

Untersuchungen zu Gasetonationen in Kapillaren für die Mikroreaktionstechnik

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von M. Sc. Thomas Meye

geb. am 7. Dezember 1977 in Staßfurt

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Frank Beyrau (Vorsitz)

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause (Gutachter)

Prof. Dr.-Ing. Michael Beyer (Gutachter)

Prof. Dr. rer. nat. Volkmar Schröder (Gutachter)

eingereicht am: 2. Juni 2016

Promotionskolloquium am: 28. November 2016

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht das Ausbreitungsverhalten von Gasdetonationen in Kapillaren. Betrachtet werden detonative Gemische aus Ethan bzw. Propan und Stickstoffmonoxid bzw. Distickstoffmonoxid bei unterschiedlichem Ausgangsdruck. Dabei wird der Frage nachgegangen, ob es mit Hilfe von detonationsspezifischen Parametern möglich ist, den sicheren Durchmesser einer Kapillare für ein definiertes Gemisch aus Brennstoff und Oxidationsmittel abschätzen zu können.

Hierfür wurde eine Versuchsanlage mit einem Querschnitt des Detonationskanals von 10 mm konzipiert und gebaut, die das Messen der Detonationsgeschwindigkeit und des Detonationsdruckes bei gleichzeitiger Aufzeichnung des Detonationszellmusters ermöglicht. Aufgrund ihrer modularen Bauweise ermöglicht diese Versuchsanlage darüber hinaus auch den Einbau von Edelstahl- und Borosilikatglaskapillaren in den Detonationskanal, sodass das Ausbreitungsverhalten der Detonation in einer Kapillare untersucht werden kann. Neuartige PVDF-Drucksensoren wurden im Detonationskanal getestet und aufgrund ihres sehr schnellen Ansprechverhaltens für den Einsatz ausgewählt.

Die Ermittlung der Detonationszellbreite über das Rußschichtverfahren hat sich in dem sehr schmalen 10 mm Detonationskanal der Versuchseinrichtung bewährt. Auch sehr kleine Detonationszellen können damit sichtbar gemacht und mit Hilfe eines Flachbettscanners ausgewertet werden. Der Einsatz von druckempfindlichen Folien brachte keinen Erfolg, da diese Hilfsmittel ein nur geringes Auflösungsvermögen besitzen und allenfalls größere Strukturen abbilden können. Die kleinsten Detonationszellen treten für die untersuchten Stoffgemische nicht bei der stöchiometrischen Konzentration auf, sondern im leicht überstöchiometrischen Bereich von $\varphi=1,2$. Dies zeigt die Notwendigkeit einer experimentellen Bestimmung dieser Konzentration.

Der Einsatz der ‚ $\lambda/3$ -Regel‘ für eine Abschätzung des sicheren Durchmessers zeigt sich für die untersuchten Stoffgemische als gut anwendbar. Der Vergleich des experimentell bestimmten sicheren Durchmessers mit dem über die Detonationszellbreite abgeschätzten kritischen Durchmesser bestätigt für den Großteil der Ergebnisse eine sehr gute Übereinstimmung. Es muss allerdings dabei beachtet werden, dass das Auftreten einer geringen Anzahl auswertbarer Detonationszellen, wie dies bei Gemischen mit Stickstoffmonoxid der Fall ist, zu einer größeren Abweichung des abgeschätzten kritischen Durchmessers kommen kann.

Es konnte gezeigt werden, dass mit einer Erhöhung des Ausgangsdruckes die Ausbildung kleinerer Detonationszellbreiten einhergeht und dies mit der Verringerung des sicheren Durchmessers verbunden ist.

Eine Materialabhängigkeit des Durchschlagverhaltens der beiden Edelstahllarten kann nicht ermittelt werden. Sie verhalten sich bei den Kapillarversuchen identisch hinsichtlich ihres Detonationsdurchschlagverhaltens. Lediglich zwischen der KPG-Kapillare und den

Edelstahlkapillaren kann ein Unterschied ausgemacht werden. Hier deutet ein von den Edelstahlkapillaren abweichender Detonationsdurchschlag in einer 1 mm KPG-Kapillare für ein Ethan/Stickstoffmonoxid Gemisch bei einem Ausgangsdruck von 2 bar darauf hin, dass die KPG-Kapillare eine höhere Affinität hinsichtlich eines Detonationsdurchschlages aufweist.

Mikroverfahrenstechnische Anlagen können nicht für jedes detonationsfähige Stoffgemisch als inhärent sicher angesehen werden. Ein Mikroreaktor, wie er beispielsweise in der Einleitung beschrieben wird, kann, bezogen auf die untersuchten Stoffgemische und Initialdrücke, nur für die Gemische mit Stickstoffmonoxid eine Detonationsausbreitung in den Kapillaren sicher verhindern. Bei den Gemischen mit Distickstoffmonoxid muss zumindest mit einer Detonationsausbreitung über das gesamte Kapillarsystem gerechnet werden.

Eine sehr gute Abschätzung des kritischen Durchmessers ist somit die beste Voraussetzung, um den sicheren Durchmesser zügig und einfach experimentell bestimmen zu können. Ob die Anwendung der ‚ $\lambda/3$ -Regel‘ zur Abschätzung des kritischen Durchmessers auch auf weitere Stoffgemische mit andersartigen Oxidationsmitteln anwendbar ist, bleibt Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.

Abstract

This dissertation deals with the investigation of the propagation behavior of gas detonations in capillary tubings, taking into account detonative mixtures of ethane or propane and nitrogen monoxide or nitrous oxide at different outlet pressures. The question pursued is whether the safe diameter of a capillary tubing can be estimated for a defined mixture of fuel and oxidant with the aid of detonation-specific parameters.

For this purpose, a test set-up with a cross section of the detonation channel of 10 mm was designed and set up which allows the detonation velocity and the detonation pressure to be measured while simultaneously recording the detonation cell pattern. Due to its modular construction, this test set-up also allows capillary tubings made of special steel and borosilicate to be installed in the detonation channel, so that the propagation behavior of the detonation in a capillary tubing can be investigated. Novel PVDF pressure sensors were tested in the detonation channel and selected for use due to their very rapid response.

The determination of the detonation cell width via the soot layer procedure has proven its worth in the very small (10 mm) detonation channel of the test set-up. Also very small detonation cells can be made visible with it and can be evaluated with the aid of a flatbed scanner. The use of pressure-sensitive foils did not lead to success, as these auxiliary means have only a low resolving power and can – at most – image larger structures. For the substance mixtures investigated, the smallest detonation cells do not occur in the case of a stoichiometric concentration, but rather in the slightly rich range of $\phi=1.2$. This shows the necessity for an experimental determination of this concentration.

The use of the " $\lambda/3$ -rule" for an estimation of the safe diameter proved to be very well applicable to the substance mixtures investigated. The comparison between the safe diameter which has been determined by experiment and the critical diameter which has been estimated over the detonation cell width confirms that there is very good agreement for most of the results. It must, however, be noted that the occurrence of a small number of evaluable detonation cells, as is the case for mixtures with nitrogen monoxide, may lead to a larger deviation of the estimated critical diameter.

It could be shown that an increase in the outlet pressure induces the formation of smaller detonation cell widths and that this is associated with the reduction in the safe diameter.

Dependence of the discharge behavior on the material, i.e. on the two special steel types, was not found. With respect to their discharge behavior, they behave identically in the capillary tests. A difference could only be noticed between the KPG capillary tubing and the special steel capillary tubings. Here, a detonation discharge in a 1 mm KPG capillary tubing for an ethane/nitrogen monoxide mixture at an outlet pressure of 2 bar which deviates from the special steel capillary tubings indicates that the KPG capillary tubing has a higher affinity for a detonation discharge.

Facilities based on micro-processing technology cannot be regarded as inherently safe for each detonative substance mixture. A microreactor as described, for example, in the introduction, can – in relation to the substance mixtures and the initial pressures investigated – safely prevent detonation propagation in the capillary tubings only for mixtures with nitrogen monoxide. In the case of mixtures with laughing gas, at least detonation propagation over the entire capillary system must be expected.

A very good estimation of the critical diameter is, thus, the best precondition for a prompt and simple experimental determination of the safe diameter. Whether the " $\lambda/3$ rule" for the estimation of the critical diameter can also be applied to other substance mixtures with different oxidants will be the subject of future investigations.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XI
Symbolverzeichnis.....	XII
1 Einleitung	14
2 Gasdetonation.....	16
2.1 Stabile Detonationen in Rohren und Kanälen.....	16
2.2 Detonationszellen	19
2.3 Der kritische Durchmesser	22
2.4 Der sichere Durchmesser und die Lambda-Drittel-Regel	23
3 Versuche.....	26
3.1 Anforderungen an die Versuchseinrichtung	26
3.2 Versuchsaufbau.....	27
3.2.1 Versuchseinrichtung für die Detonationsparameterbestimmung.....	28
3.2.2 Versuchseinrichtung für die Kapillarversuche	32
3.3 Messeinrichtungen.....	35
3.3.1 Druckmessung.....	35
3.3.2 Gemischerzeugung.....	37
3.3.3 Aufzeichnung der Detonationszellmuster.....	38
3.3.4 Kameratechnik	40
3.4 Arbeitsschutz und besondere Vorkehrungen	40
3.5 Versuchsablauf.....	43
3.5.1 Durchführung der Versuche zur Detonationsparameterbestimmung.....	43
3.5.2 Kapillarversuche	45
3.6 Auswertung der Messergebnisse.....	46
3.6.1 Detonationsgeschwindigkeit und Detonationsdruck.....	46
3.6.2 Detonationszellmuster	47
3.6.3 Kapillarversuche	48

4	Ergebnisse	50
4.1	Detonationsgeschwindigkeit.....	50
4.1.1	Distickstoffmonoxid	50
4.1.2	Stickstoffmonoxid.....	54
4.2	Detonationsdruck.....	56
4.2.1	Distickstoffmonoxid	56
4.2.2	Stickstoffmonoxid	58
4.3	Detonationszellbreite.....	60
4.3.1	Distickstoffmonoxid	63
4.3.2	Stickstoffmonoxid	67
4.4	Kapillarversuche.....	69
4.4.1	Distickstoffmonoxid	70
4.4.2	Stickstoffmonoxid	74
5	Zusammenfassung und sicherheitstechnische Schlussfolgerung	78
	Literaturverzeichnis.....	81
	Lebenslauf	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Schema der Detonationsausbreitung in Röhren und Kanälen	17
Abbildung 2.2 Mechanismus der Detonationszellenentstehung.....	20
Abbildung 2.3 Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung von Methan/Sauerstoff- Gemischen und dem kritischen Durchmesser nach [22]	22
Abbildung 3.1 Detonationsmessstrecke	27
Abbildung 3.2 Versuchsanordnung zur Detonationsdatenbestimmung	28
Abbildung 3.3 Zündvorrichtung mit keramischer Isolation	29
Abbildung 3.4 Messmodul M-4 und M-6	30
Abbildung 3.5 Blick in die geöffneten Messmodule M-4 und M-6	30
Abbildung 3.6 Deckel der Messmodule M-4 und M-6.....	31
Abbildung 3.7 Versuchsanordnung zur Bestimmung des sicheren Durchmessers.....	32
Abbildung 3.8 KPG-Kapillare eingebaut in Kapillarmodul.....	33
Abbildung 3.9 Ferrulen für KPG-Kapillaren und Edelstahlkapillaren	34
Abbildung 3.10 PVDF Drucksensor M60-3 mit Silikondeckschicht und Sensor-Einbauadapter .	36
Abbildung 3.11 Aufbau zur Gemischerzeugung.....	37
Abbildung 3.12 Flachbettscanner, modifiziert.....	39
Abbildung 3.13 Steuerung und Kontrolle der Detonationsmessstrecke	41
Abbildung 3.14 Waschkolonne mit regulierbarer Luftzuführung	42
Abbildung 4.1 Detonationsgeschwindigkeiten von Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Ethan und für verschiedene Initialdrücke	51
Abbildung 4.2 Mittlere Detonationsgeschwindigkeit und Standardabweichung beim Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisch in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Ethan bei einem Initialdruck von 1,5 bar	52
Abbildung 4.3 Detonationsgeschwindigkeiten von Propan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan und für verschiedene Initialdrücke	53
Abbildung 4.4 Mittlere Detonationsgeschwindigkeit und Standardabweichung beim Propan/Distickstoffmonoxid-Gemisch in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan bei einem Initialdruck von 2 bar	53
Abbildung 4.5 Detonationsgeschwindigkeiten von Ethan/Stickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Ethan und für verschiedene Initialdrücke	54
Abbildung 4.6 Detonationsgeschwindigkeiten von Propan/Stickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan und für verschiedene Initialdrücke	55
Abbildung 4.7 Detonationsdrücke von Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Ethan und für verschiedene Initialdrücke	56
Abbildung 4.8 Detonationsdrücke von Propan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan und für verschiedene Initialdrücke	57
Abbildung 4.9 Druckverlauf der Detonation eines Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisches für einen Initialdruck von 1,5 bar	58

Abbildung 4.10 Detonationsdrücke von Ethan/Stickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Ethan und für verschiedene Initialdrücke	59
Abbildung 4.11 Detonationsdrücke von Propan/Stickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan und für verschiedene Initialdrücke	60
Abbildung 4.12 Einfluss der Versuchsanlage auf die Detonationszellbreite	61
Abbildung 4.13 Detonationszellbreiten von Propan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan und in unterschiedlichen Kanalformen.....	62
Abbildung 4.14 Abhängigkeit der Detonationszellbreite vom Äquivalenzverhältnis bei Auswertung durch zwei voneinander unabhängige Beobachter.....	63
Abbildung 4.15 Detonationszellbreiten von Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Ethan und für verschiedene Initialdrücke	64
Abbildung 4.16 Detonationszellbreiten von Propan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan und für verschiedene Initialdrücke	65
Abbildung 4.17 Konzentrationsabhängige Verteilung der Detonationszellbreite eines Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisches.....	65
Abbildung 4.18 Verteilung der Detonationszellbreite bei verringertem Initialdruck.....	66
Abbildung 4.19 Detonationszellbreite von Gemischen mit Stickstoffmonoxid.....	68
Abbildung 4.20 Rußbild von Detonationszellmustern	68
Abbildung 4.21 Detonationsverhalten und kritischer Durchmesser des Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisches in einer KPG-Kapillare.....	71
Abbildung 4.22 Detonationsverhalten und kritischer Durchmesser des Propan/Distickstoffmonoxid-Gemisches in einer KPG-Kapillare	72
Abbildung 4.23 Detonationsverhalten und kritischer Durchmesser des Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisches in einer geglühten Edelstahlkapillare und einer zugharten Edelstahlkapillare.....	73
Abbildung 4.24 Detonationsverhalten und kritischer Durchmesser des Propan/Distickstoffmonoxid-Gemisches in einer geglühten Edelstahlkapillare und einer zugharten Edelstahlkapillare.....	74
Abbildung 4.25 Detonationsverhalten und kritischer Durchmesser des Ethan/Stickstoffmonoxid-Gemisches in einer KPG-Kapillare.....	75
Abbildung 4.26 Detonationsverhalten und kritischer Durchmesser des Propan/Stickstoffmonoxid-Gemisches in einer KPG-Kapillare	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Detonationszellbreite und kritischer Durchmesser bei unterschiedlichen Initialdrücken für Ethan/Distickstoffmonoxid- und Propan/Distickstoffmonoxid-Gemische.....	67
Tabelle 2 Detonationszellbreite und kritischer Durchmesser bei unterschiedlichen Initialdrücken für Ethan / Stickstoffmonoxid- und Propan/Stickstoffmonoxid-Gemische	69
Tabelle 3 Ergebnisse der Detonationsversuche bei eingebautem Kapillarmodul	70

Symbolverzeichnis

a_s	m	Sensorabstand, Messstreckenabschnitt
c	$m \cdot s^{-1}$	Schallgeschwindigkeit
c_{st}	$mol \cdot m^{-3}$	stöchiometrische Konzentration
d	m	Rohrdurchmesser
d_c	m	kritischer Rohrdurchmesser, Detonationsübergang
d_k	m	sicherer Durchmesser, bestimmt im Kapillarversuch
d_s	m	sicherer Durchmesser, abgeschätzt mit Lambda-Drittel-Regel
D^*	m	kritischer Rohrdurchmesser, stabile Detonationsausprägung
H	J	Enthalpie
M	---	Mach-Zahl
P	Pa	Druck
p_0	Pa	Initialdruck
p_D	Pa	Detonationsdruck
$p_{D,i}$	Pa	Detonationsdruck, einzelner Sensor
r_i	m	Krümmungsradius
T	K	Temperatur
u	$m \cdot s^{-1}$	Geschwindigkeit des Gases
v_D	$m \cdot s^{-1}$	Detonationsgeschwindigkeit
$v_{D,i}$	$m \cdot s^{-1}$	Detonationsgeschwindigkeit, einzelner Messstreckenabschnitt
W	m	Kanalweite
W_c	m	Kanalweite, kritisch
$\Delta_R H$	J	Reaktionsenthalpie
κ	---	Isentropenexponent
λ	m	Detonationszellbreite

λ'	m	Detonationszellbreite, verzerrtes Abbild kreisförmiger Kanal
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Dichte
φ	---	Äquivalenzverhältnis

1 Einleitung

Befindet sich ein detonationsfähiges Gas- oder Dampfgemisch aus Brennstoff und Oxidationsmittel in einer an mindestens einem Ende verdämmten Röhre, so kann es bei einer Zündung des Gemisches an der geschlossenen Seite zur Ausbildung einer Detonation kommen. Die Detonation ist dadurch gekennzeichnet, dass die Flammenausbreitung mit einer höheren Geschwindigkeit als der Schallgeschwindigkeit im unverbrannten Gemisch vor der Detonationsfront abläuft. Für Gasdetonationen in einem Röhrensystem kann hierbei sogar das Mehrfache der Schallgeschwindigkeit erreicht werden [1]. Dies kann nur erfolgen, sofern die chemische Reaktion stationär an eine Stoßwelle gekoppelt ist.

Eine Detonation, die sich in einem Röhrensystem z.B. einer industriellen Einrichtung ausbreitet, kann, bei einer dafür nicht ausgelegten Anlage, zu erheblichen materiellen Schäden an der Anlage selbst und zu schweren körperlichen Beeinträchtigungen des Personals führen. In letzter Zeit ist daher - für geeignete Prozesse - vermehrt der Einsatz von Mikroreaktoren in der chemischen Industrie zu beobachten. Ihr Einsatz soll neben einer effektiveren und damit wirtschaftlicheren Arbeitsweise auch einen besseren Schutz vor Unfällen beziehungsweise Störfällen bieten. So geht man davon aus, dass diese Anlagen aufgrund ihrer kleineren Bauweise und einem damit einhergehenden geringeren Einsatz von Reaktanden eine erhöhte Sicherheit bieten. Dabei kommt es jedoch oft zum Einsatz von Oxidationsmitteln, deren Oxidationsvermögen größer als das der Luft ist.

Als Beispiel für die Anwendung der Mikroreaktoren soll hier die katalytische Wasserstofferzeugung aus Ethanol genannt werden. Die kompakte Bauweise der Reaktoren, bei gleichzeitig großer spezifischer Oberfläche des Katalysators, ermöglicht eine effiziente Wasserstofferzeugung. Hierbei ist ein geeigneter Katalysator direkt in die Mikrostruktur der sogenannten „Reformerplatten“ des Reaktors integriert. Mehrere dieser Platten aufeinander geschraubt ergeben, in einer Art Sandwichbauweise, eine Vielzahl von halbrunden Mikrokanälen mit einer Kanalbreite von 400 Mikrometern [2]. Die für eine optimale Reaktionsführung notwendigen isothermen Bedingungen können aufgrund der geringen Querschnitte der Reaktionskanäle und dem damit verbundenen sehr guten Wärmetransport gewährleistet werden.

Bisher nicht erschöpfend untersucht ist die Ausbreitung von Detonationen in Mikrostrukturen. Insbesondere das Verhalten von Detonationen beim Einsatz unterschiedlicher Oxidationsmittel stellt hierbei einen interessanten Aspekt dar. Dabei ist von zentraler Frage, ob sich charakteristische Detonationsmerkmale nutzen lassen, um Aussagen über das Ausbreitungsverhalten von Detonationen in Mikrostrukturen treffen zu können.

Die Detonationszellbreite λ (siehe Kapitel 2.2), als charakteristisches Merkmal einer Detonation, könnte sich hierfür als geeignete Kenngröße zeigen. Wie bereits aus den Untersuchungen von Dupre et al. [3] hervorgeht, erweisen sich Detonationen als hoch instabil

für eine Vielzahl von detonationsfähigen Brennstoff/Luft-Gemischen, sobald die Detonationszellbreite größer als der Umfang der Rohrleitung bzw. des Strömungskanals wird.

Auch aus den Untersuchungen von Brandes et al. [4] an der Physikalisch Technischen Bundesanstalt Braunschweig zu charakteristischen Merkmalen von Detonationen und ihrer Anwendung für die Entwicklung von Mikrostrukturanlagen lässt sich erkennen, dass die Detonationszellbreite eine geeignete sicherheitstechnisches Kenngröße ist, um den gegen einen Detonationsdurchschlag sicheren Durchmesser einer Kapillare abschätzen zu können. Die dabei gemachten Versuche wurden mit dem Oxidationsmittel Sauerstoff durchgeführt und lassen bei derartigen Detonationen auf eine Gültigkeit der sogenannten ‚ $\lambda/3$ -Regel‘ zur Abschätzung des sicheren Kapillardurchmessers mit Hilfe der Detonationszellbreite schließen.

Detonationszellbreiten wurden bereits für eine Vielzahl von Stoffgemischen gemessen. Allerdings in den meisten Fällen unter Verwendung des Oxidationsmittels Sauerstoff oder Luft. So ermittelten zum Beispiel Bull et al. [5] die Detonationszellstruktur unter anderem von Wasserstoff, Ethin, Ethen, Ethan und Propan unter Verwendung des Oxidationsmittels Luft und Kumar [6] die Detonationszellbreite verschiedener Wasserstoff/Sauerstoff-Gemische, die die unter Umständen sehr kleinen Dimensionen der Detonationszellbreite zeigen. Er ermittelte für ein stöchiometrisches Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch, selbst bei einer Verdünnung mit 10 % Helium, noch eine Detonationszellbreite von 1,2 mm. Beide Forscher zeichneten die Detonationszellen in Kanälen mit einem relativ großen Durchmesser auf. Bull et al. benutzten einen rechteckigen Kanal mit den Seitenlängen 76 mm x 38 mm und Kumar ein zylindrisches Rohr mit einem Durchmesser von 150 mm. Er fand heraus, dass für ein Wasserstoff/Luft-Gemisch die kleinsten Detonationszellstrukturen im leicht überstöchiometrischen Bereich entstehen.

Diese Beispiele lassen deutlich werden, wie wichtig die Ausgangs - und Grenzbedingungen für die Ausbildung einer sehr kleinen Detonationszellstruktur und damit für die Ausbreitung einer Detonation in Kapillaren sind.

2 Gasdetonation

Um eine Unterscheidung zwischen einer durch detonationsfähige Feststoffe beziehungsweise Flüssigkeiten (z.B. Sprengstoffe) erzeugten Detonation und einer Detonation, die durch detonationsfähige Gas/Oxidationsmittel-Gemische erfolgt, treffen zu können, werden letztere Detonationen auch als Gasdetonationen bezeichnet. Im Zentrum dieser Arbeit stehen ausschließlich Gasdetonationen, auch wenn diese hier als Detonation bezeichnet werden.

Bei sich ausbreitenden und selbst erhaltenden Verbrennungen von geeigneten Gasgemischen, lassen sich prinzipiell zwei Zustände unterscheiden: die Deflagration und die Detonation. Bei der Deflagration breitet sich eine Flammenfront mit Unterschallgeschwindigkeit aus. Aufgrund der relativ langsamen Ausbreitungsgeschwindigkeit mit Unterschallgeschwindigkeit, können die Bedingungen hinter der Verbrennungsfront die thermodynamischen Initialzustände des unverbrannten Stoffgemisches vor der Verbrennungsfront beeinflussen und so auf die Verbrennung einwirken. Beispielsweise kann es hierbei bei einer verdämmten Deflagration zu einem Anstieg des Initialdruckes vor der Verbrennungsfront und damit zu einer Beeinflussung der Verbrennung kommen. Diese Einflussnahme ist aufgrund der sich mit Überschallgeschwindigkeit ausbreitenden Reaktionszone bei einer Detonation nicht möglich. Das unverbrannte Stoffgemisch vor der Detonationsfront kann somit nicht vom thermodynamischen Zustand hinter der Detonationsfront beeinflusst werden. Die Umsetzung der Edukte wird - anders als bei einer Deflagration - durch die adiabatische Kompression der Moleküle durch die Schockfront eingeleitet. In der Literatur wird für den Begriff Detonationswelle auch die Bezeichnung Stoßwelle verwendet beziehungsweise für die Detonationsfront, die den vorderen Rand der Detonationswelle darstellt, auch die Bezeichnungen Schockfront und Stoßwellenfront. Hierbei muss angemerkt werden, dass eine Schock- bzw. Stoßwellenfront nicht an eine chemische Reaktion gekoppelt sein muss.

2.1 Stabile Detonationen in Rohren und Kanälen

Bei einer Detonation ist die Reaktionszone, also der Bereich in welchem der chemische Stoffumsatz stattfindet, an eine sich mit Überschallgeschwindigkeit ausbreitende Schockwelle gekoppelt. Ein solches Ereignis ist am Besten in einem Kanal bzw. einem Rohr zu beobachten. Die Voraussetzung für eine stabile Detonationsausbildung ist das Vorhandensein eines möglichst homogenen und detonationsfähigen Brenngas/Oxidationsmittel-Gemisches im Kanal bzw. Rohr. Die Zündung erfolgt dann am geschlossenen Ende, sodass sich die Detonation – getrieben von der Volumenzunahme durch die Reaktionsprodukte – nur in eine Richtung ausbreiten kann. Bewegt man sich mit der nahezu konstanten Geschwindigkeit der Detonationsfront einer stabilen Detonation mit, so ergeben sich für die Bereiche vor und hinter der Detonationswelle die in Abbildung 2.1 dargestellten Bedingungen. Das unverbrannte Gasgemisch bewegt sich mit der Geschwindigkeit u_1 in die Detonationswelle

hinein, was das Fünf- bis Zehnfache [7] der Schallgeschwindigkeit c_1 des unverbrannten Gasgemisches darstellt. Die Geschwindigkeit u_2 , mit der das verbrannte Gasgemisch aus der Detonationswelle austritt, bewegt sich in der Größenordnung des 0,4 bis 0,7-Fachen von u_1 .

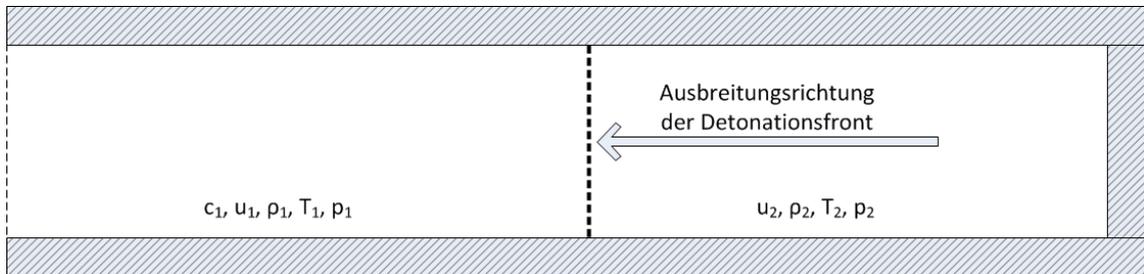


Abbildung 2.1 Schema der Detonationsausbreitung in Röhren und Kanälen

Während sich somit die Geschwindigkeit relativ zur Detonationswelle verringert, kommt es für die Dichte ρ_2 , die Temperatur T_2 und den Druck p_2 des verbrannten Gasgemisches (Index „2“; Bedingungen hinter der Detonationswelle) zu einer Erhöhung der Werte. In Bezug auf das Gebiet vor der Detonationswelle (Index „1“) steigt die Dichte um das 1,4 bis 2,6-Fache, die Temperatur erhöht sich um das 8 bis 21-Fache und der Druck kann bis auf das 55-Fache des Ausgangsdruckes ansteigen. Diese Werte stellen den qualitativen Unterschied zu einer Deflagration dar, bei der es z.B. zu einer maximalen Flammenausbreitungsgeschwindigkeit vom 0,03-Fachen der Schallgeschwindigkeit des unverbrannten Gases kommt [7].

Das Verhältnis der Zustandsgrößen lässt sich für die Ausbreitung einer Detonation über die Sätze der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung zeigen. Bezogen auf die Detonationsfront entspricht u_1 der Detonationsgeschwindigkeit v_D und u_2 ist die Geschwindigkeit, mit der sich das verbrannte Gas aus der Detonationswelle heraus bewegt. Für eine wie in Abbildung 2.1 dargestellte Detonation, die sich vom geschlossenen Ende her nach links ausbreitet, gilt dann die Massenerhaltung:

$$\rho_1 \cdot v_D = \rho_2 \cdot u_2 \quad (1)$$

und die Impulserhaltung:

$$\rho_1 \cdot v_D^2 + p_1 = \rho_2 \cdot u_2^2 + p_2 \quad (2)$$

Aus Gleichung (1) und (2) lässt sich die ‚Rayleigh-Gerade‘ mit dem Anstieg $-m^2$ bilden.

$$-m^2 = \frac{p_2 - p_1}{\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1}} \quad (3)$$

Es gilt der Energiesatz:

$$H_1 + \Delta_R H + \frac{v_D^2}{2} = H_2 + \frac{u_2^2}{2} \quad (4)$$

Aus Gleichung (4) erfolgen mit Hilfe der Gleichungen (1) und (2) durch Elimination der Geschwindigkeit die Gleichungen für die ‚Hugoniot-Kurven‘ für verschiedene Reaktionsenthalpien:

$$H_2 - H_1 - \Delta_R H = \frac{1}{2}(p_2 - p_1) \left(\frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_1} \right) \quad (5)$$

Die Enthalpie eines idealen Gases kann dabei bei konstanter spezifischer Wärme nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$H = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p}{\rho} \quad (6)$$

Nach dem Chapman-Jouguet-Modell ergibt sich die Detonationsgeschwindigkeit, wenn die ‚Rayleigh-Gerade‘ Tangente der ‚Hugoniot-Kurve‘ bei zugeführter maximaler Reaktionsenthalpie ist. Über die Detonationsgeschwindigkeit lässt sich die Machzahl M bestimmen:

$$M = \frac{v_D}{c_1} \quad (7)$$

Um eine Aussage zur Druck- und Temperatursteigerung in der Detonationswelle zu treffen, werden die Gleichungen (8) und (9) verwendet.

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2 \cdot \kappa \cdot M^2 - (\kappa - 1)}{\kappa + 1} \quad (8)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{(\kappa - 1)M^2 + 2}{(\kappa + 1)M^2} \quad (9)$$

Eine stabile, sich selbst erhaltende Detonation, kann sich nur innerhalb bestimmter Grenzen des Verhältnisses der Stoffkonzentrationen der Reaktanden – den Detonationsgrenzen – ausbilden. Die Detonationsgrenzen eines detonationsfähigen Gemisches sind die kritischen Bedingungen für die Ausbreitung einer sich selbsterhaltenden Detonation. Diese kritischen Bedingungen umfassen beides, die Ausgangs- und die Grenzbedingungen eines

detonationsfähigen Stoffgemisches. Ausgangs- und Grenzbedingungen haben einen starken Einfluss auf eine sich selbst erhaltende Detonation, wie zahlreiche Untersuchungen gezeigt haben [8]. Zu den Ausgangsbedingungen zählen hauptsächlich die Eigenschaften eines detonationsfähigen Stoffgemisches vor der eigentlichen Zündung. Dazu zählen zum Beispiel: Art und Anteile der stofflichen Zusammensetzung, die thermodynamischen Ausgangsbedingungen und der fluid-mechanische Zustand (Strömungszustand). Es werden aber auch die Eigenschaften der Zündquelle dazu gezählt, wie zum Beispiel Art und Energieinhalt der Zündquelle. Die Grenzbedingungen werden aufgezeigt durch die Größe und die Geometrie des Volumens der Stoffgemische (Größe und Form der umgebenden Wände), den Grad der Eindämmung sowie die Oberflächenbeschaffenheit der umgebenden Wände. Die Detonationsgrenzen können nicht aus den Ausgangsparametern vorhergesagt werden, was ihre experimentelle Bestimmung erforderlich macht [9].

Der Krümmungsradius r_i eines Rohres, beispielsweise, ist eine Grenzbedingung für die stabile Ausbreitung einer Detonation, zu der Experimente durchgeführt wurden. Bei Untersuchungen von stöchiometrischen Ethen/Sauerstoff-Detonationen in gekrümmten Rechteckkanälen konnte gezeigt werden, dass der Übergangsbereich einer Detonation vom instabilen Zustand in den stabilen Zustand für verschiedene Ausgangsdrücke und Krümmungsradien beim 21-32-Fachen der Detonationszellbreite liegt [10]. Dies zeigt deutlich, dass bei relativ großen Krümmungsradien keine Beeinflussung einer stabilen Detonationsausbreitung zu erwarten ist.

2.2 Detonationszellen

Die Abläufe in der Detonationswelle sind sehr komplex und können daher nicht nur eindimensional bei ihrer Ausbreitung durch ein Rohr bzw. einen Kanal betrachtet werden. Vielmehr ist es so, dass die vordere Stoßwellenfront nicht als planar verstanden werden kann, sondern aus drei verschiedenen Schockwellen gebildet wird und Bereiche von beschleunigenden und verlangsamenen Stoßwellenabschnitten beinhaltet. Man spricht dabei auch von einer mehrköpfigen Detonation (engl.: multiheaded detonation). Stabile Detonationen können auf der Innenwand / den Innenwänden ein gleichmäßiges Detonationszellularmuster aus vielen nebeneinander angeordneten Detonationszellen erzeugen. Voraussetzung dafür ist, dass die Oberfläche in geeigneter Art und Weise (z.B. durch Aufbringen einer dünnen Rußschicht) präpariert ist, und so eine Sichtbarmachung der Detonationszellen ermöglicht. Die Gleichmäßigkeit und Lesbarkeit solcher Detonationszellularmuster ist sehr stark abhängig von der Art der verwendeten Brennstoffe und Oxidationsmittel [11], der Art und Konzentration eines etwaig verwendeten Inertgases [12] und weniger stark abhängig von der Stöchiometrie und dem Initialdruck des detonationsfähigen Gemisches [13].

Entstehung von Detonationszellen:

In Abbildung 2.2 sind die Abläufe dargestellt, die zur Bildung eines Detonationszellmusters führen. Dargestellt sind zwei vollständig ausgeprägte Detonationszellen, die als Ausschnitt eines Detonationszellmusters betrachtet werden können. Ihre idealtypische Form ist durch eine gestrichelte Linie dargestellt, die gleichzeitig die Grenze zu den benachbarten Detonationszellen anzeigt. Die Detonationswelle breitet sich hierbei von unten nach oben aus.

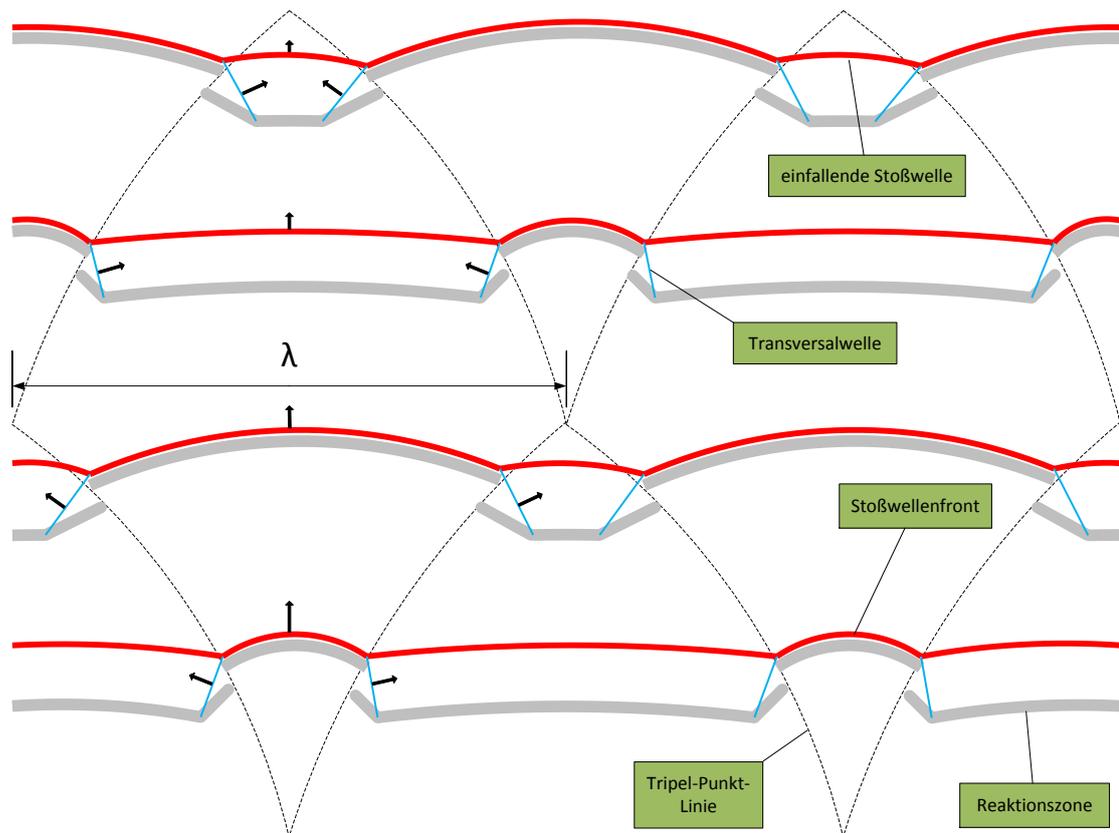


Abbildung 2.2 Mechanismus der Detonationszellenentstehung

Bei der unteren Spitze einer Detonationszelle befindet sich eine Art Hot Spot. Von hier aus breitet sich eine stabile Stoßwellenfront mit einer kurzen und dicht geschlossenen Reaktionszone nach oben aus. Die Geschwindigkeit der Stoßwellenfront in Ausbreitungsrichtung der Detonation (Chapman-Jouguet Geschwindigkeit) kann hierbei bis zum 1,5-Fachen der Detonationsgeschwindigkeit betragen [1]. An der linken und rechten Seite der Stoßwellenfront befindet sich jeweils ein Bereich, in dem es zum Kontakt mit den einfallenden Stoßwellen der beiden benachbarten Detonationszellen kommt. Dort bilden sich auch die jeweiligen Transversalwellen aus, die sich in die Richtungen der seitlichen

Nachbarzellen ausbreiten und am Schnittpunkt mit der Stoßwellenfront und der einfallenden Stoßwelle den Tripelpunkt bilden [14]. Dieser Tripelpunkt ‚zeichnet‘ bei seiner Verlagerung in Ausbreitungsrichtung der Detonation die Linien des Detonationszellmusters auf eine geeignete Oberfläche (z.B. Rußschicht) [15]. Im weiteren Durchlauf der Stoßwellenfront durch die untere Hälfte der Detonationszelle verbreitert sich die Reaktionszone und die von ihr getriebene Stoßwellenfront verringert ihre Geschwindigkeit in Ausbreitungsrichtung der Detonation. Ab dem Beginn der zweiten Hälfte der Detonationszelle löst sich die Reaktionszone allmählich von der Stoßwelle und die Transversalwellen der benachbarten Detonationszellen laufen mit Beginn ihrer jeweiligen Hot Spots in die Detonationszelle hinein. Im weiteren Durchlauf durch die obere Hälfte der Detonationszelle verkleinert sich die Reaktionszone weiter und der Abstand zur einfallenden Stoßwelle vergrößert sich weiter. Die Geschwindigkeit der einfallenden Stoßwelle kann in diesem Bereich bis auf das 0,6-Fache der Detonationsgeschwindigkeit sinken [1]. In der Spitze der Detonationszelle treffen dann die beiden Stoßwellenfronten der benachbarten Detonationszellen und ihre dazugehörigen Transversalwellen aufeinander. In diesem Punkt kommt es infolgedessen zur Ausbildung eines neuen Hot Spots und damit zur Ausbildung einer sich anschließenden Detonationszelle.

Merkmale und Einflussgrößen:

Die Größe einer Detonationszelle und ihre charakteristische Detonationszellbreite λ sind von mehreren Parametern abhängig. So spielen hierfür vor allem die Zusammensetzung des detonationsfähigen Gemisches (Art der Stoffe und Stoffmengenanteile) und der Initialdruck eine wesentliche Rolle [1]. Die Auswirkung der Inertgaszugabe eines detonationsfähigen Gemisches auf die Detonationszellgröße war bereits Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Es konnte anhand von Brennstoff/Luft-Detonationen gezeigt werden, dass die Detonationszellbreite bei steigender Inertgaszugabe (CO_2 , H_2O) stark zunimmt. Bei einem Stoffmengenanteil von 20 % Kohlendioxid in einem stöchiometrischen Wasserstoff/Luft-Gemisch (bei 100 °C) ist beispielsweise die Detonationszellbreite um das 30-Fache größer als ohne einen Kohlendioxidanteil [16]. Desweiteren gilt für die Ausbildung eines Detonationszellmusters, je geringer die Komplexität des Brennstoffmoleküls oder je unverdünnter ein detonationsfähiges Stoffgemisch, desto gleichmäßiger und deutlicher zeigt sich das Detonationszellmuster [17]. Der Einfluss des Ausgangsdruckes kann anhand von Detonationsversuchen mit Dimethylether/Sauerstoff-Gemischen verdeutlicht werden [18]. Experimente hierzu haben gezeigt, dass mit kleiner werdendem Initialdruck die Detonationszellbreite steigt und sich dieses Stoffgemisch hinsichtlich der größer werdenden Detonationszellbreite ähnlich verhält wie ein Propan/Sauerstoff- bzw. Ethan/Sauerstoff-Gemisch [19]. Auch für einfache Kohlenwasserstoffe scheint es daher durch die Reduzierung des Ausgangsdruckes zu einer Vergrößerung der Detonationszellbreite zu kommen.

Doppelzellen:

Für einige wenige Gemische kann die Ausbildung von Haupt- und Subzellen beobachtet werden [20], welche auch als Doppelzellen bezeichnet werden. Bei Versuchen mit detonationsfähigen Gemischen aus Stickstoffdioxid/Distickstofftetroxid mit verschiedenen

Brennstoffen, konnten solche Doppelzellen beobachtet werden [21]. Hierbei kommt es für Gemische mit einer Stöchiometrie $\varphi \geq 1$ zur Bildung einer Vielzahl von kleineren Detonationszellen innerhalb größerer Detonationszellen. Ursächlich scheint hierfür die sukzessive Energieumwandlung in der Reaktionszone zu sein. In einem ersten Schritt erfolgt in einer schnellen exothermen Reaktion die Bildung von Stickstoffmonoxid aus Stickstoffdioxid und im darauffolgenden, kinetisch langsameren Schritt, fungiert dieses Stickstoffmonoxid dann als Oxidationsmittel.

2.3 Der kritische Durchmesser

Eine wichtige Größe für die Beurteilung des Ausbreitungsverhaltens von Detonationen in Röhren ist der kritische Durchmesser d_c . Pusch und Wagner [22] erkannten bei ihren Untersuchungen zu den Detonationsgrenzen von Methan/Sauerstoff-Gemischen, dass es beiderseits der stöchiometrischen Konzentration c_{st} zu einer vermutlich asymptotischen Annäherung an die jeweilige Grenzkonzentration kommt (siehe Abbildung 2.3). Sie schlussfolgerten daraus, dass es für den kritischen Durchmesser ein Konzentrationslimit geben muss.

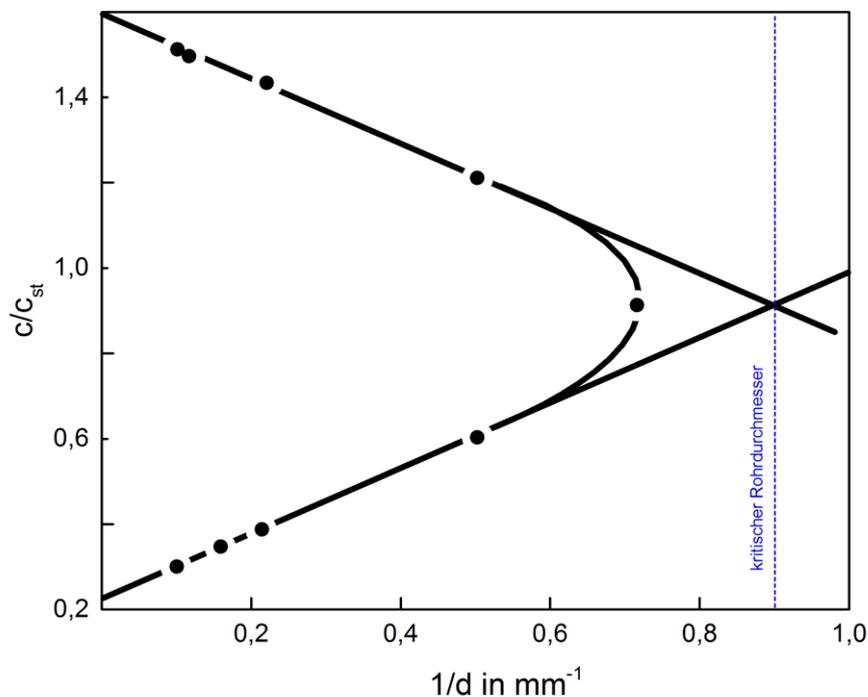


Abbildung 2.3 Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung von Methan/Sauerstoff-Gemischen und dem kritischen Durchmesser nach [22]

Weitere Untersuchungen zum kritischen Durchmesser zeigten: Kommt es bei der Ausbreitung einer Detonation in einer Röhre zu einem plötzlichen Übergang des Röhrendurchmessers in einen nicht umschlossenen (bzw. sehr großen umschlossenen) Raum, in dem sich das gleiche detonationsfähige Gemisch befindet, so kann sich die ebene Detonationsfront in eine sphärische Detonationsausbreitung umwandeln, wenn der Röhrendurchmesser d einen bestimmten kritischen Wert d_c überschreitet. Ist allerdings für den Rohrdurchmesser folgende Bedingung gegeben,

$$d < d_c \quad (10)$$

so wird beim Übergang der Detonation aus dem Rohr die Reaktionszone von der Schockwelle entkoppelt und läuft als sphärische Deflagration weiter [23].

Interessant ist auch der Zusammenhang zwischen dem kritischen Durchmesser und der Detonationszellbreite. In Untersuchungen von zahlreichen stöchiometrischen Kohlenwasserstoff/Sauerstoff-Gemischen bei atmosphärischem und verringertem Ausgangsdruck sowie mit unterschiedlichen Stickstoffanteilen [24] in glatten Stahlrohren, konnte die sich in früheren Experimenten (siehe auch: [25], [26], [27]) andeutende Relation zwischen dem kritischen Durchmesser und der Detonationszellbreite bestätigt werden:

$$d_c = 13\lambda \quad (11)$$

Für einen quadratischen Kanal mit der Seitenlänge W gilt folgende Beziehung für die kritische Weite W_c :

$$W_c = 10\lambda \quad (12)$$

Der kritische Durchmesser lässt sich, als charakteristische Größe der Detonationsgrenzen, nicht alleine als Merkmal der chemischen Reaktion betrachten. Vielmehr ist es ein Zusammenspiel zwischen der chemischen Reaktionskinetik und der Gasdynamik. Insofern haben Material, Krümmung und Oberflächenbeschaffenheit eines Detonationsrohres Einfluss auf den kritischen Durchmesser. Bei Untersuchungen zu dieser Thematik konnte beispielsweise festgestellt werden, dass eine Detonationsausbreitung unter bestimmten Bedingungen unterbunden werden kann, beim Übergang von einem starren Stahlrohr in ein dünnwandiges Plastikrohr [28].

2.4 Der sichere Durchmesser und die Lambda-Drittel-Regel

Aus sicherheitstechnischer Sicht ist es sinnvoll, nicht nur Aussagen hinsichtlich des Übergangs von Detonationen aus einer Röhre beispielsweise in einen sich anschließenden freien Raum treffen zu können, sondern auch zum Ausbreitungsverhalten der Detonation in der Röhre selbst. Hierbei ist die Frage wichtig, ab welchem Durchmesser eine Detonationsausbreitung für

ein bestimmtes detonationsfähiges Gemisch in einer Röhre/Kapillare nicht mehr möglich ist, beziehungsweise anders ausgedrückt, welcher maximale Durchmesser der sichere Durchmesser ist.

Zu den Grenzbedingungen einer sich selbst erhaltenden Detonation zählen unter den in Kapitel 2.1 genannten Parametern, auch die ein explosives Stoffgemisch umschließende Geometrie der Wände, sowie ihre Oberflächenbeschaffenheit. Wichtigstes geometrisches Merkmal ist dabei der Durchmesser einer Röhre. Dupré et al. fiel bei Untersuchungen zur Detonationsausbreitung in glatten Röhren nahe der Grenzbedingungen auf, dass Detonationen von Stoffgemischen, deren Detonationszellbreite größer als das π -Fache des Rohrdurchmessers sind, höchst instabil werden können [3]. Zu dieser Beziehung hatten bereits zuvor Kogarko und Zeldovich [29] die Vermutung aufgestellt, dass bei der Einstellung einer sogenannten ‚single-head spin‘ Detonation die Detonationszellbreite dem inneren Umfang des Rohres entsprechen muss. Hierzu lieferte Lee eine Erklärung [9]. Er zeigt auf, dass mit Blick auf die Detonationsausbreitung der Umfang ($\pi \cdot d$) eines Rohres die charakteristische Größe ist und die für den Schall benötigte charakteristische Zeit sich aus dem Verhältnis des Umfangs zur Schallgeschwindigkeit c ergibt ($\pi \cdot d/c$), wobei die Schallgeschwindigkeit der Schallgeschwindigkeit in den Reaktionsprodukten der Detonation entspricht. Setzt man eine resonante Verbindung zwischen der Schallschwingung und den periodisch chemischen Prozessen in einer Detonationszelle voraus, so argumentiert Lee, muss die für den Schall charakteristische Zeit gleich der Zeit der chemischen Prozesse in der Detonationszelle sein:

$$\frac{\pi \cdot d}{c} = \frac{\lambda}{c} \quad (13)$$

Woraus sich der einfache Zusammenhang zwischen dem Umfang eines Rohres und der Detonationszellbreite ergibt:

$$\pi \cdot d = \lambda \quad (14)$$

Aus dieser Beziehung lässt sich die sogenannte ‚Lambda-Drittel-Regel‘ ($\lambda/3$ -Regel; $\pi \approx 3$) ableiten. Sie dient zur Abschätzung des möglichen minimalen Durchmessers D^* eines glatten und starren Rohres, für den eine stabile Detonationsausprägung gerade noch möglich ist:

$$D^* = \frac{\lambda}{\pi} \quad (15)$$

Es soll an dieser Stelle ausdrücklich betont werden, dass diese Abschätzung nur für Detonationen in runden, glatten, starren Rohren gilt, welche keine Einbauten (Hindernisse) im Inneren enthalten und von einer starken Zündquelle eingeleitet werden. So wurde zum Beispiel bei Untersuchungen zahlreicher Stoffgemische zu ihrem ‚deflagration to detonation transition‘ (DDT) Verhalten in rauen Rohren (mit eingebauten Hindernissen) festgestellt, dass der Übergang zur Detonation hier erst für wesentlich größere lichte Rohrdurchmesser erfolgt.

Bei Rohren dieser Art ist das Kriterium für den Übergang zu einer stabilen Detonation erst bei der Bedingung $\lambda/d \leq 1$ gegeben [9].

In Untersuchungen zu Detonationen von Methan/Luft-Gemischen [30] konnte gezeigt werden, dass sich aus mehrköpfigen Detonationen einzelköpfige Detonationen bilden können, bevor sich die Gemischzusammensetzung den Detonationsgrenzen (stark über- und unterstöchiometrische Konzentrationen) annähert und die Detonationen instabil werden. Für eine stabile Detonation ist es daher essentiell, dass der Umfang des Rohres mindestens so groß ist, dass sich eine Detonationszelle darin vollständig ausbilden kann. Legt man dies zu Grunde, so ergibt sich ein theoretisch sicherer Durchmesser d_s für ein Rohr, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$d_s < \frac{\lambda}{\pi} \quad (16)$$

Die Detonationsgrenzen werden in Rohren mit kleinen Durchmessern sehr stark durch den Wärme- und Impulsverlust über die relativ große Grenzschicht (verglichen mit Rohren großer Durchmesser) beeinflusst. Ob diese Regel auch auf Kapillarröhren umfassend anwendbar ist, bleibt zu überprüfen. Untersuchung in jüngster Vergangenheit hierzu haben beispielsweise gezeigt, dass die Lambda-Drittel-Regel zur Abschätzung des sicheren Durchmessers bei der Verwendung von Sauerstoff als Oxidationsmittel und für Rohrdurchmesser von 1,8 mm anwendbar ist [31]. Auch bei Detonationsexperimenten in Edelstahlkapillaren ($d \leq 1 \text{ mm}$) konnte eine Anwendbarkeit der Lambda-Drittel-Regel bei der Verwendung des Oxidationsmittels Sauerstoff gezeigt werden [32].

3 Versuche

Im Zentrum der durchgeführten Versuche steht das Ausbreitungsverhalten von Detonationen in Kapillaren. Hierzu werden zwei unterschiedliche Versuchsreihen durchgeführt: Versuchsreihen zur Bestimmung der Detonationsparameter in Abhängigkeit der Gemischzusammensetzung und der Initialdrücke und Versuchsreihen zum Durchschlagverhalten in Kapillaren (Kapillarversuche). Folgende Brennstoff/Oxidationsmittel-Gemische werden untersucht:

- Ethan / Distickstoffmonoxid
- Propan / Distickstoffmonoxid
- Ethan / Stickstoffmonoxid
- Propan / Stickstoffmonoxid

Das Ziel dieser Versuchsreihen zur Bestimmung der Detonationsparameter ist die Bestimmung der folgenden Größen bei unterschiedlichen Konzentrationen eines Brennstoff/Oxidationsmittel-Gemisches und verschiedenen Initialdrücken bei Umgebungstemperatur (zwischen 16 °C und 24 °C):

- Detonationsgeschwindigkeit
- Detonationsdruck
- Detonationszellbreite

Die dabei ermittelte Zusammensetzung des jeweiligen Gemisches mit der kleinsten Detonationszellbreite wird dann in den Kapillarversuchen eingesetzt, um das Ausbreitungsverhalten der Detonation in unterschiedlichen Kapillaren zu untersuchen.

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden zunächst die grundlegenden Anforderungen an die Versuchseinrichtung betrachtet und der Versuchsaufbau beschrieben. Desweiteren werden die verwendeten Messeinrichtungen erklärt und auf den notwendigen Arbeitsschutz beziehungsweise die besonderen Vorkehrungen eingegangen. Dieses Kapitel schließt mit den Abschnitten zur Darstellung des Versuchsablaufes, sowie der Vorgehensweise bei der Auswertung der Messergebnisse.

3.1 Anforderungen an die Versuchseinrichtung

Die physikalischen Belastungen (Druck, Temperatur) und die chemische Beanspruchung (Säurekorrosion) der einzelnen Baugruppen der Anlage können bei einer Detonation sehr groß sein. Um einen sicheren Betrieb der Anlage zu gewährleisten, ist sie für einen statischen Druck von 100 Bar, für kurzzeitige Temperaturen von 2000 °C ausgelegt und aus Edelstahl gefertigt. Unebenheiten in einem Kanal können die Ausbreitung einer Detonation sowie die Bildung

eines Detonationszellmusters in ihm beeinflussen [33]. Um eine möglichst störungsfreie Detonationsausbreitung zu erreichen, werden in der Anlage Störstellen vermieden. So sind z.B. die Flanschverbindungen und die Sensoreinlässe plan gehalten und es werden bautechnische Lösungen verwendet, die einen störungsfreien Übergang der Detonation zwischen kreisrunden- und quadratischen Kanalquerschnitten ermöglichen (siehe Kapitel 3.2.1). Der Durchmesser des Detonationsrohres /-kanals und der Messmodule wird klein gehalten, um möglichst nah an die Geometrie von Kapillaren zu gelangen. Dies erfordert den Einsatz von geeigneten Drucksensoren, die bei kleinster Bauweise ein schnelles Ansprechverhalten aufweisen (siehe Kapitel 3.3.1). Der Einsatz der Oxidationsmittel Distickstoffmonoxid und Stickstoffmonoxid stellt besondere Anforderungen an die Versuchseinrichtung. Beide Stoffe besitzen brandfördernde Eigenschaften. Das farb- und geruchlose Gas Stickstoffmonoxid gilt zusätzlich als sehr giftig und ätzend. Beim Kontakt mit dem Luftsauerstoff erfolgt eine rasche Umwandlung in Stickstoffdioxid. Dieses rotbraune, stechend riechende Gas ist ebenfalls sehr giftig. Der Kontakt mit Wasser führt zur Bildung von Salpetersäure, die eine Verätzung der Schleimhäute bewirken kann. Der Einsatz dieser Stoffe erfordert eine Bauweise, die die Freisetzung der Stoffe in die Umgebung verhindert sowie eine Versuchsdurchführung, die ausschließt, dass der Bediener in Kontakt mit diesen Stoffen kommen kann (siehe auch Kapitel 3.4 und Kapitel 3.5).

3.2 Versuchsaufbau

Die Konstruktion der Detonationsmessstrecke erfolgt in modularer Form (Abbildung 3.1), wobei die einzelnen Module mit Hilfe genormter Flanschverbindungen untereinander verbunden werden können und auf einem Aluminiumprofil befestigt werden. Diese Bauweise ermöglicht es, die Anlage für verschiedene Experimentalanordnungen zu nutzen.

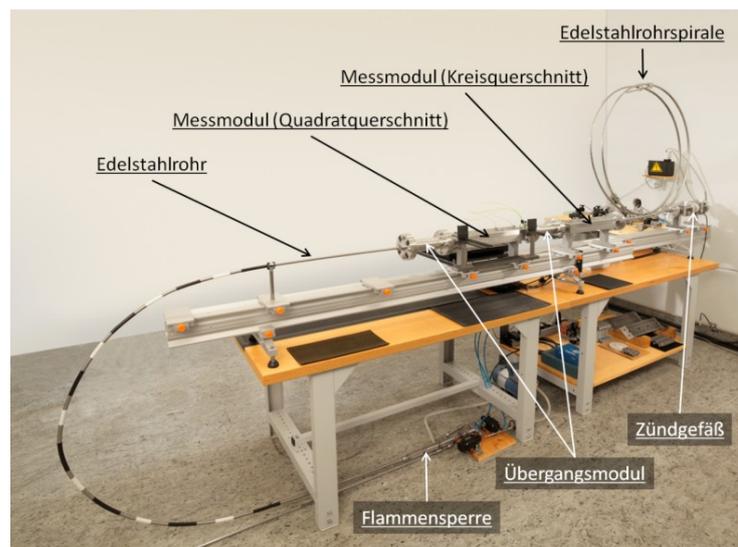


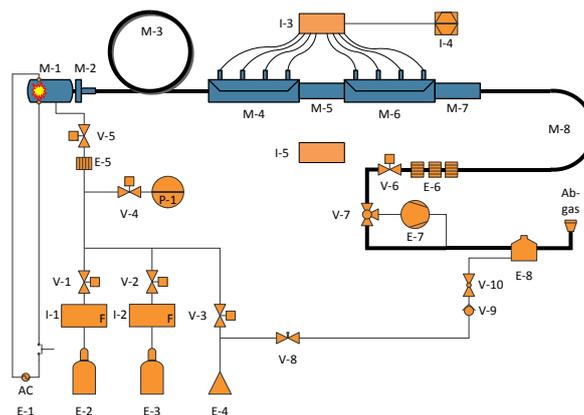
Abbildung 3.1 Detonationsmessstrecke

Die Versuchseinrichtung wurde in einer Experimentierhalle errichtet, in der die Temperatur zwischen 16 °C und 24 °C gehalten wird. Aus sicherheitstechnischen Gründen (siehe Kapitel 3.4) wird die Versuchseinrichtung aus einem benachbarten abgetrennten Raum fernbedient und überwacht.

Für die Untersuchungen werden zwei verschiedene Experimentalanordnungen verwendet. Die erste Versuchseinrichtung dient der Bestimmung der Detonationsparameter, mit der zweiten Versuchseinrichtung werden die Kapillarversuche durchgeführt. In den beiden folgenden Abschnitten wird jeweils auf eine dieser Experimentalanordnungen eingegangen.

3.2.1 Versuchseinrichtung für die Detonationsparameterbestimmung

Die erste Versuchsanordnung dient der Vermessung von Detonationen in engen Röhren bzw. Kanälen. Hierzu erfolgt der Aufbau der Anlage wie er in Abbildung 3.2 zu sehen ist. Der lichte Durchmesser der Strecke beträgt 0,01 Meter und ergibt somit inklusive aller Module, bei einer Gesamtlänge von rund 10,6 Metern, ein Volumen von ca. 1 Liter.



V-1 bis V-7	Pneumatikventile, fernsteuerbar
V-8	Nadelventil
V-9	Rückschlagventil
V-10	Kugelventil, manuell steuerbar
P-1	Drucksensor 10 bar, piezoresistiv
I-1 und I-2	Massendurchflussregler
I-3	Ladungsverstärker
I-4	Messrechner
I-5	Scanner
E-1	Hochspannungsquelle, 14 kV, 20 mA
E-2	Brenngas
E-3	Oxidationsmittel
E-4	Druckluft
E-5	Flammensperre, 0,25 mm
E-6	Flammensperre, dreifach, 0,25 mm
E-7	Vakuumpumpe
E-8	Waschkolonne, NaOH
M-1	Zündgefäß mit elektrischer Funkenzündung
M-2	Isolationsmodul, keramisch
M-3	Edelstahlrohrspirale, 6000 mm
M-4	Messmodul (Kreisquerschnitt) mit Druckaufnehmern, piezoelektrisch
M-5	Übergangsmodule, kreisförmiger auf quadratischer Querschnitt
M-6	Messmodul (Quadratquerschnitt) mit Druckaufnehmern, piezoelektrisch
M-7	Übergangsmodule, quadratischer auf kreisförmiger Querschnitt
M-8	Edelstahlrohr, 3000 mm

Abbildung 3.2 Versuchsanordnung zur Detonationsdatenbestimmung

Die kontrollierte Zugabe des Brenngases E-2 und des Oxidationsmittels E-3 erfolgt über die Massendurchflussregler I-1 und I-2. Eine Absperrung dieser beiden Einspeisungsstellen wird mittels der Pneumatikventile V-1 und V-2 gewährleistet. Um die Detonationsmessstrecke vor und nach einem Versuch spülen zu können, besitzt die Anlage eine Druckluft einspeisung E-4, die über das Pneumatikventil V-3 steuerbar ist. Zur Kontrolle und Steuerung des statischen Initialdruckes vor und nach der Durchführung eines Detonationsversuches dient der Drucksensor P-1. Er kann mit Hilfe des Pneumatikventils V-4 von der Anlage getrennt werden. Die Förderung von Brenngas, Oxidationsmittel sowie Druckluft erfolgt über die Flammensperre E-5 (siehe Kapitel 3.3.2) und das Pneumatikventil V-5 in die Detonationsmessstrecke.

Die Zündvorrichtung besteht aus einem Zündgefäß mit Zündelektrode, einem Isolationsmodul und einer Hochspannungsquelle (siehe Abbildung 3.3). Das Zündgefäß ist ein Zylinder mit einem Innendurchmesser von 35 mm, an dessen Ende die Zündelektrode angebracht ist. Die Zündelektrode ist aus einem hochtemperaturbeständigen thermoplastischen Polyetheretherketon gefertigt und dient der Fixierung und der elektrischen Isolation der beiden Elektroden im Zündgefäß. Der Übergang vom Zündgefäß in das Isolationsmodul M-2 erfolgt über den abgeschrägten pfeilförmigen Ausgang des Zündgefäßes. Um zu verhindern, dass etwaige elektrische Ladungen vom Zündvorgang auf den nachfolgenden Teil der Detonationsmessstrecke übergehen und dort die piezoelektrischen Sensoren stören können, erwies sich das Isolationsmodul als zuverlässig. Es besteht im Wesentlichen aus einer Keramikscheibe, die das Detonationsrohr auf einer Länge von 20 mm elektrisch vom Zündgefäß isoliert. Als Wechselstromhochspannungsquelle dient ein Hochspannungstransformator, der auf seiner Sekundärseite einen Strom von 20 Milliampere bei einer Spannung von 14 Kilovolt bereitstellt. Für die Auslösung des Zündfunken kommt ein handelsüblicher Zeitschalttaster zum Einsatz.

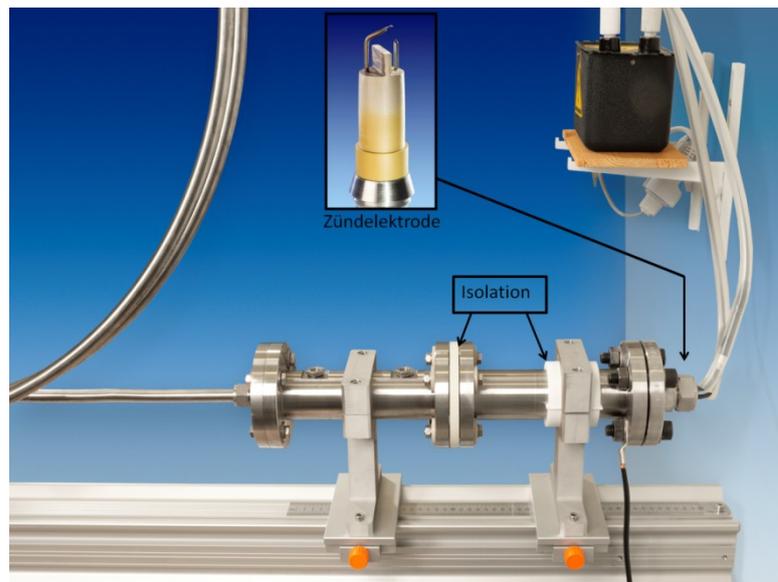


Abbildung 3.3 Zündvorrichtung mit keramischer Isolation

Die sich an das Isolationsmodul anschließende Edelstahlrohrspirale dient ausschließlich der Stabilisierung der Detonation (die Detonation wird schon im Zündgefäß ausgelöst). Die Spiralform des Rohres wird hierbei aus ortstechnischen Gründen gewählt und beeinflusst mit einem Spiraldurchmesser von ca. 100 Zentimeter ($r_1 \approx 500$ mm) und einer Länge von 6 Meter die Detonationsausbreitung nicht (siehe auch Kapitel 2.1).

An die Edelstahlrohrspirale schließt sich das Messmodul mit kreisförmigem Querschnitt an. Dieses Modul, mit einer Gesamtlänge von 530 mm, bietet die Möglichkeit, den Detonationskanal auf einer Länge von 320 mm zu öffnen. Der kreisrunde Kanal wird mittig seiner Längsachse geöffnet, wodurch sich zwei Halbschalen ergeben. In die abnehmbare Halbschale sind 4 Drucksensoren in einem Abstand von jeweils 100 mm eingelassen. Darüber hinaus kann die Innenseite des Deckels über die gesamte Länge mit einer Rußschicht versehen werden (Abbildung 3.6).

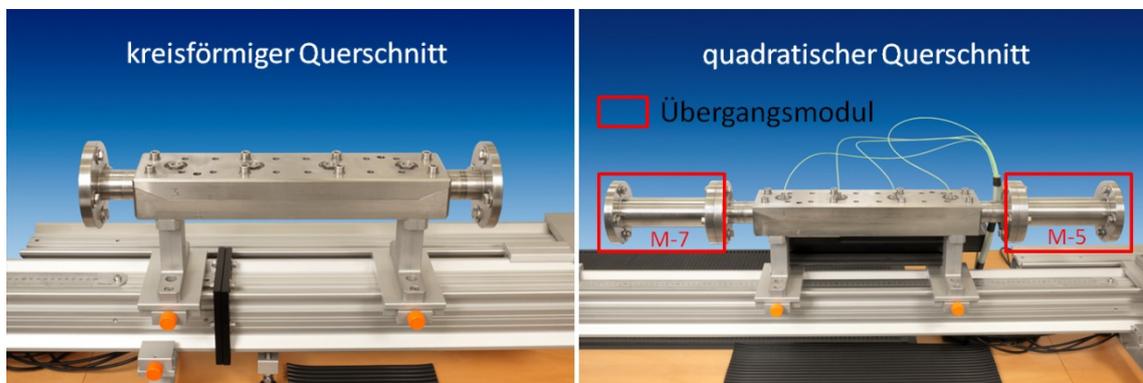


Abbildung 3.4 Messmodul M-4 und M-6

Nachfolgend schließen sich die Module M-5, M-6 und M-7 an. Hierbei ist das Messmodul M-6, abgesehen von der Querschnittform des Detonationskanals, baugleich mit dem Messmodul M-4. Das Messmodul M-6 besitzt einen quadratischen Querschnitt mit einer Seitenlänge von 10 mm (Abbildung 3.5). Die Oberseite des Kanals ist als Deckel ausgeführt, dessen Innenseite ebenfalls mit Ruß beschichtet werden kann.

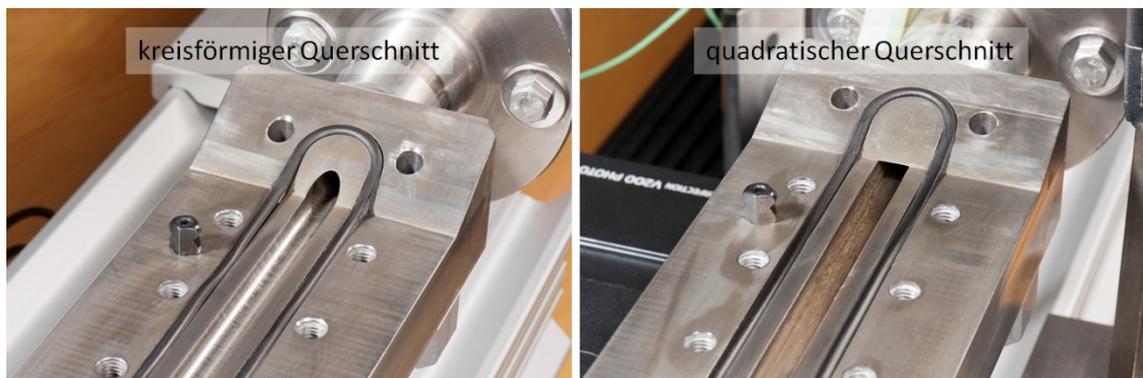


Abbildung 3.5 Blick in die geöffneten Messmodule M-4 und M-6

Die Module M-5 und M-7 werden eingebaut, um eine Störung der Detonationsausbreitung durch einen plötzlichen Übergang von einem kreisförmigen Querschnitt auf einen quadratischen Querschnitt sowie nach Modul M-6 zurück auf einen kreisförmigen Querschnitt, zu verhindern (Abbildung 3.4). In diesen beiden Modulen wurde der Detonationskanal jeweils auf einer Kanallänge von 200 mm mittels Erodierverfahren übergangslos vom kreisförmigen Querschnitt auf den quadratischen Querschnitt und umgekehrt herausgearbeitet, sodass der Übergang zwischen beiden Kanalquerschnittformen ohne Störstellen erfolgt.

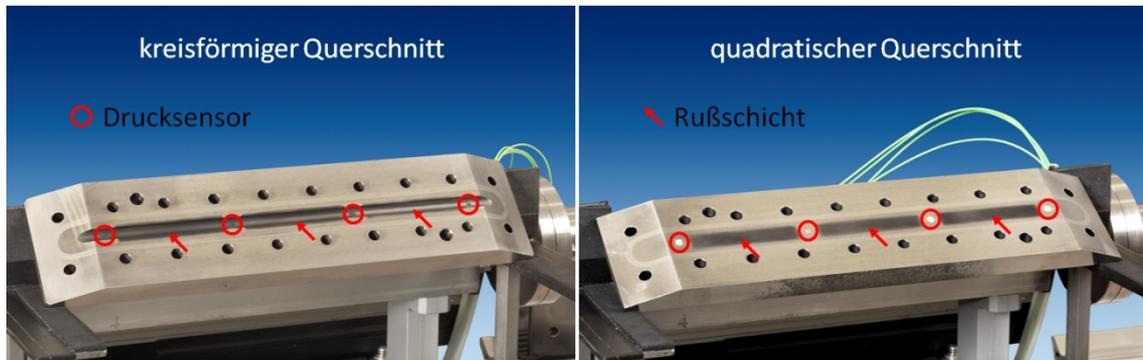


Abbildung 3.6 Deckel der Messmodule M-4 und M-6

Am Ende des sich anschließenden Edelstahlrohres von 3 Meter Länge (M-8) befinden sich drei hintereinander geschaltete Flammensperren (E-6) und das Pneumatikventil V-6, das den Abschluss des Teils der Versuchsstrecke bildet, in welchem Detonationen erwartet werden. Über das Drei-Wege-Pneumatikventil V-7 kann die Abgasstrecke der Detonationsmessstrecke gesteuert werden. Sie besteht im Wesentlichen aus den fünf Komponenten (siehe auch Abschnitt 3.4): Vakuumpumpe E-7, Waschkolonne E-8, Kugelventil V-10, Rückschlagventil V-9 und Nadelventil V-8. Über eine angeschlossene Druckluftleitung kann die Waschkolonne mit dem notwendigen Sauerstoff versorgt werden.

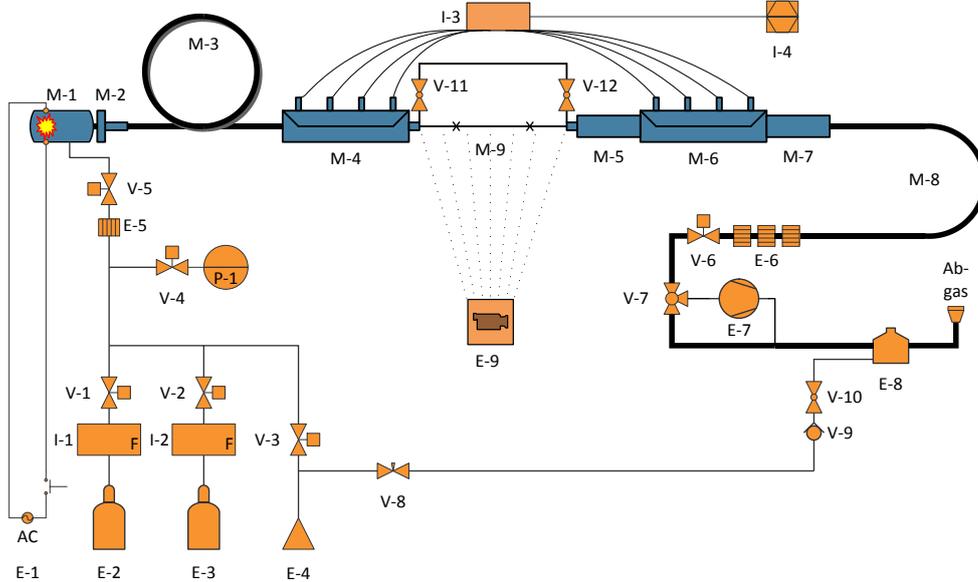
Die Aufzeichnung der Detonationszellmuster, welche auf den beruhten Kanaloberflächen der Deckel von Modul M-4 und M-6 entstehen, erfolgt unter Zuhilfenahme eines handelsüblichen Flachbett-Farbbildscanners I-5 (Model: „Epson Perfection V200 Photo“)

Die Anlage verfügt über pneumatisch geschaltete Ventile, die als Teil des Steuer- und Regelsystems unter Zuhilfenahme der „LabVIEW“¹ Software ferngesteuert aus einem separaten Raum bedient werden können.

¹ National Instruments Germany GmbH, 2012

3.2.2 Versuchseinrichtung für die Kapillarversuche

Für die experimentelle Bestimmung des sicheren Durchmessers, kann die in Kapitel 3.2.1 beschriebene Versuchsanordnung durch den Einbau eines zusätzlichen Moduls erweitert und betrieben werden. Hierzu wird die Anlage zwischen den Modulen M-4 und M-5 getrennt und das Kapillarmodul M-9 eingefügt (siehe Abbildung 3.7).



V-1 bis V-7	Pneumatikventile, fernsteuerbar
V-8	Nadelventil
V-9	Rückschlagventil
V-10	Kugelventil, manuell steuerbar
V-11	Kugelventil (Bypass Zufuhr), manuell steuerbar
V-12	Kugelventil (Bypass Abfuhr), manuell steuerbar
P-1	Drucksensor 10 bar, piezoresistiv
I-1 und I-2	Massendurchflussregler
I-3	Ladungsverstärker
I-4	Messrechner
E-1	Hochspannungsquelle, 14 kV, 20 mA
E-2	Brenngas
E-3	Oxidationsmittel
E-4	Druckluft
E-5	Flammensperre, 0,25 mm
E-6	Flammensperre, dreifach, 0,25 mm
E-7	Vakuumpumpe
E-8	Waschkolonne, NaOH
E-9	Hochgeschwindigkeitskamera
M-1	Zündgefäß mit elektrischer Funkenzündung
M-2	Isolationsmodul, keramisch
M-3	Edelstahlrohrspirale, 6000 mm
M-4	Messmodul (Kreisquerschnitt) mit Druckaufnehmern, piezoelektrisch
M-5	Übergangsmodule, kreisförmiger auf quadratischer Querschnitt
M-6	Messmodul (Quadratquerschnitt) mit Druckaufnehmern, piezoelektrisch
M-7	Übergangsmodule, quadratischer auf kreisförmiger Querschnitt
M-8	Edelstahlrohr, 3000 mm
M-9	Kapillarmodul

Abbildung 3.7 Versuchsanordnung zur Bestimmung des sicheren Durchmessers

Es werden insgesamt drei verschiedene Kapillararten auf ihren sicheren Durchmesser hin getestet, um so auch Erkenntnisse hinsichtlich des Materialeinflusses auf den sicheren Durchmesser gewinnen zu können. Folgende Kapillaren (Länge jeweils 1000 mm) werden getestet:

- Edelstahl zughart, Werkstoff: 1.4301, Innendurchmesser: 0,22/0,50/1,00 mm
- Edelstahl gegläht, Werkstoff: 1.4571, Innendurchmesser: 0,24/0,51/1,00 mm
- Borosilikatglas 3.3, Innendurchmesser: 0,15/0,20/0,40/0,60/0,80/1,00/2,00 mm

Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Kapillaren aus Borosilikatglas 3.3 gelegt, welche aufgrund ihrer hohen chemischen und physikalischen Beständigkeit in der chemischen Verfahrenstechnik zum Einsatz kommen. Diese kalibrierten Präzisionsglaskapillaren (Bezeichnung des Herstellers: „KPG-Kapillare“) der „DURAN Group GmbH“ werden mit minimalen Toleranzen des Innendurchmessers von $\pm 0,01$ mm gefertigt und bieten mit ihrer hohen Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit den idealen Versuchsgegenstand für die Bestimmung des sicheren Durchmessers von Kapillaren. Darüber hinaus erlaubt die Transparenz des Glases eine Beobachtung der Ausbreitung einer Detonation in der Kapillare selbst. Hierzu kommt eine Hochgeschwindigkeitskamera zum Einsatz. Diese ist im Abstand von ca. 4 Meter zur KPG-Kapillare aufgestellt und zeichnet den Verlauf der Detonation in der KPG-Kapillare auf. Abbildung 3.8 zeigt eine KPG-Kapillare eingebaut in das Kapillarmodul.

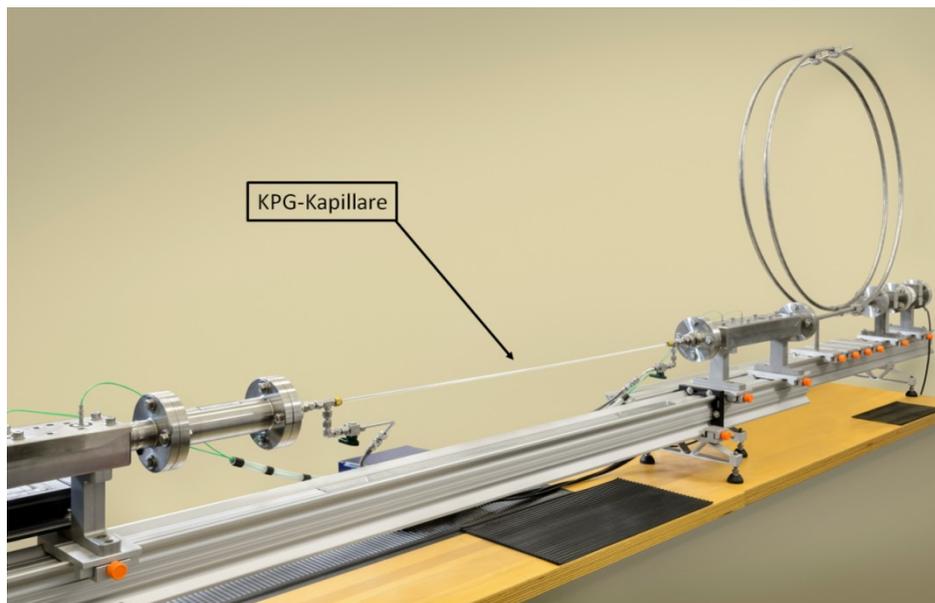


Abbildung 3.8 KPG-Kapillare eingebaut in Kapillarmodul

Verformungen und Beschädigungen an den präzise gefertigten Kapillaren können das Verhalten hinsichtlich der Ausbreitung einer Detonation in ihnen ungewollt beeinflussen. Dies kann zum einen beim Einbau der Kapillaren in die Versuchseinrichtung geschehen, so zum Beispiel durch Glasabplatzungen an den Enden der KPG-Kapillaren oder auch Querschnittveränderungen der Edelstahlrohre durch das Verwenden ungeeigneter

Haltevorrichtungen oder zum anderen während eines Detonationsversuchs, zum Beispiel durch einen nicht spannungsfreien Einbau, welcher zur Zerstörung der KPG-Kapillaren führen kann. Aus diesen Gründen verfügt das Kapillarmodul über speziell angepasste Fittings, die es erlauben, die Kapillaren zerstörungsfrei ein- und wieder auszubauen. Für die Edelstahlkapillaren werden hierfür spezielle Graphit/Vespel Ferrulen (Abbildung 3.9) verwendet. Neben Vespel² besitzt dieser Kunststoff einen Graphitanteil. Das weiche und konisch geformte Material dieser Ferrule passt sich beim Einbau an die Oberfläche der Kapillare an und hält diese fest in ihrer Halterung, ohne sie dabei zu verformen oder zu beschädigen, wie es zum Beispiel bei der Verwendung von Schneid- und Quetschringen der Fall ist.

Als Halte- und Dichtelement für die KPG-Kapillare erweist sich die Graphit/Vespel Ferrule als ungeeignet. Die Stirnflächen der KPG-Kapillaren besitzen im Vergleich zu den Stirnflächen der Edelstahlkapillare eine viel größere Oberfläche. Das führt dazu, dass das weiche Material der Graphit/Vespel Ferrule die KPG-Kapillare bei einem hohen Detonationsdruck nicht in der Halterung halten kann. Um eine daraus resultierende Zerstörung der Kapillare zu vermeiden, wurde für den Einbau der KPG-Kapillaren eine reine Vespel Ferrule verwendet. Dieses Material besitzt eine höhere Festigkeit als die Graphit/Vespel Ferrule bei gleichzeitig guter Anpassungsfähigkeit an die Oberfläche der KPG-Kapillare und kann so die Kapillare mit einem höheren Anpressdruck in der Halterung fixieren.

Die Kapillaren sind mit Hilfe der Ferrule so in das Kapillarmodul eingebaut, dass ihre Enden jeweils 20 mm in den Kanal der Detonationsmessstrecke hineinragen. Eine Störung der Detonationsübergänge zwischen der Kapillare und dem Kanal der Detonationsmessstrecke durch an den Wänden reflektierte Detonationswellen wird hierdurch vermieden.

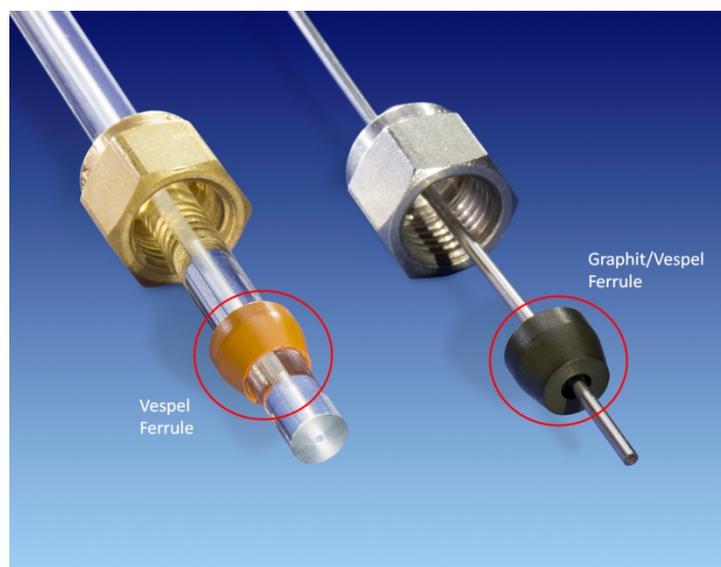


Abbildung 3.9 Ferrulen für KPG-Kapillaren und Edelstahlkapillaren

² eine Bezeichnung des US-amerikanischen Konzerns „DuPont“ für thermisch, mechanisch und elektrisch stark beanspruchbare Kunststoffe

Der geringe Strömungsquerschnitt einer Kapillare macht den Einbau einer Umföhrung (Bypass) erforderlich welche einen Teil des Volumenstroms an der Kapillare vorbeileitet und somit das spölen der Anlage ermöglicht. Die Umföhrung wird unmittelbar vor dem Auslösen einer Detonation mit Hilfe der Ventile V-11 und V-12 weggeschaltet.

3.3 Messeinrichtungen

Die folgenden Messeinrichtungen sind Bestandteil der Versuchsapparatur: Druckmessung, Gemischerzeugung, Detonationszellmustersaufzeichnung und Highspeedkameratechnik. Letztere dient der Ermittlung der Eindringtiefe der Detonation in die Kapillare.

3.3.1 Druckmessung

Piezoelektrischer Drucksensor:

Die Bestimmung der Detonationsgeschwindigkeit und des Detonationsdruckes erfolgt mit Hilfe piezoelektrischer Drucksensoren der Firma „Dr. Müller Instruments“, da diese eine sehr kurze Ansprechzeit von 50 ns besitzen[34]. Jeweils vier dieser Sensoren sind in Abständen von 100 mm in die Deckel der Module M-4 und M-6 eingelassen. Diese Drucksensoren vom Typ „M60-3“ enthalten einen Polyvinylidenfluoridkunststoff (PVDF-Kunststoff), welcher nach seiner Polarisation sehr gute piezoelektrische Effekte zeigt. Der maximale Druck für diesen Sensortyp beträgt 400 Bar. Aufgrund dieser Eigenschaften und seines geringen Durchmessers von 5,5 mm ist er sehr gut geeignet für Detonationsmessungen und für den Einbau in den schmalen Detonationskanal der Messmodule. Bei einer längeren Temperaturexposition von über 60 °C verliert der PVDF-Kunststoff seine Polarisation und wird unbrauchbar. Um den Drucksensor vor den kurzzeitig einwirkenden sehr hohen Temperaturen einer Detonation zu schützen, wurde seine Oberfläche mit einer dünnen Deckschicht aus Silikon überzogen (Abbildung 3.10). Die Drucksensoren müssen berührungsfrei (abgesehen von ihrer Dichtfläche) beziehungsweise berührungsarm in die Deckel der Messmodule eingebaut werden, um so eine Störung des Sensors durch Erschütterungen der Versuchsanlage - verursacht durch die Detonation - zu vermeiden. Um dies zu erreichen, wird ein Sensor-Einbauadapter für das passgenaue Einsetzen des Drucksensors in den Deckel der Messmodule verwendet. Dieser Sensor-Einbauadapter kann speziell für jeden Sensortyp gefertigt werden und ermöglicht so bei Bedarf den Einbau unterschiedlicher Sensortypen in die Deckel der Messmodule ohne aufwendige Umbauarbeiten oder Neuanfertigung der Messmodule.

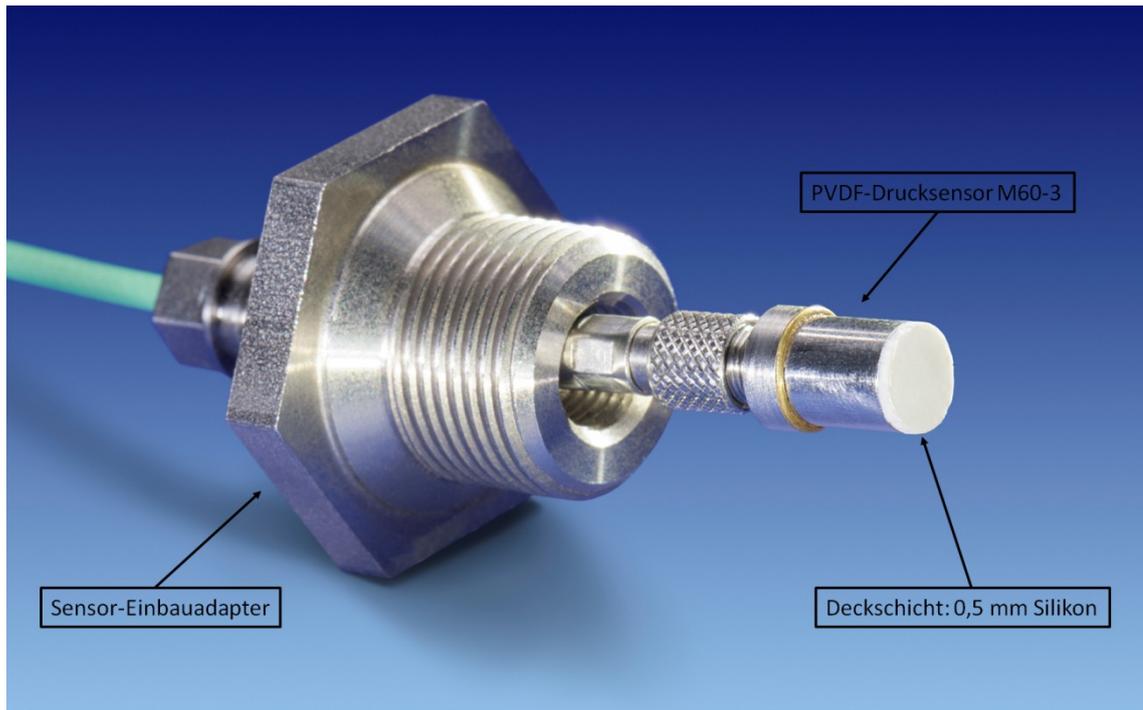


Abbildung 3.10 PVDF Drucksensor M60-3 mit Silikondeckschicht und Sensor-Einbauadapter

Zur Detektion einer Detonation während der Kapillarversuche (siehe Kapitel 3.2.2) in Modul M-4 und im Fall eines Durchschlages durch eine Kapillare in Modul M-6, kommen die piezoelektrischen Drucksensoren „M113A03“ der Firma „PCB Piezotronics“ zum Einsatz. Dieser Sensortyp lässt sich aufgrund einer ähnlich kleinen Dimensionierung wie der Drucksensor M60-3 sehr gut mit Hilfe eines Sensor-Einbauadapters in die Deckel der Messmodule einbauen. Eine zusätzliche Deckschicht aus Silikon benötigt dieser Drucksensor nicht, da der piezoelektrische Kristall des Drucksensors Arbeitstemperaturen bis mindestens 250 °C ohne Beschädigung überstehen kann. Die Ansprechzeit von maximal einer Mikrosekunde ist im Vergleich mit der des Drucksensor M60-3 sehr lang. Sie ist für den Einsatz der Kapillarversuche aber mehr als ausreichend, da die Drucksensoren hierbei lediglich der Aussage dienen, ob eine Detonation stattgefunden hat oder nicht. Eine Bestimmung der Detonationsgeschwindigkeit erfolgt also bei diesen Versuchen nicht.

Piezoresistiver Drucksensor:

Der eingesetzte piezo-resistive Drucksensor vom Model 4045A10 der Firma „Kistler Instrumente AG“ besitzt einen Messbereich bis zu einem Absolutdruck von 10 bar. Der Drucksensor wird benötigt um die statischen Drücke der Anlage zu überwachen und zu steuern. Er wird dazu bei folgenden Vorgängen eingesetzt:

- Evakuierung der Versuchsanlage
- Überwachung des Spülvorgangs vor und nach einem Detonationsversuch
- Einstellung des Initialdruckes
- Überprüfung der Anlage auf Dichtigkeit

Der piezoresistive Drucksensor ist für hohe dynamische Drücke, wie sie bei einer Detonation auftreten, nicht ausgelegt. Um eine Zerstörung des Drucksensors zu vermeiden, ist er während der Detonationsversuche durch das Ventil V-4 (siehe Abbildung 3.2) von der Detonation getrennt.

3.3.2 Gemischerzeugung

Für die Erzeugung einer definierten und reproduzierbaren Gemischzusammensetzung werden insgesamt drei Massendurchflussmesser / -regler³ eingesetzt. Ein Massendurchflussmesser / -regler dient hierbei der Zugabe des jeweiligen Brennstoffes (Ethan oder Propan), die beiden anderen sind je für ein Oxidationsmittel vorgesehen (Distickstoffmonoxid und Stickstoffmonoxid). Bei einem Mischvorgang fördern der Massendurchflussmesser / -regler des Brennstoffes und der Massendurchflussmesser / -regler des gewünschten Oxidationsmittels einen konstanten Massenstrom über eine Flammensperre und die Zündgefäßzuleitung (siehe Abbildung 3.11) in die Detonationsmesstrecke.

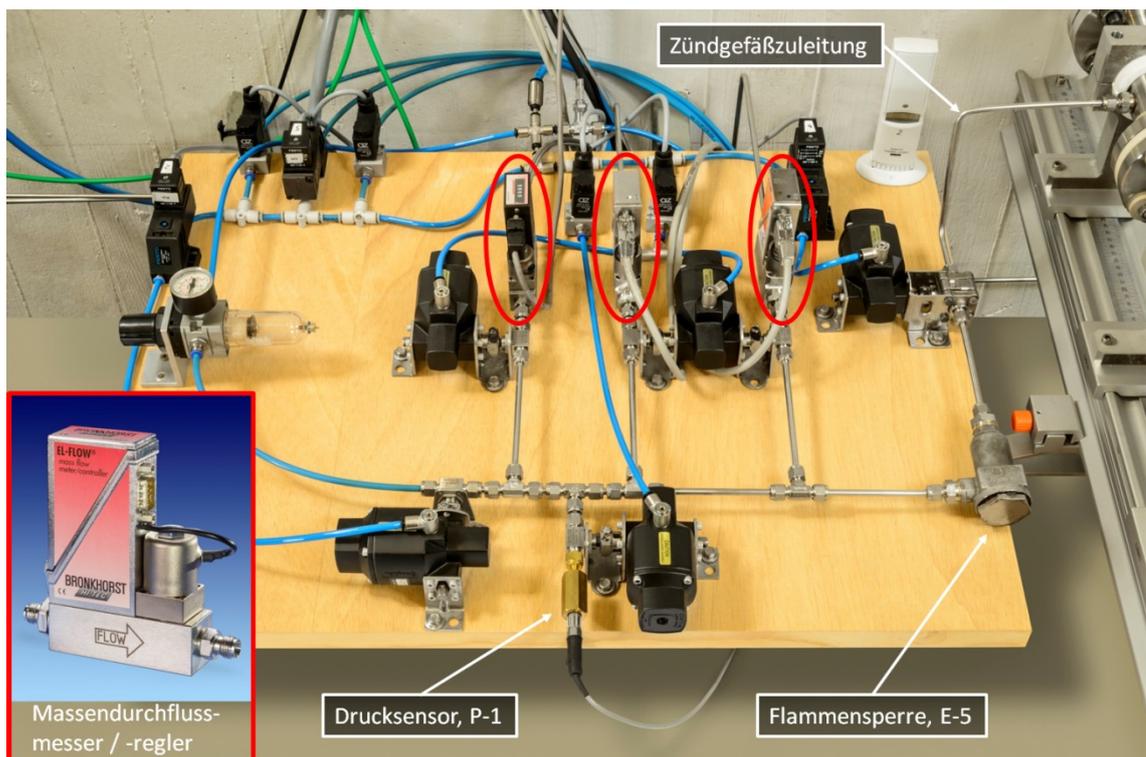


Abbildung 3.11 Aufbau zur Gemischerzeugung

³ BRONKHORST HIGH-TECH B.V., Model: F-201CV ®

Die Flammensperre erfüllt hierbei zwei wesentliche Funktionen. Sie unterdrückt zum einen eine etwaige Flammenausbreitung in die gemischerzeugende Anlage (siehe Kapitel 3.4) und zum anderen gewährleistet sie aufgrund ihrer Turbulenz erzeugenden Geometrie ein optimales Vermischen von Brenngas und Oxidationsmittel.

Die Einleitung des Gemisches in die Detonationsmessstrecke erfolgt zu Beginn des Vorganges in die evakuierte Detonationsmessstrecke. Ab dem Erreichen des Umgebungsdruckes (atmosphärischer Druck) wird das pneumatische Ventil V-6 (siehe Kapitel 3.2.1, Abbildung 3.2) geöffnet, sodass das Gemisch ohne weiteren Druckaufbau als Abgas entweichen kann. Insgesamt wird das Gemisch mit einer Förderrate von maximal 1 Liter pro Minute solange durch die Detonationsmessstrecke gefördert, bis die zehnfache Menge des Anlagenvolumens (Anlagenvolumen: ca. 1 Liter) erreicht ist.

3.3.3 Aufzeichnung der Detonationszellmuster

Um ein geeignetes Verfahren für die Aufzeichnung der Detonationszellen zu finden, wurde neben der Verwendung von berußten Oberflächen auch der Einsatz von Druckmessfolien geprüft. Hierbei wurden zweilagige Druckmessfolien getestet, bei welchen auf der oberen Schicht unterschiedlich große, mit einer Flüssigkeit gefüllte Mikrokapseln verteilt sind und die darunterliegende Schicht mit einer hochempfindlichen Farbentwicklungsschicht versehen ist. Bei einer Druckeinwirkung auf die Folie platzen die Mikrokapseln und geben ihren Inhalt in die Farbentwicklungsschicht ab. Infolgedessen verfärbt sich die Folie, je nach Druckintensität, in unterschiedlichen Rottönen. Folien für sieben unterschiedliche Druckbereiche (gesamter Druckbereich: 0,05 bar bis 300 bar) wurden direkt im Deckel des Messmodul M-6 mit Hilfe eines Klebestreifens befestigt und die Eignung durch mehrere Detonationstests überprüft. Die Druckmessfolien erwiesen sich als ungeeignet für das Aufzeichnen von Detonationszellmustern, da nur in sehr wenigen Fällen ein Detonationszellmuster auf der Folie erzeugt werden konnte und die Abgrenzung einer Detonationszelle nur unscharf erkennbar war.

Das Rußschichtverfahren erwies sich als geeignet für die Aufzeichnung der Detonationszellmuster. Die Messmodule werden hierzu geöffnet und der Deckel auf eine Haltevorrichtung abgelegt. Bevor eine neue Rußschicht auf den Deckel aufgebracht werden kann, wird er zunächst mit Ethanol und danach mit destilliertem Wasser gereinigt. Dabei wird darauf geachtet, dass der Bereich, der den Innenteil des Detonationskanals bildet, keinerlei Verunreinigungen aufweist. Im Anschluss wird der Deckel berußt. Dafür wird der Deckel mit einer feuerfesten Schablone präpariert, die gewährleistet, dass ausschließlich der Bereich des Deckels berußt wird, welcher Teil des Detonationskanals ist (siehe auch Abbildung 3.6). Diese Schablone verhindert auch, dass der jeweilige Drucksensorkopf mit seiner Silikonschicht direkt von der berußenden Flamme erwärmt werden kann und verhindert somit ein versehentliches Überhitzen des Drucksensors. Zum Berußen wird ein dickflüssiges Paraffinöl verwendet. Dieses

Öl wird mit Hilfe einer Öllampe über einen Docht verbrannt. Um eine möglichst gleichmäßig dicke Rußschicht zu erhalten, wird die Öllampe mit der rußenden Flamme langsam und in konstantem Abstand zum Deckel unter ihm mehrmals entlang geführt. Hat sich eine deutliche und gleichmäßige Rußschicht gebildet, ist der Vorgang des Berußens beendet. Nach einer Wartezeit von ca. 1 Minute, während der das möglicherweise gebildete Kondenswasser verdunstet, wird der Deckel wieder am Messmodul befestigt und ist für die Detonationszellmustersaufzeichnung einsatzbereit.

Damit eine Auswertung und Dokumentation der aufgezeichneten Detonationszellmuster erfolgen kann, muss davon direkt nach jedem Detonationsversuch eine Bilddatei erstellt werden. Dazu wird der Deckel des Messmoduls mit dem aufgezeichneten Detonationszellmuster auf einen Flachbettscanner⁴ gelegt.



Abbildung 3.12 Flachbettscanner, modifiziert

Die Modifikationen des Flachbettscanners erlauben ein passgenaues Einscannen des aufgezeichneten Detonationszellmusters, wobei Lage und Maßstab der Detonationszellmustersaufzeichnung immer gleich bleiben und somit eine Auswertung erleichtert wird. Die Aufzeichnung des Detonationszellmusters erfolgt mit der maximalen Scanauflösung (4800 dpi x 9600 dpi).

⁴ Model: Epson Perfection V200 Photo

3.3.4 Kameratechnik

Bei der Durchführung der Kapillarversuche kommen die KPG-Kapillaren zur Anwendung. Die Verwendung dieser Kapillaren ermöglicht den Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera. Die Hochgeschwindigkeitskamera wird hierbei verwendet, um eine Aussage zur Eindringtiefe der Detonation in die Kapillare treffen zu können. Hierzu wird sie quer zur KPG-Kapillare (siehe Kapitel 3.2.2, Abbildung 3.7, Element E-9), in einem Abstand von ungefähr 4 Metern, positioniert. Die Auslösung der Kamera wird getriggert mit dem Zeitschalttaster der Zündfunkenauslösung.

Daten zur Hochgeschwindigkeitskamera:

Bezeichnung:	FASTCAM-1024PCI
Model:	100 KC mit 10-bit CMOS Sensor
maximale Bildfrequenz:	109500 Bilder pro Sekunde

Die maximale Bildfrequenz von 109500 Bildern pro Sekunde konnte für die Aufzeichnung der Kapillarversuche nicht verwendet werden, da die Helligkeit der Detonation beim Verlöschen in der Kapillare hierfür nicht ausreicht. Stattdessen wurde mit einer maximalen Bildfrequenz von 18000 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet, was ausreichend ist, um die Eindringtiefe der Detonation beim Verlöschen in der Kapillare ermitteln zu können.

3.4 Arbeitsschutz und besondere Vorkehrungen

Im Focus der Risikominimierung stehen vor allem zwei Gefahrenquellen, die für den/die Bediener der Anlage bestehen: Dies ist zum Einen die gesundheitsschädigende Wirkung durch etwaig unfreiwillig freigesetzte Gase und zum anderen die Gefahr körperlicher Verletzung infolge unbeabsichtigter Brände und Explosionen. Sowohl die Steuerung der Ventile und das Auslösen der Zündung über den Zeitschalttaster, als auch die Aufzeichnung der Messdaten und die Kontrolle der Anlage werden hierzu aufgrund der sicherheitstechnischen Aspekte aus einem räumlich vom Standort der eigentlichen Detonationsmessstrecke getrennten Bereich betrieben (Abbildung 3.13). Die Trennung der beiden Räume ist so gestaltet, dass ein direkter Gasaustausch zwischen beiden Räumen nicht möglich ist und, im Falle einer unbeabsichtigten Explosion oder eines Brandes im Bereich der Detonationsmessstrecke, die Folgen für den Steuerungs- und Kontrollraum der Anlage überschaubar gering bleiben (Trennwand aus 30 cm Stahlbeton).

Die Druckgasflaschen mit den verwendeten Brennstoffen und Oxidationsmitteln befinden sich in deutlich voneinander getrennten wetter- und sonnengeschützten Unterständen außerhalb

des Versuchsgebäudes. Die Zuleitungen zur Versuchsanlage sind direkt an den Druckgasflaschen mit ausfallsicheren, pneumatisch steuerbaren Ventilen versehen, deren Steuerleitungen aus Kunststoff im Bedarfsfall (z.B. von der Feuerwehr) problemlos zertrennt werden können (führt zu Druckabfall in der Steuerleitung mit daraus folgender selbständiger mechanischer Verriegelung des Ventils), um ein Nachströmen der Gase in die Versuchsanlage schnell und einfach zu unterbinden.

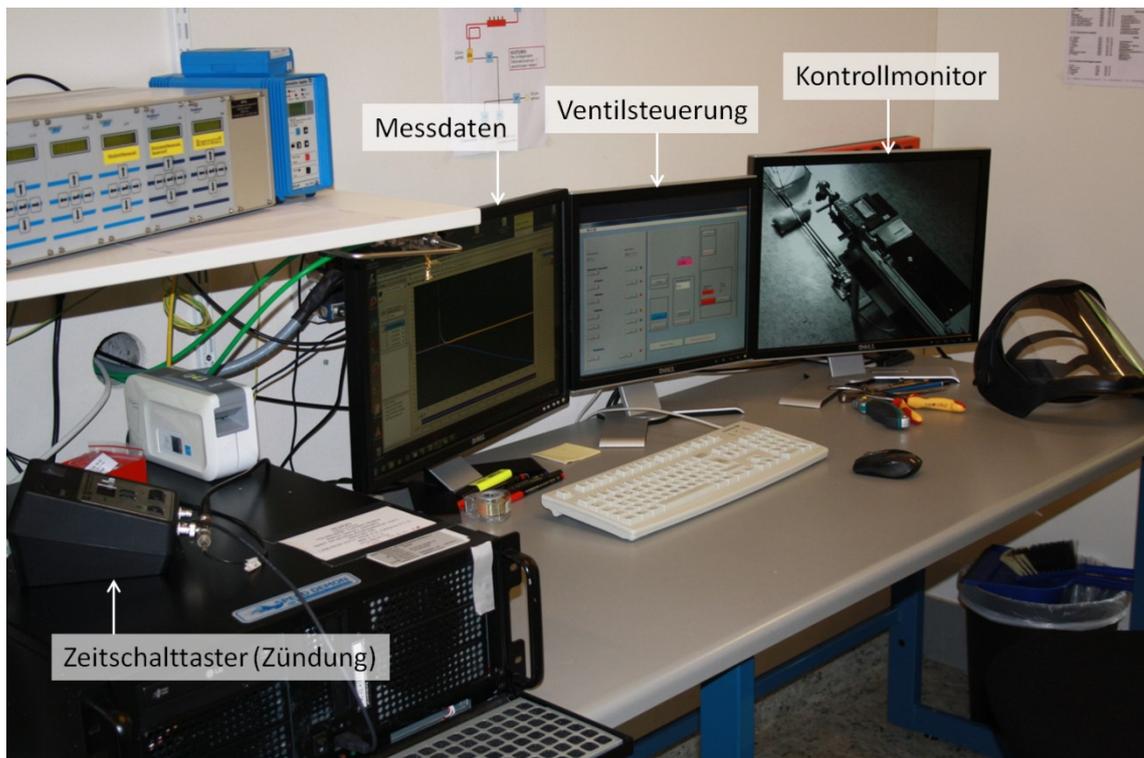


Abbildung 3.13 Steuerung und Kontrolle der Detonationsmessstrecke

Bei der Verwendung von Stickstoffmonoxid als Oxidationsmittel kommt im Abgastrakt der Detonationsmessstrecke (Abbildung 3.2) eine Waschkolonne (E-8) zum Einsatz, um das stark toxisch wirkende Stickstoffmonoxid zu neutralisieren. Hierbei wird, über das Nadelventil (V-8), die Zugabe von Luft reguliert. Bei der chemischen Reaktion von Stickstoffmonoxid mit dem Sauerstoffanteil der Luft kommt es zur Bildung von Stickstoffdioxid, welches anschließend, mit Hilfe einer 10-prozentigen Natriumhydroxidlösung, in der Waschkolonne (Abbildung 3.14) ausgewaschen wird. Die Waschkolonne besteht aus zwei parallel geschalteten Flaschenreihen mit je 3 Flaschen. Jede Flasche kann maximal 2 Liter Natriumhydroxidlösung aufnehmen. Die Zugabe des notwendigen Luftsauerstoffes erfolgt unmittelbar vor dem Eintritt des Gasstromes in die Flaschen der Waschkolonne (Abbildung 3.14, blaue Luftzuleitung). Um einen möglichen Eintritt von Abgasen in die Luft-Zuleitung zu verhindern, wird ein Rückschlagventil (siehe

Abbildung 3.2; V-9) in die Zuleitung eingebaut, das bei einem zu starken Rückstau der Abgase an der Waschkolonne die Zuleitung verschließt.



Abbildung 3.14 Waschkolonne mit regulierbarer Luftzuführung

Da lediglich die Module M-1 bis M-8 für die starken Beanspruchungen durch Detonationen ausgelegt sind, ist es nötig, die Anlagenteile der vorgeschalteten Mischapparatur und die des nachgeschalteten Abgastraktes für den etwaigen Fall eines Ventilversagens von V-5 oder V-6 bzw. einer Fehlbedienung der Anlage durch Flammensperren (E-5, E-6) zu schützen. Die Flammensperre E-6 begünstigt darüber hinaus eine Abschwächung der auftreffenden Stoßwelle, da die ankommende Stoßfront einer Detonation in der Flammensperre, im Vergleich zu einem Auftreffen auf ein geschlossenes Ventil, bei der Reflexion stärker gestreut wird.

Während eines Detonationversuches befinden sich keine Personen im Raum der Detonationsmessstrecke. Um diese zusätzlich überwachen zu können, ist der Versuchsraum mit einer schwenkbaren zoomfähigen Kamera ausgerüstet, die vom benachbarten Kontroll- und Steuerungsraum aus bedient werden kann (siehe auch Abbildung 3.13). Der Einsatz von Stickstoffmonoxid erfordert aus Arbeitsschutzgründen die Aufstellung einer Gefährdungsanalyse mit Sicherheitsmaßnahmen (hinterlegt in der PTB). Bei der Verwendung von Distickstoffmonoxid sind die auftretenden Detonationsdrücke kleiner als bei der

Verwendung von Sauerstoff. Sauerstoff ist darüberhinaus ein stärkeres Oxidationsmittel als Distickstoffmonoxid. Hinsichtlich der Risiken des Berstens der Versuchsanlage kann daher auf die bestehende Gefährdungsbeurteilung und die Arbeitsanweisung für Detonationen in Sauerstoff zurückgegriffen werden.

Die zum Teil starke Rußentwicklung bei der Präparation der Messmoduldeckel für die Detonationszellmustersaufzeichnung erfordert den Einsatz von Staubschutzmasken, deren Filter einen Großteil der Rußpartikel zurückhalten können.

Um jedwedes unnötige Risiko im Normalbetrieb der Anlage auszuschließen, ist der Versuchsablauf so aufgestellt, dass unmittelbar vor dem Öffnen eines Messmodules die komplette Messapparatur evakuiert und anschließend mit Luft geflutet wird.

3.5 Versuchsablauf

Die Steuerung und Überwachung der pneumatischen Ventile und die Überwachung des piezoresitiven Drucksensors der Anlage ist computergestützt. Als Plattform dient hierzu die „Lab VIEW“⁵ Software mit deren Hilfe alle pneumatischen Ventile zur zeit- und druckgenauen Steuerung programmiert sind.

Es werden zuerst die gesamten Versuche zur Bestimmung der Detonationsparameter durchgeführt und aufgezeichnet. Die Dokumentation der Drucksensordaten erfolgt hierbei unter Zuhilfenahme der „Lab VIEW Signal Express“⁶ Software. Diese Software ermöglicht, neben der Aufzeichnung der Daten für die spätere Auswertung, auch eine sofortige Diagrammdarstellung der zeitabhängigen Drucksensursignale. Über diese Darstellung kann direkt nach einem Versuch entschieden werden, ob eine Detonation stattgefunden hat. Die Versuche werden für die jeweiligen Brennstoff/Oxidationsmittel-Gemische über den gesamten Detonationsbereich in geeigneten Konzentrationsschrittgrößen durchgeführt.

Danach werden zunächst die aufgezeichneten Detonationszellmuster ausgewertet, bevor mit der Gemischzusammensetzung, für die sich die kleinsten Detonationszellbreiten ergaben, die Kapillarversuche durchgeführt werden können.

3.5.1 Durchführung der Versuche zur Detonationsparameterbestimmung

In der Vorbereitung eines Detonationsversuches wird der Deckel des Modul M-6 bzw. Modul M-4 auf der Innenseite mit einer Rußschicht versehen, welche der Aufzeichnung des

⁵ Lab VIEW 2012, Version 12.0.1f5 (32-Bit)

⁶ Lab VIEW Signal Express 2012, Version 6.0.0, National Instruments

Detonationszellmusters dient (siehe Kapitel 3.3.3). Die Deckel werden geschlossen und die Anlage wird vor jedem Versuch mit Hilfe einer Vakuumpumpe (E-7) bei geschlossenen Ventilen V-1 bis V-3 und geöffneten Ventilen V-4 bis V-7 auf $10 \text{ mbar} \pm 2 \text{ mbar}$ evakuiert (siehe Kapitel 3.2.1, Abbildung 3.2). Das Einleiten der gewünschten Brennstoff- und Oxidationsmittelanteile erfolgt dann mit Hilfe der Massendurchflussmesser / -regler (siehe Kapitel 3.3.2), bei geschlossenen Ventilen V-3 und V-6 und bei gleichzeitig geöffneten Ventilen V-1, V-2, V-4, V-5 bis zum Erreichen des Umgebungsdrucks. Für das Anzeigen des Anlagendrucks dient hierbei der Drucksensor P-1. Nach dem Erreichen des Umgebungsdrucks wird die Anlage bei geöffneten Ventilen V-6 und V-7 weiterhin mit Gemisch beschickt, bis das Zehnfache des Anlagenvolumens gefördert wurde. Je nachdem, ob ein Versuch bei erhöhtem Ausgangsdruck oder verringertem Ausgangsdruck durchgeführt werden soll, gib es anschließend zwei verschiedene Verfahrensweisen:

Überdruck:

Soll ein Detonationsversuch bei erhöhten Ausgangsdrücken durchgeführt werden, so wird das Ventil V-6 danach geschlossen und das Brennstoff/Oxidationsmittel-Gemisch solange weiter hin in die Detonationsmessstrecke gefördert, bis der gewünschte Initialdruck erreicht ist. Das Schließen der Ventile V-1 und V-2 verhindert dann ein weiteres Nachfördern von Brennstoff und Oxidationsmittel.

Unterdruck:

Soll ein Detonationsversuch bei verringertem Ausgangsdruck durchgeführt werden, so werden die Ventile V-1, V-2 und V-6 gleichzeitig geschlossen. Nach 3 Minuten wird dann das ruhende Gemisch mit Hilfe der Vakuumpumpe E-7, bei freigeschaltetem Ventil V-7 und geöffnetem Ventil V-6, auf den gewünschten Initialdruck gebracht und das Ventil V-6 wird wieder geschlossen.

Nach der jeweiligen zuvor beschriebenen Verfahrensweise wird 3 Minuten gewartet, um ein vollständig ruhendes und homogenisiertes Gemisch zu erhalten. Nach dieser Zeit werden die Ventile V-4 und V-5 geschlossen. Anschließend wird das Gemisch im Zündgefäß gezündet. Die Hochspannungsquelle E-1 wird hierzu mittels eines Zeitschalttasters für 0,2 Sekunden mit Strom versorgt. Eine ausgelöste Detonation passiert die Messmodule M-4 und M-6. Die Drucksensordaten werden dabei direkt über den Ladungsverstärker I-3 an den Messrechner I-4 geleitet und aufgezeichnet. Anschließend wird zunächst das Ventil V-6 geöffnet, um ein Entspannen des erhöhten Abgasdrucks der Detonationsmessstrecke auf Umgebungsbedingung zu erzielen und danach wird die Anlage, nach Öffnen der Ventile V-3, V-4 und V-5, mit Druckluft gespült. Damit sichergestellt ist, dass sich keinerlei Abgase mehr in der Anlage befinden, wird die Detonationsmessstrecke nach dem Spülen nochmals evakuiert und anschließend mit Druckluft auf Umgebungsdruck aufgefüllt (siehe auch Kapitel 3.4). Um ein in den Deckeln der Messmodule erzeugtes Detonationszellmuster zu dokumentieren, werden

diese nun geöffnet und die berußten Deckelinnenseiten mit Hilfe des Scanners I-5 abgelichtet und die Deckel anschließend wieder gereinigt (siehe Kapitel 3.3.3).

Um den Einfluss der Kanalquerschnittform auf die Detonationszellbreite zu untersuchen, wurde eine Vergleichsmessung für ein Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisch bei einem Initialdruck von 2 bar durchgeführt. In dieser Vergleichsmessung soll festgestellt werden, ob es, bei sonst gleichen Bedingungen, für den kreisrunden und den quadratischen Kanalquerschnitt zu unterschiedlichen Breiten bei den Detonationszellen kommt. Sollten sich keine deutlichen Unterschiede in der Detonationszellbreite ergeben, so werden die Messungen für die Detonationszellbreiten für alle Versuche lediglich unter Zuhilfenahme des Messmoduls mit quadratischem Querschnitt durchgeführt, da die Auswertung der Detonationszellen hier, aufgrund der fehlenden Krümmung des Detonationskanals, ohne räumliche Verzerrung geschehen kann.

3.5.2 Kapillarversuche

Für die Durchführung der Kapillarversuche wird die Detonationsmessstrecke gemäß Kapitel 3.2.2 aufgebaut. Es wird zunächst die KPG-Kapillare mit dem größten Innendurchmesser eingebaut (1 mm). Anschließend werden die Massendurchflussmesser /-regler auf die in den Versuchen zur Detonationsparameterbestimmung ermittelte Konzentration des jeweiligen Brennstoff/Oxidationsmittel-Gemisches eingestellt, bei der die kleinsten Detonationszellbreiten ermittelt wurden (siehe Kapitel 3.6.2). Die Hochgeschwindigkeitskamera wird im rechten Winkel zur Längsachse der Kapillare positioniert und ihr Trigger auf den Zeitschalttaster der Hochspannungsquelle eingestellt. Das Befüllen der Anlage mit dem gewünschten Gemisch geschieht analog der Versuche zur Bestimmung der Detonationsparameter, nur dass hierbei die Ventile V-11 und V-12 des zusätzlich eingebauten Kapillarmoduls geöffnet sein müssen. Nach 3 Minuten werden die Ventile V-4 und V-5, sowie V-11 und V-12 geschlossen. Die Detonation wird durch das Betätigen des Zeitschalttasters ausgelöst, während gleichzeitig die Hochgeschwindigkeitskamera eine mögliche Detonationsausbreitung in der Kapillare aufzeichnet. Anhand der aufgezeichneten Daten der Hochgeschwindigkeitskamera und der Drucksensordaten der Messmodule vor und hinter der Kapillare wird evaluiert, ob ein Detonationsdurchschlag durch die Kapillare hindurch stattgefunden hat, die Detonation in der Kapillare gelöscht wurde (mindestens 50 mm Eindringtiefe) oder die Kapillare einen Durchschlag sicher verhindert hat (weniger als 50 mm Eindringtiefe). Für den Fall, dass ein Detonationsdurchschlag oder ein Löschen der Detonation in der Kapillare stattgefunden hat, wird die Kapillare mit dem nächstkleineren Durchmesser eingebaut (nachdem die Anlage gespült, evakuiert und mit Druckluft gefüllt wurde) und der Detonationsversuch erneut durchgeführt. Dies wird solange wiederholt, bis der größte Kapillardurchmesser ermittelt wurde, bei dem ein Detonationsdurchschlag sicher verhindert wird. Zur Bestätigung des gefundenen sicheren Kapillardurchmessers werden anschließend weitere vier Wiederholungsmessungen durchgeführt.

Die Kapillarversuche mit den beiden Edelstahlwerkstoffen werden in derselben Verfahrensweise durchgeführt wie die Versuche mit den KPG-Kapillaren. Die Hochgeschwindigkeitskamera ist aufgrund des Materials allerdings hierbei nicht einsetzbar, sodass das Löschen einer Detonation in der Edelstahlkapillare lediglich aufgrund der Drucksensordaten vor und hinter der Kapillare angezeigt werden kann. Ist der größte Kapillardurchmesser gefunden, bei dem die Detonation in der Kapillare gelöscht wird, wird dies ebenfalls durch weitere vier Wiederholungsmessungen bestätigt.

3.6 Auswertung der Messergebnisse

Die Versuche zur Bestimmung der Detonationsparameter dienen in erster Linie der Ermittlung der optimalen Gemischzusammensetzung von Brennstoff und Oxidationsmittel. Hierbei bedeutet „optimal“, dass die Konzentration eines detonationsfähigen Brennstoff/Oxidationsmittel-Gemisches gesucht wird, bei der die Detonationszellbreite möglichst klein ist. Insgesamt werden drei Detonationsparameter ermittelt:

- Detonationsgeschwindigkeit
- Detonationsdruck
- Detonationszellbreite

Die anschließenden Abschnitte erläutern die Vorgehensweise bei der Auswertung von:

- Detonationsgeschwindigkeit und Detonationsdruck
- Detonationszelmuster
- Kapillarversuche

3.6.1 Detonationsgeschwindigkeit und Detonationsdruck

Für die Auswertung der Detonationsgeschwindigkeit und des Detonationsdruckes mit Hilfe der Origin⁷ Analysesoftware [35], müssen zunächst die mit der „Lab VIEW Signal Express 2012“ Software erzeugten lvm-Dateien (Lab View Makefile-Dateien) der gewonnenen Rohdaten in ein hierfür verwendbares Format gebracht werden. Dabei ist es notwendig, die auf signifikante 18 Stellen gespeicherten Zeitangaben auf maximal 15 signifikante Stellen zu reduzieren, um sie mit Origin einlesen zu können. Für diesen Vorgang wird die Messdatei eines jeden Detonationsversuches unter Zuhilfenahme der GNU Octave⁸ Software so umgeschrieben, dass für die einzelnen Taktungen einer jeden Messung die Zeitdifferenzen gebildet werden. Dies verkürzt die Zeitangaben auf maximal 7 signifikante Stellen, die mit Origin problemlos verarbeitet werden können, ohne an Genauigkeit zu verlieren.

⁷ Origin 8.5.0G SR1; 2010; Origin Lab Corporation

⁸ GNU Octave; 2011; Version 3.4.3

Neben den Zeitdaten werden auch die vier Datenblöcke der vier Drucksensoren eines Messmoduls eingelesen. Die Datenblöcke der Drucksensoren werden danach mit einem 100 Punkte Perzentilfilter geglättet. Anschließend lässt sich der Zeitpunkt mit dem größten Druckanstieg (Durchlaufen der Detonationsfront) bestimmen und aus den geometrischen Abständen der Drucksensoren die Detonationsgeschwindigkeit ermitteln. Dabei ist der jeweils gleiche Abstand der Sensoren a_s zueinander bekannt (100 mm) und über die vier Drucksensoren werden - in drei Teilabschnitten - die Detonationsgeschwindigkeiten bestimmt, indem die Zeitdifferenz der durchlaufenden Stoßwelle zwischen den einzelnen Sensoren ausgewertet wird. Der Vergleich der drei Detonationsgeschwindigkeiten in diesen Teilabschnitten ermöglicht es, eine Aussage zur Entwicklung der konzentrationsabhängigen Stabilität einer Detonation zu treffen. Das Merkmal einer stabilen Detonation ist hierbei eine konstante Geschwindigkeit über die Teilabschnitte. Mit größer werdender Schwankung der Detonationsgeschwindigkeit wird sie instabiler. Die Detonationsgeschwindigkeit v_D ist der Mittelwert der Detonationsgeschwindigkeiten der drei Teilabschnitte a_s der Messstrecke und lässt sich nach folgender Formel ermitteln:

$$v_D = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 v_{D,i} \quad (17)$$

Der Detonationsdruck wird als Mittelwert aller Detonationsdrücke der vier Drucksensoren gebildet:

$$p_D = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 p_{D,i} \quad (18)$$

Die für die Auswertung verwendeten einzelnen Detonationsdrücke gehen als Peak aus den aufgezeichneten Graphen des Detonationsdruckes eines Detonationsversuches hervor.

3.6.2 Detonationszellmuster

Das Vermessen der Detonationszellgröße erfolgt mit Hilfe der Bildanalysesoftware „DatInf@Measure“⁹. Die Bilder der gescannten Detonationszellmuster des Messmoduls mit dem quadratischen Kanalquerschnitt können hiermit maßstabsgetreu untersucht werden. Hierbei werden von Hand die Abmessungen aller eindeutig im Bild erkannten Detonationszellen markiert und vom Programm die einzelnen Detonationszellbreiten

⁹ Version 2.1d, DatInf GmbH, Tübingen, 2012

errechnet. Als „eindeutig erkannt“ gilt hierbei eine Detonationszelle, wenn alle ihre vier Seiten und die dazugehörigen Ecken erkennbar sind. Dabei darf die Detonationszelle keine weiteren Detonationszellen (Subzellen) einschließen. Enthält eine Detonationszelle Subzellen, so werden nur diese Subzellen markiert und vermessen, die einbindende Detonationszelle (Hauptzelle) wird nicht markiert oder berücksichtigt. Aus der Summe aller vermessenen Detonationszellen eines Detonationsversuches, wird über den Mittelwert die Detonationszellbreite für die betreffende Stoffkonzentration gebildet.

Um den Einfluss des kreisförmigen Detonationskanalquerschnitts mit dem Durchmesser $d=10$ mm auf die Detonationszellbreite darzustellen und mit den Detonationszellbreiten des quadratischen Detonationskanals zu vergleichen, können die Detonationszellbreiten nicht direkt aus den eingescannten Bildern ermittelt werden. Aufgrund der Krümmung des Detonationskanals müssen die gemessenen Breiten λ' noch mit folgender Formel auf die reale Detonationszellbreite λ umgerechnet werden:

$$\lambda = d \cdot \arcsin \frac{\lambda'}{d} \quad (19)$$

Dabei muss darauf geachtet werden, dass ausschließlich Detonationszellen untersucht werden, die mittig über die gesamte Achslänge des Detonationskanals im gescannten Bild liegen. Detonationszellen, die sich außerhalb dieser Achse befinden, müssen unberücksichtigt bleiben, da ihre reale Detonationszellbreite mit der Formel (19) nicht aus diesem gescannten Bild ermittelt werden kann.

Die Genauigkeit der Detonationszellmustersauswertung hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab. So zum Beispiel von der aufgetragenen Rußschicht, der Qualität und Detailschärfe der gescannten Detonationszellmusterbilder, dem Auflösungs- und Darstellungsvermögen des Auswertemonitors und vor allem den Augen des auswertenden Betrachters. Um untersuchen zu können, wie stark der subjektive Einfluss einer auswertenden Person sein kann, wurde stichprobenartig die Auswertung der Detonationszellmuster eines Versuchs durch eine zweite Person vorgenommen.

3.6.3 Kapillarversuche

Auswertung der KPG-Kapillarversuche:

Für die Auswertung der KPG-Kapillarversuche werden zweierlei Messdaten verwendet: die Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera und die Messdaten der Messmodule vor und hinter dem Kapillarmodul (siehe auch Abbildung 3.7). Anhand der Drucksensordaten des Messmoduls, welches sich direkt vor dem Kapillarmodul befindet, wird bewertet, ob die Detonation ausgelöst wurde. Die Drucksensordaten des Messmoduls hinter dem Kapillarmodul

dienen der Entscheidung, ob ein Detonationsdurchschlag durch die Kapillare stattgefunden hat. Ein Versuch wird als „Detonationsdurchschlag“ gewertet, wenn die Drucksensoren des nachgeschalteten Messmoduls einen Druckanstieg über 0,1 bar registrieren. Erfolgte kein Detonationsdurchschlag durch die Kapillare, werden die Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera ausgewertet. Hierbei wird die sichtbare Eindringtiefe der Detonation in die Kapillare gemessen und als „Löschung in der Kapillare“ festgehalten. Bei einer Eindringtiefe von weniger als 50 mm, sowie vierfach erfolgter positiver Wiederholungsmessung, wird der Durchmesser der betreffenden Kapillare als „sicherer Durchmesser“ eingestuft.

Auswertung der Edelstahl-Kapillarversuche:

Aufgrund der Undurchsichtigkeit der Edelstahlkapillare, kann für die Auswertung dieser Versuche keine Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt werden. Die Auswertung dieser Versuche geschieht ausschließlich über die Drucksensordaten der Messmodule vor und hinter dem Kapillarmodul nach der gleichen Vorgehensweise wie bei den KPG-Kapillarversuchen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass aufgrund der nicht messbaren Eindringtiefe der Detonation in die Kapillare, kein „sicherer Durchmesser“ nachgewiesen werden kann. Daher werden alle Versuche, bei denen kein „Detonationsdurchschlag“ erfolgt, nach vierfach erfolgter positiver Wiederholungsmessung, als eine „Löschung in Kapillare“ vermerkt.

4 Ergebnisse

Dieses Kapitel beinhaltet die Resultate der Detonationsparameterbestimmung (Detonationsgeschwindigkeit, Detonationsdruck, Detonationszellbreite) und der Kapillarversuche.

4.1 Detonationsgeschwindigkeit

In den nachfolgenden beiden Abschnitten wird auf die bei den Versuchen erreichten Detonationsgeschwindigkeiten eingegangen. Dabei werden die Abschnitte zur besseren Übersicht nach den Oxidationsmitteln Distickstoffmonoxid und Stickstoffmonoxid unterteilt.

4.1.1 Distickstoffmonoxid

Bei einem Ausgangsdruck von 1 bar ergibt sich der Detonationsbereich für Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemische zwischen 5,0 Vol% Ethan und 24,0 Vol% Ethan. Die durchschnittliche Detonationsgeschwindigkeiten (ermittelt nach Gleichung 17) für Gemische aus Ethan und Distickstoffmonoxid, bei unterschiedlichen Konzentrationen und verschiedenen Initialdrücken, sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Es zeigt sich, dass bei höherem Ausgangsdruck auch höhere Detonationsgeschwindigkeiten erreicht werden. Der Einfluss des Ausgangsdruckes im Vergleich zur Konzentration des Gemisches ist jedoch für den untersuchten Druckbereich gering. Die Erhöhung des Ausgangsdruckes von 0,8 bar auf 1,5 bar führt in den durchgeführten Messreihen zu einer maximalen Erhöhung der Detonationsgeschwindigkeit von unter 50 m/s, während es durch eine Veränderung der Konzentration vom beispielsweise 0,5-Fachen auf das 1,5-Fache des stöchiometrischen Verhältnisses, bei einem Ausgangsdruck von 1,5 bar, zu einem Anstieg der Detonationsgeschwindigkeit um etwa 300 m/s kommt. Die maximalen Detonationsgeschwindigkeiten ergeben sich für alle untersuchten Ausgangsdrücke bei etwa dem 1,6-Fachen des stöchiometrischen Verhältnisses. Die Detonationsgeschwindigkeiten sind nahe der oberen Detonationsgrenze deutlich höher als in der Nähe der unteren Detonationsgrenze. Dieses Verhalten bestätigen auch zahlreiche Detonationsversuche mit diversen Brennstoffen von Zeldovich und Kompaneets [36]. Für Detonationen in Rohren konnten sie für die Oxidationsmittel Sauerstoff und Luft deutlich höhere Detonationsgeschwindigkeiten nahe der oberen Detonationsgrenze messen als an der unteren Detonationsgrenze.

Betrachtet man die Geschwindigkeitsschwankungen einer Detonation über die drei Teilabschnitte der Messstrecke, so zeigt sich für einen Konzentrationsbereich zwischen dem 0,8-Fachen und dem 1,6-Fachen der stöchiometrischen Konzentration und insbesondere für erhöhte Ausgangsdrücke, eine relativ konstante Detonationsgeschwindigkeit.

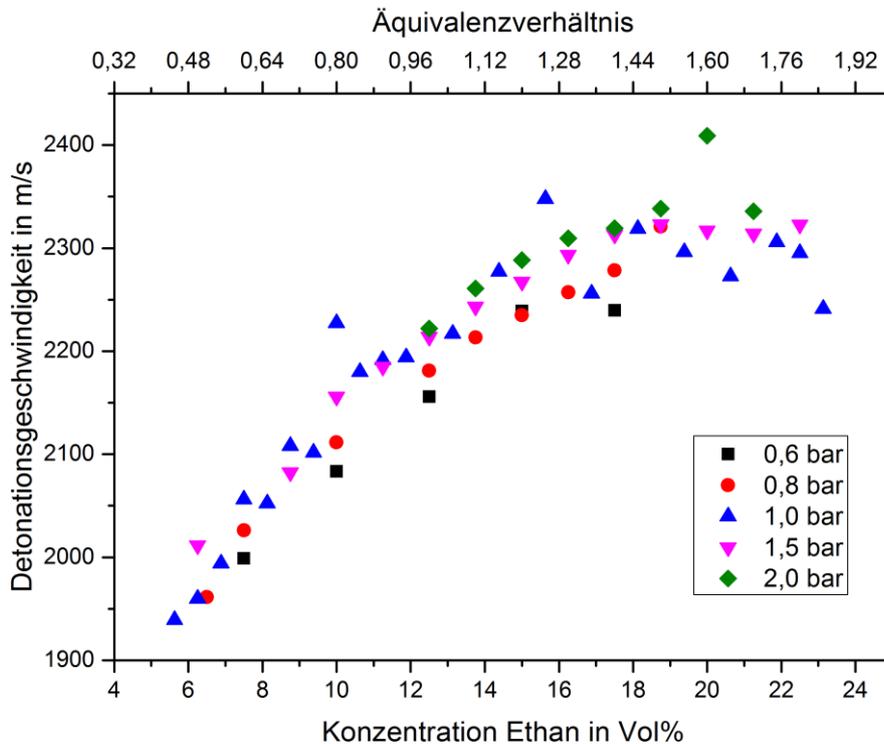


Abbildung 4.1 Detonationsgeschwindigkeiten von Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Ethan und für verschiedene Initialdrücke

In Abbildung 4.2 sind beispielgebend die Standardabweichungen der konzentrationsabhängigen Detonationsgeschwindigkeit bei einem Ausgangsdruck von 1,5 bar dargestellt. Für den Bereich zwischen dem 0,8-Fachen und dem 1,6-Fachen der stöchiometrischen Konzentration liegt die Standardabweichung unter 28 m/s. Dies entspricht einer relativen Abweichung von 1,2 % bei $\varphi=1,4$ und kann somit als Merkmal einer stabilen Detonation angesehen werden. Die stark überstöchiometrischen und stark unterstöchiometrischen Konzentrationen außerhalb dieses Bereiches weisen hingegen starke Schwankungen der Detonationsgeschwindigkeit auf, welche durch eine maximale Standardabweichung von 132 m/s angezeigt werden. Die relative Schwankung der Detonationsgeschwindigkeit bei $\varphi=1,9$ beträgt 5,7 % und kennzeichnet somit den Konzentrationsbereich, in dem die Detonation an Stabilität verliert.

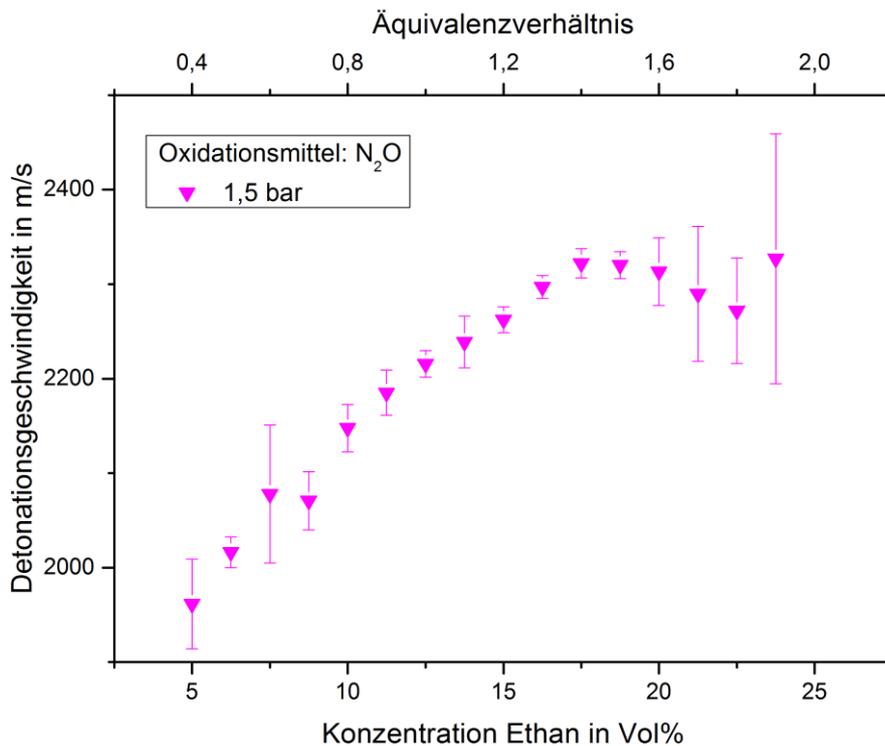


Abbildung 4.2 Mittlere Detonationsgeschwindigkeit und Standardabweichung beim Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisch in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Ethan bei einem Initialdruck von 1,5 bar

Die Untersuchungen der Gemische aus Propan und Distickstoffmonoxid (Abbildung 4.3) wurden für drei Ausgangsdrücke durchgeführt und ergaben vergleichbare Ergebnisse wie bei den zuvor beschriebenen Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemischen. Auch hier kommt es zu einer eher geringeren Druckabhängigkeit, verglichen mit der Konzentrationsabhängigkeit. Im Bereich um das 1,6-Fache der stöchiometrischen Konzentration bildet die Detonationsgeschwindigkeit auch für Propan/Distickstoffmonoxid-Gemische ihr Maximum aus. Anders als bei den Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemischen, zeigen sich jedoch bei Propan / Distickstoffmonoxid stärkere Schwankungen der Detonationsgeschwindigkeit. Die Standardabweichungen über die drei Messstreckenabschnitte betragen zwischen 16 m/s und 66 m/s, wobei dies für den gesamten Konzentrationsbereich gilt und kein ausgedehnter Bereich größerer Stabilität und keine Bereiche abnehmender Stabilität erkennbar sind (siehe Abbildung 4.4).

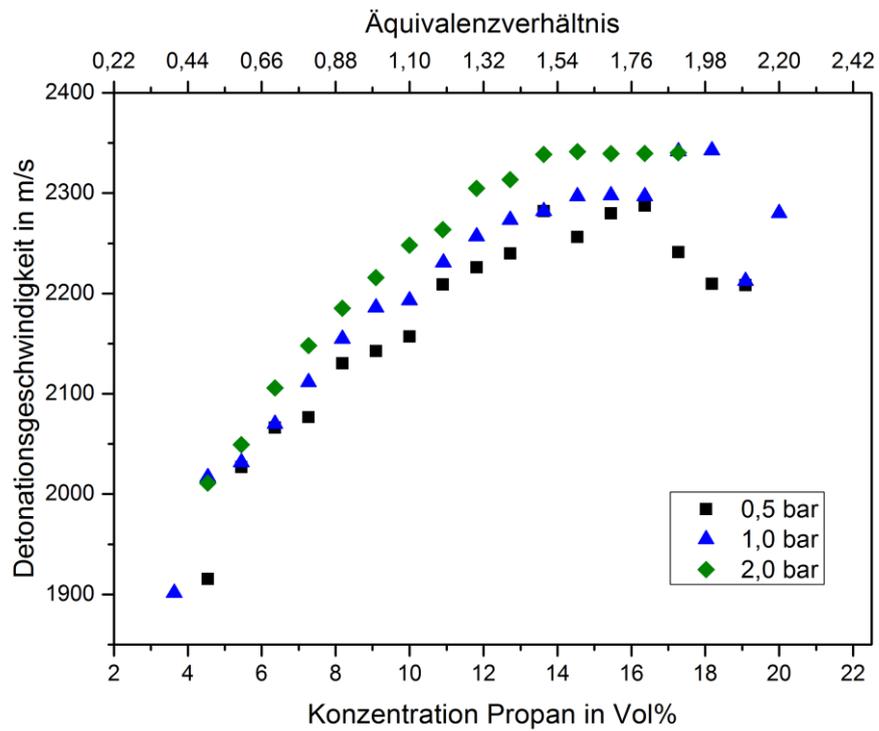


Abbildung 4.3 Detonationsgeschwindigkeiten von Propan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan und für verschiedene Initialdrücke

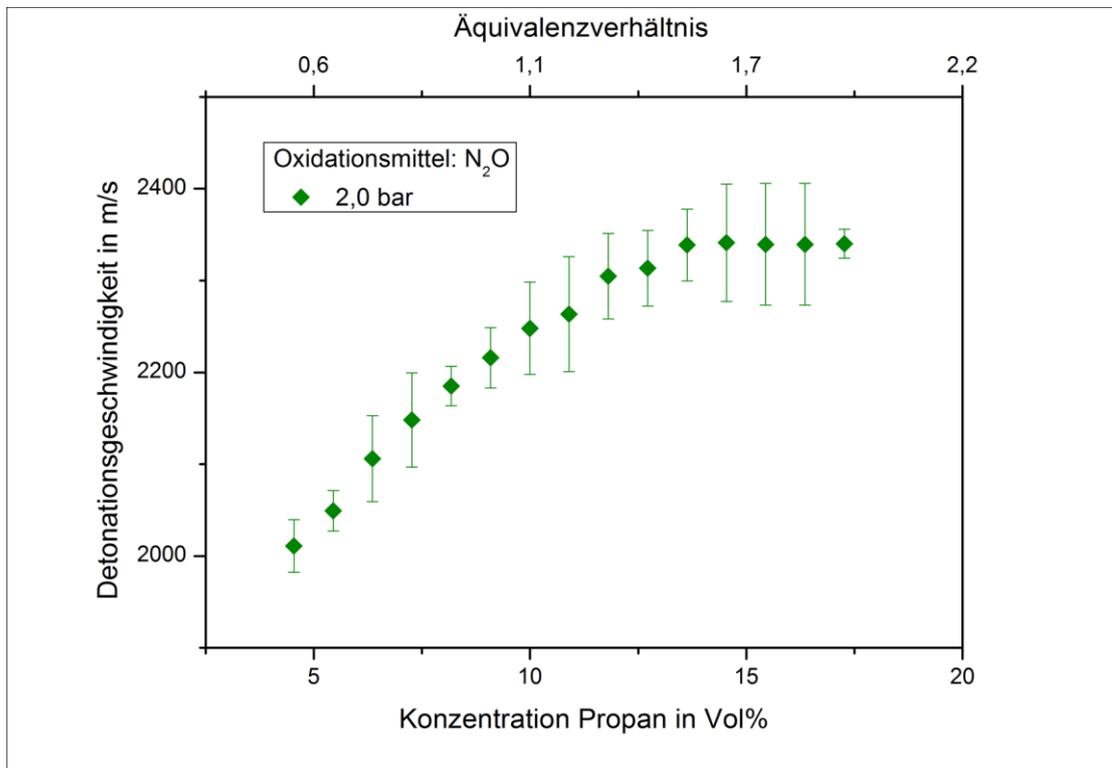


Abbildung 4.4 Mittlere Detonationsgeschwindigkeit und Standardabweichung beim Propan/Distickstoffmonoxid-Gemisch in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan bei einem Initialdruck von 2 bar

4.1.2 Stickstoffmonoxid

Bei der Verwendung des Oxidationsmittels Stickstoffmonoxid führt ebenfalls die Erhöhung des Ausgangsdruckes zu einer Steigerung der Detonationsgeschwindigkeit. In Abbildung 4.5 lässt sich der Unterschied der Detonationsgeschwindigkeiten bei einem Initialdruck von 1 bar und 2 bar für Ethan/Stickstoffmonoxid-Gemische erkennen. Die Versuche wurden ebenfalls bei einem reduzierten Ausgangsdruck von 0,5 bar durchgeführt. Allerdings konnten hierbei keine Detonationen oder Deflagrationen erzeugt und somit auch keine Detonationsgeschwindigkeiten oder Deflagrationsgeschwindigkeiten gemessen werden. Für die beiden übrigen Ausgangsdrücke wird die maximale Detonationsgeschwindigkeit bei einem Brennstoffanteil von 15 % erreicht, was einem Äquivalenzverhältnis von 1,2 entspricht. Bei einem Initialdruck von 1 bar wird eine maximale Detonationsgeschwindigkeit von 2300 m/s erreicht und bei einer Erhöhung auf 2 bar Ausgangsdruck eine maximale Detonationsgeschwindigkeit von 2430 m/s. Im Gegensatz zu den Versuchen mit Distickstoffmonoxid als Oxidationsmittel, können bei den Versuchen mit Stickstoffmonoxid Detonationsgrenzen ermittelt werden, bei deren Überschreitung die Detonation in eine Deflagration übergeht. Der Detonationsbereich bei einem Initialdruck von 1 bar erstreckt sich hierbei über eine Ethankonzentration von 8,75 Vol% bis 15 Vol%. Bei einem höheren Ausgangsdruck von 2 bar vergrößert sich dieser Bereich auf 6,25 Vol% bis 18,75 Vol%.

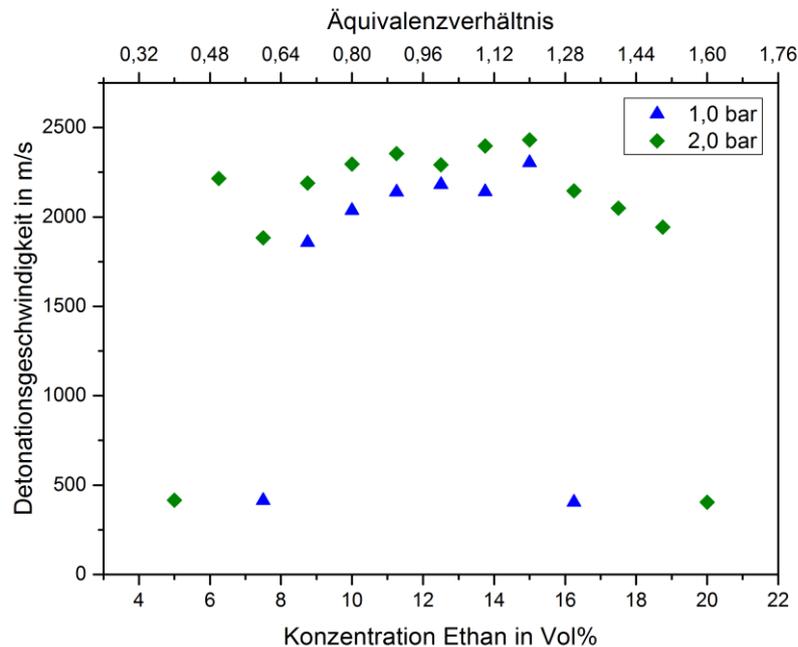


Abbildung 4.5 Detonationsgeschwindigkeiten von Ethan/Stickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Ethan und für verschiedene Initialdrücke

Außerhalb der Detonationsbereiche konnten Deflagrationsgeschwindigkeiten zwischen 404 m/s und 416 m/s gemessen werden, die somit deutlich langsamer sind als die ermittelten

Detonationsgeschwindigkeiten, aber schneller als die Schallgeschwindigkeit im unverbrannten Gas (für Stickstoffmonoxid: $c=324 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [37]). Hierbei handelt es sich vermutlich um eine ‚schnelle‘ Deflagration, wie sie bereits Knystautas et al. bei ihren Untersuchungen von Benzen/Luft-Gemischen beobachtet haben und bei der sich die Deflagrationsgeschwindigkeit in der Nähe der Schallgeschwindigkeit des verbrannten Gases befindet, welche deutlich höher als die des unverbrannten Gases ist [38]. Das Propan/Stickstoffmonoxid-Gemisch (Abbildung 4.6) weist stärkere Schwankungen in Bezug auf die Detonationsgeschwindigkeit auf als das Ethan/Stickstoffmonoxid-Gemisch. Dies zeigt sich besonders deutlich im überstöchiometrischen Bereich bei 1 bar Ausgangsdruck. So weist beispielsweise der Maximalwert bei $\varphi=1,1$ eine Standardabweichung von 894 m/s für die gemittelten Detonationsgeschwindigkeitswerte der drei Teilabschnitte der Messstrecke auf. Ein deutliches Maximum der Detonationsgeschwindigkeit kann daher für dieses Stoffgemisch nicht mit der relativ kurzen Messstrecke bestimmt werden. Das Propan/Stickstoffmonoxid-Gemisch weist ebenfalls Detonationsgrenzen im über- und unterstöchiometrischen Bereich auf. Auch hierbei ist der Detonationsbereich bei einem Initialdruck von 2 bar größer als bei einem Ausgangsdruck von 1 bar. Der Detonationsbereich bei erhöhtem Druck erstreckt sich über eine Propankonzentration von 4,55 Vol% bis 14,54 Vol%, während der Detonationsbereich bei einem Ausgangsdruck von 1 bar zwischen 5,45 Vol% und 11,82 Vol% liegt. Die Geschwindigkeiten der ‚schnellen‘ Deflagration an den Grenzen zum jeweiligen Detonationsbereich liegen dabei zwischen 396 und 435 m/s.

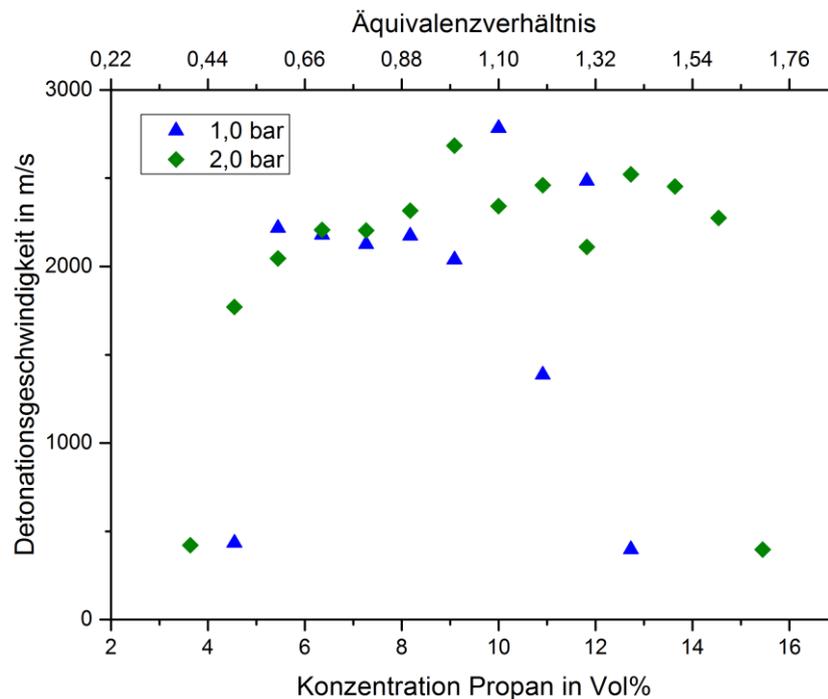


Abbildung 4.6 Detonationsgeschwindigkeiten von Propan/Stickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan und für verschiedene Initialdrücke

4.2 Detonationsdruck

Der ermittelte Detonationsdruck ist der höchste gemessene Wert. Es handelt sich dabei um einen dynamischen Druck, der nur für Bruchteile einer Mikrosekunde am Sensor anliegt. Bei den Untersuchungen werden maximale Detonationsdrücke bis zum 30-Fachen des Ausgangsdruckes gemessen (Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisch, 2 bar Initialdruck), was im Bereich der gemessenen maximalen Detonationsdrücke von Thomas [39] und Hirsch et al. [19] liegt. Thomas gibt für ein Ethylen/Sauerstoff-Gemisch einen maximalen Detonationsdruck von über 30 bar an (Initialbedingungen: $T=293\text{ K}$, $p_0=1\text{ bar}$), was aufgrund des höheren Oxidationspotentials von Sauerstoff, im Vergleich zu Distickstoffmonoxid, erwartet werden kann. Die folgenden beiden Abschnitte beinhalten jeweils getrennt die Ergebnisse für die Untersuchungen mit den Oxidationsmitteln Distickstoffmonoxid und Stickstoffmonoxid.

4.2.1 Distickstoffmonoxid

Der Detonationsdruck definierter Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemische ist als gemittelter Wert der vier Einzelmesswerte der piezoelektrischen Drucksensoren in Abbildung 4.7 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich der maximale Detonationsdruck im überstöchiometrischen Bereich ergibt. Das Maximum liegt je nach Ausgangsdruck im Konzentrationsbereich von 17,5 Vol% bis 20 Vol% Ethan im Gemisch, das einem Äquivalenzverhältnis zwischen 1,4 und 1,6 entspricht.

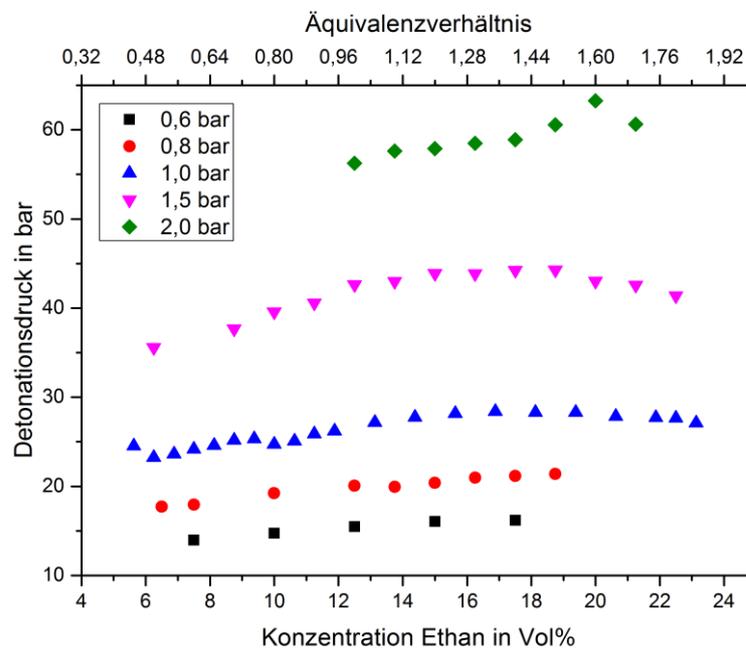


Abbildung 4.7 Detonationsdrücke von Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Ethan und für verschiedene Initialdrücke

Es ist zu erkennen, dass der Detonationsdruck eine Größe ist, die sehr stark vom Initialdruck abhängig ist. Bei einem Ausgangsdruck von 1 bar beträgt der maximale Detonationsdruck 28 bar ($\varphi=1,4$). Erhöht man bei der gleichen Konzentration den Initialdruck auf den doppelten Wert von 2 bar, so erreicht der Detonationsdruck einen Wert von 58 bar. Eine Erhöhung des Ausgangsdruckes von 0,8 bar auf 1,5 bar führt zu einer Erhöhung des maximalen Detonationsdruckes von 21 bar auf 44 bar ($\varphi=1,5$). Eine Verdopplung des Ausgangsdruckes führt somit ungefähr zu einer Verdopplung des Detonationsdruckes. Eine stärkere Konzentrationsabhängigkeit des Detonationsdruckes zeigt sich erst bei höheren Initialdrücken. Die Ergebnisse der Detonationsdruckbestimmung für Propan/Distickstoffmonoxid-Gemische zeigt Abbildung 4.8. Das Maximum des Detonationsdruckes befindet sich auch für dieses Stoffgemisch im überstöchiometrischen Bereich. Für alle drei eingestellten Initialdrücke findet man das Maximum des Detonationsdruckes bei einer Propankonzentration zwischen 13,63 Vol% und 15,45 Vol% beziehungsweise $\varphi=1,5$ und $\varphi=1,7$. Der Konzentrationsbereich, bei dem sich der maximale Detonationsdruck ergibt, liegt somit geringfügig höher als beim Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisch. Bei einem Initialdruck von 1 bar erreicht der maximale Detonationsdruck mit 29 bar nahezu den gleichen Wert wie beim Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisch. Das Maximum bildet sich allerdings hier erst bei einem höheren Äquivalenzverhältnis von $\varphi=1,6$ heraus. Durch eine Verdopplung des Ausgangsdruckes auf 2 bar ergibt sich bei der gleichen Gemischzusammensetzung ein Detonationsdruck von 60 bar. Eine Erhöhung des Initialdruckes um den Faktor 2 führt somit auch beim Propan/Distickstoffmonoxid-Gemisch zu einer Verdopplung des Detonationsdruckes. Deutlich zeigt sich auch eine geringe Konzentrationsabhängigkeit des Detonationsdruckes bei niedrigen Initialdrücken und eine stärkere Konzentrationsabhängigkeit des Detonationsdruckes bei erhöhten Ausgangsdrücken.

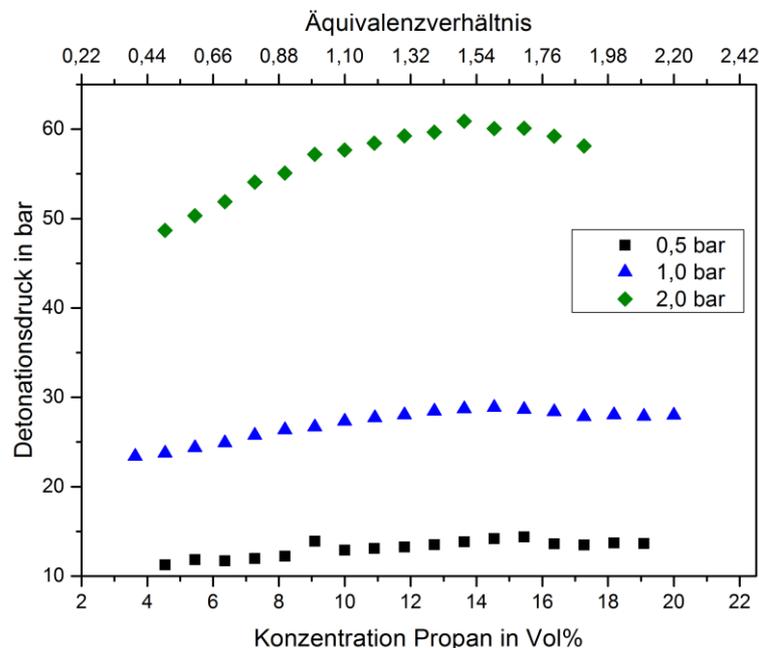


Abbildung 4.8 Detonationsdrücke von Propan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan und für verschiedene Initialdrücke

In Abbildung 4.9 ist beispielhaft der Druckverlauf einer Detonation dargestellt, wie er von einem piezoelektrischen Drucksensor aufgenommen wird. Es handelt sich um ein Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisch bei einem Initialdruck von 1,5 bar und einem Äquivalenzverhältnis von 1,2. Erreicht die Detonationsfront den Drucksensor, so wird dies durch einen plötzlichen Druckanstieg auf einen Maximalwert (Peak) angezeigt. Dieser Wert ist der Detonationsdruck. Nachdem die Detonationsfront den Sensor passiert hat, fällt der Druck wieder. Durch die beiden verschlossenen Enden der Versuchsstrecke wird die Schockwelle im Detonationskanale reflektiert und es kommt zu Drucksprüngen am Drucksensor. Die roten Pfeile in Abbildung 4.9 zeigen die durch die reflektierten Detonationswellen erzeugten Drucksprünge.

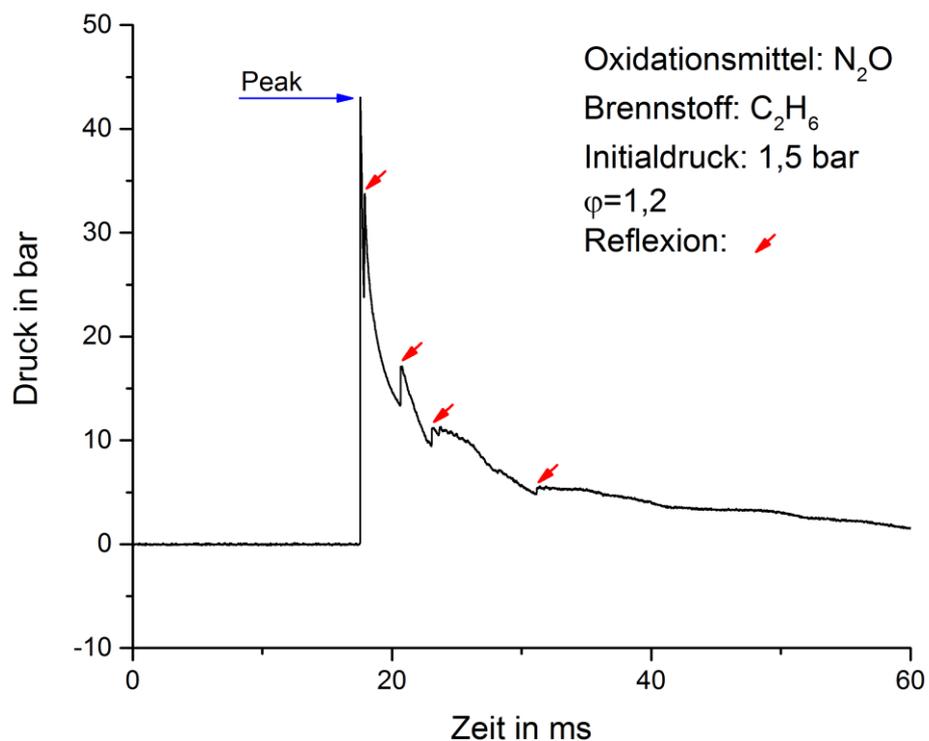


Abbildung 4.9 Druckverlauf der Detonation eines Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisches für einen Initialdruck von 1,5 bar

4.2.2 Stickstoffmonoxid

Der Detonationsdruck konnte für die Brennstoffe Ethan und Propan bei einem Initialdruck von 1 bar und 2 bar ermittelt werden. Die Detonationsversuche bei einem verringerten Ausgangsdruck von 0,5 bar erzeugten keine Detonationen. In Abbildung 4.10 sind die

Ergebnisse der Versuche mit Ethan/Stickstoffmonoxid-Gemischen zusammengefasst. Die Messergebnisse zeigen über den untersuchten Detonationsbereich eine geringe Abhängigkeit des Detonationsdruckes von der Konzentration an Ethan. Ein deutliches Maximum des Detonationsdruckes lässt sich als konzentrationsabhängiger Wert somit nicht ermitteln. Der Mittelwert des Detonationsdrucks beträgt bei einem Ausgangsdruck von 1 bar rund 21 bar (± 3 bar). Bei einem Ausgangsdruck von 2 bar beträgt dieser Wert 39 bar (± 3 bar). Es stellt sich somit bei einer Verdopplung des Ausgangsdruckes ein nahezu doppelter Detonationsdruck ein. Bei den Versuchen in den Konzentrationsbereichen, welche außerhalb des Detonationsbereiches liegen, konnten ‚schnelle‘ Deflagrationen beobachtet werden.

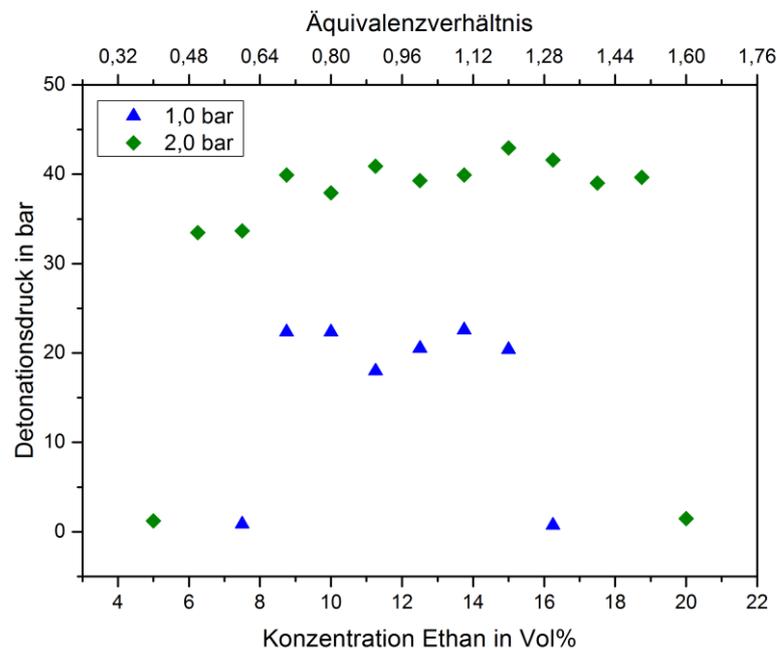


Abbildung 4.10 Detonationsdrücke von Ethan/Stickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Ethan und für verschiedene Initialdrücke

Die Abbildung 4.11 zeigt die Detonationsdrücke für unterschiedliche Konzentrationen von Propan/Stickstoffmonoxid-Gemischen bei unterschiedlichem Ausgangsdruck. Ähnlich den Ergebnissen für Ethan / Stickstoffmonoxid, schwanken auch hier die Messwerte stärker als bei den Gemischen mit Distickstoffmonoxid als Oxidationsmittel, sodass kein eindeutiger maximaler Detonationsdruck ermittelt werden kann. Im Mittel beträgt der Detonationsdruck 20 bar (± 4 bar) bei einem Ausgangsdruck von 1 bar. Bei einem erhöhten Initialdruck von 2 bar beträgt der Detonationsdruck durchschnittlich 37 bar (± 4 bar) in einem Konzentrationsbereich von 4,55 Vol% bis 10 Vol% Propan. Der Detonationsdruck steigt bei weiterer Erhöhung der Propankonzentration sprunghaft auf einen Wert von durchschnittlich 55 bar (± 3 bar, maximal 58 bar bei $\varphi=1,6$) an. Dieser Konzentrationsbereich ($1,2 \leq \varphi \leq 1,6$)

ist bei einem Initialdruck von 2 bar durch eine Vorkomprimierung des Propan/Stickstoffmonoxid-Gemisches gekennzeichnet. Vor dem Einsetzen der Detonation kommt es zu einer Deflagration, die durch einen Druckanstieg des Initialdruckes an den Drucksensoren nachweisbar ist. Den Prozess einer möglichen Vorkomprimierung des unverbrannten Gases stellen bereits Hirsch et al. [19] in ihrem Bericht zu den „Löschgrenzen bei erhöhten Drücken und Temperaturen“ fest. Dabei kommt es für ein Ethan/Sauerstoff-Gemisch unterhalb der oberen Detonationsgrenze ebenfalls zu einem plötzlichen Anstieg des Detonationsdruckes. Bei einer weiteren Erhöhung der Konzentration auf $\varphi=1,7$ wird offensichtlich die obere Detonationsgrenze erreicht, sodass die Flammenausbreitung als eine ‚schnelle‘ Deflagration erfolgt.

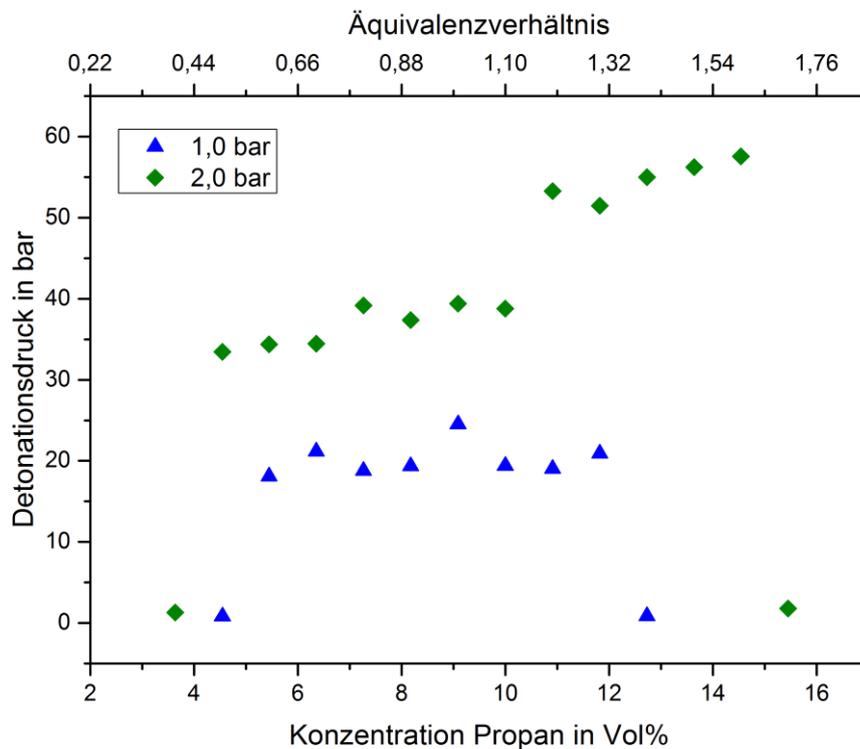


Abbildung 4.11 Detonationsdrücke von Propan/Stickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan und für verschiedene Initialdrücke

4.3 Detonationszellbreite

Das Abbilden von Detonationszellen und das Auswerten von Detonationszellmustern sind nur in aufwendigen und komplizierten Prozeduren mit Hilfe berußter Oberflächen möglich. Versuche, Detonationszellmuster adäquat auf andere Weise darzustellen, so z.B. in

Vorversuchen mit Hilfe druckempfindlicher Folien oder Magnesiumoxidbeschichtungen, schlugen fehl oder waren zu ungenau, sodass das Verfahren mit Hilfe einer Rußschicht als einzig praktikables Verfahren gewählt wurde. In Vorversuchen wurde zunächst überprüft, ob sich mit der Versuchsapparatur vergleichbare Detonationszellbreiten erzeugen lassen, wie mit einer Vorgängerversion der Versuchsapparatur der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig, mit der Detonationszellbreiten unter der Verwendung des Oxidationsmittels Sauerstoff gemessen wurden [4]. Hierzu wurden die Detonationszellbreiten von Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemischen unterschiedlicher Zusammensetzung mit beiden Apparaturen bestimmt. Wie in Abbildung 4.12 zu erkennen ist, stimmen die Detonationszellbreiten aus beiden Versuchsapparaturen für ansonsten gleiche Bedingungen ($p_0=1$ bar, Umgebungstemperatur) sehr gut überein.

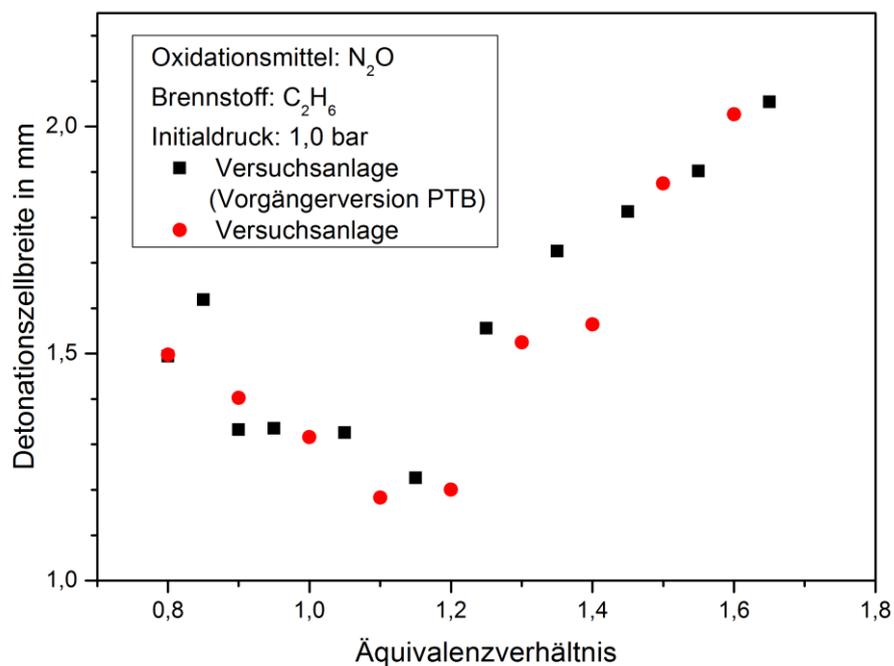


Abbildung 4.12 Einfluss der Versuchsanlage auf die Detonationszellbreite

Die kleinste Detonationszellbreite der Versuchsanlage ergibt sich bei einem Äquivalenzverhältnis von 1,1 und beträgt 1,18 mm. Die kleinste Detonationszellbreite der Vorgängerversion der Versuchsanlage beträgt 1,23 mm bei einem Äquivalenzverhältnis von 1,15. Die Differenz der ermittelten kleinsten Detonationszellbreiten beider Anlagen beträgt 0,05 mm. Die neu konzipierte Anlage ist somit für die durchgeführten Versuche geeignet.

Da die Auswertung der Detonationszellbreiten genauer und unproblematischer von planen Flächen erfolgen kann, im Vergleich zu gekrümmten Flächen, wurde in Vorversuchen

außerdem überprüft, ob es in den Modulen M-4 und M-6 (siehe Kapitel 3.2.1) zur Ausbildung unterschiedlicher Detonationszellbreiten kommt. Hierzu wurden in die Versuchsanlage beide Module eingebaut und beruht. Durch die Detonationen von Propan/Distickstoffmonoxid-Gemischen wurden dann die Detonationszellen bei unterschiedliche Propankonzentrationen für sonst gleiche Bedingungen ($p_0=2$ bar, Umgebungstemperatur) erzeugt und ihre Breite bestimmt (siehe Kapitel 3.6.2). Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.13 zusammengefasst und zeigen eine gute Übereinstimmung der Detonationszellbreite in beiden Kanalquerschnitten. Es konnte somit belegt werden, dass für die Versuche zur Bestimmung der Detonationszellbreite ausschließlich das Modul mit dem quadratischen Querschnitt genutzt werden kann, ohne eine nennenswerte Abweichung der Detonationszellbreite zu erhalten.

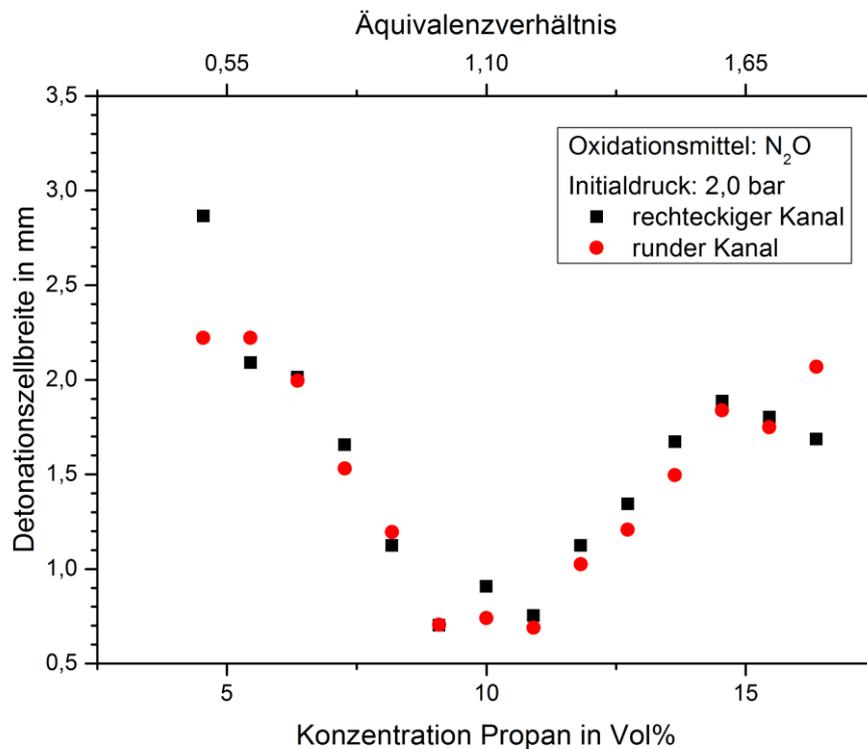


Abbildung 4.13 Detonationszellbreiten von Propan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan und in unterschiedlichen Kanalformen

Die Untersuchung des subjektiven Einflusses auf die Bestimmung der Detonationszellbreite bei der Auswertung von Detonationszellmustern wurde anhand der Rußschriebe aus einem Vorversuch für Propan/Distickstoffmonoxid-Detonationen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Vergleichsauswertung sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse konnte für den Bereich der kleinsten Detonationszellen ($0,7 \leq \varphi \leq 1,6$) festgestellt werden. Hierfür liegt die Abweichung der Kontrollauswertung für alle Detonationszellbreiten

unter 10 Prozent. Eine sehr gute Übereinstimmung der Auswertung zeigt sich für den leicht überstöchiometrischen Bereich ($\varphi=1,1$ und $\varphi=1,2$). Die Auswertungen beider Personen stimmen hier überein. In den stark unterstöchiometrischen und stark überstöchiometrischen Randbereichen hingegen weichen die Auswertungen stärker voneinander ab (maximal 24 Prozent). In diesen Bereichen ergeben sich, im Vergleich zur Umgebung des stöchiometrischen Verhältnisses, relativ große und somit weniger Detonationszellen. Die kleinere Anzahl an auswertbaren Detonationszellen führt so zu einer stärkeren Streuung der ermittelten Detonationszellbreiten.

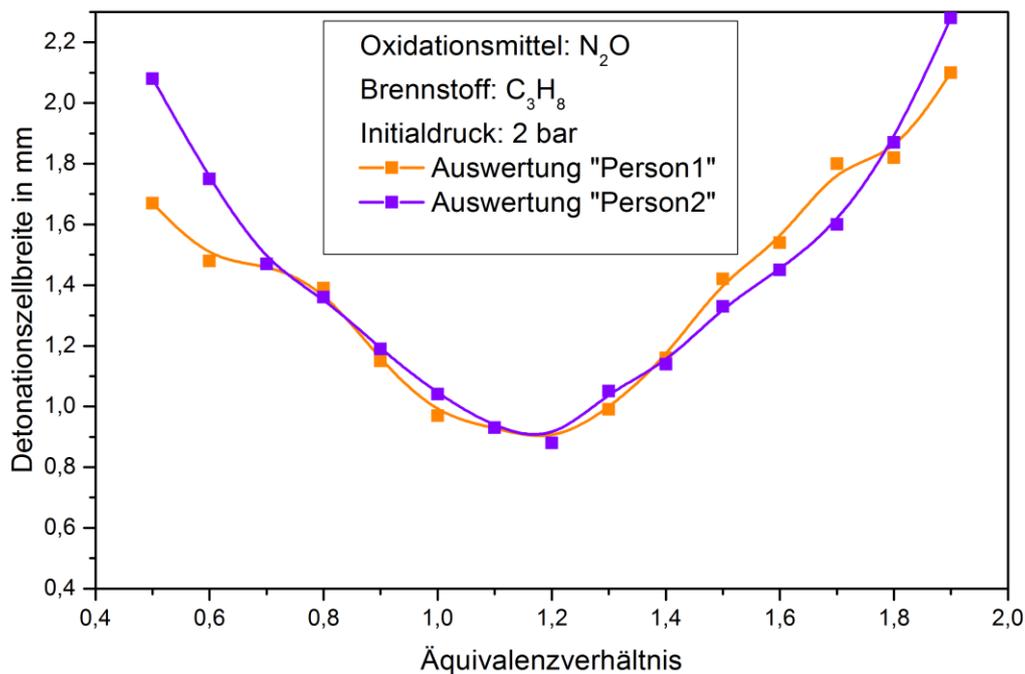


Abbildung 4.14 Abhängigkeit der Detonationszellbreite vom Äquivalenzverhältnis bei Auswertung durch zwei voneinander unabhängige Beobachter

4.3.1 Distickstoffmonoxid

Die Detonationszellmuster der unter der Verwendung des Oxidationsmittels Distickstoffmonoxid erzeugten Detonationen weisen im auswertbaren Bereich eine deutliche und gleichmäßige Struktur mit einer Vielzahl von Detonationszellen auf (siehe auch Abbildung 4.20, Bild a). Hierbei ist kein Unterschied beim Einsatz der Brenngase Ethan und Propan zu erkennen. In Abbildung 4.15 und Abbildung 4.16 sind alle gemessenen Detonationszellbreiten der Ethan / Distickstoffmonoxid- und Propan/Distickstoffmonoxid-Gemische bei

unterschiedlichem Initialdruck eingetragen. Es zeigt sich, dass sich für alle Ausgangsdrücke die kleinste Detonationszellbreite für eine Ethankonzentration im leicht überstöchiometrischen Bereich ($\varphi \approx 1,2$) ergibt. Diese Konzentration stimmt relativ gut überein mit den Ergebnissen von Bull et al. [5], bei denen ein ähnliches Gemisch - ein Propan/Luft-Gemisch - seine kleinsten Detonationzellen im leicht überstöchiometrischen Bereich von $\varphi = 1,3$ ausbildet. Es konnte nachgewiesen werden, dass es bei steigendem Initialdruck für diesen Bereich zur Ausbildung kleinerer Detonationszellen kommt. Die Detonationszellbreite ist stark von der Konzentration des detonationsfähigen Stoffgemisches abhängig. Die Bandbreite an Detonationszellbreiten ist hierbei für Ethan und Propan bei stark überstöchiometrischen und stark unterstöchiometrischen Stoffgemischen größer als in der Nähe der stöchiometrischen Zusammensetzung. Für ein Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisches ist dieser Zusammenhang in Abbildung 4.17 beispielhaft dargestellt. Wie im Diagramm aufgezeigt, ist auch die Anzahl der auswertbaren Detonationszellen in der Nähe der stöchiometrischen Zusammensetzung ($\varphi = 1,2$) erheblich größer als für davon stark abweichende Konzentrationen. Für ein Konzentrationsverhältnis von $\varphi = 1,2$ konnten insgesamt 35 Detonationszellen ausgewertet werden, wohingegen für die stark überstöchiometrische Konzentration von $\varphi = 1,8$ lediglich 9 auswertbare Detonationszellen zur Verfügung standen.

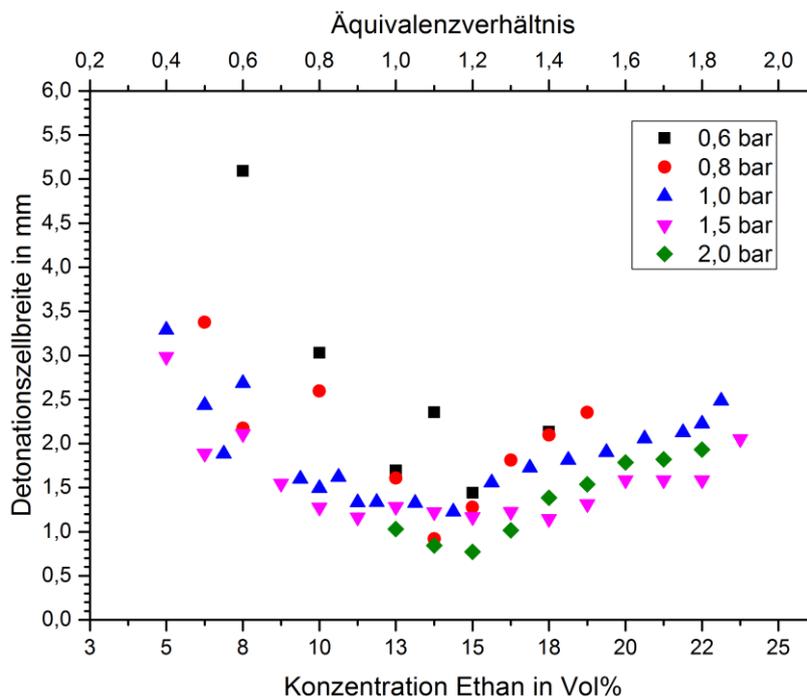


Abbildung 4.15 Detonationszellbreiten von Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Ethan und für verschiedene Initialdrücke

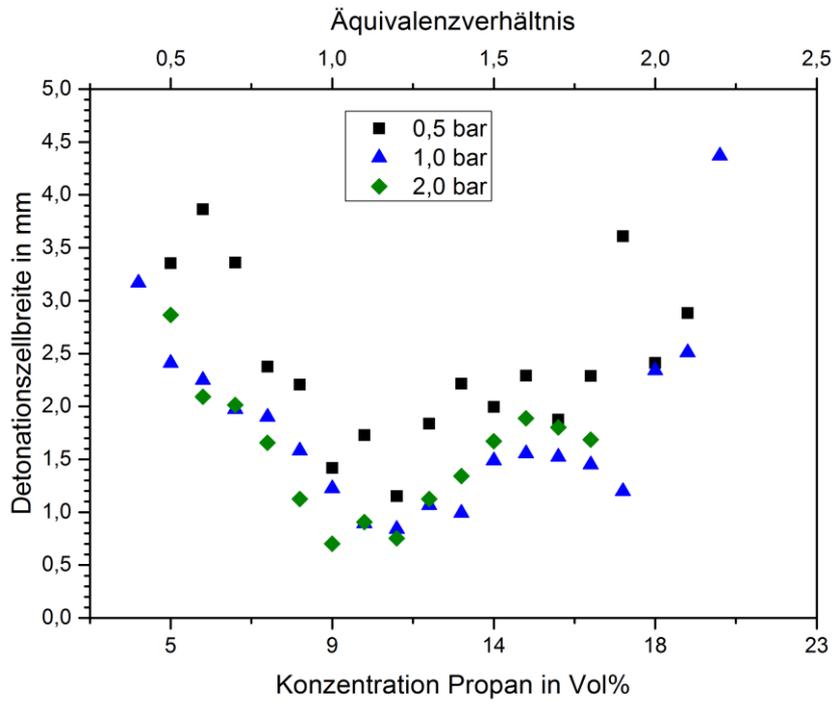


Abbildung 4.16 Detonationszellbreiten von Propan/Distickstoffmonoxid-Gemischen in Abhängigkeit vom Volumenanteil an Propan und für verschiedene Initialdrücke

Für die Propan/Distickstoffmonoxid-Detonationen bei 1 bar und 2 bar Ausgangsdruck traten in einem kleinen Bereich ab dem Äquivalenzverhältnis von 1,6 mit steigendem Brennstoffanteil kleiner werdende Detonationszellbreiten auf.

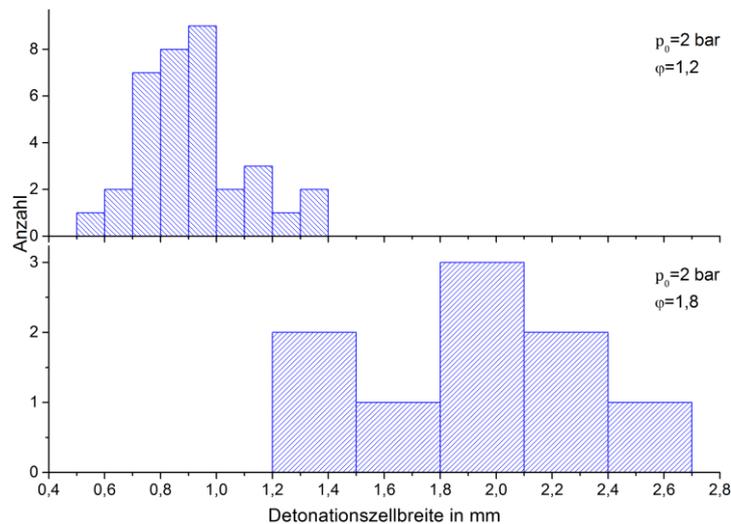


Abbildung 4.17 Konzentrationsabhängige Verteilung der Detonationszellbreite eines Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisches

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass dieser Befund auf der starken Streuung der Werte basiert, die sich aus der Abnahme der Anzahl der Detonationszellen für diesen stark überstöchiometrischen Bereich mit zunehmendem Brennstoffanteil ergibt. Auch die Detonationszellbreiten bei reduziertem Ausgangsdruck lassen, im Gegensatz zum erhöhten Ausgangsdruck und einem Ausgangsdruck von 1 bar, eine starke Schwankung der Werte über den gesamten Konzentrationsbereich erkennen. Dies gilt sowohl für die Ethan/Distickstoffmonoxid-, als auch für die Propan/Distickstoffmonoxid-Detonationen.

Der Einfluss des reduzierten Initialdrucks auf die Anzahl der auswertbaren Detonationszellen und die Verteilung ihrer Detonationszellbreite ist in Abbildung 4.18 am Beispiel der Ethan / Distickstoffmonoxid Detonation bei einem Äquivalenzverhältnis von $\varphi=1,2$ zu sehen. Ein Abweichen vom Äquivalenzverhältnis $\varphi=1,2$ führt zu einer geringeren Anzahl an auswertbaren Detonationszellen sowie zu einer Vergrößerung der Detonationszellbreite.

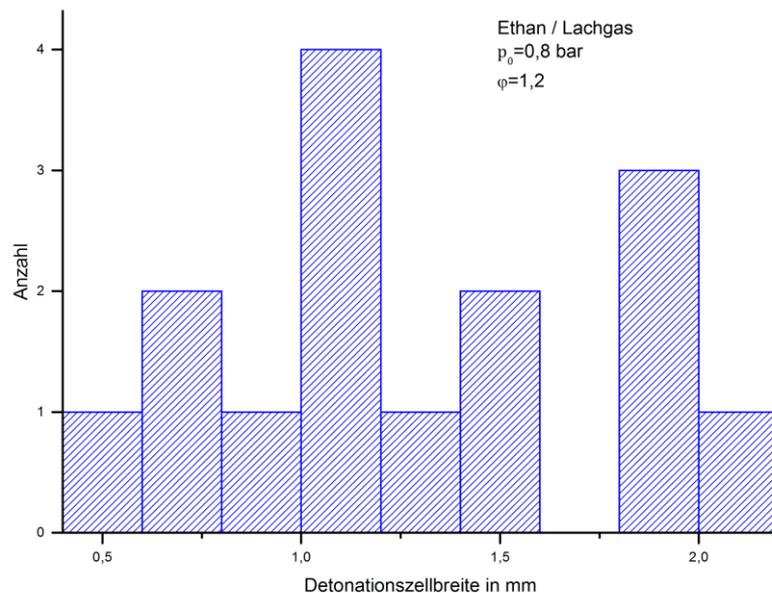


Abbildung 4.18 Verteilung der Detonationszellbreite bei verringertem Initialdruck

Tabelle 1 fasst die kleinsten Detonationszellbreiten und die daraus mit der ‚ $\lambda/3$ -Regel‘ berechneten kritische Durchmesser für Ethan/Distickstoffmonoxid- und Propan/Distickstoffmonoxid-Gemische in Abhängigkeit vom Initialdruck zusammen.

Tabelle 1 Detonationszellbreite und kritischer Durchmesser bei unterschiedlichen Initialdrücken für Ethan/Distickstoffmonoxid- und Propan/Distickstoffmonoxid-Gemische

Gemisch	Initialdruck in bar	kleinste Detonationszellbreite in mm	kritischer Durchmesser $D^* = \frac{\lambda}{\pi}$ in mm
Ethan / Distickstoffmonoxid	0,6	1,45	0,46
Ethan / Distickstoffmonoxid	0,8	1,29	0,41
Ethan / Distickstoffmonoxid	1,0	1,23	0,39
Ethan / Distickstoffmonoxid	1,5	1,16	0,37
Ethan / Distickstoffmonoxid	2,0	0,79	0,25
Propan / Distickstoffmonoxid	0,5	1,16	0,37
Propan / Distickstoffmonoxid	1,0	0,85	0,27
Propan / Distickstoffmonoxid	2,0	0,75	0,24

4.3.2 Stickstoffmonoxid

Die Detonationszelmuster, welche durch die Detonation eines Stoffgemisches mit Stickstoffmonoxid als Oxidationsmittel erzeugt werden, unterscheiden sich signifikant von solchen, die sich unter der Verwendung von Distickstoffmonoxid generieren. Während sich bei Distickstoffmonoxid relativ regelmäßige Detonationszellverbände zeigen, ergibt sich bei Stickstoffmonoxid eine eher unregelmäßige Detonationszellanordnung (siehe Abbildung 4.20, Bild b). Dies gilt sowohl für die Verwendung von Ethan, als auch beim Einsatz von Propan. Auswertbare Detonationszellen können hierbei allerdings nur bei einem leicht erhöhten Initialdruck von 2 bar sichtbar gemacht werden. Bei den Versuchen mit einem Initialdruck von 0,5 bar konnten bei beiden Brenngasen keine Detonationen erzeugt werden. Dabei war es auch nicht möglich, bei den untersuchten Konzentrationen eine Deflagration zu erzeugen. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass der Radius des Zündgefäßes im Bereich des Löschabstandes lag, was das Erzeugen einer Deflagration/Detonation für die betreffenden Versuchsparameter verhinderte. Bei den Versuchen bei einem Initialdruck von 1 bar konnten zwar zuverlässig Detonationen erzeugt werden, allerdings ergibt sich für diesen Ausgangsdruck kein auswertbares Detonationszelmuster auf der beruhten Oberfläche. Diese bleibt hierbei von der Detonation meist relativ unberührt oder erfährt in seltenen Fällen eine gleichmäßige eher teilweise Abtragung der Rußschicht. In den bei einem Ausgangsdruck von 2 bar entstehenden Rußschrieben von Ethan- und Propan-Gemischen werden nur sehr wenige auswertbare Detonationszellen gebildet, die in den meisten Fällen einzelnstehend sind und nicht in größeren zusammenhängenden Zellverbänden auftreten, wie dies bei den Versuchen mit Distickstoffmonoxid beobachtet werden konnte. Die Detonationszellbreiten für die Experimente mit einem Initialdruck von 2 bar sind in Abbildung 4.19 dargestellt. Die kleinsten Detonationszellen wurden für beide Brenngase im leicht überstöchiometrischen Bereich von $\varphi=1,2$ ermittelt. Ethan besitzt eine kleinere Detonationszellbreite als Propan.

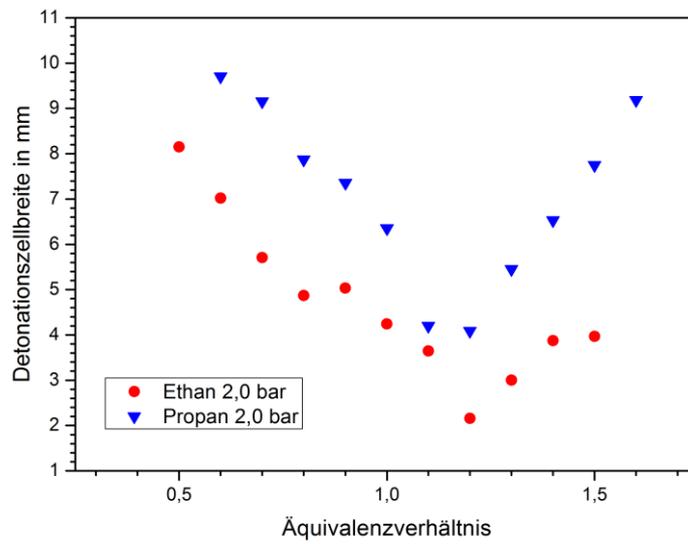


Abbildung 4.19 Detonationszellbreite von Gemischen mit Stickstoffmonoxid

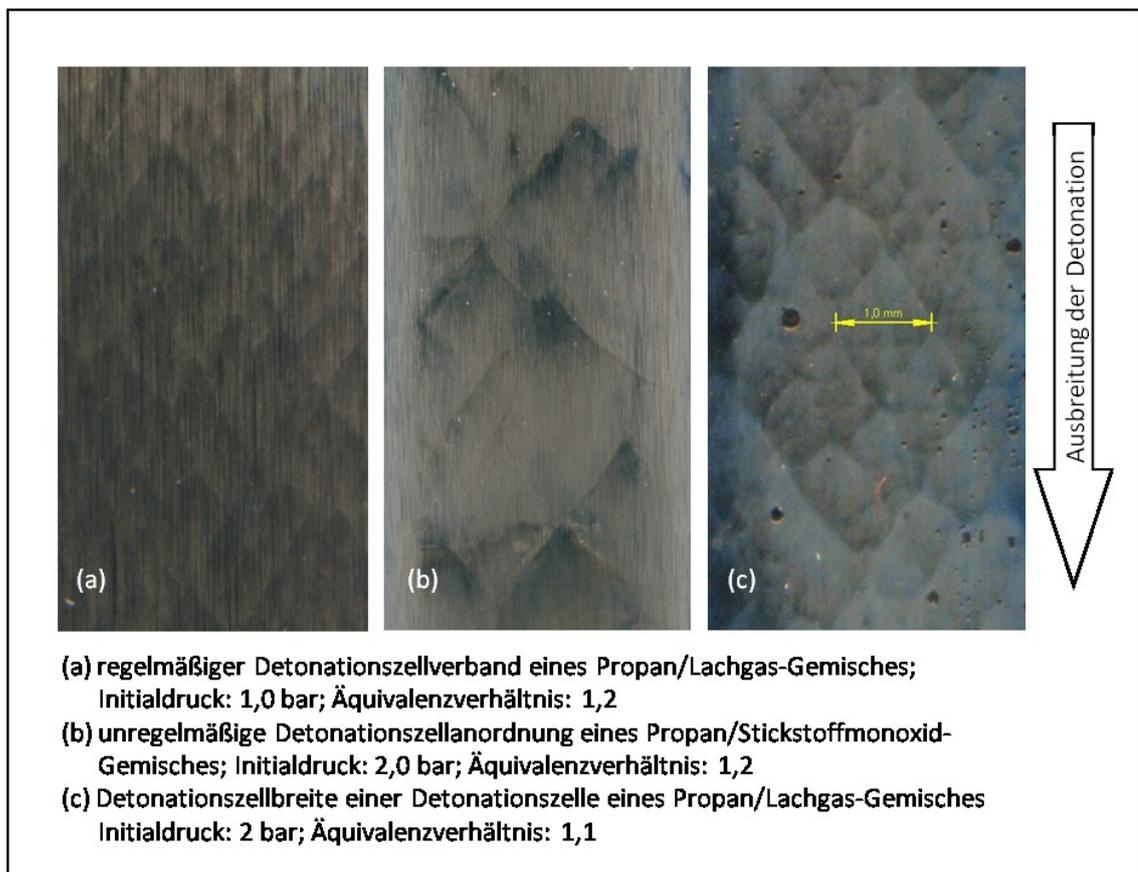


Abbildung 4.20 Rußbild von Detonationszellmustern

Tabelle 2 fasst die kleinsten Detonationszellbreiten und die daraus mit der ‚ $\lambda/3$ -Regel‘ berechneten kritischen Durchmesser für Ethan/Stickstoffmonoxid- und Propan/Stickstoffmonoxid-Gemische, in Abhängigkeit vom Initialdruck, zusammen. Eine Ermittlung des kritischen Durchmessers ist bei Initialdrücken von 0,5 bar und 1,0 bar für die betreffenden Gemische nicht möglich, da bei diesen Ausgangsdrücken keine Detonationszellbreiten bestimmt werden können.

Tabelle 2 Detonationszellbreite und kritischer Durchmesser bei unterschiedlichen Initialdrücken für Ethan / Stickstoffmonoxid- und Propan/Stickstoffmonoxid-Gemische

Gemisch	Initialdruck in bar	kleinste Detonationszellbreite in mm	kritischer Durchmesser $D^* = \frac{\lambda}{\pi}$ in mm
Ethan / NO	0,5	nicht bestimmbar	-----
Ethan / NO	1,0	nicht bestimmbar	-----
Ethan / NO	2,0	2,20	0,70
Propan / NO	0,5	nicht bestimmbar	-----
Propan / NO	1,0	nicht bestimmbar	-----
Propan / NO	2,0	4,30	1,37

4.4 Kapillarversuche

Die Kapillarversuche wurden durchgeführt auf Grundlage der bei der Detonationsparameterbestimmung erhaltenen Werte für die kleinste Detonationszellbreite und der entsprechenden Konzentration des jeweiligen Brennstoff/Oxidationsmittel-Gemisches. Das Detonationsverhalten der untersuchten Brennstoff/Oxidationsmittel-Gemische lässt für die verwendeten Kapillararten Edelstahl 1.4301 und Edelstahl 1.4571 keine Materialabhängigkeit des Durchschlagverhaltens der Detonation erkennen. Ein Detonationsdurchschlag erfolgte bei beiden Materialien ab dem gleichen Kapillardurchmesser für die jeweiligen Gemische und Initialdrücke. Beim Vergleich des Durchschlagverhaltens bei Edelstahlkapillaren und KPG-Kapillaren konnte allenfalls eine geringe Abweichung festgestellt werden. Für ein Stoffgemisch aus Ethan und Stickstoffmonoxid konnte, bei einem Äquivalenzverhältnis von $\varphi=1,2$ und einem Ausgangsdruck von 2 bar, für die Edelstahlkapillaren kein Detonationsdurchschlag bei einem Kapillarinnendurchmesser von 1 mm nachgewiesen werden (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3 Ergebnisse der Detonationsversuche bei eingebautem Kapillarmodul

Brennstoff	Ox-mittel	Init.-Druck in bar	D* in mm	KPG-Kapillare ø in mm						Edelstahl gegläht ø in mm			Edelstahl zughart ø in mm			
				0,15	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	0,24	0,51	1	0,22	0,5	1
C ₂ H ₆	N ₂ O	0,6	0,46	1000		1000										
		0,8	0,41	1000												
		1	0,39	1000												
		1,5	0,37	100												
		2	0,25	100												
	NO	1	---	100		100	400									
	NO	2	0,7	100		1000										
C ₃ H ₈	N ₂ O	0,5	0,37	1000												
		1	0,27	1000												
		2	0,24	1000												
	NO	1	---	100		300										
		NO	2	1,37	1000		1000	1000								

- sicherer Durchmesser (Kapillarversuch)
- Lösung in Kapillare nach xxxx mm
- Detonationsdurchschlag
- D*** kritischer Rohrdurchmesser (berechnet)

Die KPG-Kapillare lässt unter den gleichen Versuchsbedingungen jedoch einen Detonationsdurchschlag zu. Ursächlich hierfür scheint die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit der Kapillarmaterialien zu sein. Laut der Werkstoffdatenblätter der Hersteller, liegen die Wärmeleitfähigkeiten bei 20 °C für die beiden Edelstahlsorten bei $15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{10}$ und das KPG-Material bei $1,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{11}$. Aufgrund des relativ großen Verhältnisses von Oberfläche und Volumen im Inneren der Kapillare wirkt somit die erhöhte Wärmeleitfähigkeit der Edelstahlkapillaren durch ihren Energieentzug unterdrückend auf die Detonationsausbreitung. Die Detonationsausbreitung in einer KPG-Kapillare ist, aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit bei sonst gleichen Bedingungen, noch bei kleineren Kapillardurchmessern möglich. Die Ergebnisse der Versuche werden getrennt nach den Oxidationsmitteln Distickstoffmonoxid und Stickstoffmonoxid in den beiden folgenden Abschnitten dargestellt.

4.4.1 Distickstoffmonoxid

Die Untersuchung des Detonationsverhaltens der Brennstoff/Distickstoffmonoxid-Gemische ergab für die beiden Brenngase Ethan und Propan ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Initialdruckabhängigkeit des Durchschlagverhaltens. Beide Stoffe erreichen im Gemisch mit Distickstoffmonoxid bei zunehmendem Ausgangsdruck einen kleiner werdenden Kapillardurchmesser im Bezug auf einen Detonationsdurchschlage durch eine Kapillare. Der

¹⁰ DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GmbH

¹¹ DURAN GROUP GmbH

Durchmesser für eine Löschung der Detonation in der Kapillare und der gegen Detonationsdurchschlag sichere Durchmesser einer Kapillare werden ebenfalls mit zunehmendem Ausgangsdruck kleiner. Der Kapillardurchmesserbereich für die sichere Löschung einer Detonation in der Kapillare verengt sich mit zunehmendem Ausgangsdruck. Erstreckt er sich bei einem Initialdruck von 0,6 bar noch über zwei untersuchte Kapillardurchmesser (0,4 mm und 0,6 mm) mit einer jeweiligen Eindringtiefe von 1000 mm, so gilt er bei einem Ausgangsdruck von 2 bar nur noch für einen Kapillardurchmesser (0,2 mm) mit einer Eindringtiefe von 100 mm. Der Bereich des Übergangs von einem sicheren Durchmesser zu einem Durchmesser, bei dem mit einem Detonationsdurchschlag gerechnet werden muss, wird somit kleiner.

Die Abschätzung des kritischen Durchmessers D^* mit Hilfe der Lambda-Drittel-Regel ist für das untersuchte Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisch in Abbildung 4.21 eingezeichnet. Zur Veranschaulichung ist eine B-Spline-Kurve (gelb gestrichelte Linie) zu den Messwerten in das Diagramm eingefügt (B-Spline-Kurven werden auch zu den jeweiligen Messwerten in Abbildung 4.22, Abbildung 4.23 und Abbildung 4.24 dargestellt). Der Wert liegt im Durchschnitt 0,2 mm und im Maximalen 0,26 mm über dem mit Kapillarversuchen ermittelten sicheren Durchmesser einer Kapillare. Im Vergleich zur Löschung der Detonation in der Kapillare ergibt sich eine geringere Abweichung des kritischen Durchmessers. Hierbei liegt dieser im Mittel 0,08 mm über dem sicheren Durchmesser einer Kapillare und maximal 0,17 mm darüber.

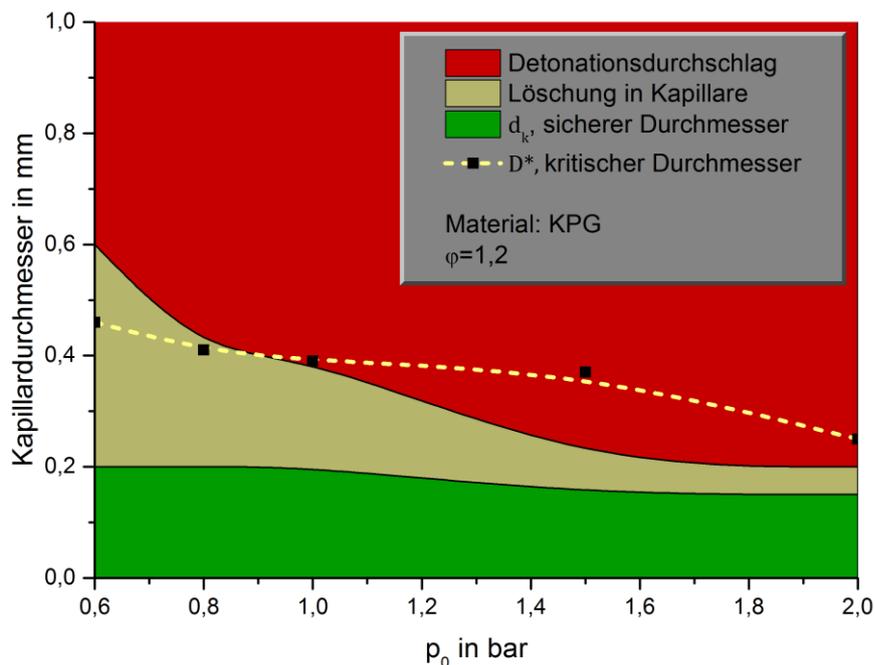


Abbildung 4.21 Detonationsverhalten und kritischer Durchmesser des Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisches in einer KPG-Kapillare

Im Bereich der erhöhten Drücke ($p_0=1,5$ bar) befindet sich der ermittelte kritische Durchmesser deutlich im Bereich des Detonationsdurchschlages. Es kann davon ausgegangen werden, dass hierbei die ungünstige Anordnung an untersuchbaren Kapillardurchmessern eine Rolle spielt. So standen bei den Tests keine Kapillaren mit einem Durchmesser zwischen 0,2 mm und 0,4 mm zur Verfügung. Die Untersuchung weiterer Kapillardurchmesser im Zwischenbereich kann somit zu einem größeren Kapillardurchmesser führen, bei dem ein Detonationsdurchschlag ausgeschlossen wird.

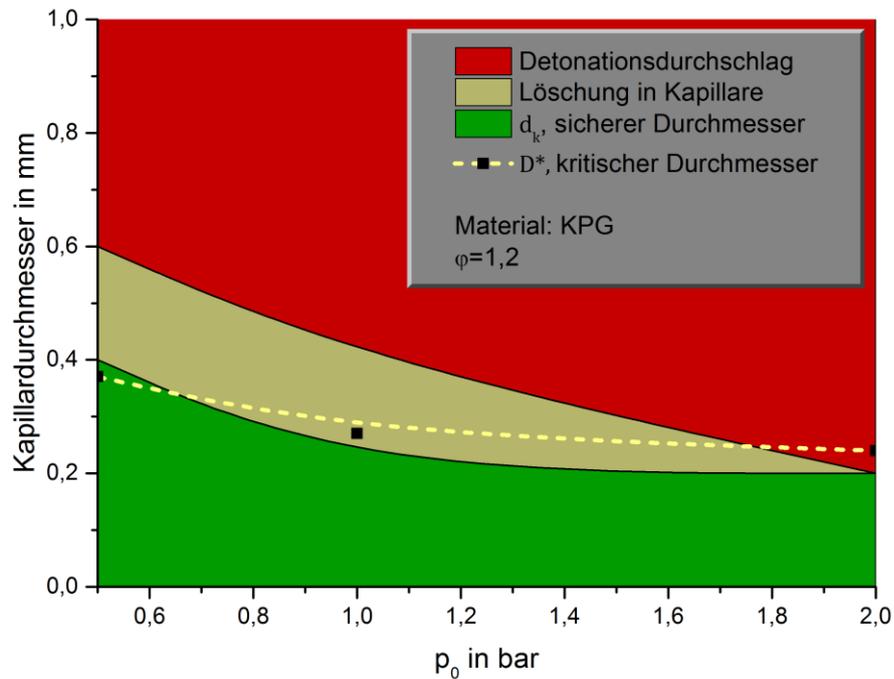


Abbildung 4.22 Detonationsverhalten und kritischer Durchmesser des Propan/Distickstoffmonoxid-Gemisches in einer KPG-Kapillare

Für das Propan/Distickstoffmonoxid-Gemisch zeigt die gestrichelt gelbe Linie in Abbildung 4.22 den über die Lambda-Drittel-Regel ermittelten kritischen Durchmesser. Dieser korreliert sehr gut mit dem gemessenen sicheren Durchmesser d_k für dieses Stoffgemisch. Der errechnete Wert liegt im Mittel 0,03 mm über dem sicheren Durchmesser und überschreitet ihn um maximal 0,07 mm. Der Kapillardurchmesserbereich für die sichere Löschung einer Detonation in der Kapillare verengt sich auch für dieses Stoffgemisch mit zunehmendem Ausgangsdruck. Liegt er bei einem Initialdruck von 0,5 bar noch über dem Kapillardurchmesser von 0,4 mm, so fällt dieser Übergangsbereich zwischen dem sicheren Durchmesser und dem Detonationsdurchschlag bei einem Ausgangsdruck von 2 bar weg. Der bestätigte sichere Kapillardurchmesser dieses Stoffgemisches von 0,2 mm geht somit bei einer Erhöhung des

Durchmessers auf 0,4 mm direkt in einen Kapillardurchmesser mit potentiellm Detonationsdurchschlag über.

Das Detonationsverhalten eines Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisches in Edelstahlkapillaren ist in Abbildung 4.23 dargestellt.

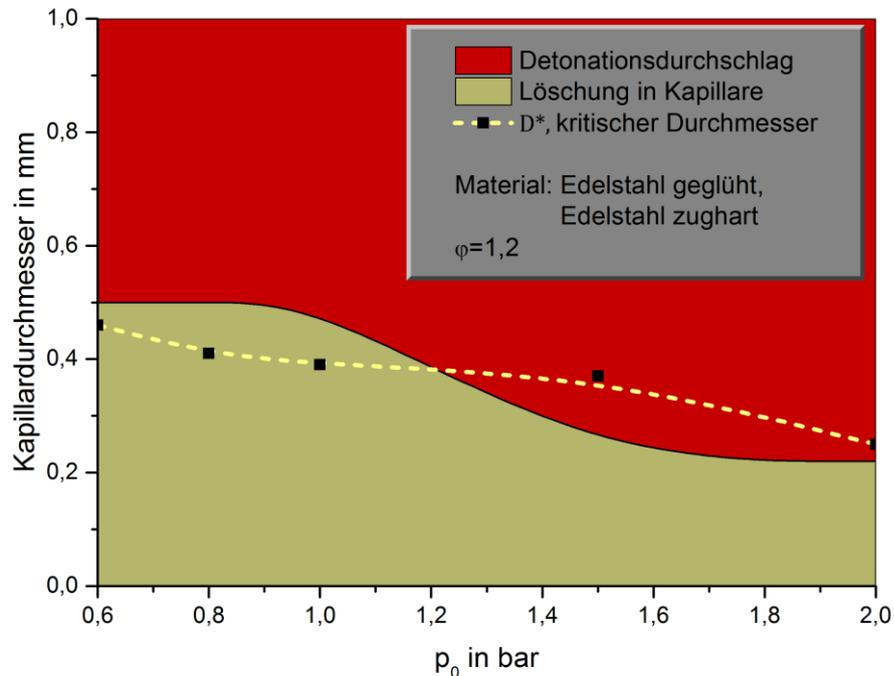


Abbildung 4.23 Detonationsverhalten und kritischer Durchmesser des Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisches in einer geglühten Edelstahlkapillare und einer zugharten Edelstahlkapillare

Da bei derartigen Kapillaren die Eindringtiefe einer Detonation in die Kapillare nicht mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitskamera bestimmt werden kann, ist eine Ermittlung des sicheren Durchmessers nicht möglich. Der kritische Durchmesser kann somit nur in Bezug auf eine Löschung der Detonation in der Kapillare beziehungsweise der sicheren Verhinderung eines Detonationsdurchschlages durch die Kapillare betrachtet werden. Wie auch bei den KPG-Kapillaren, verringert sich bei den Edelstahlkapillaren mit zunehmendem Initialdruck der Kapillardurchmesser ab dem es zu einem Detonationsdurchschlag kommt. Hierbei lässt sich für die untersuchten Kapillardurchmesser kein Unterschied bei der Verwendung der zugharten Edelstahlkapillare und der geglühten Edelstahlkapillare erkennen. Der kritische Durchmesser weicht im Durchschnitt 0,09 mm vom größten Kapillardurchmesser ab, bei dem ein Detonationsdurchschlag zuverlässig verhindert wird. Wie schon bei den KPG-Kapillaren, befindet sich der kritische Durchmesser für einen Ausgangsdruck von $p_0=1,5$ deutlich im Bereich des Detonationsdurchschlages. Es kann auch hier davon ausgegangen werden, dass die

ungünstige Anordnung an untersuchbaren Kapillardurchmessern dabei eine Rolle spielt. So standen bei den Tests keine Kapillaren zwischen einem Durchmesser von 0,24 mm und 0,5 mm zur Verfügung. Die Untersuchung weiterer Kapillardurchmesser im Zwischenbereich kann somit zu einem größeren Kapillardurchmesser führen, bei dem ein Detonationsdurchschlag ausgeschlossen wird.

Für ein Propan/Distickstoffmonoxid-Gemisch (Abbildung 4.24) zeigt sich bei einem erhöhten Ausgangsdruck ebenfalls eine Verkleinerung des kleinsten, für einen Detonationsdurchschlag gängigen, Kapillardurchmessers. Die Abweichung des kritischen Durchmessers vom größten Kapillardurchmesser, bei dem ein Detonationsdurchschlag durch die Kapillare sicher unterdrückt wird, beträgt hier 0,02 mm im Durchschnitt.

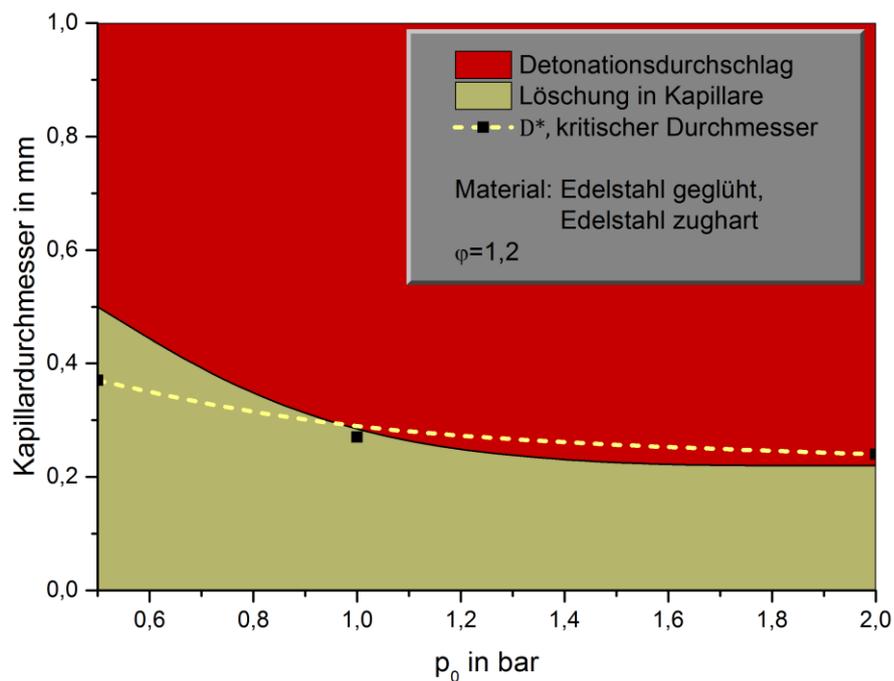


Abbildung 4.24 Detonationsverhalten und kritischer Durchmesser des Propan/Distickstoffmonoxid-Gemisches in einer geglühten Edelstahlkapillare und einer zugharten Edelstahlkapillare

4.4.2 Stickstoffmonoxid

Aufgrund der nicht erfolgenden Detonation bei Unterdruck (0,5 bar) lässt sich für Detonationen, die bei der Verwendung des Oxidationsmittels Stickstoffmonoxid stattfinden, lediglich auf zwei Ausgangsdrücke (1 bar und 2 bar) zurückgreifen. Für das Ethan/Stickstoffmonoxid-Gemisch lässt sich in Abbildung 4.25 erkennen, dass es auch hier bei einer Initialdruckerhöhung von 1 bar auf 2 bar zu einer Verkleinerung des

Kapillardurchmessers für den sicheren Durchmesser und den Durchmesser für eine sichere Löschung in der Kapillare kommt. Für den Initialdruck von 1bar konnten keine Detonationszellen sichtbar gemacht und die dazugehörigen Detonationszellbreiten ausgewertet werden. Der kritische Durchmesser kann somit ausschließlich bei einem Ausgangsdruck von 2 bar bestimmt werden. Es zeigt sich, dass die Abschätzung des kritischen Durchmessers bei 2 bar Ausgangsdruck (siehe Abbildung 4.25, gelber Messpunkt) im Bereich der sicheren Löschung der Detonation in der Kapillare liegt und somit gut geeignet scheint für eine Abschätzung des sicheren Durchmessers einer Kapillare. Der Kapillardurchmesserbereich der sicheren Löschung einer Detonation in der Kapillare bleibt bei einer Erhöhung des Ausgangsdruckes gleich. Dies bedeutet, dass es bei 1 bar und 2 bar Initialdruck jeweils zwei aufeinanderfolgende Kapillardurchmesser gibt bei denen es zu einer Löschung der Detonation in der Kapillare kommt. Beim erhöhten Initialdruck von 2 bar ist dies allerdings auch mit einer gesteigerten Eindringtiefe der Detonation in die Kapillare verbunden, was sich gegensätzlich zur Verwendung eines Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisches zeigt.

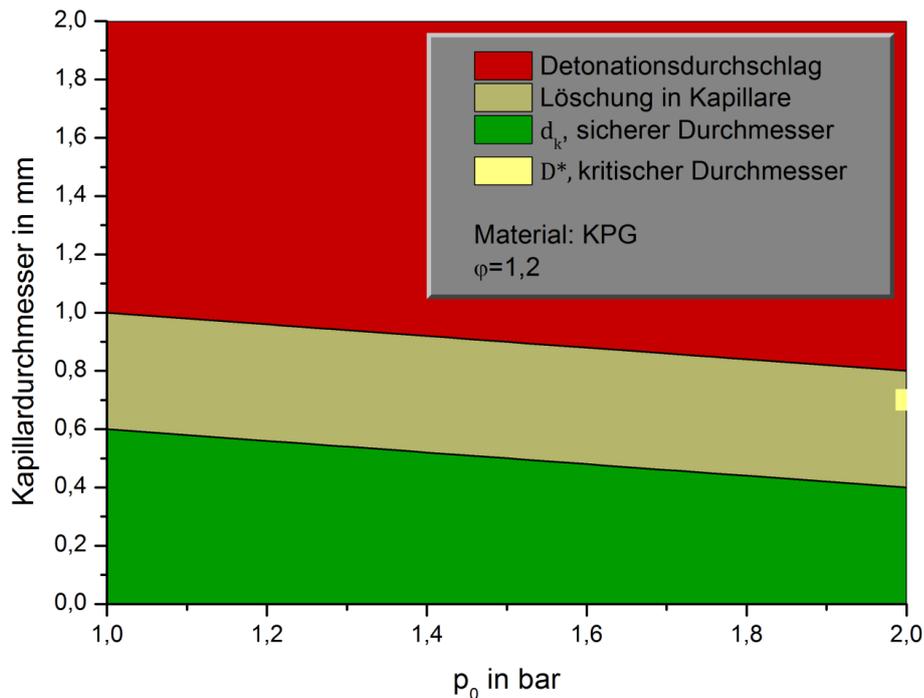


Abbildung 4.25 Detonationsverhalten und kritischer Durchmesser des Ethan/Stickstoffmonoxid-Gemisches in einer KPG-Kapillare

Die Ergebnisse der Versuche mit einem Propan/Stickstoffmonoxid-Gemisch sind in Abbildung 4.26 dargestellt. Bei einer Erhöhung des Initialdruckes von 1 bar auf 2 bar lässt sich, wie auch schon beim Ethan/Stickstoffmonoxid-Gemisch gezeigt, eine Verkleinerung des sicheren

Durchmessers nachweisen. Allerdings zeigt sich, dass der Kapillardurchmesser für eine sichere Löschung der Detonation in der Kapillare bei einer Initialdruckerhöhung von 1 bar auf 2 bar gleich bleibt. Allenfalls die Eindringtiefe der Detonation in die Kapillare erhöht sich um 700 mm (siehe Tabelle 3). Bei gleichzeitig kleiner werdendem sicheren Durchmesser vergrößert sich somit, konträr zu den Detonationen mit Distickstoffmonoxid als Oxidationsmittel, der Bereich der Löschung der Detonation in der Kapillare mit steigendem Ausgangsdruck. Dies zeigt sich sehr deutlich durch den breiten Bereich der Löschung der Detonation in der Kapillare bei einem Ausgangsdruck von 2 bar. Hier kommt es bei drei untersuchten Kapillardurchmessern (0,6 mm; 0,8 mm und 1,0 mm) zur sicheren Löschung der Detonation in der Kapillare. Dabei beträgt die Eindringtiefe der Detonation jeweils 1000 mm. Dieser Bereich ist somit ausgedehnter als das beim niedrigeren Initialdruck von 1 bar der Fall ist, bei dem lediglich bei zwei Kapillardurchmessern (0,8 mm und 1,0 mm) die sichere Löschung der Detonation in der Kapillare nachgewiesen werden konnte. Die Löschung der Detonation in der Kapillare findet über dies hinaus auch bei einer wesentlich geringeren Eindringtiefe statt, als dies der Fall bei einem erhöhten Initialdruck von 2 bar ist.

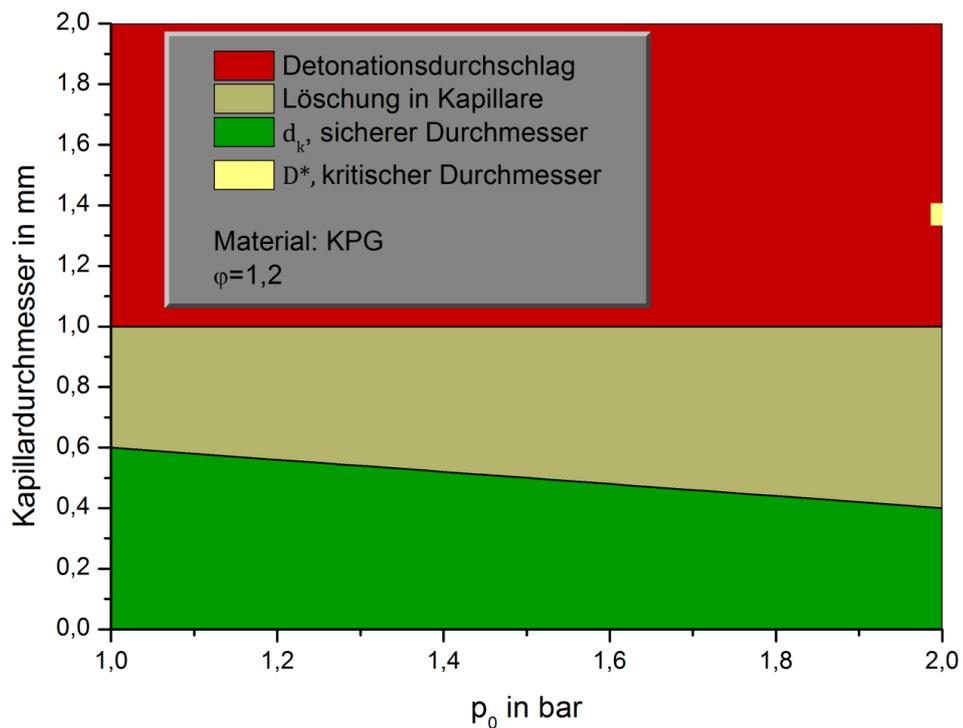


Abbildung 4.26 Detonationsverhalten und kritischer Durchmesser des Propan/Stickstoffmonoxid-Gemisches in einer KPG-Kapillare

Bei den untersuchten Edelstahlkapillaren konnte für kein Brennstoff/Stickstoffmonoxid-Gemisch ein Detonationsdurchschlag bei den jeweiligen Ausgangsdrücken und

Kapillardurchmessern nachgewiesen werden. Aufgrund des nicht überprüfbaren Kriteriums der Eindringtiefe in eine Edelstahlkapillare lässt sich zum sicheren Durchmesser hierbei keine Aussage treffen. Im Vergleich mit den KPG-Kapillaren erfolgt bei keinem Ausgangsdruck und keinem Kapillardurchmesser ein Detonationsdurchschlag, bei dem für die KPG-Kapillaren ein sicherer Durchmesser oder eine sichere Löschung in der Kapillare festgestellt wurde.

5 Zusammenfassung und sicherheitstechnische Schlussfolgerung

Gasdetonationen können bei ihrem Auftreten in einem Röhren- beziehungsweise Kapillarsystem sehr leicht durch ihre Ausgangs- und Grenzbedingungen beeinflusst und in ihrer stabilen Ausbreitungsform gestört werden. Eine ausführliche Planung und der präzise Bau einer Versuchsanordnung standen daher vor Beginn der wissenschaftlichen Experimente im Zentrum dieser Arbeit. Die Versuchsanordnung wurde in einer modularen Bauweise konzipiert, die einen Umbau für verschiedenartige Experimente ermöglicht und gleichzeitig den hohen physikalischen, thermischen und korrosiven Kräften einer Detonation widersteht. In aufwendigen Herstellungsprozessen wurden die Messmodule ohne bauliche Störstellen gefertigt, die eine stabile Detonationsausbreitung beeinflussen könnten. Neuartige PVDF-Drucksensoren wurden im Detonationskanal getestet und aufgrund ihres sehr schnellen Ansprechverhaltens für den Einsatz ausgewählt.

Die folgenden wichtigsten Punkte lassen sich zusammenfassend aus den durchgeführten Untersuchungen zur Detonationsparameterbestimmung ableiten:

- Die kleinsten Detonationszellstrukturen sind im leicht überstöchiometrischen Bereich zu finden. Alle vier Stoffgemische (Ethan/Distickstoffmonoxid, Propan/Distickstoffmonoxid, Ethan/Stickstoffmonoxid, Propan/Stickstoffmonoxid) bilden die kleinste Detonationszellbreite, unabhängig vom Initialdruck, bei einem Äquivalenzverhältnis von $\varphi = 1,2$ aus.
- Die maximale Detonationsgeschwindigkeit und der maximale Detonationsdruck erweisen sich ebenfalls als konzentrationsabhängige Größe. Sie ergeben sich allerdings, abhängig von der Art des Stoffgemisches und seinem jeweiligen Ausgangsdruck bei deutlich höheren Äquivalenzverhältnissen, als die kleinste Detonationszellbreite. Die Detonationsgeschwindigkeit und der maximale Detonationsdruck können somit nicht genutzt werden, um auf die gefährlichste Konzentration - gefährlich in Bezug auf einen Detonationsdurchschlag durch Kapillaren - eines detonationsfähigen Stoffgemisches schließen zu können.
- Die Querschnittform des Detonationskanals (quadratisch, kreisförmig) hat keinen Einfluss auf die Detonationszellbreite. Dies zeigen die Ergebnisse der Vergleichsmessung beider Kanalformen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse können die Detonationszellbreiten ohne Verlust an Genauigkeit mit Hilfe des quadratischen Detonationskanals und seinem, die Perspektive nicht verzerrenden, ebenen Deckel ermittelt werden.
- Eine Erhöhung des Initialdruckes führt für alle untersuchten Stoffgemische zu einer Verkleinerung der Detonationszellbreiten.

Die Ermittlung der Detonationszellbreite über das Rußschichtverfahren hat sich in dem sehr schmalen Detonationskanal (10 mm Durchmesser) der Versuchsanordnung bewährt. Auch

sehr kleine Detonationszellen können damit sichtbar gemacht und mit Hilfe eines Flachbettscanners ausgewertet werden. Der Einsatz von druckempfindlichen Folien brachte keinen Erfolg, da diese Hilfsmittel ein nur geringes Auflösungsvermögen besitzen und allenfalls größere Strukturen abbilden können.

Die kleinsten Detonationszellen treten für die untersuchten Stoffgemische nicht bei der stöchiometrischen Konzentration auf, sondern im leicht überstöchiometrischen Bereich. Dies zeigt die Notwendigkeit einer experimentellen Bestimmung der für einen Detonationsdurchschlag (durch eine Kapillare) günstigsten Konzentration mit Hilfe der kleinsten Detonationszellbreite, um die Kapillarversuche mit der geeigneten Konzentration an Brennstoff und Oxidationsmittel durchführen zu können.

Die Ergebnisse der Kapillarversuche zeigen, dass mit zunehmendem Initialdruck der sichere Durchmesser für alle untersuchten Stoffgemische mit Distickstoffmonoxid oder Stickstoffmonoxid kleiner wird. Die KPG-Kapillar-Tests für Gemische mit Distickstoffmonoxid zeigen, dass es mit zunehmendem Ausgangsdruck zu einer Verkleinerung des Durchmesserbereiches kommt, in dem eine Löschung der Detonation in der Kapillare stattfindet. Das bedeutet, dass sich das Intervall der Kapillardurchmesser zwischen einem Detonationsdurchschlag und dem Löschen der Detonation in der Kapillare verkleinert und sich somit das Risiko eines Detonationsdurchschlages, bei einer vermeintlichen Einhaltung des sicheren Durchmessers, erhöht. Die Kapillarversuche mit Stickstoffmonoxid als Oxidationsmittel liefern hierzu ein nahezu konträres Ergebnis. Der Durchmesserbereich, in dem es zu einer Löschung der Detonation in der Kapillare kommt, vergrößert sich mit zunehmendem Ausgangsdruck oder bleibt nahezu gleich.

Die ‚ $\lambda/3$ -Regel‘ erweist sich für die Gemische mit Distickstoffmonoxid als relativ genaues Abschätzverfahren für den sicheren Durchmesser. Die Abschätzung für das Propan/Distickstoffmonoxid-Gemisch liegt im Mittel 0,03 mm über dem sicheren Durchmesser sowie im Maximum 0,07 mm darüber und ist somit sehr genau. Das Ethan/Distickstoffmonoxid-Gemisch ist mit einer geringfügig größeren Abweichung versehen, die im Durchschnitt 0,2 mm und maximal 0,26 mm über dem experimentell bestimmten sicheren Durchmesser liegt.

Eine Abschätzung des sicheren Durchmessers für Gemische mit Stickstoffmonoxid als Oxidationsmittel ist möglich, muss aber auf Grund der geringen Anzahl an auswertbaren Detonationszellen und der damit einhergehenden unregelmäßigen Anordnung, insbesondere bei niedrigen Ausgangsdrücken, als ungenau betrachtet werden. So können erst ab einem Initialdruck von 2 bar überhaupt Detonationszellen erzeugt werden.

Beim Vergleich des Einflusses der Kapillarmaterialien auf das Durchschlagsverhalten von Detonationen kann kein eindeutig belegbarer Unterschied ausgemacht werden. Lediglich der Detonationsdurchschlag eines Ethan/Stickstoffmonoxid-Gemisches in einer 1 mm KPG-Kapillare, bei einem Ausgangsdruck von 2 bar, lässt auf einen möglicherweise geringeren sicheren Durchmesser der KPG-Kapillaren bezüglich eines Detonationsdurchschlages

schließen. Unter den gleichen Versuchsbedingungen konnten beide Edelstahlkapillararten einen Detonationsdurchschlag verhindern.

Mikroverfahrenstechnische Anlagen können nicht für jedes detonationsfähige Stoffgemisch als inhärent sicher angesehen werden. Ein Mikroreaktor, wie er beispielsweise in der Einleitung beschrieben wird, kann, bezogen auf die untersuchten Stoffgemische und Initialdrücke, nur für die Gemische mit Stickstoffmonoxid eine Detonationsausbreitung in den Kapillaren sicher verhindern. Bei den Gemischen mit Distickstoffmonoxid muss zumindest mit einer Detonationsausbreitung über das gesamte Kapillarsystem gerechnet werden.

Eine sehr gute Abschätzung des kritischen Durchmessers ist die beste Voraussetzung, um den sicheren Durchmesser zügig und einfach experimentell bestimmen zu können. Der Einsatz der ‚ $\lambda/3$ -Regel‘ für eine Abschätzung des sicheren Durchmessers zeigt sich für die untersuchten Stoffgemische als gut anwendbar. Der Vergleich des experimentell bestimmten sicheren Durchmessers mit dem über die Detonationszellbreite abgeschätzten kritischen Durchmesser bestätigt für den Großteil der Ergebnisse eine sehr gute Übereinstimmung. Ob die Anwendung der ‚ $\lambda/3$ -Regel‘ zur Abschätzung des kritischen Durchmessers auch auf weitere Stoffgemische mit andersartigen Oxidationsmitteln anwendbar ist, bleibt Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.

Literaturverzeichnis

- [1] M. A. Nettleton, *Gaseous Detonations: their nature, effects and control*, London, New York: Chapman and Hall, 1987.
- [2] H. Ehrlich und K. Jähnisch, „Mikrostrukturen für die katalytische Wasserstoffherzeugung aus Ethanol,“ in *s Chemie Ingenieur Technik*, Bd. 83, Wiley-VCH Verlag, 2011, pp. 2229-2236.
- [3] G. Dupre, R. Knystautas und J. H. Lee, „Near-Limit Propagation of Detonations in Tubes,“ in *s 10th International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, 1985, pp. 244-259.
- [4] E. Brandes, M. Gödde und W. Hirsch, „Detonation parameters: a basis for the design of microstructured process equipment,“ *Green Process Synth*, pp. 345-352, 2012.
- [5] D. C. Bull, J. E. Elsworth und P. J. Shuff, „Detonation Cell Structures in Fuel/Air Mixtures,“ in *s Combustion and Flame*, Bd. 45, Elsevier North Holland, 1982, pp. 7-22.
- [6] R. K. Kumar, „Detonation Cell Widths in Hydrogen-Oxygen-Diluent Mixtures,“ in *s Combustion and Flame*, Bd. 80, Elsevier Science Publishing Co., 1990, pp. 157-169.
- [7] R. Friedman, „Kinetics of the Combustion Wave,“ *Journal of the American Rocket Society*, pp. 349-354, Dezember 1953.
- [8] J. H. Lee, *The Detonation Phenomenon*, Cambridge University Press, 2008.
- [9] C. M. Guirao, R. Knystautas und J. H. Lee, *A Summary of Hydrogen-Air Detonation Experiments*, M. U. Department of Mechanical Engineering, Hrsg., Montreal, Quebec, 1989.
- [10] H. Nakayama, T. Moriya, J. Kasahara, A. Matsuo, Y. Sasamoto und I. Funaki, „Stable detonation wave propagation in rectangular-cross-section curved channels,“ in *s Combustion and Flame*, Bd. 159, Elsevier, 2012, pp. 859-869.
- [11] R. A. Strehlow, R. Liaugminas, R. H. Watson und J. R. Eyman, „Transverse Wave Structure in Detonations,“ in *s The Combustion Institute, Eleventh Symposium (international) Combustion*, 1967, pp. 683-692.
- [12] R. A. Strehlow und C. D. Engel, „Transverse Waves in Detonations: II. Structure and Spacing in H₂-O₂, C₂H₂-O₂, C₂H₄-O₂, and CH₄-O₂ Systems,“ in *s AIAA JOURNAL*, Bd. 7, 1969, pp. 492-496.

- [13] R. A. Strehlow, R. E. Maurer und S. Rajan, „Transverse Waves in Detonations: I. Spacing in the Hydrogen-Oxygen System,“ in s *AIAA JOURNAL*, Bd. 7, 1969, pp. 323-328.
- [14] K. K. Kuo, *Principles of combustion*, 2. Edition Hrsg., New Jersey: Jon Wiley & Sons, 2005.
- [15] D. H. Edwards, A. T. Jones und D. E. Phillips, „The location of the Chapman-Jouguet surface in a multiheaded detonation wave,“ in s *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Bd. 9, 1976.
- [16] D. W. Stamps, S. E. Slezak und S. R. Tieszen, „Observations of the cellular structure of fuel-air detonations,“ in s *Combustion and Flame*, 2006, pp. 289-298.
- [17] B. E. Gelfand, S. M. Frolov und M. A. Nettleton, „Gaseous detonations - a selective review,“ in s *Prog. Energy Combust. Sci.*, Bd. 17, Pergamon Press, 1991, pp. 327-371.
- [18] H. D. Ng, J. Chao, T. Yatsufusa und J. H. Lee, „Measurment and chemical kinetic prediction of detonation sensitivity and cellular structure characteristics in dimethyl ether-oxygen mixtures,“ in s *Fuel*, Bd. 88, Elsevier Ltd., 2009, pp. 124-131.
- [19] W. Hirsch und E. Brandes, „Löschgrenzen bei erhöhten Drücken und Temperaturen,“ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 2010.
- [20] V. N. Gamezo, A. A. Vasilev, A. M. Khokhlov und E. S. Oran, „Fine cellular structures produced by marginal detonations,“ in s *Proceedings of the Combustion Institute*, Bd. 28, 2000, pp. 611-617.
- [21] F. Joubert, D. Desbordes und H. N. Presles, „Detonation cellular structure in NO₂/N₂O₄-fuel gaseous mixtures,“ in s *Combustion and Flame*, Bd. 152, Elsevier Inc., 2008, pp. 482-495.
- [22] W. Pusch und H. G. Wagner, „Investigation of the Dependence of the Limits of Detonability on Tube Diameter,“ in s *Combustion and Flame*, Bd. 6, 1962, pp. 157-162.
- [23] J. H. Lee, „Dynamic Parameters of Gaseous Detonations,“ in s *Fluid Mech.*, Bd. 16, Annual Reviews Inc., 1984, pp. 311-336.
- [24] R. Knystautas, J. H. Lee und C. M. Guirao, „The Critical Tube Diameter for Detonation Failure in Hydrocarbon-Air Mixtures,“ in s *Combustion and Flame*, Bd. 48, Elsevier Science Publishing Co., 1982, pp. 63-83.
- [25] V. V. Mitrofanov und R. I. Soloukhin, „The diffraction of multi-front detonation waves,“ in s *Sov. Phys.Dokl.*, Bd. 9, 1965, p. 1055.
- [26] I. O. Moen, M. Donato, R. Knystautas und J. H. Lee, „The influence of confinement on the propagation of detonations near the detonability limit,“ in s *18th Symposium*

- (*International*) *Combustion*, Combustion Institute, 1981, pp. 1615-1623.
- [27] D. H. Edwards, G. O. Thomas und M. A. Nettleton, „The diffraction of a planar detonation wave at an abrupt area change,“ in s *J. Fluid Mech.*, Bd. 95, 1979, pp. 79-96.
- [28] S. B. Murray und J. H. Lee, „The influence of yielding confinement on large-scale ethylene-air detonations,“ in s *Prog. Astro. Aero.*, Bd. 94, 1984, pp. 80-103.
- [29] S. M. Kogarko und Y. B. Zeldovich, „Detonation of gaseous mixture,“ in s *SSSR Doklady*, Bd. 63, Academija Nauk, 1948, pp. 553-556.
- [30] P. Wolanski, C. W. Kauffman, M. Sichel und J. A. Nicholls, „Detonation of methane-air mixtures,“ in s *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1981, pp. 1651-1660.
- [31] A. Camargo, H. D. Ng, J. Chao und J. H. Lee, „Propagation of near-limit gaseous detonations in small diameter tubes,“ in s *Shock Waves*, Bd. 20, Springer-Verlag, 2010, pp. 499-508.
- [32] J. Fischer, C. Liebner, H. Hieronymus und E. Klemm, „Maximum safe diameters of microcapillaries for a stoichiometric ethene/oxygen mixture,“ in s *Chemical Engineering Science*, Bd. 64, Elsevier, 2009, pp. 2951-2956.
- [33] C. Guo, C. Wang, S. Xu und H. Zhang, „Cellular pattern evolution in gaseous detonation diffraction in a 90°-branched channel,“ in s *The Combustion Institute*, Bd. 148, Elsevier Inc., 2006, pp. 89-99.
- [34] Dr. Müller Instruments, „Measurment of Shock Waves and Fluid Motion,“ [Online]. Available: www.mueller-instruments.de. [Zugriff am 02 05 2012].
- [35] OriginLab Corporation, *Origin 8.5.OG SR1*, Northampton, MA 01060 USA, 2010.
- [36] I. B. Zeldovich und A. S. Kompaneets, *Theory of Detonation*, New York, London: Academic Press, 1960.
- [37] D. Surek und S. Stempin, „Angewandte Strömungsmechanik für Praxis und Studium,“ Wiesbaden, B. G. Teubner Verlag, 2007, p. 414.
- [38] R. Knystautas, J. H. Lee, J. E. Shepherd und A. Teodorczyk, „Flame Acceleration and Transition to Detonation in Benzene-Air Mixtures,“ in s *Combustion and Flame*, Bd. 115, Elsevier Science Inc., 1998, pp. 424-436.
- [39] G. O. Thomas, „Flame acceleration and the development of detonation in fuel-oxygen mixtures at elevated temperatures and pressures,“ in s *Journal of Hazardous Materials*,

- Bd. 163, Elsevier B.V., 2009, pp. 783-794.
- [40] R. Knystautas, C. Guirao, J. H. Lee und A. Sulmistras, „Measurements of cell size in hydrocarbon-air mixtures and predictions of critical tube diameter, critical initiation energy, and detonability limits,“ American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1984, pp. 23-37.
- [41] B. P. Mullins und S. S. Penner, Explosions, Detonations, Flammability and Ignition, London, New York, Paris, Los Angeles: Pergamon Press, 1959.
- [42] J. E. Shepherd, „Detonation in gases,“ *Proceedings of the Combustion Institute*, Bd. 32, pp. 83-98, 2009.
- [43] B. B. Botros, H. D. Ng, Y. J. Zhu, Y. Ju und J. H. Lee, „The evolution and cellular structure of a detonation subsequent to a head-on interaction with a shock wave,“ in s *Combustion and Flame*, Bd. 151, Elsevier Inc., 2007, pp. 573-580.
- [44] G. Ciccarelli, T. Ginsberg, J. Boccio, C. Economos, K. Sato und M. Kinoshita, „Detonation Cell Size Measurements and Predictions in Hydrogen-Air-Steam Mixtures at Elevated Temperatures,“ in s *Combustion and Flame*, Bd. 99, Elsevier Science Inc., 1994, pp. 212-220.
- [45] R. Guirguis, E. S. Oran und K. Kailasanath, „The effect of energy release on the regularity of detonation cells in liquid nitromethane,“ in s *Twenty-first Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1986, pp. 1659-1668.
- [46] I. Sochet, M. Aminallah und J. Brossard, „Detonability of fuel-oxygen and fuel-air mixtures,“ in s *Shock Waves*, Springer Verlag, 1997, pp. 163-174.
- [47] D. S. Stewart, T. D. Aslam und J. Yao, „On the evolution of cellular detonation,“ in s *The Combustion Institute*, Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, 1996, pp. 2981-2989.
- [48] S. R. Tieszen, D. W. Stamps, C. K. Westbrook und W. J. Pitz, „Gaseous Hydrocarbon - Air Detonations,“ in s *The Combustion Institute*, Bd. 84, Elsevier, 1991, pp. 376-390.
- [49] A. A. Vasiliev und Y. Nikolaev, „Closed theoretical model of a detonation cell,“ in s *Acta Astronautica*, Pergamon Press Ltd., 1978, pp. 983-996.
- [50] M.-H. Wu und W.-C. Kuo, „Accelerative expansion and DDT of stoichiometric ethylene/oxygen rings in micro-gaps,“ in s *Proceedings of the Combustion Institute*, Bd. 34, Elsevier Inc., 2012, pp. 2017-2024.

- [51] A. I. Gavrikov, A. A. Efimenko und S. B. Dorofeev, „A Model for Detonation Cell Size Prediction from Chemical Kinetics,“ in s *The Combustion Institute*, Bd. 120, Elsevier Science Inc., 2000, pp. 19-33.
- [52] J. M. Austin und J. E. Shepherd, „Detonations in hydrocarbon fuel blends,“ in s *Combustion and Flame*, Bd. 132, The Combustion Institute, 2003, pp. 73-90.
- [53] X. Y. Hu, D. L. Zhang und Z. L. Jiang, „Analytical study of idealized two-dimensional cellular detonations,“ in s *Shock Waves*, 2002, pp. 475-480.
- [54] Y. Auffret, D. Desbordes und H. N. Presles, „Detonation structure and detonability of C₂H₂-O₂ mixtures at elevated initial temperature,“ in s *Shock Wave*, Bd. 11, Springer Verlag, 2001, pp. 89-96.
- [55] W. B. Yun, „Investigation of some Mechanisms on the Detonation of Detonator Tubes,“ *Mining Science and Technology*, pp. 275-281, Mai 1987.
- [56] C. K. Westbrook und P. A. Urtiew, „Chemical kinetic prediction of critical parameters in gaseous detonations,“ in s *Nineteenth Symposium (International) on Combustion*, The combustion Institute, 1982, pp. 615-623.
- [57] F. Pintgen, C. A. Eckett, J. M. Austin und J. E. Shepherd, „Direct observations of reaction zone structure in propagating detonations,“ in s *Combustion and Flame*, Bd. 133, Elsevier, 2003, pp. 211-229.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Geburtsdatum 07.12.1977
Geburtsort Staßfurt
Staatsangehörigkeit deutsch
Familienstand ledig

Schule und Studium

09/1984 - 07/1985 POS „Hermann Kasten“, Staßfurt
09/1985 - 07/1991 POS „Am Tierpark“, Staßfurt
09/1991 - 07/1996 Dr. -Frank-Gymnasium, Staßfurt
09/2001 - 07/2004 Abitur, Kolleg „Schule des Zweiten Bildungsweges“, Magdeburg
09/2004 - 08/2008 Bachelorstudium „Sicherheit und Gefahrenabwehr“, Otto von Guericke Universität, Magdeburg; Bachelorarbeit: „Grenzsplattweiten/ O₂-Index – Eine Betrachtung von Abhängigkeiten“
09/2008 - 10/2010 Masterstudium „Sicherheit und Gefahrenabwehr“, Otto von Guericke Universität, Magdeburg; Masterarbeit: „Einfluss der Inertgase Kohlendioxid und Stickstoff auf die Grenzsplattweite“

Beruflicher Werdegang

09/1996 - 08/2000 Soldat auf Zeit, Stammeinheit: PzAuklBtl 7, GFM-Rommel-Kaserne Augustdorf
seit 04/2011 Projekt „Detonationen in Mikrostrukturen“, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, Abteilung: „Chemische Physik und Explosionsschutz“

Braunschweig, Juni 2016

M. Sc. Thomas Meyer