12, 13, 27] als auch in numerischen Simulationen beobachtet [30].

Charakteristische Flammengeschwindigkeitsverläufe

Zusammengefasst können in allen untersuchten Kanalkonfigurationen mit Hindernisstrecke sieben charakteristische Geschwindigkeitsverläufe beobachtet werden (s. Abb. 6.8). Die einzelnen charakteristischen Geschwindigkeitsverläufe sind hierbei abhängig von der Anordnung der Hindernisse und der Gemischzusammensetzung.

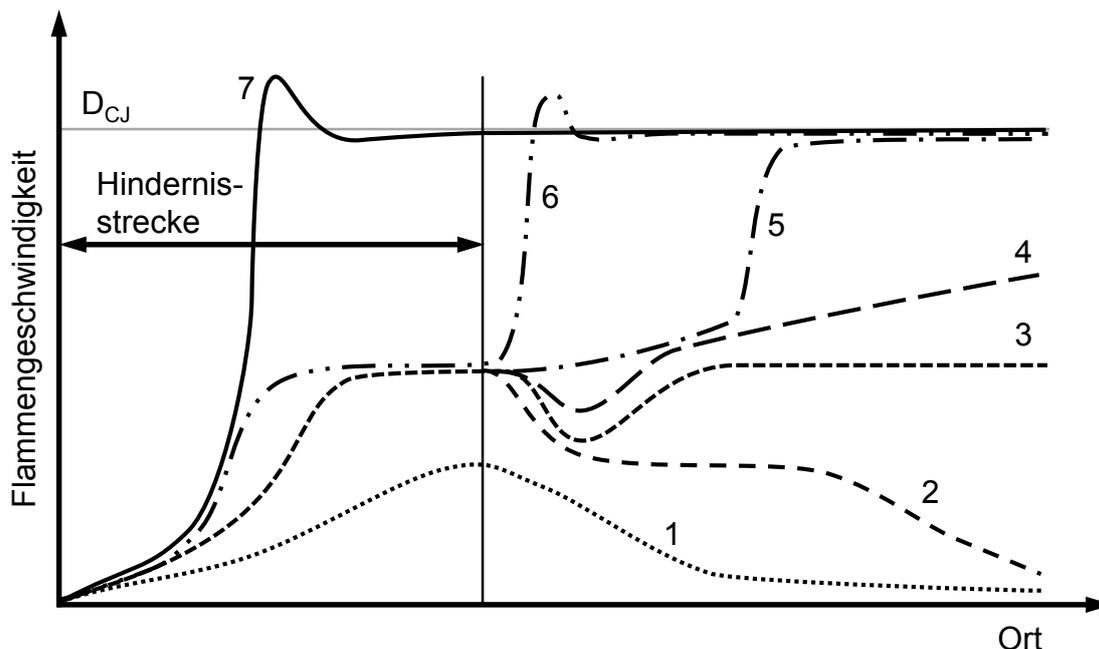


Abbildung 6.8: Charakteristische Geschwindigkeitsverläufe der Flammenfront in der GraVent-Anlage mit Hindernisstrecke. Die Angabe D_{CJ} entspricht der CJ-Geschwindigkeit.

Verlauf 1: Keine oder nur geringe Flammenbeschleunigung, wobei die maximale Flammengeschwindigkeit u_F auch deutlich kleiner als a_p sein kann.

Verlauf 2: Beschleunigung der Flamme bis zum Ende der Hindernisstrecke. Anschließend nimmt die Flammenfrontgeschwindigkeit bis zum Kanalende hin ab.

Verlauf 3: Beschleunigung der Flamme bis zum Ende der Hindernisstrecke auf $u_F \geq a_p$. Nach der Hindernisstrecke kommt es unter Umständen zu einem Geschwindigkeitsabfall, anschließend breitet sich die Flamme bis zum Kanalende hin mit konstanter Geschwindigkeit aus.

Verlauf 4: Beschleunigung der Flamme bis zum Ende der Hindernisstrecke

auf $u_F \geq a_p$. Nach der Hindernisstrecke kommt es ggfs. zu einem Geschwindigkeitsabfall. Die Flamme wird im Anschluss weiter beschleunigt, wobei die maximale Flammengeschwindigkeit unterhalb der CJ-Geschwindigkeit bleibt (Quasi-Detonation).

Verlauf 5: Beschleunigung der Flamme über die Schallgeschwindigkeit der Produkte. Ein Übergang von der Deflagration in die Detonation tritt erst in einem größeren Abstand vom letzten Hindernis ($\Delta x \geq 1$ m) ein.

Verlauf 6: Wie Verlauf 5, allerdings tritt DDT unmittelbar nach dem letzten Hindernis ein.

Verlauf 7: Wie Verlauf 5, allerdings kommt es zu DDT bereits in der Hindernisstrecke. Bei großer Versperrung des Kanals (BR = 60 %) breitet sich die Flamme nach einem DDT-Übergang in der Hindernisstrecke mit einer Geschwindigkeit unterhalb der CJ-Geschwindigkeit aus.

Auswertung der Versuche mit Hindernisstrecke

Abbildung 6.9 zeigt die maximale Flammengeschwindigkeit bzw. aufgrund der besseren Darstellung die Geschwindigkeit der stabilen Detonation¹ für die vier Kanalkonfigurationen mit einem homogenen Gemisch. Hierbei kann die maximale Flammengeschwindigkeit in der Hindernisstrecke oder im unversperrten Kanalabschnitt beobachtet werden. Anhand dieser Abbildung ist zu erkennen, dass für BR30-S100-VR00 die Maximalgeschwindigkeit zwischen 12,0 % und 13,5 % H₂ von der Schallgeschwindigkeit der Reaktanden auf die Schallgeschwindigkeit der Produkte ansteigt. Zwischen 17,9 % und 19,7 % H₂ springt die Maximalgeschwindigkeit der Flammenfront von der Schallgeschwindigkeit der Produkte auf bis zu 2040 m/s. Sie liegt somit über der CJ-Geschwindigkeit. Der Grund hierfür ist, dass die DDT erst in Endplattennähe auftritt.

Für diese Kanalkonfiguration wird anhand des 7λ -Kriterium [18] DDT für ein Gemisch mit 20,5 % H₂ erwartet. Es sei angemerkt, dass die Autoren eine Genauigkeit von 30 % angeben. Hier fließt zum einen die nicht eindeutig bestimmbare Detonationszellgröße ein [41], zum anderen die Abweichun-

¹Während des Übergangs von der Deflagration in die Detonation kann lokal eine deutlich höhere Flammengeschwindigkeiten als die CJ-Geschwindigkeit gemessen werden. Aus diesem Grund wird bei den Versuchen mit DDT nicht die maximale Flammengeschwindigkeit angegeben, sondern die Geschwindigkeit der stabilen Detonation.

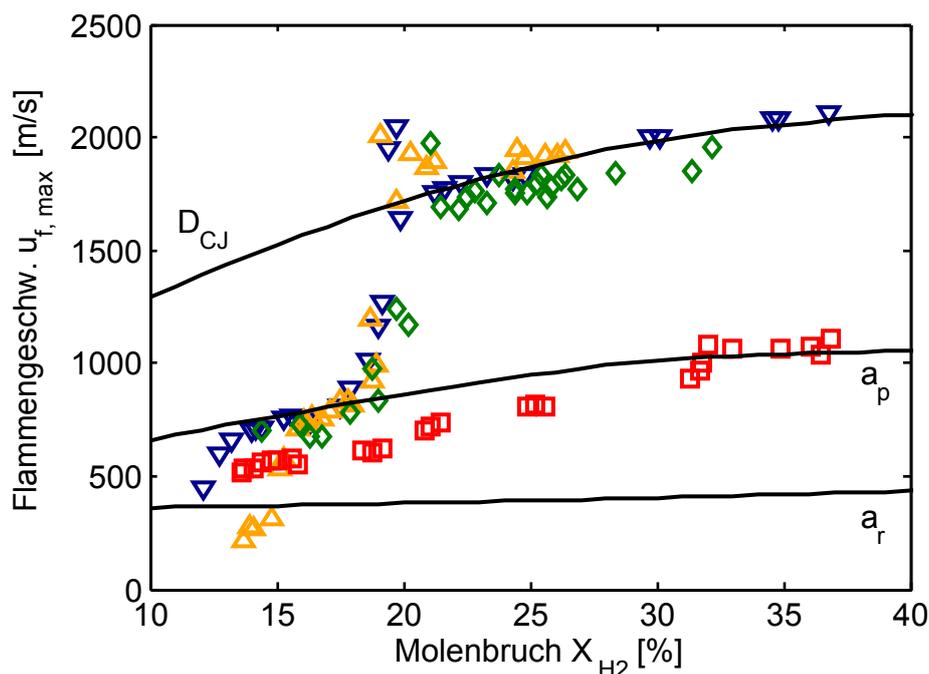


Abbildung 6.9: Maximale Flammengeschwindigkeit bzw. Geschwindigkeit der stabilen Detonation in der GraVent-Anlage für verschiedene Kanalkonfigurationen mit Hindernisstrecke. ∇ BR30-S100-VR00, \triangle BR30-S300-VR00, \square BR60-S100-VR00, \diamond BR60-S300-VR00; a_r : Schallgeschwindigkeit der Reaktanden; a_p : Schallgeschwindigkeit der Produkte; D_{CJ} : CJ-Geschwindigkeit. Um eine bessere Darstellung zu ermöglichen, wird nur ein Teil der durchgeführten Versuche dargestellt.

gen der experimentellen Messergebnisse. Ein weiterer Einfluss kann auch die hier untersuchte Kanalkonfiguration sein. Die Hindernisstrecke erstreckt sich nicht über die komplette Kanallänge. Zudem tritt mit der zuvor vorgestellten Kanalkonfiguration und magerem Gemisch (19,4 % bis 19,7 % H_2) DDT erst in der Nähe der Endplatte auf (s. hierzu auch Abb. 6.10). Diese Art der DDT ist auf den Einfluss der Endplatte zurückzuführen: Der reflektierte Stoß trifft auf die Flamme, wodurch es zu einer lokalen Explosion kommt. Dies konnte in numerischen Arbeiten gezeigt werden [29].

Bei weitem Hindernisabstand (BR30-S300-VR00) wird ein Wasserstoffanteil von mehr als 15,0 % H_2 in dem Wasserstoff-Luft-Gemisch benötigt, um die Flamme über die Schallgeschwindigkeit der Reaktanden zu beschleunigen. Somit ist bei dieser Kanalkonfiguration der Turbulenzeintrag in das Gasgemisch geringer als mit kleinerem Hindernisabstand. Beauvais [8] und Brehm [12] hatten dies bei Untersuchungen mit geringer Blockierate ebenfalls fest-

gestellt. DDT tritt bei einer Mischung mit mehr als 19,1 % H_2 ein. Das 7λ -Kriterium sagt DDT mit 18,7 % H_2 voraus und trifft somit gut die experimentellen Beobachtungen.

Abbildung 6.10 zeigt, dass bei der Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00 mit zunehmendem Wasserstoffanteil die Anlaulänge X_D deutlich abnimmt. Ab einem Wasserstoffanteil von mehr als 26 % tritt DDT bereits innerhalb der Hindernisstrecke auf. Mit einem Wasserstoffanteil von 19,1...21,2 % kann DDT auch noch in einem größeren Abstand vom letzten Hindernis ($X_D = 3,5 \dots 4,7$ m) beobachtet werden. Diesen prinzipiellen Zusammenhang haben Kiyanda et al. [52] ebenfalls mit einer anderen Versuchsanlage festgestellt.

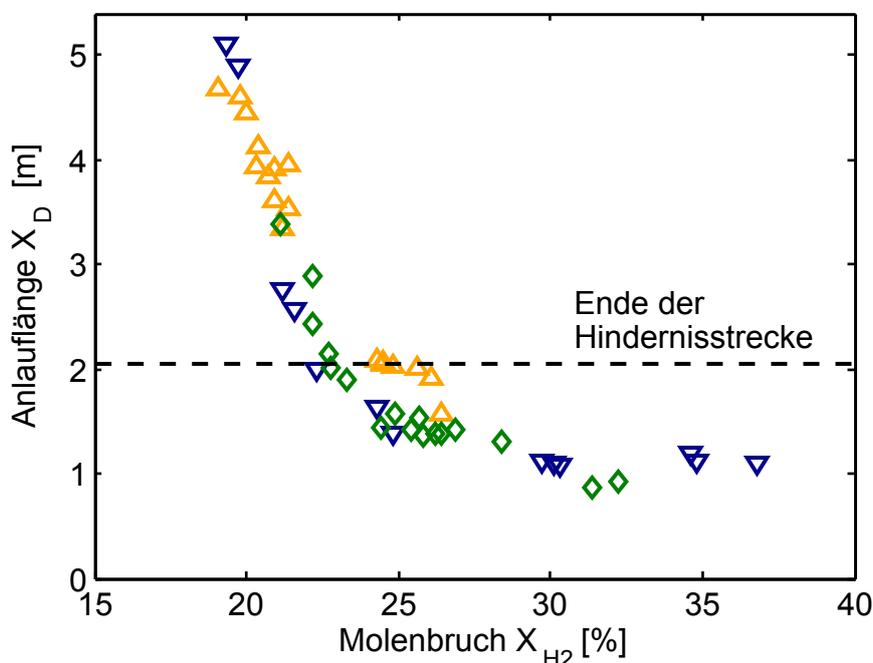


Abbildung 6.10: Anlaulänge der Flamme bis zum Auftreten von DDT in Abhängigkeit der Wasserstoffanteile für verschiedene Kanalkonfigurationen mit Hindernisstrecke. ∇ BR30-S100-VR00, \triangle BR30-S300-VR00, \diamond BR60-S300-VR00. Um eine bessere Darstellung zu ermöglichen, wird nur ein Teil der durchgeführten Versuche dargestellt. In der Kanalkonfiguration BR60-S100-VR00 wurde kein DDT beobachtet.

Die Versuche mit der Kanalkonfiguration BR60-S300-VR00 werden anhand der Abbildung 6.9 und 6.10 nochmals näher betrachtet. Bei Versuchen mit einem Wasserstoffanteil von 21,0 % liegt die maximale Flammgeschwindigkeit erstmalig über der CJ-Geschwindigkeit. Der experimentell ermittelte

Umschlagpunkt bei 21,0 % H_2 stimmt somit gut mit dem 7λ -Kriterium (DDT mit 20,1 % H_2) überein. Die Geschwindigkeit der stabilen Detonation liegt geringfügig unter der CJ-Geschwindigkeit. Im Gegensatz zu den zwei Kanal-konfigurationen mit geringer Versperrung tritt DDT niemals am Ende des Versuchskanals, sondern nur bis zu einem Abstand von $x = 3,4$ m auf (s. Abb. 6.10).

In Abbildung 6.11 ist für die vier untersuchten Kanalkonfigurationen die Anlaulänge X_s über dem Molenbruch X_{H_2} aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich mit zunehmendem Wasserstoffgehalt die Anlaulänge X_s verkürzt. Einzige Ausnahme sind die Versuche mit der Kanalkonfiguration BR60-S100-VR00. Hier bleibt die Anlaulänge nahezu konstant bei $x = 4,5$ m. Für die zwei Kanalkonfigurationen BR30-S100-VR00 und BR60-S300-VR00 wird über einen großen Bereich des Wasserstoffanteils die kürzesten Anlaulänge X_s beob-

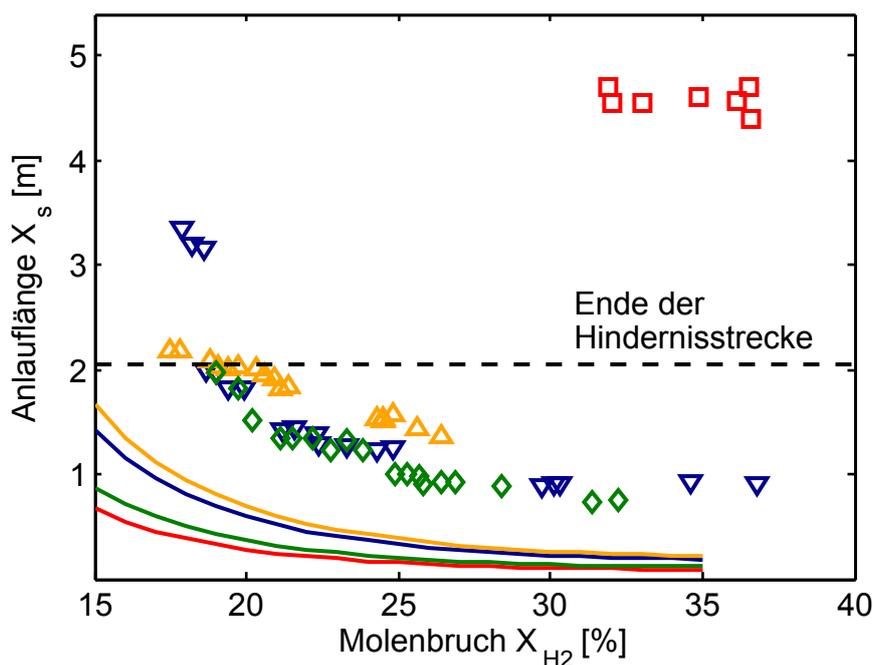


Abbildung 6.11: Anlaulänge der Flamme bis zum Erreichen der Schallgeschwindigkeit der Produkte für Kanalkonfigurationen mit Hindernisstrecke. ∇ BR30-S100-VR00, \triangle BR30-S300-VR00, \square BR60-S100-VR00, \diamond BR60-S300-VR00. Um eine bessere Darstellung zu ermöglichen, wird nur ein Teil der durchgeführten Versuche dargestellt. Die durchgezogene Linien sind die erwarteten Anlaulängen nach Ciccarelli et al. [16] (Konstante $a = 2$ und $b = 1,5$). Die Linienfarbe gibt die Zuordnung zur jeweiligen Kanalkonfiguration an.

achtet. Bei der Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00 wird die Flamme in der Hindernisstrecke aufgrund des geringeren Turbulenzeintrags in das Gemisch weniger beschleunigt. Dadurch wird eine längere Anlauflänge benötigt, bis die Flamme auf die Schallgeschwindigkeit der Produkte beschleunigt wird.

Veser et al. [80] stellten einen Ansatz zur Vorhersage der Anlauflänge X_S vor. Nach der Anlauflänge X_S erreicht die Flammengeschwindigkeit 95 % der isobaren Schallgeschwindigkeit der Produkte a_p . Der Ansatz berücksichtigt hierbei den geometrischen Einfluss der Hindernisse auf die Faltung der Flammenfront. Der Einfluss der Druckwellen wird vernachlässigt. Ciccarelli et al. [16] haben einen Zusammenhang zwischen Hindernisabstand und Anlauflänge gefunden und in den Ansatz von [80] mit eingearbeitet. Dieser modifizierte Ansatz lautet:

$$X_S \underbrace{\frac{20 s_L (\sigma - 1)}{a_p}}_{\text{Gemischabhängige Größen}} \approx a \underbrace{\frac{D (1 - BR)}{1 + b (D / S) BR}}_{\text{Kanalspezifische Größen}} \quad (6.1)$$

Dieser Ansatz wurde auch auf die Messergebnisse der GraVent-Anlage angewendet. Hierbei wird der Rohrdurchmesser D durch die Kanalhöhe H der GraVent-Anlage ersetzt. Das Expansionsverhältnis σ sowie die isobare Schallgeschwindigkeit a_p kann Tabelle A.1 in Anhang A entnommen werden. Die laminare Brenngeschwindigkeit wurde mit einer Korrelation nach Ettner berechnet [29]. Auf der rechten Seite der Gleichung sind die Konstanten a , b , die Blockierate BR und der Hindernisabstand S . Veser et al. [80] und Dorofeev [19] stellten mit $a = 2$ und $b = 1,5$ eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Ansatz fest. So haben Ciccarelli et al. [16] eine Streuung von 50 %, Dorofeev [19] eine Streuung von 25 % zwischen Ansatz und Messdaten festgestellt. Aus diesem Grund wurden diese Werte für die Berechnung der Anlauflänge verwendet. Das Ergebnis sind die in Abbildung 6.11 eingezeichneten Linien. Die Linienfarbe gibt die Zuordnung zur jeweiligen Kanalkonfiguration an.

Wie aus der Abbildung 6.11 zu erkennen ist, stimmen die Ergebnisse der GraVent-Anlage nicht mit dem Ansatz überein. Die experimentell ermittelte Anlauflänge X_S ist bei einem stöchiometrischen Gemisch sechs mal länger als nach dem Ansatz berechnet. Auch bei Variation der Konstanten a und b konnte kein stimmiges Ergebnis mit den in der GraVent-Anlage durchgeführ-

ten Versuche erzielt werden. Es kann gefolgert werden, dass Gleichung (6.1) nicht auf alle Geometrien übertragen werden kann.

Druckentwicklung

Für die sicherheitstechnische Fragestellung spielt der Maximaldruck und der Druckimpuls eine wichtige Rolle. Abbildung 6.12 zeigt die maximalen Drücke der Drucksensoren in der Deckplatte (Diagramm oben) sowie den reflektierten Druck (Diagramm unten), der am Drucksensor in der Endplatte gemessen wurde. Wie in Abbildung 6.9 ist auch hier der Übergang in die einzelnen Flammenregimes, d.h. der Übergang von langsamer zu schneller Deflagration bzw. von der Deflagration zur Detonation, gut zu erkennen. An der Endplatte können Maximaldrücke bis zu 250 bar gemessen werden. Diese treten dann auf, wenn es unmittelbar vor der Endplatte ($x \geq 5,0$ m) zu lokalen Explosionen kommt, die starke Druckstöße aussenden. Diese werden an der Endplatte reflektiert und zünden das noch unverbrannte Gemisch. Der Enddruck ist aufgrund der Vorkompression der Reaktanden wesentlich höher. Dies ist in guter Übereinstimmung mit den Beobachtungen von Eder [27] und den numerischen Berechnungen von Ettner [29].

6.1.3 Flammenausbreitung im Explosionskanal mit rechteckigem Kanalquerschnitt

Durch den Einbau des optischen Segments war es aufgrund der fünf quer zur Ausbreitungsrichtung angeordneten Flammensensoren möglich, die Ankunft der Flammenfront über der Breite des Kanals (d. h. entlang der y -Koordinate) zu detektieren (s. Abb. 5.3). Abbildung 6.13 zeigt die relative Flammenankunftszeit bei allen Flammensensoren bezogen auf den Flammensensor bei $y = 10$ mm.

Bei dem Versuch mit 17,8 % H_2 sind die fünf Flammensensoren in einem Abstand von $x = 2,0$ m von der Zündquelle und somit unmittelbar vor dem letzten Hindernis angeordnet. Die Flamme breitet sich hier mit einer Geschwindigkeit von ca. 600 m/s aus. Es liegt somit eine schnelle Deflagration vor ($u_f > a_r$). Es ist zu erkennen, dass die Flamme an den Flammensensoren im Wandbereich ($|y| > 80$ mm) früher detektiert wird als an der Position $y = 10$ mm. Das heißt, die Flammenfront ist gekrümmt. Versuchswiederholungen zeigen,

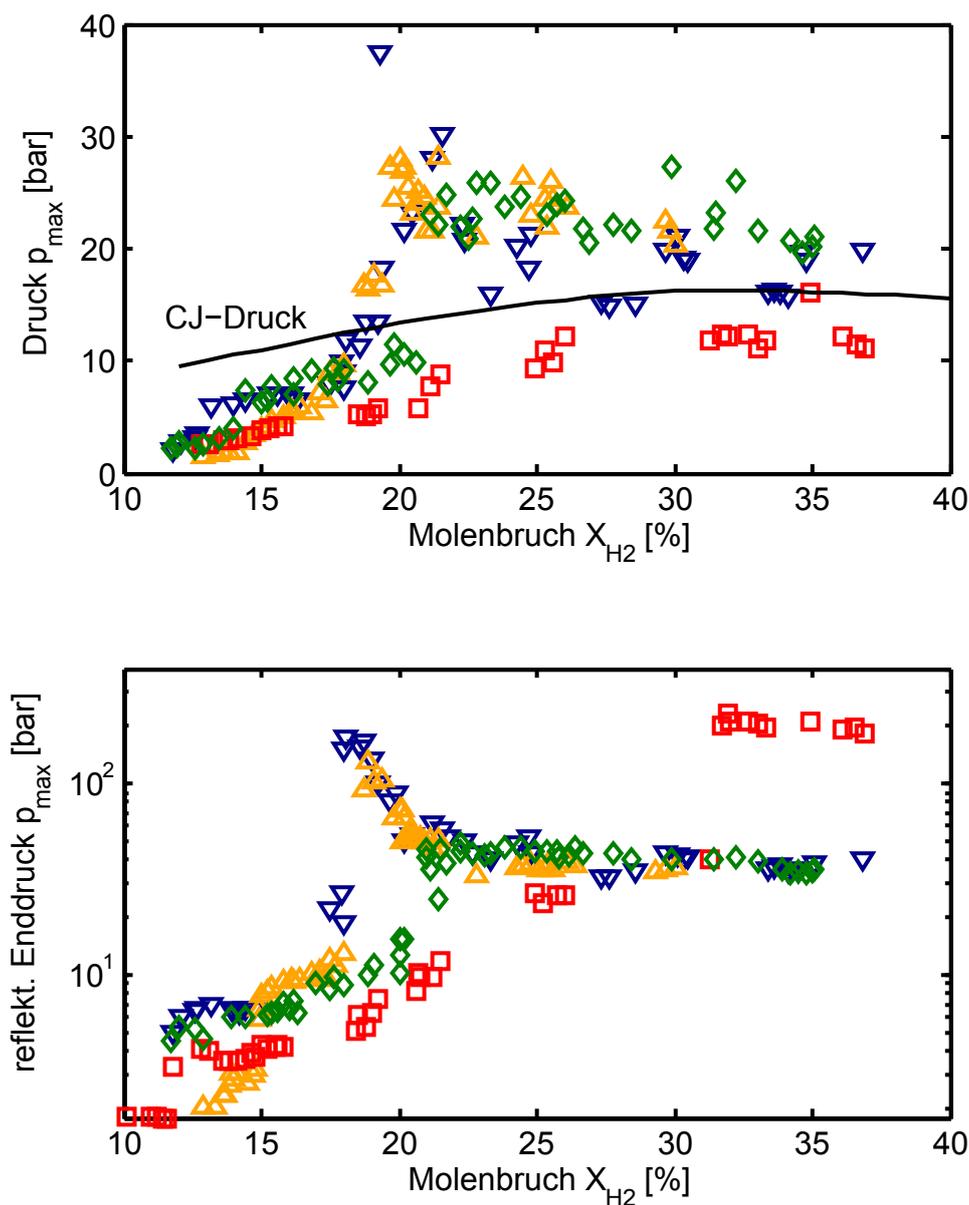


Abbildung 6.12: Maximaldruck in der GraVent-Anlage für verschiedene Kanalkonfigurationen mit Hindernisstrecke. Oben: Maximaldruck entlang des Kanals; unten: Reflektierter Enddruck an der Endplatte. ∇ BR30-S100-VR00, \triangle BR30-S300-VR00, \square BR60-S100-VR00, \diamond BR60-S300-VR00. Um eine bessere Darstellung zu ermöglichen, wird in beiden Diagrammen nur ein Teil der durchgeführten Versuche dargestellt.

dass die relative Flammenankunftszeit von Versuch zu Versuch schwankt. Die Flamme eilt jedoch stets im Wandbereich voraus. Auch nach der Hindernisstrecke wird die Flamme im Wandbereich früher detektiert. Bei einem Wasserstoffgehalt von 34,1 % breitet sich die Flamme nach der Hindernisstrecke mit einer Geschwindigkeit von 1950 m/s aus. Die Reaktion verläuft detonativ.

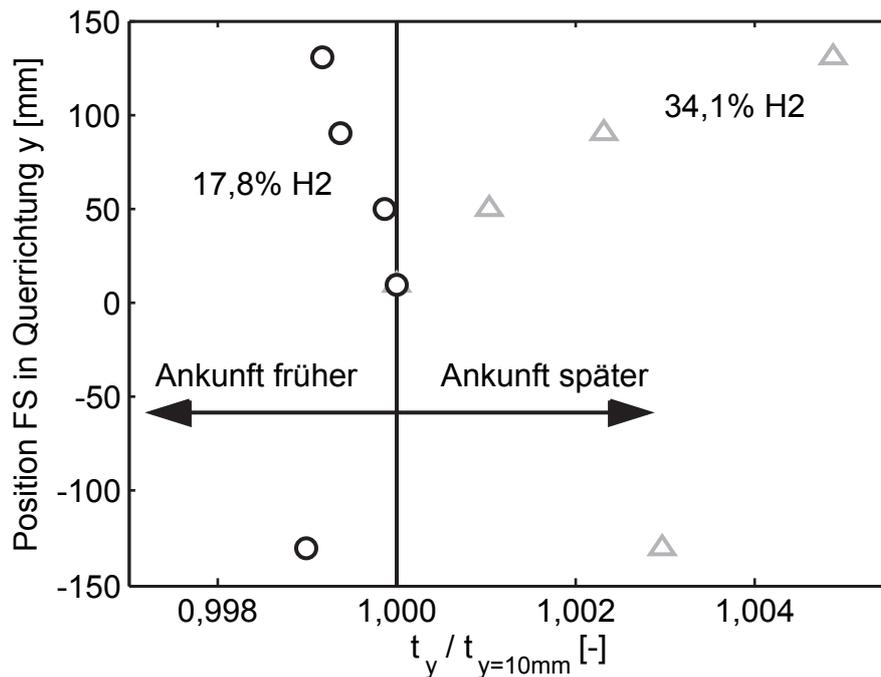


Abbildung 6.13: Flammenankunft (entdimensioniert) in Abhängigkeit der Sensorposition in Querrichtung. Versuche mit der Kanalkonfiguration BR60-S300-VR00. Für die Versuche mit 17,8 % H₂ sind die Flammensensoren bei $x = 2,0$ m positioniert und für 34,1 % H₂ bei $x = 3,9$ m.

Die Flamme wird in diesem Fall zuerst am Flammensensor bei $y = 10$ mm detektiert.

Abbildung 6.14 zeigt Schattenaufnahmen einer schnellen Deflagration mit der Kanalkonfiguration BR60-S300-VR00. Die Ausbreitung der Druckwelle und Flamme verläuft von links nach rechts. Zu den Zeitpunkten 42,08 ms und 42,12 ms sind zwei führende Stöße kurz vor einem Hindernis zu erkennen. Diese annähernd planaren Stöße treffen auf das Hindernis und werden reflektiert. Der Teil, der durch die Mitte zwischen den Hindernissen tritt, breitet sich anschließend annähernd zylinderförmig aus. Zum Zeitpunkt 42,22 ms ist die Flamme am linken Bildausschnitt zu sehen. Die Flammenfront ist gekrümmt. Es ist zu erkennen, dass die Flammenfront nahezu symmetrisch zur Kanalmitte (Höhe) ist. Dies ist ein Zeichen dafür, dass das Gemisch ausreichend beschleunigt wird und Auftriebseffekte keine Rolle spielen [1]. Die Krümmung der Flammenfront an der oberen und unteren Wand ist teilweise der Haftbedingung an der kalten Wand, vor allem aber dem Flammendurchtritt durch das vorangehende Hindernis geschuldet. Bei 42,26 ms trifft der jetzt vereinigte

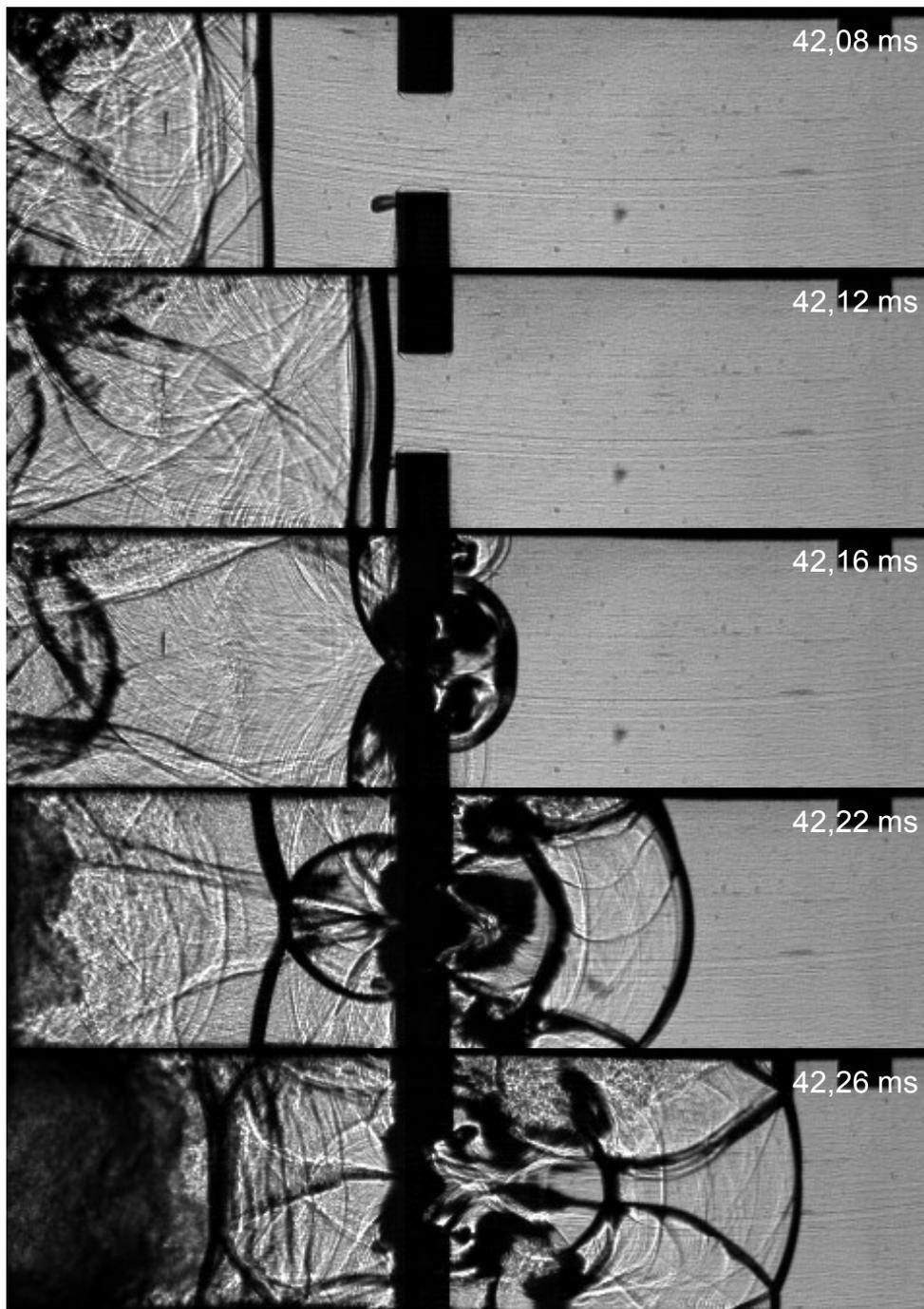


Abbildung 6.14: Schattenaufnahme der Kanalkonfiguration BR60-S300-VR00 mit 17,8% H₂.

te, rücklaufende Stoß auf die Flamme und bremst diese entscheidend ab. Danach strömt die Flamme aufgrund der hohen Blockierrate wie ein Freistrahle durch den Spalt in den nächsten Kanalabschnitt hinein. Dies ist in dieser Aufnahmesequenz nicht dargestellt.

Wie bereits in Kapitel 5.2.1 beschrieben wurde, handelt es sich bei dem hier verwendeten Schattenverfahren um ein tiefen-integrierendes Messverfahren. Die Krümmung der Flammenfront in Querrichtung erschwert die Auswertung der Schattenaufnahmen. Stöße erscheinen in den Aufnahmen teilweise dicker als sie es in der Realität sind. Die Ergebnisse sind jedoch prinzipiell vergleichbar mit den Beobachtungen in anderen Versuchsanlagen [16, 17, 27, 57].

Abbildung 6.15 zeigt Schattenaufnahmen einer Detonation im unversperrten Kanalabschnitt. Die vertikale Detonationsfront zeigt keine erkennbaren Unebenheiten über die gesamte Kanalhöhe. Die Flammenfront ist in den dargestellten Schattenaufnahmen nicht erkennbar. Sie wird durch den Stoß überdeckt. Die Wärmefreisetzung ist jedoch unmittelbar mit der führenden Stoßfront gekoppelt, da sich die Flamme ansonsten nicht detonativ ausbreiten würde.

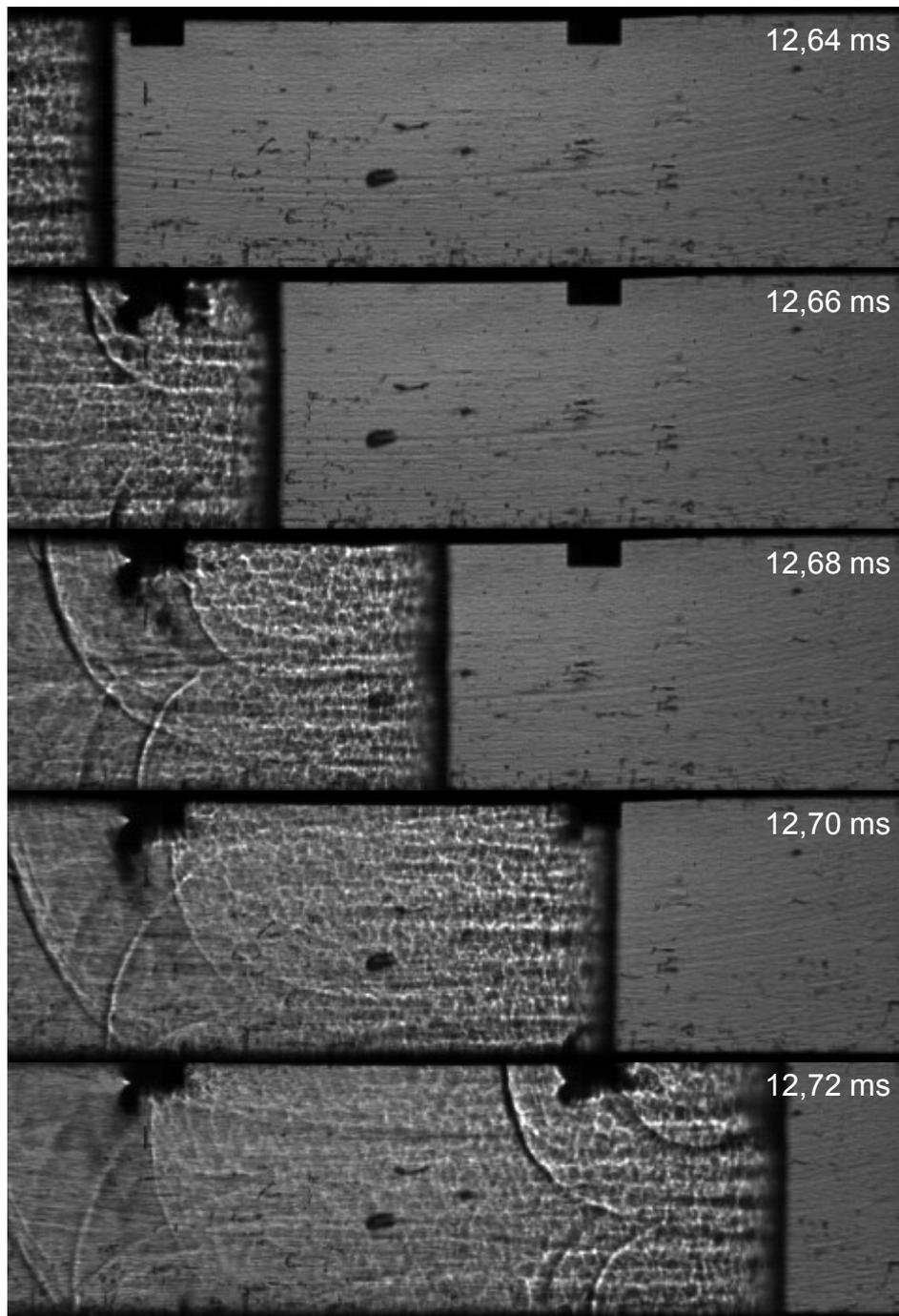


Abbildung 6.15: Schattenaufnahme der Kanalkonfiguration BR60-S300-VR00 mit 34,1% H₂.

6.2 Gradienteneinfluss

Der Einfluss von Mischungsgradienten wurde in einem glatten Kanal und in einem Kanal mit Hindernisstrecke untersucht. In dieser Arbeit wird auf die Ergebnisse der vier Kanalkonfigurationen BR30-S100-VR00, BR30-S300-VR00, BR60-S100-VR00 und BR60-S300-VR00 näher eingegangen. Die Ergebnisse des glatten Kanals sind in Ettner et al. [31] und Vollmer et al. [81] aufgeführt. Die Stärke des Konzentrationsgradienten wird in dieser Arbeit durch die Wartezeit t_w angegeben, welche die Zeitdifferenz zwischen Beginn der Wasserstoffeindüsung und dem Zündzeitpunkt entspricht. Bei einer Wartezeit von 60 s liegt ein homogenes Gemisch vor. Mit Verkürzung der Wartezeit nimmt die Stärke des vertikalen Konzentrationsgradienten zu (s. Kap. 3.4).

6.2.1 Gradienteneinfluss auf den Geschwindigkeitsverlauf

Abbildung 6.16 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf einzelner Versuche mit einem homogenen Gemisch sowie mit Gemischen mit einem unterschiedlich stark ausgeprägten Konzentrationsgradienten. Für jede Kanalkonfiguration wurde jeweils ein interessanter Bereich ausgewählt, bei der zwar der Wasserstoffanteil gleich, die Geschwindigkeitsverläufe zum Teil doch sehr unterschiedlich sind.

Für die Kanalkonfiguration BR30-S100-VR00 und einen gemittelten Wasserstoffanteil von 14,5 % liegt bei allen fünf Versuchen eine schnelle Deflagration vor. Jedoch unterscheiden sich hier die Versuche mit einem starken Konzentrationsgradienten von den restlichen Versuchen. So wird mit einem Gemisch mit einem sehr starken Gradienten (Wartezeit von $t_w = 3$ s) die Flamme in der Hindernisstrecke ($x \leq 2,05$ m) wesentlich stärker beschleunigt als in einem homogenen Gemisch. Die maximale Flammengeschwindigkeit wird am Ende der Hindernisstrecke beobachtet und beträgt 815 m/s. Mit einem homogenen Gemisch ($t_w = 60$ s) wird die Flamme nur auf eine Geschwindigkeit von 657 m/s beschleunigt. Nach der Hindernisstrecke kann sich die Flamme ausschließlich in dem Gemisch mit einem sehr starken Gradienten ($t_w = 3$ s) mit einer nahezu konstanten Geschwindigkeit von 580 m/s ausbreiten. Für alle anderen Gemische wird die Flamme durch den Aufstau der Frischgase an der Endplatte abgebremst.

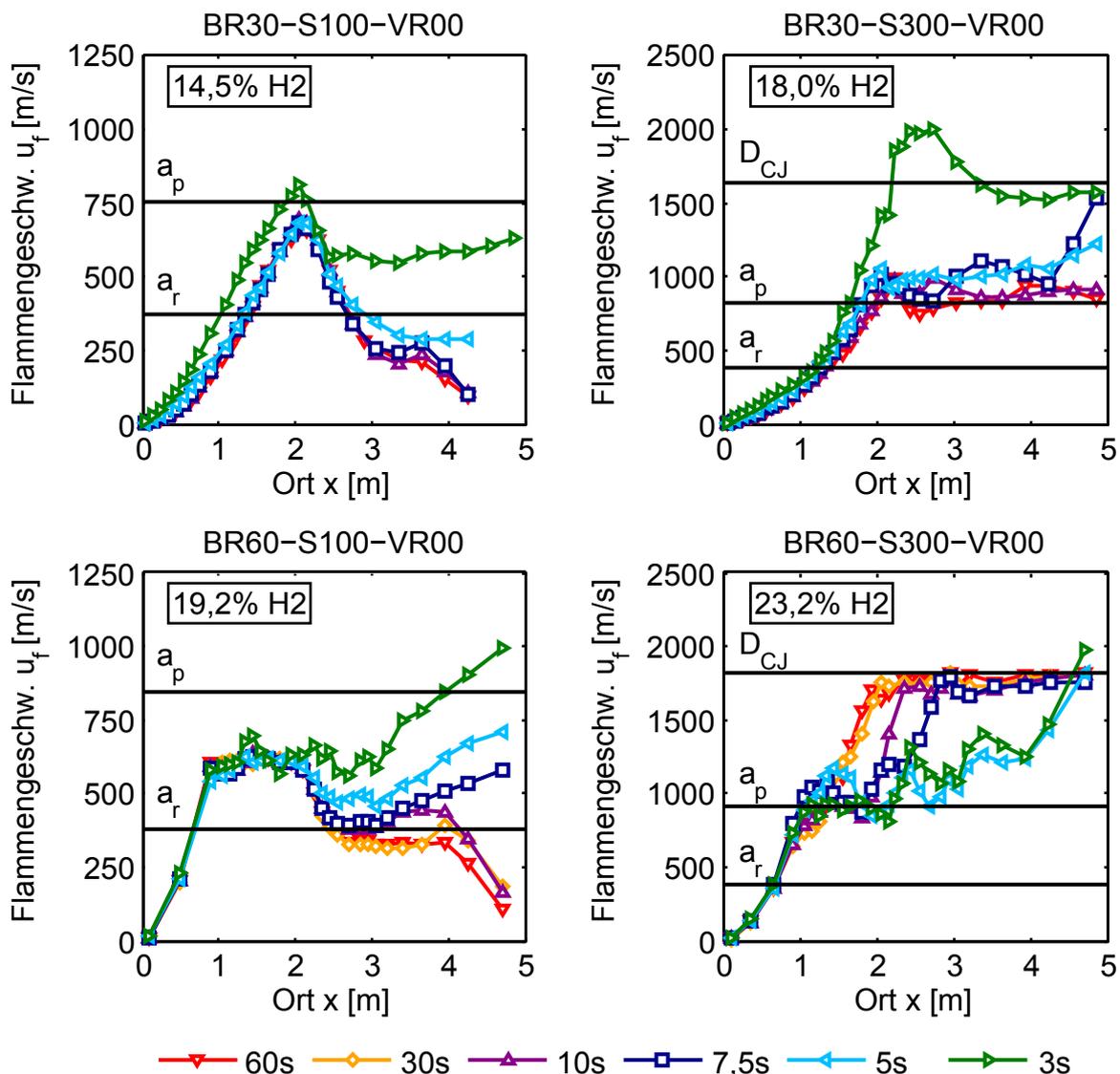


Abbildung 6.16: Verlauf der Flammengeschwindigkeiten für Mischungen mit unterschiedlicher Stärke des Konzentrationsgradienten. Die Wartezeit gibt hierbei die Stärke des Konzentrationsgradienten wieder. Die Hindernisstrecke erstreckt sich bis zu einem Abstand von $x = 2,05$ m von der Zündquelle. Die horizontalen Linien entsprechen der Schallgeschwindigkeit der Reaktanden (a_r), der Schallgeschwindigkeit der Produkte (a_p) und der CJ-Geschwindigkeit (D_{CJ}).

Für die Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00 und einen gemittelten Wasserstoffanteil von 18,0% ist ebenfalls zu erkennen, dass das Vorhandensein von Konzentrationsgradienten eine Auswirkung auf die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit hat. So tritt unmittelbar nach der Hindernisstrecke bei einem Gemisch mit einem starken Konzentrationsgradienten ($t_w = 3$ s) DDT ein, während bei den anderen Gemischen nur eine schnelle Deflagration vor-

liegt. Bei näherer Betrachtung der Flammenausbreitung in der Hindernisstrecke kann auch hier eine verstärkte Flammenbeschleunigung für das Gemisch mit einem starken Konzentrationsgradienten festgestellt werden. Die Flammengeschwindigkeit von Gemischen mit einem starken Konzentrationsgradienten liegt durchgehend über der des homogenen Gemischs.

Mit der Kanalkonfiguration BR60-S100-VR00 wird bereits in der Hindernisstrecke eine konstante Geschwindigkeit unterhalb der Schallgeschwindigkeit der Produkte erreicht. Der Unterschied zwischen homogenen und inhomogenen Gemischen ist gering. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die kontinuierlich bedingte Flammenbeschleunigung zwischen den Hindernissen jetzt aufgrund des geringen Hindernisabstandes vornehmlich im mittleren Teils des Kanals erfolgen muss. Dieser nimmt nur 40 % der Gesamthöhe ein. Die Wasserstoffkonzentration ist in diesem Bereich für Gemische mit einem starken Gradienten vergleichbar mit der eines homogenen Gemisches (s. Abb. 3.7). In allen Versuchen fällt die Flammengeschwindigkeit nach der Hindernisstrecke zunächst ab, bevor in den Mischungen mit Gradient eine erneute Beschleunigung auftritt. In dem Gemisch mit einem sehr starken Gradienten ($t_w = 3$ s) wird die Flamme über die Schallgeschwindigkeit der Produkte – bezogen auf den gemittelten Wasserstoffanteil – beschleunigt.

Bei größerem Hindernisabstand (BR60-S300-VR00) wurde eine Versuchsreihe ausgewählt, bei der bei allen Versuchen DDT beobachtet wurde. In einem homogenen Gemisch tritt hierbei DDT kurz vor Ende der Hindernisstrecke ein. Mit zunehmender Stärke des Konzentrationsgradienten verschiebt sich die Position des DDT-Umschlagpunktes in Richtung Kanalende, d. h. die Anlaufstrecke X_D nimmt zu. Im Fall von sehr starken Gradienten ($t_w = 5$ s und 3 s) kommt es zu einem Übergang von der Deflagration in die Detonation erst in größerem Abstand vom letzten Hindernis ($x \geq 4,5$ m).

Die wesentliche Erkenntnis aus diesem Abschnitt ist, dass das Vorhandensein von Konzentrationsgradienten eine deutliche Auswirkung auf die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit haben kann. Dies gilt für alle untersuchten Kanalkonfigurationen. Der Gradient hat einen Einfluss auf die Flammenbeschleunigung sowie auf den Übergang von der Deflagration in die Detonation. Hierauf wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen.

6.2.2 Gradienteneinfluss auf die Flammenbeschleunigung

Abbildung 6.17 zeigt zwei Weg-Zeit-Diagramme, in denen jeweils fünf Versuche mit identischem Wasserstoffgehalt, jedoch unterschiedlicher Stärke des Konzentrationsgradienten dargestellt sind. Im linken Diagramm beträgt der

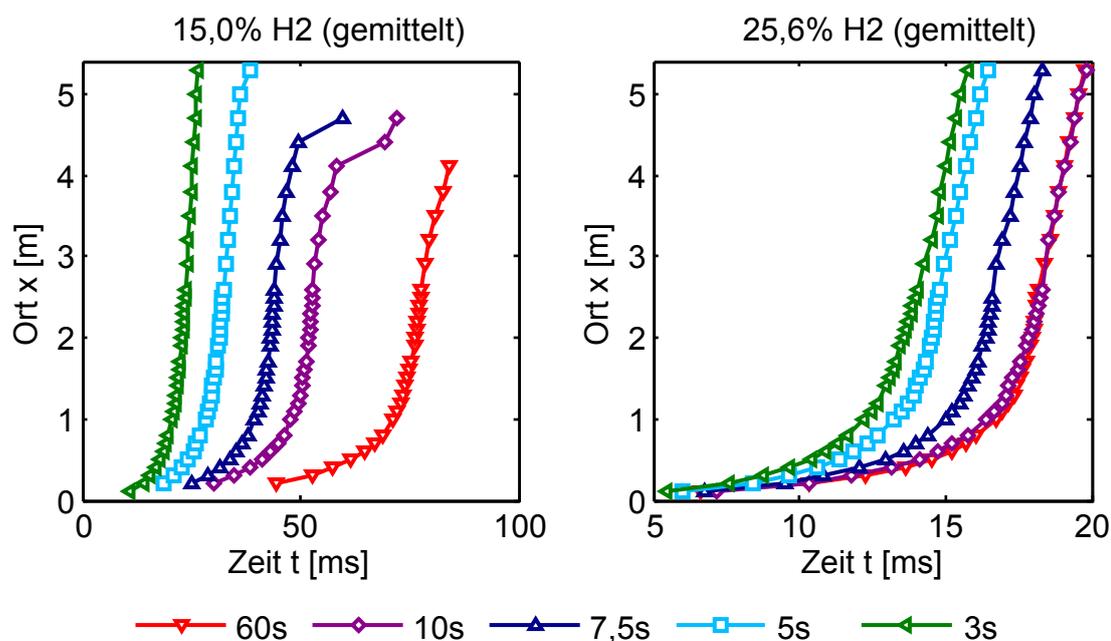


Abbildung 6.17: Zeitliche Flammenausbreitung für Gemische mit unterschiedlichen Konzentrationsgradienten. Die Versuche wurden in der Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00 durchgeführt und in Diagrammen mit jeweils identischem Wasserstoffgehalt zusammengefasst (15,0 % H₂ bzw. 25,6 % H₂). Die Legende gibt die Wartezeit und somit die Stärke des Konzentrationsgradienten an.

gemittelte Wasserstoffanteil 15,0 %. Mit zunehmender Stärke des Konzentrationsgradienten (kürzere Wartezeit) wird die Flamme am ersten Flammensensor (FS) früher detektiert. So erreicht die Flamme in einem Versuch mit einem homogenen Gemisch den Flammensensor an der Position $x = 0,2$ m (FS2) nach 44,36 ms, in einem Versuch mit einem starken Gradienten ($t_w = 3$ s) bereits nach 13,87 ms.

Im Gegensatz hierzu erreicht die Flamme in den Versuchen mit einem mittleren Wasserstoffanteil von 25,6 % in einem homogenen Gemisch und in einem Gemisch mit Konzentrationsgradienten nahezu zeitgleich FS2. Der Zeitunterschied beträgt hier 1,2 ms, wobei auch hier die Flamme in einem Gemisch mit einem starken Mischungsgradienten ($t_w = 3$ s) früher an FS2 detektiert wird.

Abbildung 6.18 zeigt den Zeitpunkt der Flammenankunft an FS2 in Abhängigkeit vom mittleren Wasserstoffanteil und der Wartezeit. Abbildung 6.18 ver-

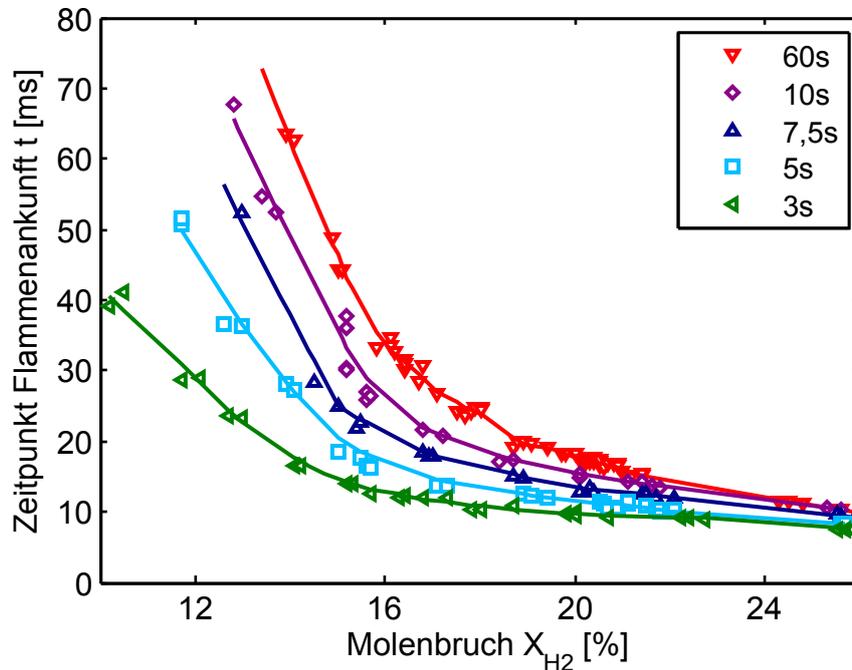


Abbildung 6.18: Flammenankunft am Sensor $x = 0,2$ m in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils und des Konzentrationsgradienten. Untersuchte Kanalkonfiguration: BR30-S300-VR00. Die Legende gibt die Wartezeit und somit die Stärke des Konzentrationsgradienten an.

anschaulicht, dass ein Mischungsgradient bereits in diesem Kanalabschnitt ($x \leq 0,2$ m) einen starken Einfluss auf die Flammenausbreitung hat, insbesondere bei Mischungen mit weniger als 25 % H_2 . In einem Gemisch mit einem starken Gradienten trifft die Flamme stets früher am Flammensensor FS2 ein als in einem homogenen Gemisch. Je stärker hierbei der Konzentrationsgradient ist, desto weniger Zeit ist seit dem Zündzeitpunkt vergangen.

Anhand eines Beispiels soll die Flammenausbreitung in einem homogenen Gemisch und in einem Gemisch mit einem starken Gradienten mit jeweils gleichem Wasserstoffgehalt von 13,5 % (gemittelt) beschrieben werden. Nach der Zündung des Gemischs breitet sich die Flamme zunächst laminar aus. Die laminare Brenngeschwindigkeit beträgt in einem homogenen Gemisch $s_{L,13,5\%} = 0,28$ m/s (s. Abb. 2.4). In einem Gemisch mit sehr starkem Gradienten ($t_w = 3$ s) liegt im oberen Bereich des Kanals ($z > 45$ mm) lokal eine Wasserstoffkonzentration von mehr als 20 % vor (s. Abb. B.3 in Anh. B.3). Die da-

zugehörige laminare Brenngeschwindigkeit beträgt $s_L = 0,9$ m/s und ist somit örtlich um einen Faktor von drei höher als die in einem homogenen Gemisch.

Da das erste Hindernis bei $x = 0,25$ m positioniert ist, kann die Flamme in den ersten 0,2 m nicht direkt mit dem ersten Hindernis wechselwirken. Die Flamme breitet sich somit im oberen Bereich des Kanals schneller aus, wo ein nahstöchiometrisches Gemisch vorliegt. Im unteren Bereich des Kanals liegt ein wesentlich mageres Gemisch vor und das Gas brennt aus diesem Grund auch langsamer ab. Dadurch kommt es zu einer Krümmung der Flammenfront, wobei die Flammenfront im oberen Bereich des Kanals vorausläuft. Dies stimmt gut mit den Ergebnissen numerischer Berechnungen überein [29]. Das heißt auch, dass im Vergleich zu einem homogenen Gemisch innerhalb kurzer Zeit mehr Wasserstoff abbrennt. Für das Gemisch mit einem Konzentrationsgradienten ist zu diesem Zeitpunkt somit die Expansionsströmung stärker und bewirkt einen größeren Turbulenzeintrag in das Gemisch. Dies wirkt sich wiederum positiv auf die Flammenbeschleunigung aus. In der Hindernisstrecke wird die Flamme weiter beschleunigt. Die Flammenfront bleibt weiterhin gekrümmt, wie in Abbildung 6.19 (rechts) zu sehen ist. In den OH^* -Chemilumineszenzaufnahmen ist zu erkennen, dass die Intensität des OH^* -Signals beim inhomogenen Gemisch wesentlich höher ist im Vergleich zum homogenen Gemisch. Das bedeutet, dass die Umsatzrate im Vergleich eben-

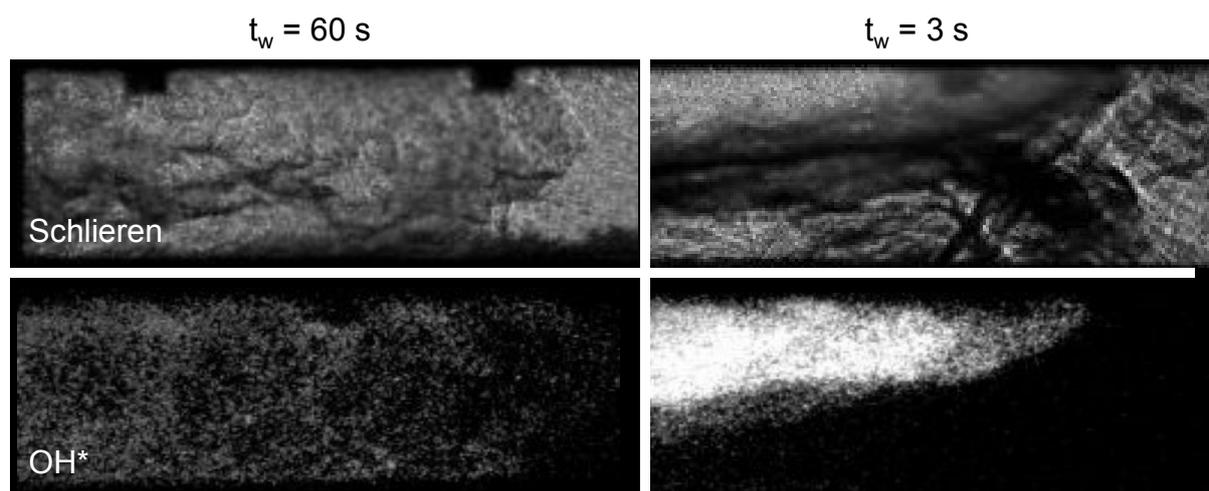


Abbildung 6.19: Schlieren- und Chemilumineszenzaufnahmen einer schnellen Deflagration in einem homogenen Gemisch und in einem Gemisch mit einem starken Mischungsgradienten. Das Gemisch hat jeweils einen mittleren Wasserstoffanteil von 20 %.

falls höher ist und damit auch lokal eine höhere Temperatur vorliegt. Der in Abbildung 2.5 gezeigte Rückkopplungsmechanismus läuft somit schneller ab.

Für Gemische mit mehr als 25 % H₂ ist zu erkennen, dass der zeitliche Abstand der Flammenankunft an FS2 zwischen einem homogenen Gemisch und Gemischen mit Gradienten zunehmend geringer wird (s. Abb. 6.18). Wiederum kann die laminare Flammenausbreitung eine Erklärung dafür sein. In einem homogenen Gemisch mit 25 % H₂ beträgt die laminare Brenngeschwindigkeit $s_L \approx 1,5$ m/s. In einem Gemisch mit vertikalen Konzentrationsgradienten liegt im oberen Bereich des Kanals ein fettes Gemisch vor. Die laminare Brenngeschwindigkeit beträgt in diesem Bereich maximal $s_{L,max} = 2,8$ m/s (s. Abb. 2.4). Das Verhältnis zwischen diesen zwei Geschwindigkeitswerten ist somit geringer als für den Fall, bei dem das Gemisch einen mittleren Wasserstoffanteil von 13,5 % H₂ hat. Aus diesem Grund trifft die Flamme in einem Gemisch mit einem starken Gradienten nur geringfügig früher an FS2 ein.

Kritisches Expansionsverhältnis σ_{krit}

Abbildung 6.20 zeigt den Einfluss des Konzentrationsgradienten auf das kritische Expansionsverhältnis. Das empirisch ermittelte σ -Kriterium besagt, dass ein H₂-Luft-Gemisch mit $\sigma_{krit} > 3,75 \pm 0,25$ von einer langsamen Deflagration in eine schnelle Deflagration übergeht [20, 56]. Es ist zu erkennen, dass das kritische Expansionsverhältnis von der Kanalkonfiguration und der Wartezeit abhängt. Für Kanalkonfigurationen mit einem geringen Hinderisabstand ($S = 100$ mm) ist σ_{krit} kleiner als für Kanalkonfigurationen mit $S = 300$ mm. In einem mageren Gemisch können eng angeordnete Hindernisse ausreichend Turbulenz in das Gemisch einbringen, so dass die Flamme über die Schallgeschwindigkeit der Reaktanden beschleunigt wird. Ist der Hindernisabstand zu groß, nimmt die Umsatzrate aufgrund des geringeren Turbulenzeintrages zwischen den Hindernisse wieder ab. Die Flamme wird deshalb in dem mageren Gemisch nicht ausreichend beschleunigt. Es ist zu erwähnen, dass das kritische Expansionsverhältnis der GraVent-Anlage bei einem homogenen Gemisch $\sigma_{krit} \geq 4$ beträgt. Es liegt demnach über dem von Kuznetsov et al. [56] angegebenen Wert von 3,75.

Durch die Versuche mit Konzentrationsgradienten konnte folgende neue Erkenntnis gewonnen werden: Für Gemische mit einem starken Konzentra-

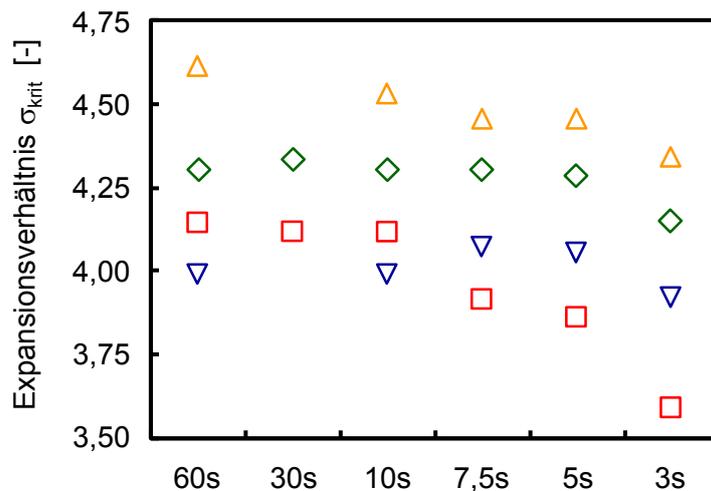


Abbildung 6.20: Kritisches Expansionsverhältnis in Abhängigkeit von Kanalkonfiguration und Wartezeit. ∇ BR30-S100-VR00, \triangle BR30-S300-VR00, \square BR60-S100-VR00, \diamond BR60-S300-VR00.

tionsgradienten ($t_w \leq 7,5$ s) verringert sich das kritische Expansionsverhältnis. Zum Beispiel sinkt bei der Kanalkonfigurationen BR60-S100-VR00 dieser Kennwert von $\sigma_{krit} = 4,2$ für ein homogenes Gemisch auf einen Wert von 3,6 für ein Gemisch mit einem starken Gradienten ($t_w = 3$ s). Dies ist ein wichtiger Aspekt, der bei der Gefahrenbewertung von inhomogenen Gasgemischen in Zukunft mit berücksichtigt werden muss.

Anlaufänge X_s

Wie schon in Kapitel 6.1.2 wird auch hier die Anlaufänge X_s für die Bewertung der Versuche herangezogen. Abbildung 6.21 fasst die Versuche der Kanalkonfiguration BR30-S100-VR00 zusammen und zeigt die Abhängigkeit vom Wasserstoffanteil und der Wartezeit auf die Anlaufänge X_s . Mit einem homogenem Gemisch und einem Wasserstoffgehalt von 17,8 % erzielt die Flamme erst nach der Hindernisstrecke die Schallgeschwindigkeit der Produkte a_p . Liegt der Wasserstoffgehalt oberhalb von 18,5 % erreicht die Flamme immer in oder unmittelbar am Ende der Hindernisstrecke erstmals eine Flammengeschwindigkeit von $u_f \geq a_p$. Für Gemische mit einem Mischungsgradienten ($t_w < 60$ s) ist die Anlaufänge X_s stets kleiner 2,1 m. Beträgt der mittlere Wasserstoffanteil in einem Gemisch weniger als 25 %, ist zudem zu erkennen, dass mit zunehmender Stärke des Mischungsgradienten die Anlaufänge X_s kürzer

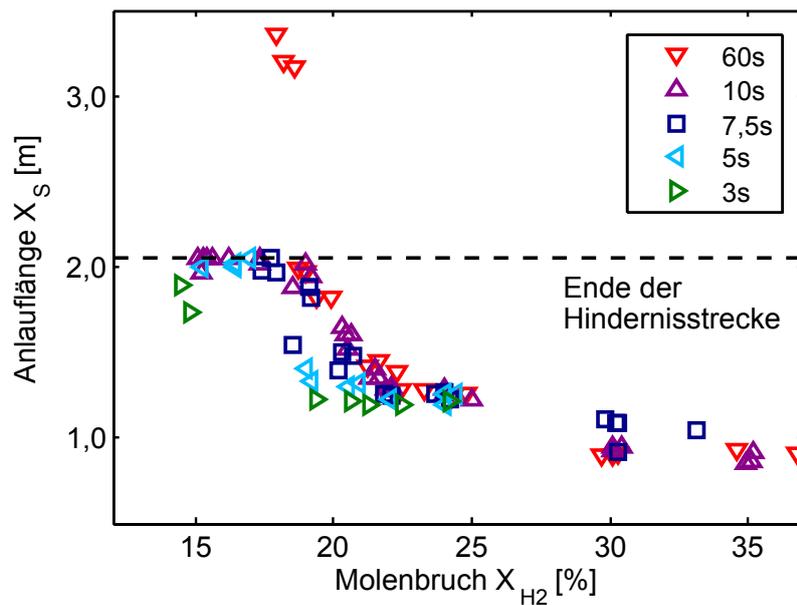


Abbildung 6.21: Einfluss von vertikalen Mischungsgradienten auf die Anlaufänge X_s in der Kanalkonfiguration BR30-S100-VR00. Die Legende gibt die Wartezeit und somit die Stärke des Konzentrationsgradienten an.

ist. Für Gemische mit einem höheren Wasserstoffanteil ist zwischen einem homogenen Gemisch und einem Gemisch mit einem Gradienten kein wesentlicher Unterschied der Anlaufänge X_s zu erkennen.

Abbildung 6.22 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse mit der Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00. Auch bei dieser Kanalkonfiguration ist erkennbar, dass mit zunehmender Stärke des Konzentrationsgradienten die Anlaufänge kürzer ist. Bei einem mittleren Wasserstoffanteil von 18 % wird nur 75 % der Anlaufänge benötigt bis die Flammenfront sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet.

Es bleibt festzuhalten, dass Gemische mit Konzentrationsgradienten eine stärkere Flammenbeschleunigung haben als ein homogenes Gemisch. Dies ist anhand der jeweiligen Kennwerte für das kritische Expansionsverhältnis σ_{krit} , der Anlaufänge X_s sowie anhand der Schatten- und Chemilumineszenzaufnahmen zu erkennen. Diese Aussage ist für alle untersuchten Kanalkonfigurationen gültig.

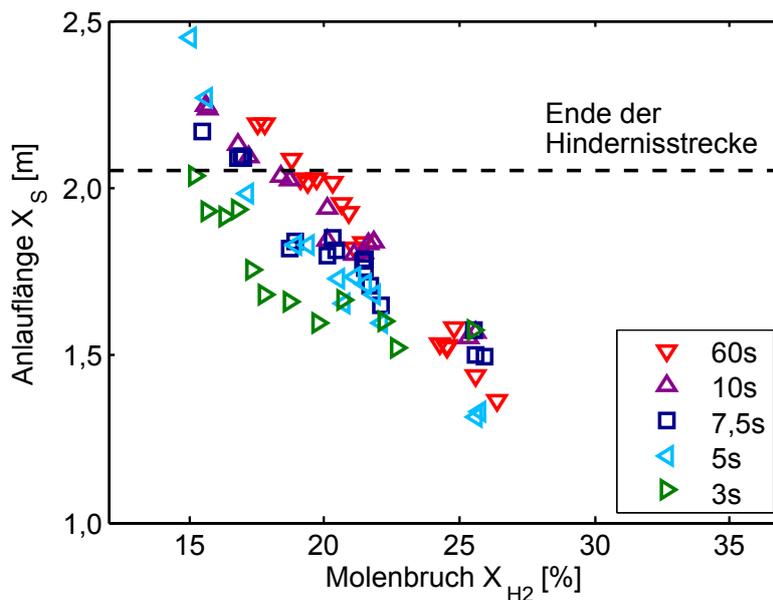


Abbildung 6.22: Einfluss von vertikalen Mischungsgradienten auf die Anlaufänge X_s in der Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00. Die Legende gibt die Wartezeit und somit die Stärke des Konzentrationsgradienten an.

6.2.3 Gradienteneinfluss auf die Detonation

Abbildung 6.23 zeigt Schlieren- und Chemilumineszenzaufnahmen einer Detonation in einem homogenen Gemisch ($t_w = 60$ s) und in Gemischen mit einem starken Gradienten ($t_w = 5$ s bzw. 3 s). Für ein homogenes Gemisch ist die Detonationsfront nahezu eine vertikale Front. Diese Beobachtung stimmt mit früheren Untersuchungen überein [5, 27, 61]. Eine Stoßwellenstruktur hinter der Detonationsfront ist hier nicht erkennbar. Anhand der OH^* -Chemilumineszenzaufnahmen ist zu erkennen, dass über die komplette Kanalhöhe und innerhalb weniger Millimeter es zur Wärmefreisetzung kommt.

Bei Mischungen mit einem starken Gradienten ($t_w = 5$ s und 3 s) ist die Detonationsfront im oberen Bereich des Kanals gekrümmt. Mehrere Versuchsreihen bestätigen, dass die Krümmung hierbei abhängig von der Stärke des Konzentrationsgradienten ist. Je stärker der Konzentrationsgradient, desto stärker ist die Krümmung. Diese Beobachtung wurde schon von Ishii und Kojima [47] in einer früheren Untersuchung gemacht. Der Grund hierfür ist, dass sich die Druckwelle immer mit der Schallgeschwindigkeit des lokal vorliegenden Gemischs ausbreitet. Da im oberen Bereich des Kanals ein hoher H_2 -Anteil

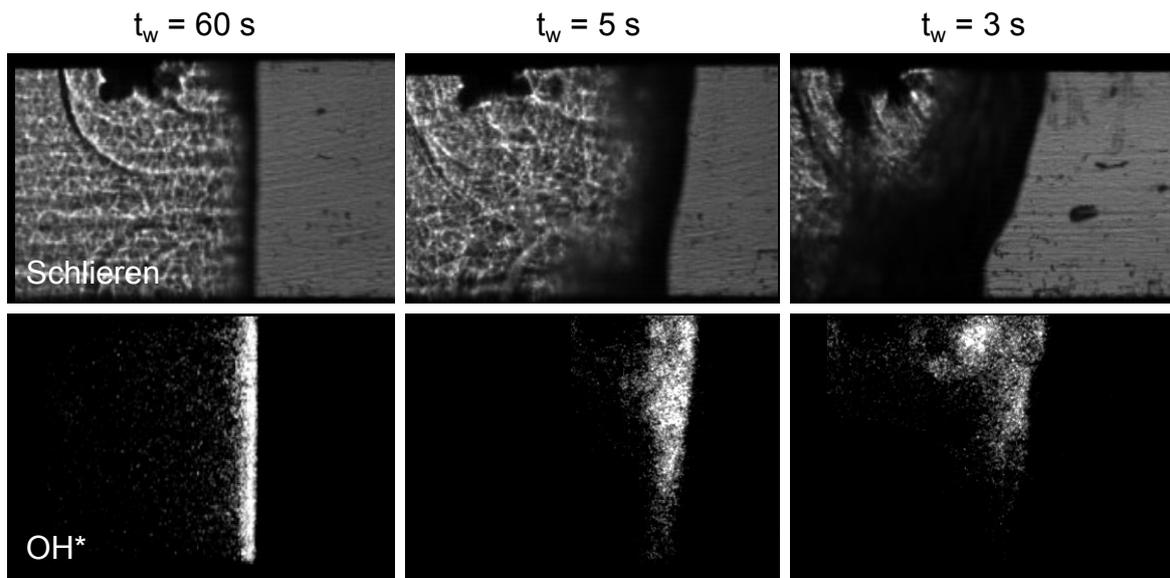


Abbildung 6.23: Schlieren- und OH^{*}-Chemilumineszenzaufnahmen einer stabilen Detonation mit unterschiedlich starken Mischungsgradienten. Untersuchte Kanalkonfiguration: BR60-S300-VR00. Das Gemisch hat jeweils einen globalen Wasserstoffanteil von 35 %. Die Aufnahmen wurde in einem Abstand von $x = 3,9$ m (Bildmitte) von der Zündquelle gemacht.

vorliegt, ist die dazugehörige Schallgeschwindigkeit dort höher (Tab. A.1 in Anh. A). Den Schlierenaufnahmen ist zu entnehmen, dass sich zur Bodenplatte hin ein Machstamm bildet. Dieser Machstamm ist notwendig, um die Randbedingung wandparalleler Strömung zu gewährleisten. Die Krümmung der Detonationsfront sowie die Notwendigkeit eines Machstamms aufgrund eines quer zur Ausbreitungsrichtung vorliegenden Konzentrationsgradienten wurde bereits von Ettner et al. [32] analytisch hergeleitet.

Das OH^{*}-Chemilumineszenzsignal ist bei einem Gemisch mit einem sehr starken Konzentrationsgradienten schwächer im Vergleich zu einem homogenen Gemisch und örtlich auch mehr im oberen Kanalbereich angeordnet. Die Wärmefreisetzung erstreckt sich jedoch über einen größeren Bereich hinter der Detonationsfront (s. Abb. 6.23).

Detonative Ausbreitungsgeschwindigkeit

Die Auswirkungen der schwächeren Wärmefreisetzung in einem Gemisch mit Konzentrationsgradienten sind unter anderem auch an der reduzierten Detonationsgeschwindigkeit zu erkennen. Die in der Tabelle 6.2 angegebenen Ge-

schwindigkeiten sind aus der Ankunftszeit der Stoßfront an den Drucksensoren DS5 ($x = 4,1$ m) und DS6 ($x = 5,0$ m) und dem Abstand der Drucksensoren zueinander berechnet worden. Hierbei wurden Versuche herangezogen,

Kanalkonfiguration	X_{H_2} [%]	D_{60s} [m/s]	D_{10s} [m/s]	$D_{7.5s}$ [m/s]	D_{5s} [m/s]	D_{3s} [m/s]
BR30-S100-VR00	24,5	1762	1748	1724	1698	1673
BR30-S300-VR00	25,6	1860	1829	1815	1772	1740
BR60-S300-VR00	31,4	1907	1891	1875	1860	1776

Tabelle 6.2: Detonationsgeschwindigkeit für Gemische mit Konzentrationsgradienten.
Grundlage der Berechnung der Detonationsgeschwindigkeit sind die Drucksensoren an den Positionen $x = 4,1$ m und $x = 5,0$ m.

bei der DDT im vorderen Kanalabschnitt ($X_D \leq 3,0$ m) eintritt. Damit soll sichergestellt sein, dass sich die Detonation im Bereich von $x = 4,1 \dots 5,0$ m mit nahezu konstanter Geschwindigkeit ausbreitet. Es ist festzustellen, dass die Detonationsgeschwindigkeit für kurze Wartezeiten abnimmt. Für die in Tabelle 6.2 aufgeführten Beispiele beträgt das relative Geschwindigkeitsdefizit zwischen den Versuchen mit 60 s und 3 s bis zu 6,9 %. Die Hinderniskonfiguration hat jedoch keinen nennenswerten Einfluss auf das relative Geschwindigkeitsdefizit.

Eine mögliche Erklärung für das Geschwindigkeitsdefizit ist der geringere Impuls, der sozusagen der Vortrieb für die Detonation ist. Bei Vorhandensein eines vertikalen Konzentrationsgradienten verformt sich die Detonationsfront (s. Abb. 6.23). Ishii und Kojima [47] zeigen anhand von Rußschrieben, dass sich die Detonationszellen sich ebenfalls verformen (s. Abb. 6.24). Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich die Geschwindigkeit der transversalen Druckwellen beim Durchlaufen durch die unterschiedlichen Schichten sich ändern muss. Die transversalen Druckwellen treffen durch die unsymmetrische Ausbreitung nicht wieder direkt aufeinander. Der Druck, der durch das aufeinander laufen der Druckwellen entsteht, ist somit im Vergleich zu einem homogenen Gemisch geringer und somit auch der Impulsbeitrag für die detonative Ausbreitung. Aus diesem Grund breitet sich die Detonationsfront in einem Gemisch mit einer geringeren Geschwindigkeit aus.

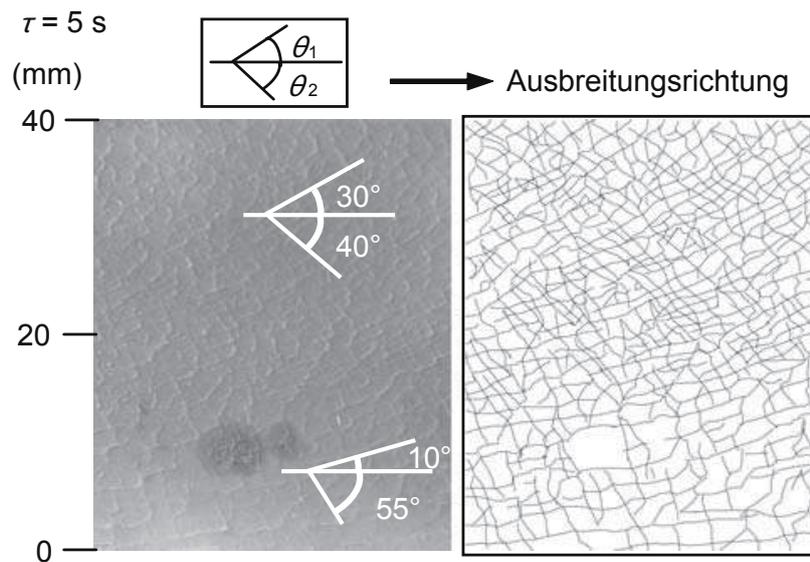


Abbildung 6.24: Rußschrieb eines Versuchs mit vertikalem Konzentrationsgradienten [47].

Druck- und Impulsverlauf

Entscheidend für die sicherheitsrelevante Forschung ist die Drucklast auf die Wände des Kanals bzw. des Sicherheitsbehälters. Abbildung 6.25 zeigt den Druck- und Impulsverlauf für Gemische mit einem mittleren Wasserstoffgehalt von 24,5 %. Die Druckverläufe sind in ihrem Verlauf nahezu gleich. Die Maximaldrücke an der oberen Wand sind bei den Versuchen mit einem homogenen Gemisch bis zu 17 % höher als bei den Versuchen mit einem starken Konzentrationsgradienten. Dies ist in guter Übereinstimmung mit Ergebnissen aus numerischen Berechnungen von Ettner [29] (s. Abb. 6.26).

Zur Bewertung der Drucklasten ist in Abbildung 6.25 auch der Verlauf des Impulses an die Deckplatte dargestellt. Bei einem homogenen Gemisch ist der Impuls vergleichbar mit den Messungen von Eder [27]. Desweiteren ist zu erkennen, dass der Impuls an die obere Wand des Kanals für Gemische mit einem starken Konzentrationsgradienten um bis zu 9,4 % geringer ist gegenüber einem homogenen Gemisch. Für die Gefahrenbewertung ist jedoch noch folgender Punkt zu berücksichtigen: Die Ergebnisse numerischer Berechnungen von Ettner [29] zeigen, dass bei Gemischen mit einem starken Konzentrationsgradienten der Spitzendruck an der unteren Wand um den Faktor 2,5 höher

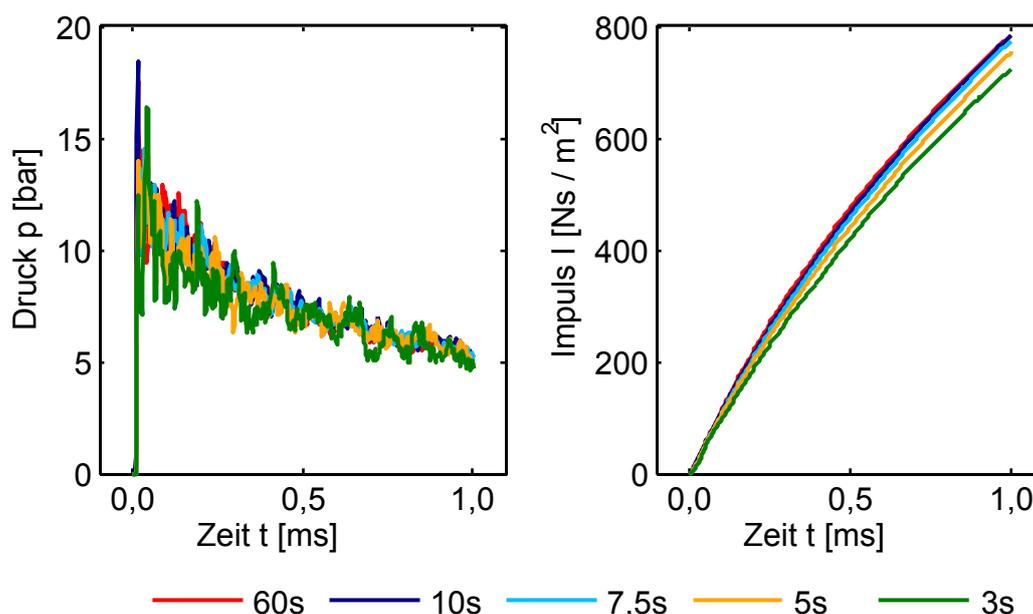


Abbildung 6.25: Druck- und Impulsverlauf für Mischungen mit unterschiedlichen Konzentrationsgradienten. Die untersuchten Versuche wurden mit der Kanalkonfiguration BR30-S100-VR00 und einem gemittelten Wasserstoffgehalt von 24,5% durchgeführt. Die Daten wurden aus dem Signalverlauf des Drucksensors an der Position $x = 4,1$ m (Drucksensor in der Deckplatte) und für eine Impulsdauer von 2,0 ms nach Eintreffen der Detonationswelle ermittelt.

ist als an der oberen Wand (s. Abb. 6.26). Grund hierfür ist die spezielle Stoßstruktur bei Mischungen mit starken Konzentrationsgradienten. Hierbei bildet sich an der unteren Wand ein Machstamm, der gegenüber eines geraden Verdichtungsstoßes über die gesamte Kanalhöhe deutlich stärker ist [32]. Da in der GraVent-Anlage die Drucksensoren nur oben in der Deckplatte positioniert sind, ist eine Validierung der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Werten nicht möglich.

6.2.4 Gradienteneinfluss auf den Übergang von der Deflagration in die Detonation

Anhand eines v_{max} - X_{H_2} -Diagramms kann gut der Umschlagpunkt ermittelt werden, mit welchem Wasserstoffanteil in einem Gemisch es zu einem Übergang von der Deflagration in die Detonation kommen kann. Abbildung 6.27 zeigt die Zusammenfassung der Versuche für die Kanalkonfigurationen BR30-S100-VR00 und BR30-S300-VR00. Die Diagramme zeigen für jeden Versuch

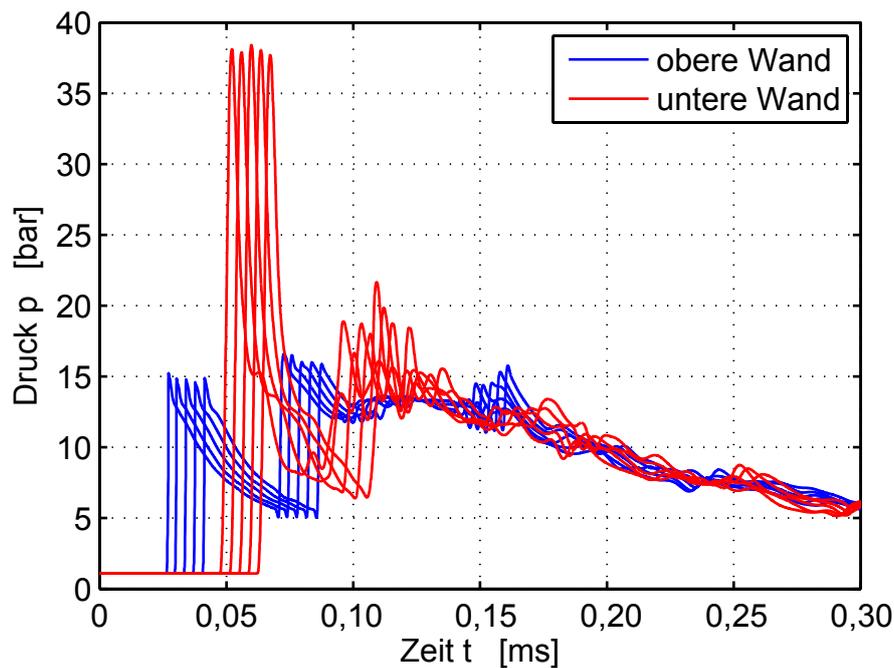


Abbildung 6.26: Drucklasten auf die obere und untere Wand bei Vorliegen eines Konzentrationsgradienten [29]. Der dargestellte Druckverlauf ist das Ergebnis einer numerischen Berechnung. Der gemittelte Wasserstoffgehalt beträgt 25 %.

die maximale Flammgeschwindigkeit über dem mittleren Wasserstoffgehalt. Der Übersichtlichkeit halber sind nur die Werte aus den Versuchen mit einem homogenen Gemisch und Gemische mit einem starken Gradienten (Wartezeit $t_w = 5$ s oder 3 s) dargestellt. Bei der Kanalkonfiguration BR30-100-VR00 ist zu erkennen, dass die Maximalgeschwindigkeit bei einem mittleren Wasserstoffgehalt von 19,2 % von der Schallgeschwindigkeit der Produkte (a_p) auf die Chapman-Jouguet-Geschwindigkeit D_{CJ} springt, was ein klares Indiz für das Auftreten von DDT ist. Das 7λ -Kriterium (s. Kap. 2.5) sagt für die Kanalkonfiguration DDT für einen Wasserstoffgehalt von 20,5 % vorher. Die Stärke des Konzentrationsgradienten scheint in diesem Fall keine Rolle zu spielen.

Die Konfiguration BR30-S300-VR00 zeigt ein komplett anderes Verhalten (s. Abb. 6.27, rechtes Diagramm). Im homogenen Fall ($t_w = 60$ s) erfolgt DDT ab einem Wasserstoffgehalt von 19,1 %. Mit zunehmender Stärke des Konzentrationsgradienten tritt DDT allerdings deutlich früher auf. So wird beim stärksten Konzentrationsgradienten ($t_w = 3$ s) bereits bei 17,2 % H_2 DDT beobachtet.

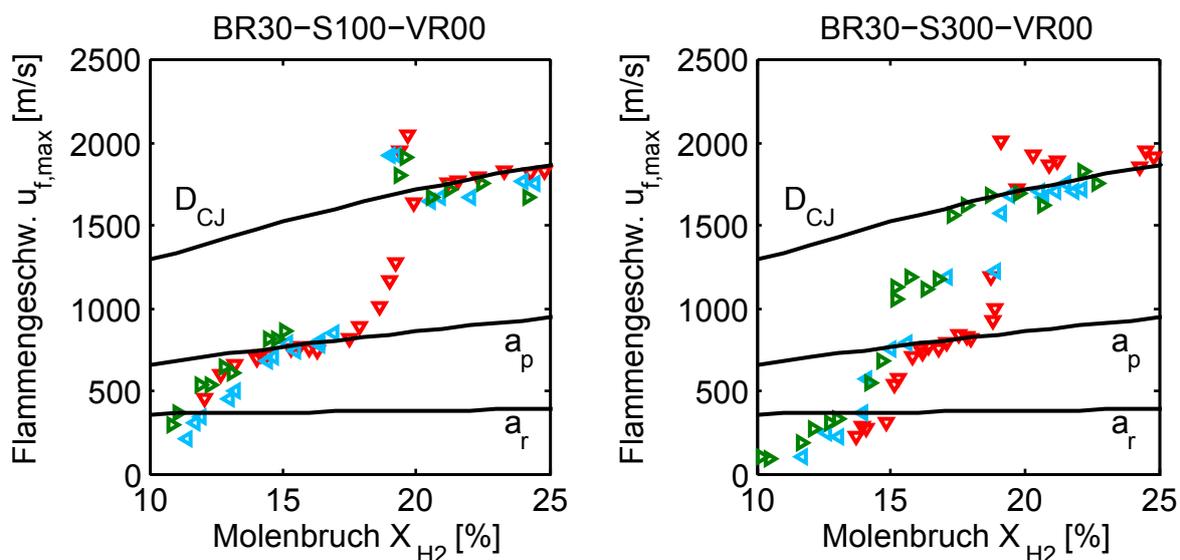


Abbildung 6.27: Maximale Flammgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom mittleren Wasserstoffanteil und Wartezeit bei geringer Blockierrate (BR30). Im linken Diagramm beträgt der Hindernisabstand 100 mm, im rechten 300 mm. Legende: ∇ 60 s, \triangleleft 5 s, \triangleright 3 s. Um eine bessere Darstellung zu ermöglichen, wird in beiden Diagrammen nur ein Teil der durchgeführten Versuche dargestellt.

Eine Erklärung für die unterschiedlichen Ergebnissen bei diesen zwei Kanal-konfigurationen kann die Interaktion der Strömung mit den Hindernissen sein. Während der anfänglichen Beschleunigungsphase verdrängt das verbrannte, expandierende Gas das Frischgas vor der Reaktionszone wie einen Kolben in Richtung Kanallende. Die dadurch induzierte Strömung bewirkt, dass das Gas beim Durchtritt durch den Hindernispalt beschleunigt wird und es bilden sich zudem Rezirkulationszonen hinter den Hindernissen. Dabei wird das Gas gemischt und der Konzentrationsgradient lokal zerstört. Die Rezirkulationszonen sind annähernd kreisförmig und in ihrem Durchmesser etwas größer als die Hindernishöhe (s. Abb. 6.28). Bei eng platzierten Hindernissen (S100) wird folglich der Großteil des Frischgases gemischt. Dieser Vorgang war auch im Rahmen einer numerischen Simulation nachweisbar [29]. So ist mit Ankunft der Flamme im letzten Abschnitt der Hindernisstrecke kein großer Unterschied mehr zwischen einem homogenen Gemisch und einem Gemisch mit anfänglichem Konzentrationsgradienten zu erkennen. Bei größerem Hindernisabstand (S300) bleibt dagegen ein Großteil des Volumens zwischen aufeinanderfolgenden Hindernissen ungemischt. Mischungen mit

einem Konzentrationsgradienten detonieren aufgrund des reaktiveren Gemischs in dieser Kanalkonfiguration leichter als homogene Gemische.

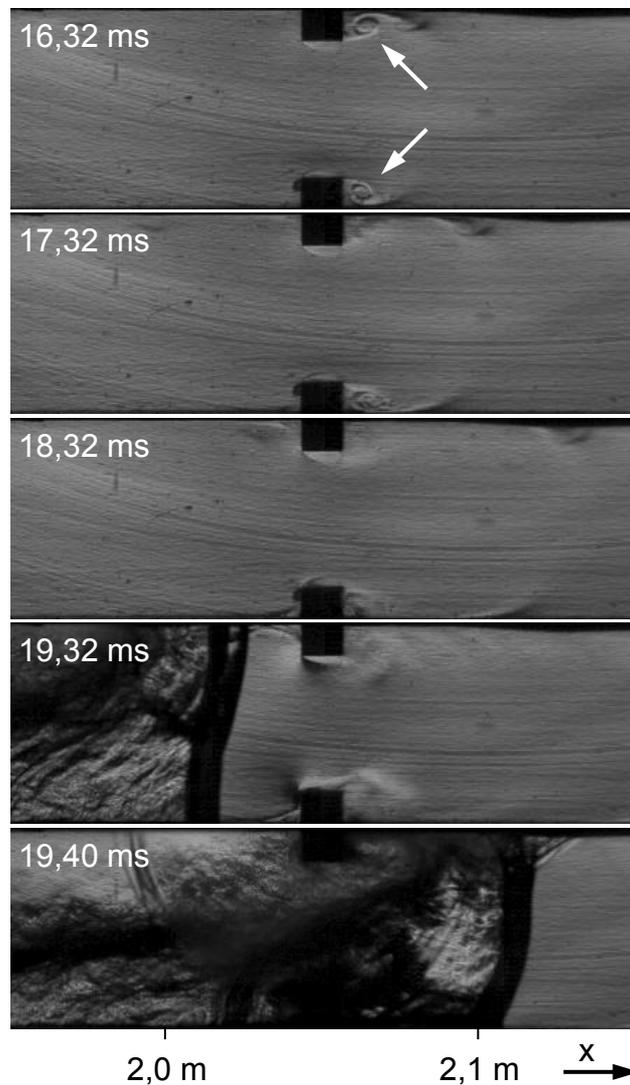


Abbildung 6.28: Schlierenaufnahmen des Gradientenabbaus verursacht durch die Umströmung der Hindernisse mit geringer Blockierrate. Untersuchte Kanalkonfiguration: BR30-S300-VR00. Das Gemisch hat einen globalen Wasserstoffanteil von 25,6% und einen starken Konzentrationsgradienten ($t_w = 3$ s).

In Bezug auf sicherheitsrelevante Betrachtungen ist dies eine wichtige Erkenntnis: Inhomogene Gemische können ein größeres Gefährdungspotential aufweisen als homogene Gemische mit demselben Wasserstoffgehalt. Das hat zur Folge, dass ein Gemisch nicht allein nach seinem mittleren Wasserstoffanteil eingestuft werden kann. Abbildung 6.29 veranschaulicht dies für die Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00. Das charakteristische Längenmaß

für diese Konfiguration beträgt $L = 600 \text{ mm}$ (s. Gl. (2.6)). Das 7λ -Kriterium ergibt, dass in einem Gemisch mit einer Detonationszellweite von $\lambda = 600/7 \leq 86 \text{ mm}$ DDT eintreten kann. Dies entspricht Punkt 1 in Abbildung 6.29. Die Versuche mit einem homogenen Gemisch zeigen, dass DDT bei einem Wasserstoffgehalt von $X_{H_2} \geq 19,1 \%$ eintritt. Das homogene Gemisch mit $X_{H_2} = 19,1 \%$ wird in Abbildung 6.29 als Gemisch A bezeichnet. Die Punkte 1 und 2 liegen nahe beieinander, d. h. das 7λ -Kriterium stimmt gut mit dem experimentellen Ergebnis überein. Das Gemisch B hat einen starken Gradienten ($t_w = 3,0 \text{ s}$) und detoniert ebenfalls. Der mittlere Wasserstoffgehalt beträgt $X_{H_2, \text{mittel}} = 17,2 \%$. Das Gemisch hat lokal eine H_2 -Konzentration von minimal $X_{H_2, \text{min}} = 7,0 \%$, maximal $X_{H_2, \text{max}} = 26,2 \%$. Die Linien von $X_{H_2, \text{min}}$, $X_{H_2, \text{mittel}}$ und $X_{H_2, \text{max}}$ sind ebenfalls in Abbildung 6.29 dargestellt.

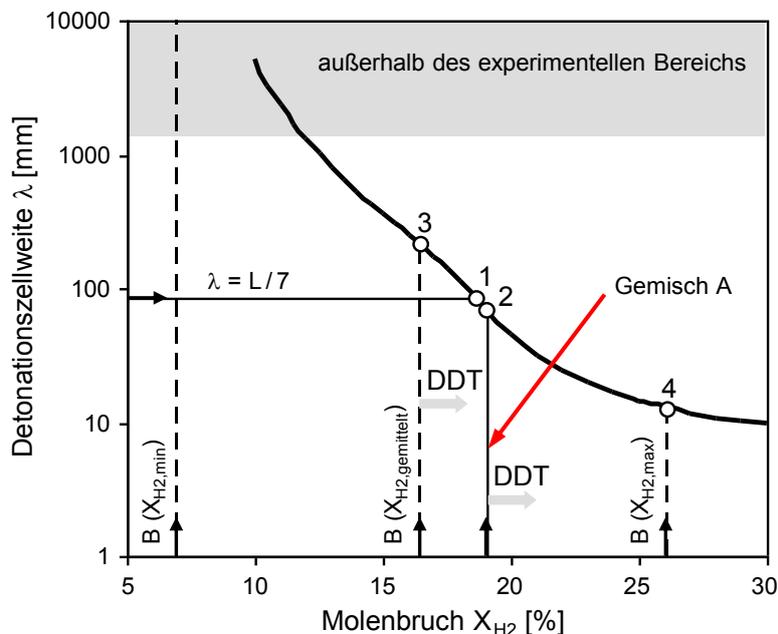


Abbildung 6.29: Anwendung des 7λ -Kriteriums auf die Kanalkonfiguration BR30-S300-VR00. Gemisch A: Homogen mit einem Wasserstoffgehalt von 19,1%; Gemisch B: starker Gradient ($t_w = 3 \text{ s}$) mit einem Wasserstoffgehalt von 17,2% (gemittelt).

Breitung et al. [13] schlagen zwei Methoden vor, wie das 7λ -Kriterium auch auf inhomogene Gemische angewendet werden kann. Die konservativste Methode ist, das 7λ -Kriterium auf die minimale Detonationszellweite λ_{min} eines inhomogenen Gemischs anzuwenden. Je nach Betrachtung werden somit aber z. B. auch ungefährliche Gasgemische, die nur in einem sehr kleinen Be-

reich in einem größeren Kontrollvolumen ein sehr reaktives Gemisch haben, als sehr gefährlich eingestuft. Alternativ wird auch eine Methode vorgeschlagen, bei der das inhomogene Gasgemisch mit einer mittleren Detonationszellweite charakterisiert wird. Die Berechnung einer mittleren Detonationszellweite ist je nach Wasserstoffverteilung in dem Gemisch jedoch nicht möglich. So hat das Gemisch B ($X_{H_2, mittel} = 17,2\%$, $t_w = 3,0$ s) lokal eine minimale H_2 -Konzentration von $X_{H_2, min} = 7,0\%$. Es gibt für ein so mageres Gemisch keinen Wert für die Detonationszellweite, wie auch anhand der Abbildung 6.29 zu erkennen ist. Aus diesem Grund ist diese Methode von Breitung et al. [13] auf die hier diskutierten Versuche nicht anwendbar.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für Kanalkonfigurationen mit großer Versperrung (BR60) zusammengefasst. Für die Konfiguration BR60-S100-VR00 wurde in keinem Versuch DDT beobachtet, obwohl dies vom 7λ -Kriterium für einen Wasserstoffgehalt von 24 % vorhergesagt wird. Allerdings waren die beobachteten Maximalgeschwindigkeiten für diese Konfiguration mit Konzentrationsgradienten deutlich höher als in vergleichbaren homogenen Gemischen (s. Abb. 6.30, linkes Diagramm).

Für die Konfiguration BR60-S300-VR00 ist DDT nach dem 7λ -Kriterium ab einem Wasserstoffgehalt von 21,0 % zu erwarten. Für ein homogenes Gemisch wird dies in den durchgeführten Experimenten bestätigt. Gemische mit einem Konzentrationsgradienten erfordern in dieser Geometrie allerdings einen höheren Wasserstoffgehalt für das Auftreten von DDT. Der Übergang zwischen schnellen Flammen und Detonation ist hier weniger abrupt als in den anderen drei hier diskutierten Kanalkonfigurationen, kann aber einem Volumenanteil im Bereich von 22 bis 23 % zugeordnet werden. Im Gegensatz zur Konfiguration BR30-S300-VR00 wird die DDT-Neigung durch das Vorhandensein eines Konzentrationsgradienten geschwächt. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen findet sich in der Anordnung der Hindernisse. Bei einer Blockierate von 60 % muss die Reaktionsfront in einem relativ engen Teil in der Mitte des Kanals die Hindernisse passieren. Dort ist der lokale Wasserstoffgehalt nahe am Wasserstoffgehalt der homogenen Mischung. Gleichzeitig werden die Stoßwellen, die in der hochreaktiven Mischung im oberen Bereich des Kanals erzeugt werden, größtenteils von den Hindernissen reflektiert (s. Abb. 6.31 und Abb. 6.32) und können so nur geringfügig zur Ausbreitung der Reaktionsfront beitragen.

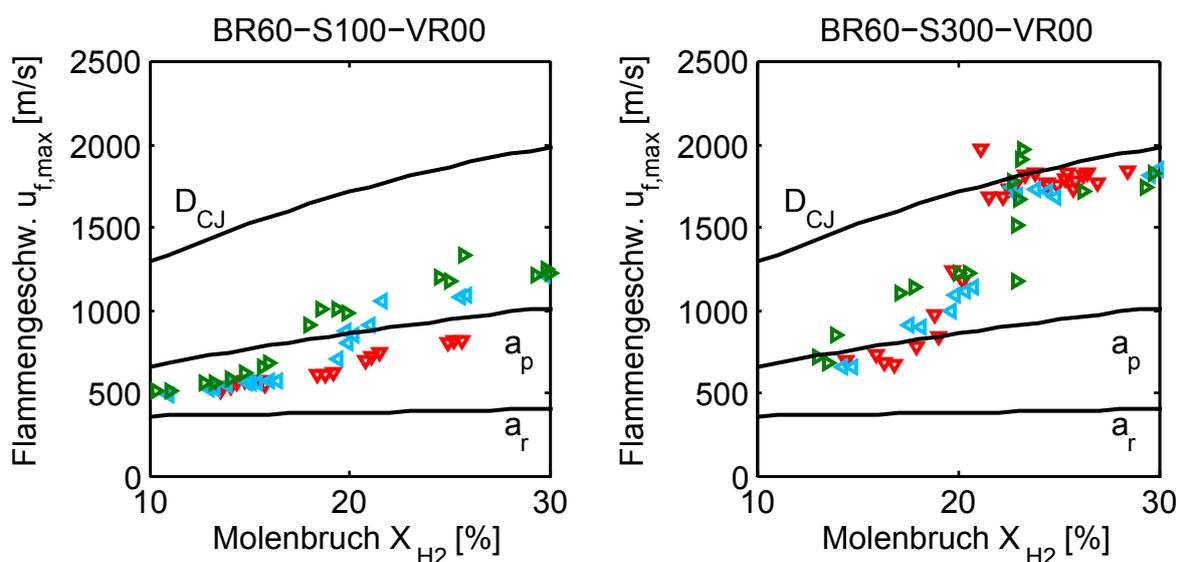


Abbildung 6.30: Maximale Flammengeschwindigkeit in Abhängigkeit von mittlerem Wasserstoffanteil und Wartezeit bei hoher Blockierrate (BR60). Im linken Diagramm beträgt der Hindernisastrah 100 mm, im rechten 300 mm. Legende: ∇ 60 s, \triangleleft 5 s, \blacktriangleright 3 s. Um eine bessere Darstellung zu ermöglichen, wird in beiden Diagrammen nur ein Teil der durchgeführten Versuche dargestellt.

Diese Hypothese konnte durch Schatten- und Chemilumineszenzaufnahmen bestätigt werden. Abbildung 6.32 zeigt z. B. den Fall, dass in einem Gemisch mit einem starken Gradienten am oberen Hindernis eine Explosion stattfindet. Die Pfeile verdeutlichen die Ausbreitungsrichtung der Stoßwellenfront. Aufgrund der gekrümmten Druckwellenfront, die zunächst auf die Hindernisse aufläuft, wird das Gas im unteren Bereich des Kanals nur geringfügig vor-komprimiert. Der Explosionsdruck kann sich somit – im Vergleich zu einem homogenem Gemisch – auch im unteren Bereich des Kanals ausbreiten. Dadurch ist der Druckimpuls an das unverbrannte Gasgemisch weiter stromab geringer. Aus diesem Grund sind bei großer Blockierate homogene Gemische detonationsfreudiger.

Generell kann festgehalten werden, dass Konzentrationsgradienten die DDT-Neigung gegenüber homogenen Gemischen sowohl erhöhen als auch verringern können, wobei erkannt wurde, dass Form und Platzierung der Hindernisse eine entscheidende Rolle spielen. In einigen Fällen stellt das bestehende 7λ -Kriterium dabei kein konservatives Konzept zur Bewertung der Sicherheit dar.

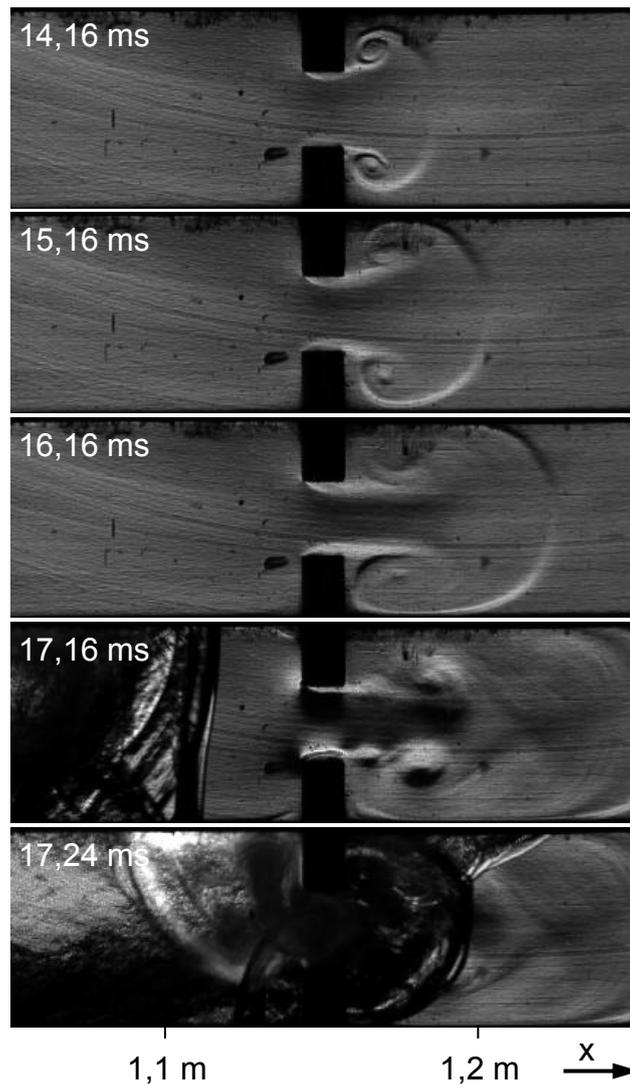


Abbildung 6.31: Schlierenaufnahmen des Gradientenabbaus verursacht durch die Umströmung der Hindernisse mit hoher Blockierrate. Untersuchte Kanalkonfiguration: BR60-S300-VR00. Das Gemisch hat einen globalen Wasserstoffanteil von 26,1 % und einen starken Konzentrationsgradienten ($t_w = 3$ s).

Basierend auf den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen kann noch keine allgemeingültige Korrelation formuliert werden, da die Problematik durch das Vorhandensein von Konzentrationsgradienten mehrdimensional geworden ist und nicht mehr wie beim 7λ -Kriterium durch ein eindimensionales Längenmaß beschreibbar ist.

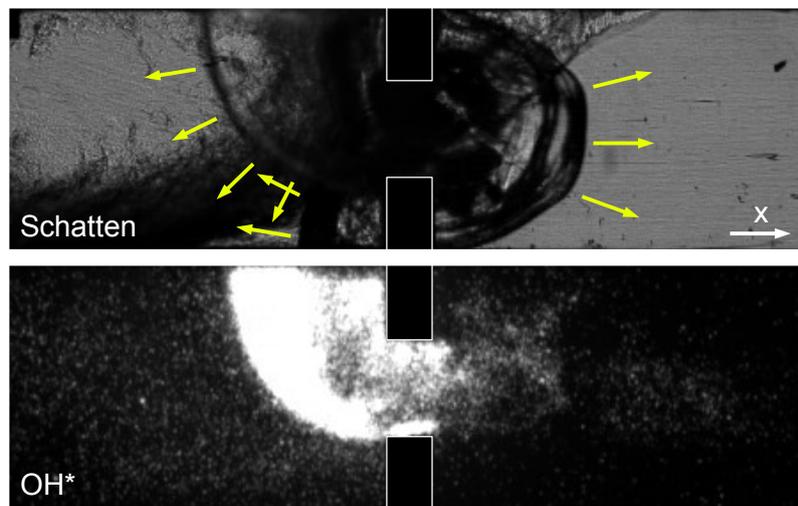


Abbildung 6.32: Simultane Schatten- und Chemilumineszenzaufnahmen einer lokalen Explosion am oberen Hindernis. Aufnahme in einem Gemisch mit 26 % H_2 (gemittelt) und starkem Gradienten ($t_w = 3$ s). Die Pfeile geben die Ausbreitungsrichtung der vorauslaufenden bzw. reflektierte Druckwellen an. Das Hindernis ist bei $x = 1,15$ m positioniert.

7 Zusammenfassung

Schwerpunkt dieser Arbeit war es, den Einfluss von Mischungsgradienten auf die Flammenausbreitung in Wasserstoff-Luft-Gemischen zu bestimmen. Hierzu wurde eine neue Versuchsanlage aufgebaut. Um den Konzentrationsgradienten der Mischung gezielt einstellen zu können, wurde ein neues Konzept zur Gemischaufbereitung entwickelt: Wasserstoff wird durch die Deckplatte eines mit Luft gefüllten Explosionskanal eingedüst, wodurch sich ein vertikaler Konzentrationsgradient ausbildet. Durch Diffusion baut sich der Gradient mit der Zeit ab. Die Stärke des Mischungsgradienten wird über die Wartezeit zwischen Eindüsungsende und Zündzeitpunkt eingestellt. Qualitative und quantitative Messungen zeigen, dass sowohl ein Gemisch mit vertikalem Konzentrationsgradienten als auch ein homogenes Gemisch innerhalb kürzester Zeit reproduzierbar hergestellt werden können. Ein homogenes Gemisch liegt nach einer Diffusionszeit von 60 s vor, unabhängig von der eingedüsten Wasserstoffmenge.

Die Untersuchung der Flammenausbreitung wurde in einem horizontal angeordneten Kanal durchgeführt. Der Explosionskanal hat einen rechteckigen Kanalquerschnitt mit einer Höhe von 60 mm und einer Breite von 300 mm und ist 5,4 m lang. Im ersten Kanalabschnitt befindet sich eine Hindernisstrecke, wodurch eine starke Flammenbeschleunigung ermöglicht wird. Alle Versuche wurden mit Wasserstoff-Luft-Gemischen und bei Umgebungsbedingungen durchgeführt. Es wurden homogene Gemische und Gemische mit einem vertikalen Mischungsgradienten untersucht. Die Stärke des Gradienten wurde in fünf Stufen variiert.

Die Versuche mit einem homogenen Gemisch zeigen, dass die Flammenbeschleunigung mit zunehmendem Hindernisabstand abnimmt. Der Übergang von der Deflagration zur Detonation (DDT) konnte z. B. mit einer Kanalkonfiguration mit geringer Blockierrate ($BR = 30\%$) und großem Hindernisabstand ($S = 300\text{ mm}$) ab einem Wasserstoffanteil von mehr als 19,1 % H_2 beobachtet werden. Grundsätzlich stimmt das 7λ -Kriterium gut mit den Ergebnissen

der Versuchsanlage überein. Abweichungen ergeben sich allerdings bei hoher Blockierrate ($BR = 60\%$) und kleinem Hindernisabstand ($S = 100\text{ mm}$), wo kein DDT zu beobachten war. Der Ansatz zur Vorhersage der Anlaufänge X_s konnte mit den Versuchsergebnisse nicht bestätigt werden.

Gemische mit Mischungsgradienten bewirken eine stärkere Flammenbeschleunigung als sie in homogenen Gemischen zu beobachten ist: Die Flammenbeschleunigung nimmt mit zunehmender Stärke des Gradienten zu. Dies drückt sich sowohl in der erhöhten Flammengeschwindigkeit als auch in der verkürzten Anlaufänge, bis die Produkte die Schallgeschwindigkeit erreichen, aus. Ursache hierfür ist, dass die Flamme im wasserstoffreicheren Bereich des Kanals schneller abbrennt. Die Versuche mit optischer Messtechnik bestätigen, dass die Flammenfront im oberen Bereich des Kanals vorausläuft. Das kritische Expansionsverhältnis σ_{krit} nimmt für Gemische mit starken Gradienten um bis zu 13 % im Vergleich zu einem homogen Gemisch ab.

Generell kann festgehalten werden, dass Konzentrationsgradienten die DDT-Neigung gegenüber homogenen Gemischen sowohl erhöhen als auch verringern können. Das bestehende 7λ -Kriterium stellt kein konservatives Konzept zur Bewertung der Sicherheit dar, was durch die Kanalkonfiguration mit geringer Blockierrate ($BR = 30\%$) und großem Hindernisabstand ($S = 300\text{ mm}$) nachgewiesen werden konnte. In Gemischen mit einem starken Mischungsgradienten tritt DDT bei einem geringeren mittleren Wasserstoffanteil auf als in homogenen Gemischen. Form und Platzierung der Hindernisse im Explosionskanal spielen hierbei eine entscheidende Rolle. So tritt DDT für die Kanalkonfiguration mit $BR = 60\%$ und $S = 300\text{ mm}$ in einem homogenen Gemisch früher ein als in einem Gemisch mit Konzentrationsgradienten.

Desweiteren wurde durch den Einsatz von optischen Messverfahren festgestellt, dass in einem Gemisch mit starken Gradienten die Detonationsfront im oberen Bereich des Kanals gekrümmt ist. Zur unteren Kanalwand hin bildet sich ein Machstamm aus. Eine Detonation breitet sich in einem inhomogenem Gemisch mit einer geringeren Geschwindigkeit aus als in einem homogenen Gemisch. Der entlang des Kanals gemessene Druck ist dabei ebenso um 14 % geringer als für homogene Gemische.

Es gilt, die gewonnen Erkenntnisse weiter zu vertiefen, damit die Anwendung sicherheitsrelevanter Kriterien für Flammenbeschleunigung und DDT auch auf inhomogene Gasgemische ausgeweitet werden kann.

Anhang

A Kennwerte von Wasserstoff-Luft-Gemischen

A.1 Geschwindigkeits- und Expansionsverhältnis-Werte

Die in dieser Arbeit angegebenen Kenngrößen

- Expansionsverhältnis σ
- Schallgeschwindigkeit der Reaktanden a_r
- Schallgeschwindigkeit der Produkte a_p
- Chapman-Jouguet-Geschwindigkeit D_{CJ}

wurden mit Cantera [39] unter Benutzung der EDL Shock and Detonation Toolbox [33] berechnet. Aus der Chemkin-Datenbank [51] wurden hierbei die temperaturabhängigen Stoffwerte entnommen. Bei der Berechnung wurde vereinfachend angenommen, dass Luft zu 21 % aus Sauerstoff und zu 79 % aus Stickstoff besteht (Angaben in Volumenprozent). Die Ausgangstemperatur beträgt $T_0 = 293 \text{ K}$ und der Ausgangsdruck $p_0 = 1,013 \text{ bar}$. Das Ergebnis der Berechnung für ein Wasserstoff-Luft-Gemisch ist in Tabelle A.1 wiedergegeben.

X_{H_2}	y_{H_2}	σ	a_r	a_p	D_{CJ}
–	–	–	m/s	m/s	m/s
7 %	0,52 %	2,84	356	586	1119
8 %	0,60 %	3,08	357	611	1178
9 %	0,69 %	3,31	359	636	1235
10 %	0,77 %	3,54	361	659	1295
11 %	0,86 %	3,77	363	682	1339
12 %	0,94 %	3,99	365	704	1388
13 %	1,03 %	4,21	367	725	1435

A Kennwerte von Wasserstoff-Luft-Gemischen

14 %	1,12 %	4,42	369	746	1480
15 %	1,22 %	4,63	371	766	1524
16 %	1,31 %	4,84	373	786	1565
17 %	1,41 %	5,04	375	805	1605
18 %	1,51 %	5,24	377	824	1644
19 %	1,61 %	5,43	379	843	1680
20 %	1,72 %	5,62	381	861	1716
21 %	1,82 %	5,81	383	879	1750
22 %	1,93 %	5,98	386	896	1782
23 %	2,04 %	6,16	388	913	1813
24 %	2,16 %	6,32	390	930	1842
25 %	2,28 %	6,48	393	946	1871
26 %	2,40 %	6,62	395	962	1897
27 %	2,52 %	6,76	398	976	1922
28 %	2,65 %	6,88	400	990	1946
29 %	2,77 %	6,97	403	1003	1967
30 %	2,91 %	7,04	405	1014	1987
31 %	3,04 %	7,05	408	1022	2004
32 %	3,18 %	7,03	411	1027	2020
33 %	3,33 %	7,00	413	1032	2033
34 %	3,47 %	6,95	416	1035	2045
35 %	3,63 %	6,90	419	1039	2056
36 %	3,78 %	6,84	422	1043	2067
37 %	3,94 %	6,78	425	1046	2076
38 %	4,11 %	6,72	428	1049	2085
39 %	4,28 %	6,66	431	1053	2094
40 %	4,45 %	6,60	434	1056	2102
41 %	4,63 %	6,53	437	1059	2112
42 %	4,82 %	6,47	441	1063	2118
43 %	5,01 %	6,40	444	1066	2126
44 %	5,20 %	6,34	448	1069	2134
45 %	5,41 %	6,27	451	1073	2142

Tabelle A.1: Kennwerte für Wasserstoff-Luft-Gemische. Berechnungsgrundlage:

$T_0 = 293 \text{ K}$, $p_0 = 1,013 \text{ bar}$ [29].

A.2 Detonationszellweiten

Abbildung A.1 zeigt die Detonationszellweiten von Wasserstoff-Luft-Gemischen in Abhängigkeit des Molenbruchs. Die Berechnung der Detonationszellweiten wurde nach Gavrikov [35] durchgeführt.

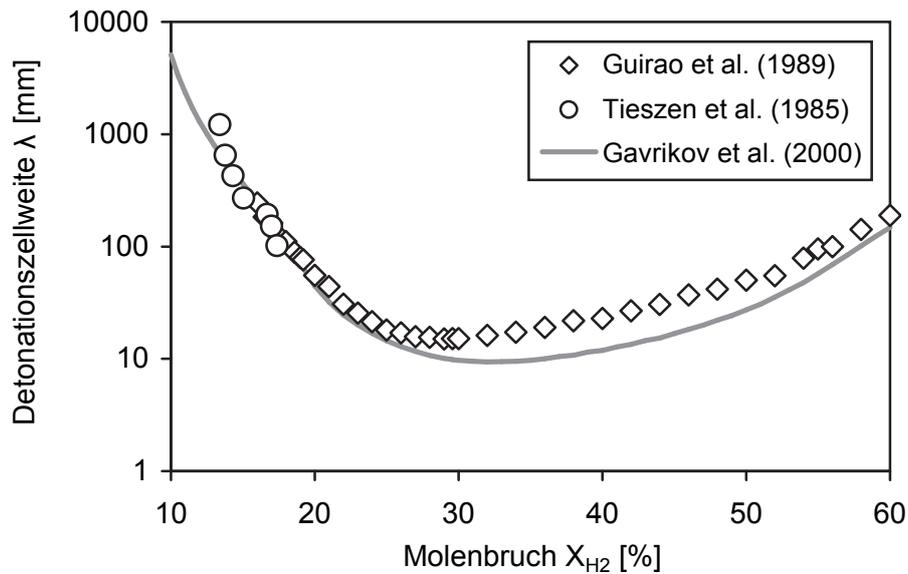


Abbildung A.1: Detonationszellweite für Wasserstoff-Luft-Gemische unter Umgebungsbedingungen. Die Daten von Daten von Guirao [41] und Tieszen et al. [75] sind diskret angegeben, wohingegen die Werte nach Gavrikov [35] berechnet wurden.

B Konzentrationsbestimmung

B.1 Aufbereitung der Gasproben

Abbildung B.1 stellt den Druckverlauf in einer Gasmaus dar, die zur Entnahme und Zwischenspeicherung der Gasproben aus dem Experiment verwendet wurde.

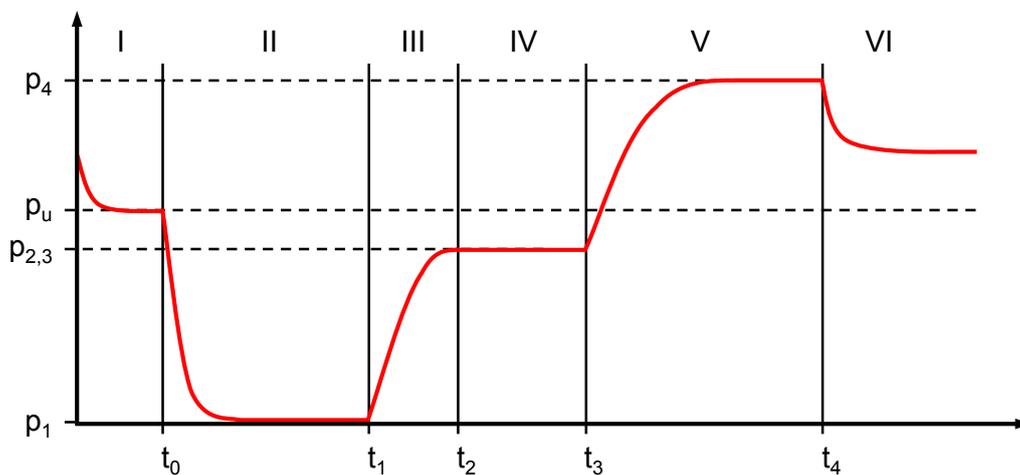


Abbildung B.1: Druckverlauf in der Gasmaus.

Der Druck in der Gasmaus ändert sich während sechs Phasen:

- I. Druckabbau auf Umgebungsdruck
- II. Evakuieren der Gasmaus auf $p_1 \leq 1$ mbar (absolut)
- III. Entnahme Gasprobe aus Eindüsungsmodell
- IV. Druckausgleich mit Aufbereitungsapparatur
- V. Befüllung mit Argon auf $p_4 \leq 1,5$ bar (absolut)
- VI. Gasanalyse mittels Gaschromatographie

Phase I und II dienen dazu, die Gasmaus für den Versuch vorzubereiten, indem die Gasmaus evakuiert wird ($p_1 \leq 1$ mbar (absolut)). In Phase III wird Gas aus dem Eindüsungsmodell entnommen. Aufgrund der kurzen Entnahmedauer der Gasprobe ($t = 0,5$ s) erhöht sich der Druck in der Gasmaus maximal auf Umgebungsdruck. Da für die anschließende Gasanalyse mit dem Gaschromatographen ein Überdruck in der Gasmaus vorliegen muss, wird die Gasmaus nun an die Aufbereitungseinheit angeschlossen, um die Gasprobe für die Gasanalyse vorzubereiten.

Die Aufbereitungseinheit hat insgesamt drei Schnittstellen, wie in Abbildung B.2 zu erkennen ist. An eine Schnittstelle wird das Magnetventil der

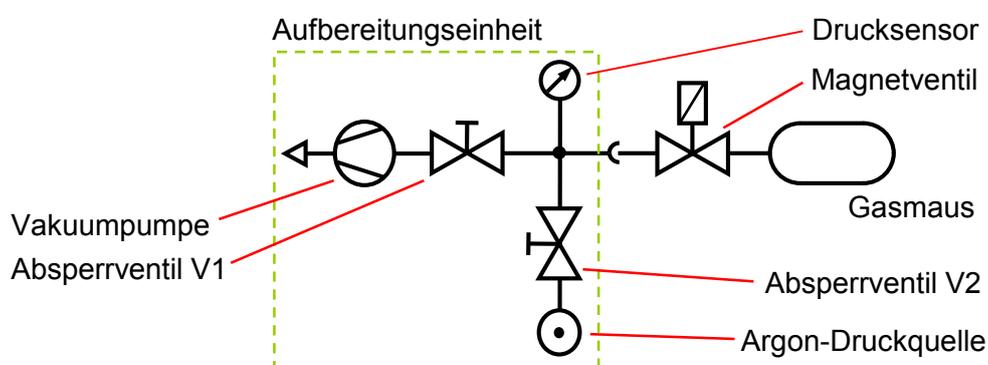


Abbildung B.2: Skizze der Aufbereitungseinheit.

Gasmaus angeschlossen, an das Absperrventil V1 die Vakuumpumpe und an das Absperrventil V2 die Argon-Versorgung. Für die Überwachung der Gasprobenaufbereitung und für die spätere Berechnung der Gemischzusammensetzung ist ein Handdruckmessgerät GMH 3110 mit einem Drucksensor DPI 705¹ an der Aufbereitungseinheit befestigt.

Zunächst sind alle Ventile (V1, V2 und das Magnetventil der Gasmaus) geschlossen. Durch Öffnen des Absperrventils V1 wird die Aufbereitungseinheit zunächst evakuiert ($p_1 \leq 1$ mbar absolut). Anschließend wird das Absperrventil V1 geschlossen und das Magnetventil der Gasmaus geöffnet. Es kommt zu einem Druckausgleich zwischen Gasmaus und Aufbereitungseinheit (Phase IV). Der Druck in der Gasmaus nimmt hierbei minimal ab ($p_3 < p_2$). Dieser Druckwert wird für die spätere Auswertung benötigt.

¹ Der Messbereich des Drucksensors beträgt 0 mbar bis 2000 mbar (absolut).

Durch das Öffnen des Absperrventils V2 strömt Argon in die Aufbereitungseinheit und die Gasmaus (Phase V). Das Absperrventil V2 wird geschlossen, wenn ein Druck von ca. 1,5 bar absolut am Drucksensor gemessen wird. Bevor das Magnetventil an der Gasmaus geschlossen wird, ist der Druck p_4 für die spätere Auswertung zu messen.

Anschließend erfolgt die Analyse der Gasprobe. Hierzu wird die Magnetventil der Gasmaus an die Schnittstelle des Gaschromatographen (GC) angeschlossen. Durch Öffnen des Magnetventils wird das Gas aus der Gasmaus durch den GC in die Umgebung gedrückt (Phase VI). Das Magnetventil wird geschlossen und es erfolgt ein Druckausgleich zwischen GC und Umgebung. Anschließend kann die Gasprobe analysiert werden.

B.2 Berechnung der Gaszusammensetzung

Die Berechnung des Heliumanteils in der Gasmaus erfolgt anhand des Messergebnisses des GC und unter Berücksichtigung der relevanten Druckwerte p_1 , p_3 und p_4 :

$$X_{\text{He}} = 1 - \frac{X_{N_2} \cdot p_4 - X_{N_2, \text{Luft}} \cdot p_1}{X_{N_2, \text{Luft}} \cdot (k \cdot p_3 - p_1)} \quad (\text{B.1})$$

Die Konstante k hat den Wert:

$$k = \frac{V_{\text{Gasmaus}} + V_{\text{Kreuz}}}{V_{\text{Gasmaus}}} = \frac{54,12}{51,16} = 1,05786 \quad (\text{B.2})$$

Die Gleichung kann zu

$$X_{\text{He}} = 1 - \frac{X_{N_2} \cdot p_4 - 0,78 p_1}{0,78 (1,05786 p_3 - p_1)} \quad (\text{B.3})$$

vereinfacht werden.

B.3 Ergebnisse der Diffusionsversuche

Ergänzend zu den Messergebnissen in Abbildung 3.7 in Kapitel 3.4.3 (Gradientenabbau mit 20 % H₂) zeigt Abbildung B.3 die Ergebnisse mit 13,5 % He,

24,5 % He, 30,0 % He und 36,0 % He. Es sind die Profile der Konzentrationsgradienten für die Wartezeiten (Diffusionszeit) von 3 s, 5 s, 7,5 s, 10 s und 60 s dargestellt. Es ist erkennbar, dass mit einer Wartezeit von 60 s ein homogenes Gemisch vorliegt.

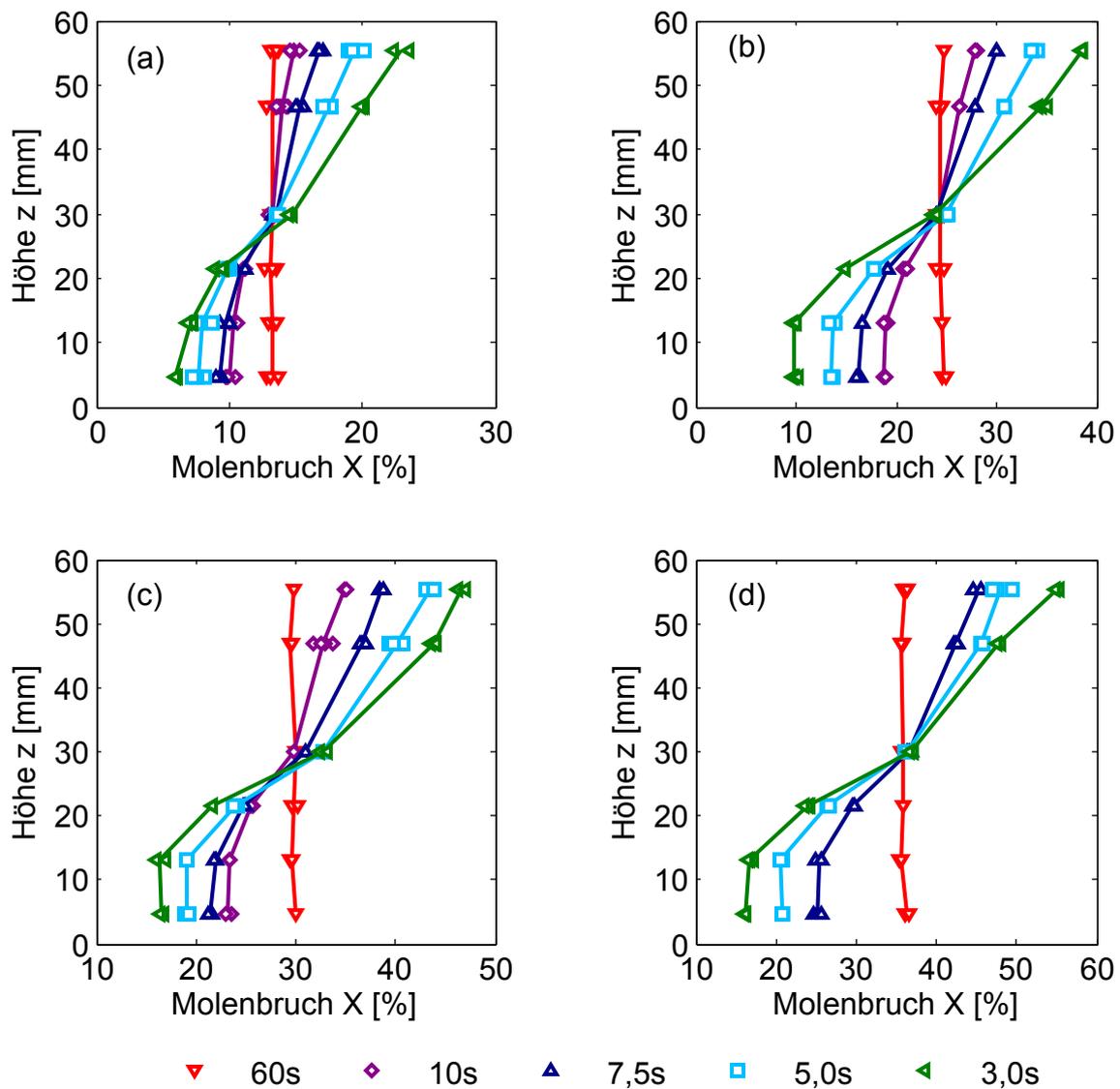


Abbildung B.3: Abbau des Konzentrationsgradienten in Abhängigkeit von dem gemittelten Heliumanteils. Der gemittelte Heliumanteil beträgt bei den Versuchen in Diagramm a) 13,5 % He, in b) 24,5 % He, in c) 30,0 % He und in d) 36,0 % He.

C Wasserstoff- und Luft-Versorgungssystem

Abbildung C.1 zeigt das Wasserstoffversorgungssystem der GraVent-Anlage, bestehend aus dem Wasserstoff-Druckspeicher, der Zuleitung zu dem Zwischenspeicher, mehreren Verteiler sowie 20 Gaszufuhreinheiten. Zudem sind in dieser Abbildung sechs weitere Schnittstellen (V2, V4, V6, V8, V10 und V12) zu dem Explosionskanal dargestellt, die hauptsächlich für den Spülvorgang, zum Teil aber auch für das Absenken des Innendrucks im Versuchsvolumen mittels Vakuumpumpe notwendig sind. Desweiteren sind noch diverse Druck- und Temperatursensoren an das Wasserstoffversorgungssystem angebracht. Die Drucksensoren P2 und P3 werden, wie in Kapitel 4.2 erwähnt, für die Bestimmung des Wasserstoffanteils in der Hauptkammer des Versuchskanals mittels Partialdruckmethode herangezogen.

Der Wasserstoff in dem Versorgungssystem kann aus Sicherheitsgründen mit einer Vakuumpumpe dem Leitungssystem entzogen werden. Anschließend kann das Leitungssystem mit Druckluft befüllt werden.

Abbildung C.2 zeigt die Komponenten der Gaszufuhreinheit. Die Gaszufuhreinheit leitet Wasserstoff durch ein Magnetventil, eine Keramik-Düse, einen Endverteiler sowie neun Edelstahlrohren in den Explosionskanal hinein (s. Kap. 4.2).

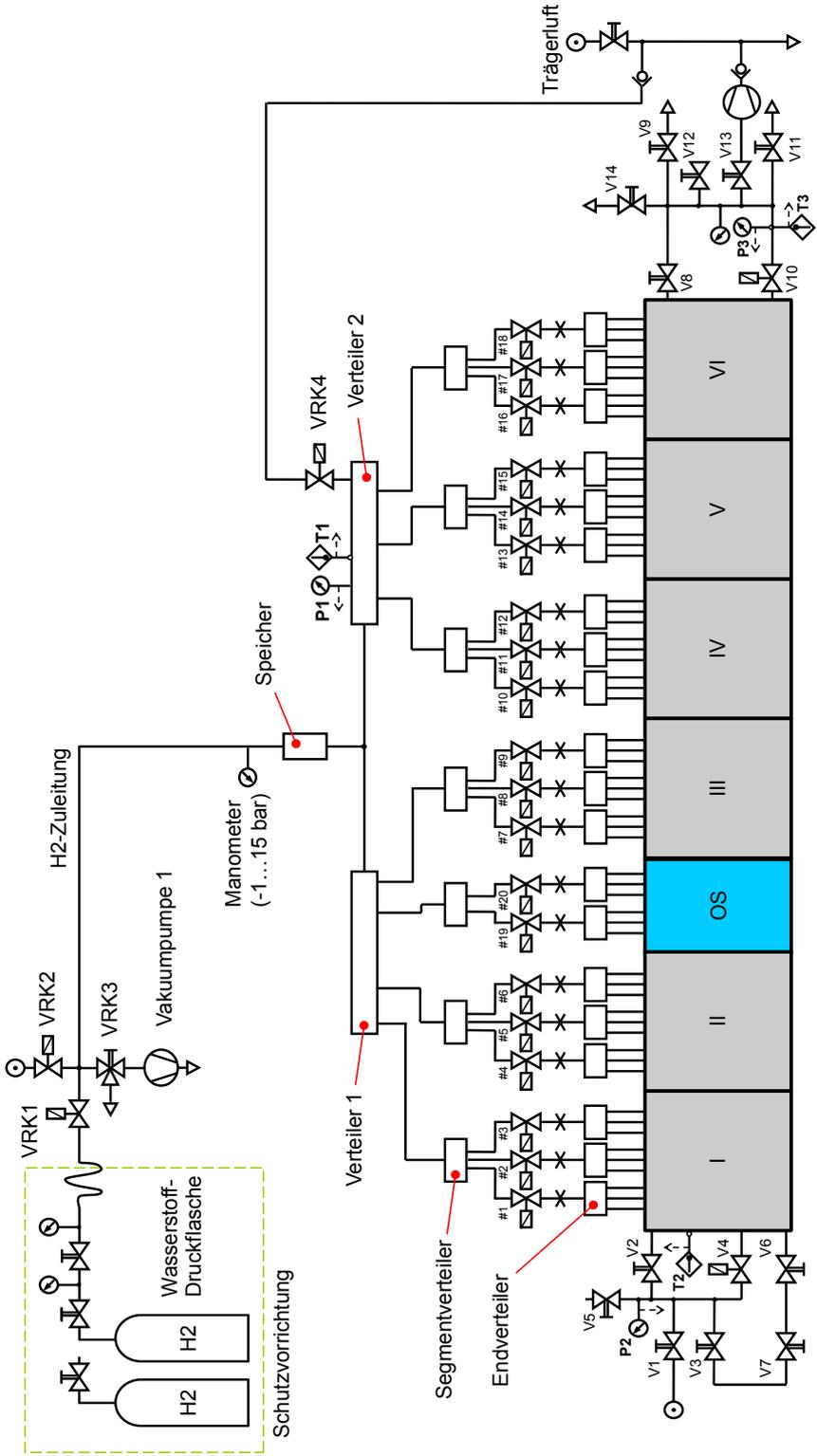


Abbildung C.1: Wasserstoff- und Luft-Versorgungssystem der GraVent-Anlage.

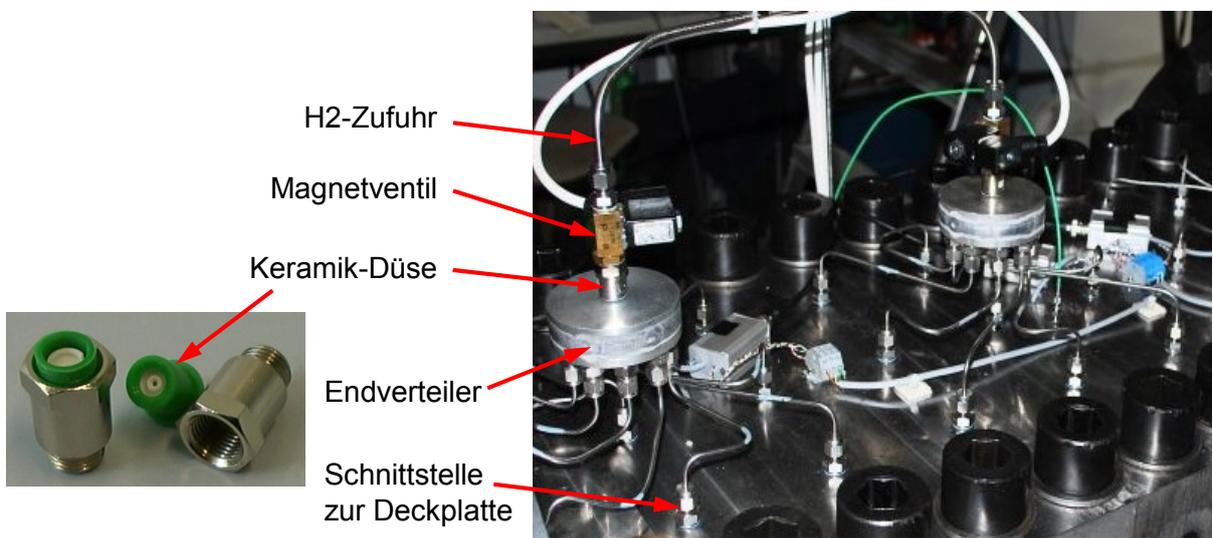


Abbildung C.2: Gaszufuhreinheit.

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Lehrstuhl für Thermodynamik in den Jahren 2007 bis 2012 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Auslegung der Versuchsanlage, zu Messverfahren und zur Versuchsdurchführung untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt nochmals allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierender	Studienarbeit
Behl, T.	Konstruktionsentwurf eines Explosionskanals, abgegeben am 17. Juni 2009.
Birk-Striebel, D.	Auslegung des Explosionskanals der GraVent-Anlage, abgegeben am 10. Oktober 2008.
Boosz, A.	Vorversuche zur Flammenbeschleunigung und zum Übergang Deflagration - Detonation mit der GraVent-Anlage, abgegeben am 14. Juli 2011.
Burma, R.	Entwicklung eines Mess- und Steuerprogramms zur Untersuchung von Explosionsvorgängen, abgegeben am 30. Juni 2009.
Dupuis, V.	Untersuchung der deflagrativen und detonativen Flammenausbreitung in Wasserstoff-Luft-Gemischen mittels optischer Messtechnik, abgegeben am 12. September 2011.

Kayser, M.	Einfluss von Konzentrationsgradienten eines Wasserstoff-Luft-Gemisches auf die Flammenausbreitung in einem Explosionskanal, abgegeben am 30. September 2011.
Musiol, M.	Einfluss von seitlichen Massenverlust (Venting) auf die Flammenbeschleunigung in der GraVent-Anlage, abgegeben am 15. Juli 2011.
Pfann, J.M.	Aufbau und Durchführung von optischen Messungen an Wasserstoff-Diffusionsflammen, abgegeben am 31. Oktober 2010.
Rieger, B.	Untersuchung von Detonationsvorgängen an der GraVent-Anlage mit der DMS-Messtechnik, abgegeben am 16. Mai 2011.
Rieger, F.	Untersuchung optischer Messverfahren: Schatten-, Schlieren- und Farbschlierenverfahren, abgegeben am 19. September 2011.
Wurdak, P.	Untersuchung der Flammenbeschleunigung in einem nach unten offen Explosionskanal, abgegeben am 30. September 2011.

Literaturverzeichnis

- [1] Ardey, N.: Struktur und Beschleunigung turbulenter Wasserstoff-Luft-Flammen in Räumen mit Hindernissen. Dissertation, Technische Universität München, 1998.
- [2] Auban, O., Zboray, R. und Paladino, D.: Investigation of Large-Scale Gas Mixing and Stratification Phenomena Related to LWR Containment Studies in the PANDA Facility. *Nuclear Engineering and Design*, 237:409–419, 2007.
- [3] Aung, K., Hassan, M. und Faeth, G.: Flame Stretch Interactions of Laminar Premixed Hydrogen/Air Flames at Normal Temperature and Pressure. *Combustion and Flame*, 109:1–24, 1997.
- [4] Aung, K., Hassan, M. und Faeth, G.: Effects of Pressure and Nitrogen Dilution on Flame/Stretch Interactions of Laminar Premixed H₂/O₂/N₂ Flames. *Combustion and Flame*, 112:1–15, 1998.
- [5] Austin, J. M.: The Role of Instability in Gaseous Detonation. Dissertation, California Institute of Technology Pasadena, California, 2003.
- [6] Barnes, N. und Bellinger, S.: Schlieren and Shadowgraph Equipment for Air Flow Analysis. *Journal of the Optical Society of America*, 35:497–509, 1945.
- [7] Bartknecht, W. und Zwahlen, G.: Explosionsschutz: Grundlagen und Anwendung. Springer, 1993.
- [8] Beauvais, R.: Brennverhalten vorgemischter, turbulenter Wasserstoff-Luft-Flammen in einem Explosionsrohr. Dissertation, Technische Universität München, 1994.

- [9] Bejdakic, E., Fischer, B., Hellmich, M., Hutter, J., Kopisch, C., Krauß, M., Link, C., Mahlke, J., Meiß, S., Niedzwiedz, K., Philipps, F., Reiner, M., Sachse, A., Schaper, A., Scheib, P., Schneider, M. und Seidel, F.: Die Katastrophe im Kernkraftwerk Fukushima nach dem Seebeben vom 11. März 2011: Beschreibung und Bewertung von Ablauf und Ursachen. Technischer Bericht, Bundesamt für Strahlenschutz, 2012.
- [10] Bendiab, M.: Erweiterung des Containment Codes COCOSYS zur Quelltermbewertung der trockenen Resuspension infolge transienter Strömungen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2007.
- [11] Bonne, U., Grewer, T. und Wagner, H.: Messungen in der Reaktionszone von Wasserstoff-Sauerstoff- und Methan-Sauerstoff-Flammen. In: Zeitschrift für Physikalische Chemie, Band 26, S. 93–110. 1960.
- [12] Brehm, N.: Ein Beitrag zum Phänomen des Übergangs Deflagration - Detonation. Dissertation, Technische Universität München, 1987.
- [13] Breitung, W., Chan, C. K., Dorofeev, S. B., Eder, A., Gelfand, B. E., Heitsch, M., Klein, R., Malliakos, A., Shepherd, J. E., Studer, E., Thibault, P. und Royen, J.: Flame Acceleration and Deflagration to Detonation Transition in Nuclear Safety. Technischer Bericht, OECD Nuclear Energy Agency, 08 2000.
- [14] Breitung, W., Baumann, W., Bielert, U., Burgeth, B., Dorofeev, S. B., Kaup, B., Kotchourko, A., Necker, G., Redlinger, R., Roysl, P., Starflinger, J., Stern, G., Travis, J. R., Vesper, A. und Xu, Z.: Innovative Methoden zu Analyse und Kontrolle des Wasserstoffverhaltens bei Kernschmelzunfällen. Abschlussbericht zu Teilprojekt 1 des HGF-Strategiefondsprojekts 98/07 FZKA 7085, Forschungszentrum Karlsruhe, 2005.
- [15] Ciccarelli, G. und Dorofeev, S.: Flame Acceleration and Transition to Detonation in Ducts. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34:499–550, 2008.
- [16] Ciccarelli, G., Fowler, C. J. und Bardon, M.: Effect of Obstacle Size and Spacing on the Initial Stage of Flame Acceleration in a Rough Tube. *Shock Waves*, 14:161–166, 2005.

- [17] Ciccarelli, G., Johansen, C. und Parravani, M.: The Role of Shock-Flame Interactions on Flame Acceleration in an Obstacle Laden Channel. *Combustion and Flame*, 157:2125–2136, 2010.
- [18] Dorofeev, S. B., Sidorov, V. P., Kuznetsov, M. S., Matsukov, I. D. und Alekseev, V. I.: Effect of Scale on the Onset of Detonations. *Shock Waves*, 10: 137–149, 2000.
- [19] Dorofeev, S.: Hydrogen Flames in Tubes: Critical Run-Up Distances. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:5832–5837, 2009.
- [20] Dorofeev, S., Kuznetsov, M., Alekseev, V., Efimenko, A. und Breitung, W.: Evaluation of Limits for Effective Flame Acceleration in Hydrogen Mixtures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14:583–589, 2001.
- [21] Dou, H., Tsai, H., Khoo, B. und Qiu, J.: Simulations of Detonation Wave Propagation in Rectangular Ducts Using a Three-Dimensional WENO Scheme. *Combustion & Flame*, 154:644–659, 2008.
- [22] Dowdy, D., Smith, D., Taylor, S. und Williams, A.: The Use of Expanding Spherical Flames to Determine Burning Velocities and Stretch Effects in Hydrogen/Air Mixtures. *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*, S. 325–332, 1991.
- [23] Drell, I. und Belles, F.: Survey of Hydrogen Combustion Properties. Technischer Bericht, NACA Report 1383, 1958.
- [24] Drinovac, P.: Experimentelle Untersuchungen zu katalytischen Wasserstoffrekombinatoren für Leichtwasserreaktoren. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2006.
- [25] Droste, B., Eder, A., Karl, W., Kesten, M., Musiol, F., Rohde, J., Sauer, G., Szamer, R. und Ziegler, H.-P.: Störfall-Kommission. Technischer Bericht, Arbeitskreis Wasserstofftechnologie, 2002.
- [26] Dumitrescu, M., Labracherie, L., Burtschell, Y. und Houas, L.: Protecting Pressure Gauges with Grease in High Temperature Facilities. *Shock Waves*, 2:269–271, 1992.
- [27] Eder, A.: Brennverhalten schallnaher und überschall-schneller Wasserstoff-Luft Flammen. Dissertation, Technische Universität München, 2001.

- [28] Ehgal, B.: Nuclear Safety in Light Water Reactors: Severe Accident Phenomenology. Academic Press, 2012.
- [29] Ettner, F.: Effiziente numerische Simulation des Deflagrations-Detonations-Übergangs. Dissertation, Technische Universität München, 2013.
- [30] Ettner, F., Vollmer, K. und Sattelmayer, T.: Simulating Deflagrations and Detonations with Detailed Chemistry. *22nd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Minsk, Belarus*, 2009.
- [31] Ettner, F., Vollmer, K. und Sattelmayer, T.: Einfluss von Mischungsgradienten und seitlichem Massenverlust auf die Flammenbeschleunigung und die Detonation in Kanälen. GRS-Abschlussbericht Vorhaben Nr. 1501338, Technische Universität München, 2011.
- [32] Ettner, F., Vollmer, K. und Sattelmayer, T.: Mach Reflection in Detonations Propagating through a Gas with a Concentration Gradient. *Shock Waves*, 23:201–206, 2012.
- [33] Explosion Dynamics Laboratory (EDL), California Institute of Technology: Shock and Detonation Toolbox. http://www.galcit.caltech.edu/EDL/public/cantera/html/SD_Toolbox/. Zuletzt abgerufen am 19.01.2013.
- [34] Fick, A.: Über Diffusion. *Annalen der Physik*, 170:59–86, 1885.
- [35] Gavrikov, A., Efimenko, A. A. und Dorofeev, S. B.: A Model for Detonation Cell Size Prediction from Chemical Kinetics. *Combustion and Flame*, 120: 19–33, 2000.
- [36] Gaydon, A.: The Spectroscopy of Flames. Chapman & Hall London, 1976.
- [37] Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS): Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke Phase B – Eine zusammenfassende Darstellung. Technischer Bericht GRS-72, 1989.
- [38] Günther, R.: Verbrennung und Feuerung. Springer, 1984.
- [39] Goodwin, D.: Cantera: An Object-Oriented Software Toolkit for Chemical Kinetics, Thermodynamics and Transport Processes: 2009. <http://code.google.com/p/cantera>. Zuletzt abgerufen am 19.09.2012.

- [40] Graduate Aerospace Laboratories of the California Institute of Technology (GALCIT): Detonation Database. http://www.galcit.caltech.edu/detn_db/html/. Zuletzt abgerufen am 11.08.2013.
- [41] Guirao, C., Knystautas, R. und Lee, J.: A Summary of Hydrogen-Air Detonation Experiments. Technischer Bericht NUREG/CR-4961; SAND-87-7128, McGill University, Montreal, February 1989.
- [42] Hamamatsu: SI photodiodes: S1336 series. <http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/alpha/P/4103/S1336-18BQ/index.html>. Zuletzt abgerufen am 10.06.2013.
- [43] Hecht, E.: Optik. 4. Auflage. Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2005.
- [44] Heinz, C.: Untersuchung eines Vorkammerzündkonzepts für Großgasmotoren in einer Hochdruckzelle mit repetierender Verbrennung. Dissertation, Technische Universität München, 2011.
- [45] Houkema, M., Komen, E., Siccama, N. und Willemsen, S.: CFD Analyses of Steam and Hydrogen Distribution in a Nuclear Power Plant. *The 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*, 2003.
- [46] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: GESTIS-Stoffdatenbank. <http://www.dguv.de/dguv/ifa/Gefahrstoffdatenbanken/GESTIS-Stoffdatenbank/index.jsp>. Zuletzt abgerufen am 20.08.2013.
- [47] Ishii, K. und Kojima, M.: Behavior of Detonation Propagation in Mixtures with Concentration Gradients. *Shock Waves*, 17:95–102, 2007.
- [48] Jordan, M.: Zündung und Verbrennung in vorgemischten turbulenten Freistrahlen. Dissertation, Technische Universität München, 1999.
- [49] Karpov, V., Lipatnikov, A. und Wolanski, P.: Finding the Markstein Number Using the Measurements of Expanding Spherical Laminar Flames. *Combustion and Flame*, 109:436–448, 1997.
- [50] Kathrotia, T., Fikri, M., Bozkurt, M., Hartmann, M., Riedel, U. und Schulz, C.: Study of the H+O+M Reaction Forming OH*: Kinetics of OH* Chemiluminescence in Hydrogen Combustion Systems. *Combustion and Flame*, 157:1261 – 1273, 2010.

- [51] Kee, R., Coltrin, M. und Glarborg, P.: Chemically Reacting Flow. John Wiley & Sons, 2003.
- [52] Kiyanda, C., Tanguay, V., Higgins, A. und Lee, J.: Effect of Transient Gas-dynamic Processes on the Impulse of Pulse Detonation Engines. *J. Propulsion*, 18:1124–1126, 2002.
- [53] Konnov, A.: Remaining Uncertainties in the Kinetic Mechanism of Hydrogen Combustion. *Combustion and Flame*, 154:507–528, 2008.
- [54] Koroll, G., Kumar, R. und Bowles, E.: Burning Velocities of Hydrogen-Air Mixtures. *Combustion and Flame*, 94:330–340, 93.
- [55] Krehl, P. und Engemann, S.: August toepfer- the first who visualized shock waves. *Shock Wave*, 5:1–18, 1995.
- [56] Kuznetsov, M., Alekseev, V., Bezmelnitsyn, A., Breitung, W., Dorofeev, S., Matsukov, I., Vesper, A. und Yankin, Y.: Effect of Obstacle Geometry on Behaviour of Turbulent Flames. Technischer Bericht FZKA 6328, Forschungszentrum Karlsruhe, 1999.
- [57] Kuznetsov, M., Matsukov, I., Alekseev, V. und Dorofeev, S.: Photographic Study of Unstable Turbulent Flames in Obstructed Channels. *17th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Heidelberg, Deutschland*, 1999.
- [58] Kwon, O. und Faeth, G.: Flame/Stretch Interactions of Premixed Hydrogen–Fueled Flames: Measurements and Predictions. *Combustion and Flame*, 124:590–610, 2001.
- [59] Lauer, M.: Determination of the Heat Release Distribution in Turbulent Flames by Chemiluminescence Imaging. Dissertation, Technische Universität München, 2011.
- [60] Lee, J.: Initiation of Gaseous Detonation. *Ann. Rev. Phys. Chem*, 28:75–104, 1977.
- [61] Lee, J.: The Detonation Phenomenon. Cambridge University Press, 2008.
- [62] Li, J., Chung, K. und Lai, W.: Tube Diameter Effect on Deflagration-to-Detonation Transition of Propane-Oxygen Mixtures. *Shock Waves*, 16: 109–117, 2006.

- [63] Mason, E. und Marrero, T.: Gaseous Diffusion Coefficients. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1:3–117, 1972.
- [64] Mathworks: Smooth Response Data. <http://www.mathworks.de/de/help/curvefit/smooth.html>. Zuletzt abgerufen am 14.08.2013.
- [65] Mayinger, F. und Feldmann, O.: *Optical Measurements: Techniques and Application*. Springer, 1994.
- [66] Mayinger, F., Strube, G. und Beauvais, G.: Derzeitiger Wissensstand über den Verlauf der Grenze für den Übergang einer Deflagration in eine Detonation (DDT) im Dreistoff-Diagramm Wasserstoff/Luft/Wasserdampf nach Shapiro/Moffette. Technischer Bericht, Technische Universität München, 1988.
- [67] Microsoft Corporation: Hilfe und Support: Automatisieren von Microsoft Excel aus Visual Basic. <http://support.microsoft.com/kb/219151/de>. Zuletzt abgerufen am 13.09.2013.
- [68] National Instruments: Systemdesignsoftware NI LabVIEW. <http://www.ni.com/labview/d/>. Zuletzt abgerufen am 13.09.2013.
- [69] Osif, B., Baratta, A. und Conkling, T.: *TMI 25 Years Later*. Pennsylvania State University Press, 2004.
- [70] Pöschl, M.: Einfluss von Temperaturinhomogenitäten auf den Reaktionsablauf bei der klopfenden Verbrennung. Dissertation, Technische Universität München, 2006.
- [71] Settles, G.: *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*. Springer, 2001.
- [72] Slide, A. und Redlinger, R.: Three-dimensional Simulation of Hydrogen Detonations in the Olkiluoto BWR Reactor Building. Technischer Bericht, VTT Energy, Finnland und Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Deutschland, 2001.
- [73] Smirnov, N. und Tyumikov, M.: Experimental Investigation of Deflagration to Detonation Transition in Hydrocarbon-Air Gaseous Mixtures. *Combustion and Flame*, 100:661–668, 1995.

- [74] Thomas, G., Ward, S., Williams, R. und Bambrey, R.: On Critical Conditions for Detonation Initiation by Shock Reflection from Obstacles. *Shock Waves*, 12:111–119, 2002.
- [75] Tieszen, S. R., Sherman, M. P., Benedick, W. B., Shepherd, J. E., Knystautas, R. und Lee, J. H.: Detonation Cell Size Measurements in H₂-Air-H₂O Mixtures. Technischer Bericht, Sandia National Laboratories and McGill University, 1985.
- [76] Töpler, A.: Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode – Ein Beitrag zur Experimental-Physik. Max Cohen & Sohn, 1864.
- [77] Tse, S., Zhu, D. und Law, C.: Morphology and Burning Rates of Expanding Spherical Flames in H₂/O₂/Inert Mixtures up to 60 Atmospheres. *Proceedings of the Combustion Institute*, 28:1793–1800, 2000.
- [78] Vagelopoulos, C., Egolfopoulos, F. und Law, C.: Further Considerations on the Determination of Laminar Flame Speeds with the Counterflow Twin-Flame Technique. *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, S. 1341–1347, 1994.
- [79] Valiev, D., Akkerman, V., Kuznetsov, M., Eriksson, L.-E., Law, C. und Bychkov, V.: Influence of Gas Compression on Flame Acceleration in the Early Stage of Burning in Tubes. *Combustion and Flame*, 160:97–111, 2013.
- [80] Vesper, A., Breitung, W. und Dorofeev, S.: Run-up Distances to Supersonic Flames in Obstacle-laden Tubes. *J. Phys. IV France*, 12:333–340, 2002.
- [81] Vollmer, K., Ettner, F. und Sattelmayer, T.: Influence of Concentration Gradients on Flame Acceleration in Tubes. *Science and Technology of Energetic Materials*, 72:74–77, 2011.
- [82] Warnatz, J., Mass, U. und Dibble, R. W.: Verbrennung. Springer, 1997.
- [83] Weber, J. K. M.: Detonationswellen in engen Spalten. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2006.
- [84] Wieser, M. und Coplen, T.: Atomic Weights of the Elements (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 83:359–396, 2011.
- [85] Wu, C. und Law, C.: On the Determination of Laminar Flame Speeds from Stretched Flames. *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, S. 1941–1949, 1985.