

KfK 4437
September 1988

Explosion und Detonation von Ozon in Gemischen mit kerntechnisch bedeutenden Trägergasen

M. M. L. Weh
Institut für Radiochemie

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Radiochemie

KfK 4437

PWA 36/88

Explosion und Detonation von Ozon in Gemischen mit
kerntechnisch bedeutenden Trägergasen^{*}

Michaela Martha Luise Weh



* Von der Fakultät für Chemie der Universität (TH) Karlsruhe
genehmigte Dissertation

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Explosion und Detonation von Ozon in Gemischen mit kerntechnisch bedeutenden Trägergasen

Zusammenfassung

Da Radiolyse von Sauerstoff bei tiefen Temperaturen das explosive Ozon bildet, sind für die Sicherheitsbetrachtung kerntechnischer Anlagen zur kryogenen Abtrennung des $^{85}\text{Krypton}$ aus den Auflöserabgas einer Wiederaufarbeitungsanlage umfangreiche Kenntnisse über das Explosions- und Detonationsverhalten von Ozon erforderlich.

Das Explosionsverhalten des gasförmigen Ozons wurde in Gemischen mit Sauerstoff, Stickstoff, Helium, Argon, Krypton, Xenon und Dichlordifluormethan in Abhängigkeit von der Ozonkonzentration, dem Initialdruck und der Geometrie des Reaktionsgefäßes untersucht.

Für Mischungen von Ozon mit Sauerstoff, Argon, Krypton und Xenon wurde die Detonationsgeschwindigkeit als Funktion der Ozonkonzentration und in Ozon-Xenon-Gemischen zusätzlich in Abhängigkeit vom Initialdruck bestimmt. Ferner wurde der Einfluß einer Füllkörperpackung, wie sie in der im KfK erprobten Anlage zur kryogenen Spaltdelgasabtrennung "KRETA" eingesetzt wurde, auf die Detonation des Ozons im System Ozon-Xenon untersucht.

Darüber hinaus wurde der Einfluß geringer Mengen an Kohlenmonoxid, Methan und Stickstoffdioxid auf die Explosion (O_3/Ar) bzw. Detonation (O_3/Xe) eines Ozon-Edelgas-Gemisches bestimmt.

Explosion and Detonation of Ozone in Mixtures with Carrier Gases Employed in Nuclear Technology

Abstract

Explosive ozone is known to be formed during low temperature radiolysis of oxygen. Detailed knowledge on the explosion and the detonation of ozone is therefore required for safety considerations of nuclear installations such as proposed for the cryogenic separation of ^{85}Kr from the head end off gas of a reprocessing plant.

The explosion properties of gaseous ozone in mixtures with oxygen, nitrogen, helium, argon, krypton, xenon and difluorodichloromethane were studied by varying the ozone concentration, the initial pressure and the shape of the vessel containing the gas.

Detonation velocities were determined for gaseous mixtures of ozone with oxygen, argon, krypton or xenon as functions of the ozone concentration. In addition, the initial pressure was varied for ozone-xenon mixtures. The effect of a packing such as used in the ^{85}Kr -separation plant 'KRETA' in KfK on ozone-xenon detonation was investigated.

In addition, the effect of low amounts of carbon monoxide, methane and nitrogen dioxide on the explosion (O_3/Ar) and the detonation (O_3/Xe) of an ozone-noble gas mixture was determined.

| Inhalt | Seite |
|--|-------|
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Theoretische Betrachtung des thermischen Ozonzerfalls, sowie der laminaren Flamme, der Detonation und der Explosion von Gasen | 5 |
| 2.1. Der thermische Ozonzerfall | 5 |
| 2.1.1. Der Mechanismus des thermischen Ozonzerfalls | 6 |
| 2.1.2. Einfluß einiger WAA-typischer Verunreinigungen auf den thermischen Ozonzerfall | 8 |
| 2.2. Die Rankine-Hugoniot Gleichungen | 12 |
| 2.3. Die eindimensionale laminare Flamme | 16 |
| 2.3.1. Modell der eindimensionalen laminaren Flamme | 17 |
| 2.3.2. Die laminare Ozonflamme | 20 |
| 2.3.3. Zündgrenzen | 28 |
| 2.4. Detonation | 30 |
| 2.4.1. Die Chapman-Jouguet-Theorie | 31 |
| 2.4.2. Die Zeldovich-v. Neumann-Döring-Theorie | 33 |
| 2.4.3. Nicht-ideale Detonationen | 35 |
| 2.4.4. Das Entstehen von Detonationen | 38 |
| 2.4.5. Die Detonation ozonhaltiger Gasgemische | 39 |

| | |
|--|-----|
| 2.5. Adiabatische Explosionen in geschlossenen Gefäßen | 43 |
| 2.5.1. Modell von Flamm und Mache | 43 |
| 2.5.2. Die Explosion ozonhaltiger Gasgemische | 45 |
| 3. Experimentelle Untersuchungen | 47 |
| 3.1. Aufbau und Durchführung der Versuche | 50 |
| 3.1.1. Herstellung der Gasgemische | 50 |
| 3.1.2. Reaktionsgefäße | 51 |
| 3.1.3. Druckmessung | 54 |
| 3.1.4. Gasanalyse | 56 |
| 3.2. Ergebnisse | 57 |
| 3.2.1. Versuche zur Ozonexplosion | 57 |
| 3.2.2. Versuche zur Ozondetonation | 86 |
| 4. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse | 97 |
| 4.1. Ozonexplosion | 97 |
| 4.1.1. Explosionsdrücke | 98 |
| 4.1.2. Übergang von der Explosion zur Detonation | 114 |
| 4.1.3. Zündgrenzen | 119 |
| 4.1.4. Einfluß WAA-typischer Verunreinigungen | 125 |
| 4.2. Ozondetonation | 127 |
| 4.2.1. Detonationsgeschwindigkeiten | 128 |
| 4.2.2. Einfluß von Knallgas und WAA-typischer Verunreinigungen | 129 |
| 4.2.3. Füllkörperpackungen | 134 |

| | |
|---|-----|
| 5. Zusammenfassung | 136 |
| 6. Literatur | 139 |
| 7. Anhang | 145 |
| 7.1. Laminare Flammen verschiedener Ozon/Trägergas-Gemische | 145 |
| 7.2. Chapman-Jouguet-Detonation verschiedener Ozon/Trägergas-Gemische | 148 |
| 7.3. Adiabatische Explosion verschiedener Ozon/Trägergas-Gemische | 168 |
| 7.4. Ergebnisse der Versuche zur Ozon-Explosion | 170 |
| 7.5. Ergebnisse der Versuche zur Ozon-Detonation | 186 |
| 7.6. Berechnung der Nicht-adiabatischen Explosion verschiedener Ozon/Trägergas-Systeme | 190 |

1. Einleitung

Durch die weltweite Nutzung der Kernenergie ist die Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen und in diesem Zusammenhang die Entsorgung radioaktiver Abfälle von Bedeutung.

Zu den während des Reaktorbetriebes erzeugten Spaltprodukten zählen radioaktive und nichtradioaktive Isotope der Edelgase Krypton und Xenon, die während des Zerkleinerns und Auflöserns der Reaktor-brennstäbe freigesetzt werden. Das wesentliche Problem ist hier das Isotop ^{85}Kr ($t_{\frac{1}{2}} = 10.8 \text{ a}$, $E_{\text{max}}(\beta) = 0.7 \text{ MeV}$) - alle anderen Spaltedel-gasnuklide sind entweder inaktiv oder so kurzlebig, daß sie während der üblichen Abklingzeit für genutzte Brennelemente (1 Jahr) zerfallen. In einer 350 Jato Wiederaufarbeitungsanlage (WAA) müssen ca. 350 m^3 inaktives Xenon und ca. 35 m^3 Krypton mit einer ^{85}Kr -Aktivität von $1.3 \times 10^{17} \text{ Bq}$ (3 MCi) entsorgt werden [1,2]. Obwohl die ^{85}Kr -Emission den von der Strahlenschutzkommission empfohlenen Grenzwert in naher Zukunft nicht überschreiten wird [3], wird aus ökologischen Gründen bereits die Rückhaltung des Kryptons erwogen. Krypton ist in der Atmosphäre zu etwa 1 vpm enthalten. Bedingt durch Kernwaffenversuche und die Emission aus Wiederaufarbeitungsanlagen (gegenwärtig wird ^{85}Kr in die Atmosphäre abgegeben) beträgt die auf ^{85}Kr zurückzuführende Aktivität bereits 740 kBq (20 μCi) pro m^3 atmosphärischen Kryptons [2,4]. Ohne Krypton-rückhaltung würde sich dieser Anteil bei weltweiter Nutzung der Wiederaufarbeitung in wenigen Jahren verdoppeln.

Zur Abtrennung und Aufarbeitung der Spalteredelgase sind zwei unterschiedliche Verfahren technisch weitgehend erprobt:

- 1) Die drucklose Edelgaswäsche; sie basiert auf der guten Löslichkeit der Edelgase in Dichlordifluormethan. Nach Reinigung des Prozeßgases von nitrosen Gasen mit Salpetersäure oder Salpetersäure/Wasserstoffperoxid werden in zwei Reinigungszyklen zunächst Xenon, dann Krypton mit Dichlordifluormethan aus dem Gasstrom herausgelöst [5,6].

- 2) Die Tieftemperaturrektifikation (TTR); hier werden die verflüssigten Gase unter Druck bei tiefen Temperaturen destillativ getrennt. Nach katalytischer Entfernung der Prozeßgas-komponenten Sauerstoff (18 Vol-%), Stickstoffoxide (5Vol-%), Kohlenwasserstoffe (10 vpm), sowie kryogener Abtrennung von Kohlendioxid (330 vpm) und Wasser wird das Gas auf 5 bar komprimiert. Krypton und Xenon werden in einer ersten Rektifikationssäule gemeinsam vom Trägergas (N_2) abgetrennt. In einer weiteren Kolonne erfolgt bei 3 bar die Separierung der Edelgase voneinander [5-7].

Ein möglicher Nachteil der TTR gegenüber der Edelgaswäsche ist die in Gegenwart einer Restmenge Sauerstoff erfolgende radiolytische Bildung von Ozon in den Rektifikationskolonnen. Daher soll die Problematik dieses Verfahrens hier eingehender diskutiert werden:

Als wichtiger Schritt vor der Rektifikation ist die bereits erwähnte Sauerstoffentfernung zu sehen. Sie ist notwendig, da - besonders bei tiefen Temperaturen - durch die Einwirkung der von ^{85}Kr ausgesandten β -Strahlung aus Sauerstoff Ozon gebildet wird: Während sich der G-Wert (Anzahl der gebildeten Teilchen pro 100 eV absorbierte Strahlung) für die Ozonbildung nur geringfügig mit der Temperatur ändert ($G(O_3) = 13-16$ für 300 K und $G(O_3) = 6-15$ für 77 K), nimmt der

G-Wert für die Ozonzersetzung stark mit der Temperatur ab ($G(-O_3) = 10^3 - 10^4$ für 300 K und $G(-O_3) \approx 25$ für 77 K) [8-21]. Wegen der langen Verweilzeit der Gase in der TTR-Anlage ist daher mit der Bildung und Akkumulation von Ozon in Sumpf und Böden der Kolonnen zu rechnen, obgleich im Normalbetrieb nicht mehr als 10 ppm Sauerstoff im vorgereinigten Speisegas zu erwarten sind.

Ozon ist thermodynamisch instabil und in höheren Konzentrationen sowohl in festem und flüssigem Zustand als auch in der Gasphase explosiv [22].

Im Speisegas sind ferner Spuren von Methan, Kohlenmonoxid und Stickstoffoxiden enthalten [6]. Diese Substanzen können entweder durch Radikalbildung die Explosionsreaktion initiieren oder durch einen zusätzlichen Beitrag zur Radikalkonzentration bzw. zur Reaktionswärme eine Explosion fördern.

Bedingt durch die geringe Differenz zwischen Schmelz- und Siedepunkt des Xenons (161 K und 165 K) ist dessen kryogene Handhabung keineswegs trivial. Bei dem hohen Xenonanteil von über 90 % am Spaltedelgas sind Ausfrierungen in den Kolonnen möglich. Daher sehen einige TTR-Varianten zur Erhöhung der Xenonlöslichkeit die Verwendung von Argon [23] oder sogar Sauerstoff als Prozeßgaskomponente vor. Im letzten Fall wurden besonders hohe Ozonkonzentrationen - bis über 30 Mol-% in der Gasphase - beobachtet [24]. Auch die oben beschriebene Edelgaswäsche mit Dichlordifluormethan kann von der Möglichkeit der Ozonexplosion nicht freigesprochen werden.

Über das Explosions- und Detonationsverhalten von Ozon/Sauerstoff-Gemischen liegt bereits eine Reihe von Arbeiten vor. Zu beachten sind vor allem die Messungen der Explosionsgrenzen von Schumacher [25], von Cook et al. [26] sowie von Raffel, Warnatz und Wolfrum [27], die Untersuchung der Ozon-Explosion von Lewis und v.Elbe [28-30], ferner die Experimente von Streng et al. [31], Miller [32], Harper und Gordon

[33] sowie Getzinger et al. [34] zur Ozon-Detonation. Dagegen ist über das Verhalten der Systeme Ozon/Stickstoff, Ozon/Edelgas und Ozon/Dichlordifluormethan bisher nur wenig bekannt. Zu zitieren in diesem Zusammenhang wäre lediglich die Arbeit von Yastrebov und Kobozev, die die Explosionsgrenzen für Ozon in verschiedenen Trägergasen bestimmten [35].

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erfassung des Explosions- und Detonationsverhaltens des Ozons unter Bedingungen, die den im Hinblick auf den technischen Einsatz diskutierten Verfahrensvarianten zur Spaltdelgasrückhaltung (TTR und Freonwäsche) Rechnung tragen. Daher sollen die Explosion und die Detonation des gasförmigen Ozons in Gemischen mit den Spaltdelgasen Krypton und Xenon, sowie den Trägergasen Sauerstoff, Stickstoff, Argon und Dichlordifluormethan experimentell untersucht werden. Besonderes Gewicht kommt dabei dem System Ozon/Xenon zu, da wegen der Ähnlichkeit der Siedepunkte beider Gase (Ozon: 162 K, Xenon: 165 K) eine Anreicherung des Ozons im Xenon zu erwarten ist. Durch den Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Aussagen einiger Modelle zur Berechnung von Flammen, Explosionen und Detonationen soll die Anwendbarkeit dieser Modelle auf das Ozonproblem untersucht werden. Darüber hinaus sollen die erzielten Ergebnisse zur Beurteilung der Sicherheit der Spaltdelgasabtrennung beitragen und Entscheidungskriterien zur Verfahrenswahl liefern.

2. Theoretische Betrachtungen des thermischen Ozonzerfalls, sowie der laminaren Flamme, der Detonation und der Explosion von Gasen

Die zur Beurteilung und Diskussion der experimentellen Ergebnisse wichtigen theoretischen Grundlagen sollen nachfolgend diskutiert werden. Wesentlich ist die Kinetik des thermischen Ozonzerfalls. Ozon ist thermodynamisch nicht stabil und zerfällt bei Raumtemperatur langsam, bei höheren Temperaturen oder in Gegenwart einer Vielzahl katalytisch wirkender Stoffe rasch. In dieser Arbeit sind hier vor allem die WAA-typischen Verunreinigungen Wasser, Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide und Methan interessant. Die Prozesse Flamme bzw. Verbrennung, Detonation und Explosion sollen definiert, ihr Entstehen und ihre Eigenschaften sowohl qualitativ als auch anhand einiger wichtiger Modelle quantitativ beschrieben werden. Während Explosionen allein durch die Geschwindigkeit der Wärmeentwicklung und damit durch die Thermodynamik und die Kinetik der chemischen Reaktion erklärt werden, sind für Flammen und Detonationen zudem ihr Fortschreiten im Raum charakteristisch. Das einfachste hydrodynamische Modell zur Beschreibung von Flammen und Detonationen führt zu den Rankine-Hugoniot-Gleichungen, die in Kapitel 2.2. diskutiert werden.

2.1. Der thermische Ozonzerfall

Ozon zerfällt bei Raumtemperatur langsam und bei Temperaturen oberhalb von 70°C rasch zu Sauerstoff mit einer Tendenz zur Explosion bei ozonreichen Gemischen. Der Ozonzerfall wird durch zahlreiche Substanzen, wie Metalle, deren Oxide, Spuren von Peroxiden und Stickstoffoxiden, sowie organische Verbindungen katalysiert [36]. Im folgenden sollen der Ozonzerfall in einem binären Gemisch und der Einfluß einiger katalytisch wirksamer Verbindungen beschrieben werden.

2.1.1. Der Mechanismus des thermischen Ozonzerfalls

Der thermische Ozonzerfall wurde sowohl bei vergleichsweise niederen Temperaturen von 300 K bis 400 K (erwähnenswert sind hier besonders die Arbeiten von Benson und Axworthy [37]), als auch bei hohen Temperaturen von 800 K bis 3000 K (Schockwellenexperimente) untersucht. Hier sind vor allem die Arbeiten von Jones und Davidson [38], Michael [39], Wray [40] und Center und Kung [41] zu nennen.

Der thermische Ozonzerfall bei mäßigen Temperaturen wird durch den erstmals von Benson und Axworthy formulierten Reaktionsmechanismus beschrieben [37]. Dieser sieht folgende Reaktionsschritte vor:

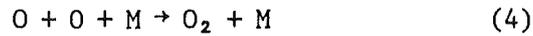


Der Stoßpartner 'M' kann sowohl O_3 , O_2 und O , oder ein anderes, dem Ozon beigemischt Gas sein, z.B. Stickstoff oder ein Edelgas.

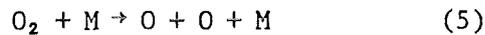
Der Zerfall des Ozons bei hohen Temperaturen (> 2000 K) ist deutlich langsamer, als eine Extrapolation der Daten für die Reaktionsgeschwindigkeit bei mäßigen Temperaturen vermuten läßt [41]. Warnatz [42] erklärt dies durch eine starke Temperaturabhängigkeit des präexponentiellen Faktors der Reaktionsgeschwindigkeit für den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt:

$$(2.1) \quad k_1 = A \times T^{-1.25} \exp(-E/RT).$$

Bei Temperaturen oberhalb von 1300 K und Drücken oberhalb von 0.5 bar zerfällt Ozon innerhalb von 1 bis 2 μ s nahezu vollständig [40,43]. Die Rekombination des atomaren Sauerstoffs erfolgt durch



Ferner tritt bei Temperaturen oberhalb 1700 K zu merklichen Anteilen Dissoziation des Sauerstoffs ein [44-52]:



Der Verlust von Sauerstoffatomen durch Wandreaktion ist hier dagegen ohne Bedeutung: Nach Kaufman und Kelso [53,54] ist die Geschwindigkeitskonstante k_w für diesen Prozeß zu berechnen nach:

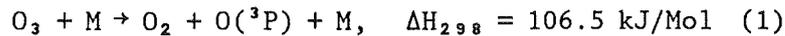
$$(2.2) \quad k_w = \frac{1}{2} \sigma \bar{u} / r \quad ,$$

wobei \bar{u} die mittlere Geschwindigkeit des atomaren Sauerstoffes, r der Gefäßradius und σ eine Funktion des Materials und der Temperatur des Gefäßes bedeuten. Da in Ozonexplosionen oder Ozonflammen keine signifikante Erhöhung der Gefäßtemperatur eintritt ($\Delta T \leq 5$ K), beträgt σ für Pyrexglas $\sigma = 10^{-5}$ [53,54] bzw. $\sigma = 1.2 \times 10^{-4}$ [55]. Somit ist für jede Flammen- oder Explosionstemperatur und jede Ozonkonzentration die Änderung der O-Konzentration durch Wandreaktion sehr viel geringer als die durch eine der Reaktionen (1) bis (4).

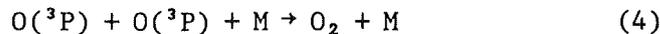
Durch die thermische Zersetzung des Ozons entstehen intermediär ausschließlich Sauerstoffatome der Konfiguration $O(^3P)$. Die Bildung von $O(^1D)$ ist aufgrund der hohen Aktivierungsenergie von 386 kJ/Mol durch thermische Anregung nicht möglich und tritt erst bei der photolytischen Ozonzersetzung bei Wellenlängen $\lambda < 310$ nm ein [56,57]. Im Gegensatz zu $O(^1D)$ ist $O(^3P)$ nicht als Kettenträger wirksam.

2.1.2. Einfluß einiger WAA-typischer Verunreinigungen
auf den thermischen Ozonzerfall

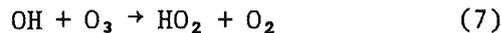
Ozon reagiert ebenso wie der intermediär entstehende $O(^3P)$
bei Raumtemperatur nicht mit Wasser [58,59]:



Tritt bei höheren Temperaturen, z.B. in Flammen oder Explosionen,
Reaktion (6) jedoch ein und wird die Reaktionsgeschwindigkeit k_6
genügend groß, so daß Reaktion (6) in Konkurrenz tritt zu den O-Rekombi-
nationsreaktionen (3) oder (4)



so ist eine Kettenreaktion möglich der Form:



Tab.2.1 zeigt eine Abschätzung der Temperaturabhängigkeit für die
Reaktionsgeschwindigkeiten der $O(^3P)$ -verbrauchenden Reaktionen (2),
(3), (4) und (6). Dabei wurden folgende Daten für die Berechnung der
Reaktionsgeschwindigkeiten herangezogen:

$$(2.3) \quad k_1 = 1.5 \times 10^{18} T^{-1.25} \exp(-96.2 \text{ kJ/RT}) \text{ cm}^3 \text{ Mol}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ für } M=O_2 \quad [42]$$

$$(2.4) \quad k_2 = 1.7 \times 10^{13} \exp(8.8 \text{ kJ/RT}) \text{ cm}^6 \text{ Mol}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ für } M=O_2 \quad [42]$$

$$(2.5) \quad k_3 = 2.3 \times 10^{13} \exp(-21.8 \text{kJ/RT}) \text{ cm}^3 \text{ Mol}^{-1} \text{ s}^{-1} [42]$$

$$(2.6) \quad k_4 = 1.4 \times 10^{18} T^{-1} \exp(-1.4 \text{kJ/RT}) \text{ cm}^6 \text{ Mol}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ für } M=\text{O}_2 [42]$$

$$(2.7) \quad k_5 = 9.8 \times 10^{24} T^{-2.5} \exp(-493.7 \text{kJ/RT}) \text{ cm}^3 \text{ Mol}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ für } M=\text{O}_2 [58]$$

$$(2.8) \quad k_6 = 1.5 \times 10^{10} T^{1.14} \exp(-72 \text{kJ/RT}) \text{ cm}^3 \text{ Mol}^{-1} \text{ s}^{-1} [60].$$

Die O_2 -Konzentration wurde gleich $1.6 \times 10^{-5} \text{ Mol/cm}^3$ gesetzt, ein Wert, der der O_2 -Konzentration bei einem Initialdruck von $p_0 = 0.40 \text{ bar}$ entspricht. Für die Konzentrationen an Ozon und Wasser wurden jeweils 10 % der Sauerstoffkonzentration angenommen, was einen relativ geringen Ozongehalt, aber einen hohen Wassergehalt bedeutet.

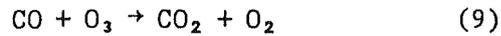
Tab.2.1 Temperaturabhängigkeit der $\text{O}(^3\text{P})$ -Reaktionen

| T[K] | $\frac{k_6 [\text{H}_2\text{O}]}{k_2 [\text{O}_2] [\text{M}] + k_3 [\text{O}_3] + k_4 [\text{O}] [\text{M}]}$ |
|------|---|
| 300 | 3.0×10^{-11} |
| 500 | 3.7×10^{-6} |
| 1000 | 4.0×10^{-3} |
| 1500 | 0.05 |
| 2000 | 0.16 |
| 2500 | 0.30 |

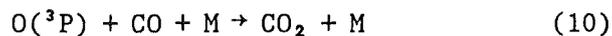
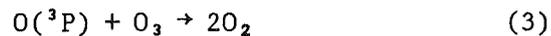
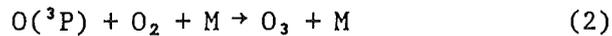
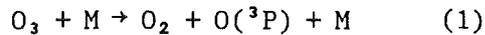
Wie Tab.2.1 zeigt, hat Reaktion (6) erst bei Temperaturen oberhalb von 1500 K einen nennenswerten Anteil an der Gesamtreaktion. Wasser wird daher die Zündgrenze des Ozons nicht beeinflussen.

Ozon reagiert bei Raumtemperatur nicht mit hochreinem Kohlenmonoxid [61]: Die Reaktionsgeschwindigkeit für Reaktion (9) beträgt $k_9 \leq 0.24 \text{ cm}^3 \text{ Mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Es kommt i.allg. jedoch unmittelbar nach dem Kontakt von gasförmigen Ozon und Kohlenmonoxid zu einer spontanen, unvollständigen Umsetzung von CO zu CO_2 , deren genaue Ursache noch ungeklärt ist [61,62]. Dabei werden innerhalb einer Minute je nach Konzentration der Reaktionspartner bis zu 70% des Kohlenmonoxids

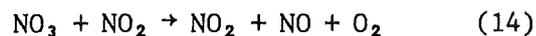
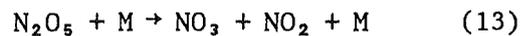
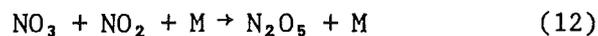
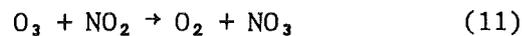
umgesetzt, anschließend erfolgt die Reaktion mit der oben angegebenen Geschwindigkeit [62].

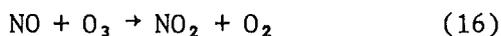


Die Reaktion zwischen Ozon und Kohlenmonoxid bei höheren Temperaturen wird durch einen Mechanismus erklärt, der als geschwindigkeitsbestimmenden Schritt die thermische Ozonzersetzung und darauffolgend die Oxidation des Kohlenmonoxids durch $\text{O}(^3\text{P})$ ansieht [63].

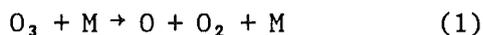


Ozon reagiert bereits bei tiefen Temperaturen spontan mit den Stickstoffoxiden NO und NO₂ [64,65]. Die Reaktion mit NO verläuft bei Raumtemperatur und genügend hoher Konzentration der Reaktionspartner explosionsartig [66] und führt zur Bildung von NO₂. Durch NO₂ wird Ozon unter Bildung von NO₃ und N₂O₅ als Zwischenprodukte katalytisch zersetzt [67-69].





Ozon reagiert mit Methan bei Temperaturen oberhalb 450 K unter Bildung einer Vielzahl von Produkten. Nachgewiesen wurden neben H_2O , CO und CO_2 auch CH_2O , CH_3OH , CH_3OOH und H_2O_2 . Rotzoll [70] formulierte einen Mechanismus für die Methanoxidation durch Ozon, der 47 Elementarreaktionen mit insgesamt 21 Spezies vorsieht. Initiiert wird die Methanoxidation durch den thermischen Ozonzerfall, gefolgt von der Reaktion des atomaren Sauerstoffs mit Methan. Als weitere wichtige Reaktionsschritte sind die Sekundärreaktionen von Ozon mit Methylradikalen und Wasserstoffatomen zu sehen.

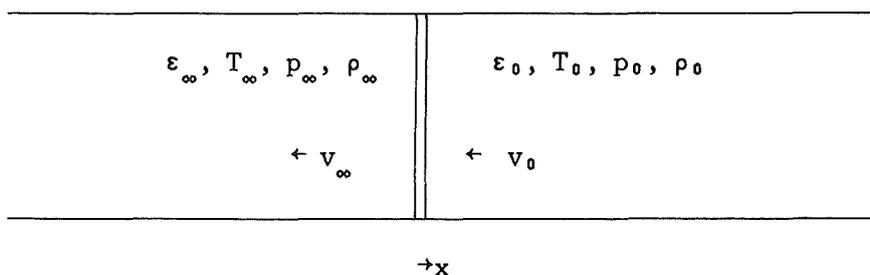


Ozon wird durch Stickstoffoxide, aber auch durch Methan und in Verbindung mit einer noch nicht identifizierten Spezies durch Kohlenmonoxid katalytisch zersetzt, d.h. es kommt zu einem deutlichen Anstieg der Reaktionsgeschwindigkeit für den in exothermer Reaktion ablaufenden Ozonzerfall. Gleichzeitig können sowohl Methan, als auch Kohlenmonoxid mit einem sauerstoffhaltigen Oxidationsmittel in exothermer Reaktion umgesetzt werden. Aus diesen Gründen werden die hier diskutierten Verbindungen das Einsetzen des explosiven Ozonzerfalls fördern.

2.2. Die Rankine-Hugoniot-Gleichungen

Verbrennungsvorgänge wurden bereits im vorigen Jahrhundert intensiv experimentell untersucht [71,72]. Dabei fand man zwei unterschiedliche, stabile Prozesse, für die jeweils eine konstante Flammengeschwindigkeit charakteristisch ist: die Detonation, deren Geschwindigkeit weit größer als die normale Schallgeschwindigkeit c_0 ist, und die normale Verbrennung, die mit einer deutlich langsameren Geschwindigkeit als c_0 fortschreitet. Mallard und Le Chatelier [72] prägten für diesen Prozeß zur Unterscheidung von der Detonation den Begriff "Deflagration". Generell wird jedoch die "normale Verbrennung" zur Unterscheidung von anderen Prozessen, insbesondere turbulenten Flammen, als laminare Flamme bezeichnet. Im folgenden Kapitel soll anhand eines einfachen Modells, welches zu den Rankine-Hugoniot-Gleichungen führt, die charakteristischen Eigenschaften laminarer Flammen und Detonationen beschrieben und erklärt werden.

Abb.2.1 Schematische Darstellung einer eindimensionalen, planaren, stationären Flammenfront



Die Verbrennung eines Gases erfolge adiabatisch in einer schmalen Zone, der Flammenfront. Unter der Annahme einer eindimensionalen, planaren Flammenfront, die stetig durch das Medium fortschreitet, läßt sich dieses System durch die hydrodynamischen Funktionen (Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie) für den eindimensio-

nalen, stetigen Fluß beschreiben. Die Flammenfront sei so schmal, daß sie sich als Unstetigkeitsstelle in diesem Gleichungssystem behandeln läßt. Die Flamme sei stationär (Abb.2.1). Dann erhält man durch Integration der hydrodynamischen Funktionen die Rankine-Hugoniot-Gleichungen, die die Relation zwischen den physikalischen Größen vor und hinter der Flammenfront angeben [73-75].

Seien ρ , v , p , ε und T Dichte, Strömungsgeschwindigkeit, Druck, spezifische Energie und Temperatur des Gases. Dann gelten für ein eindimensionales, strömendes Medium nach den Gesetzen für die Erhaltung von Masse, Impuls und Energie die Beziehungen:

$$(2.9) \quad \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

$$(2.10) \quad \frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (p - \eta \frac{\partial v}{\partial x}) = 0$$

$$(2.11) \quad \frac{d}{dt} (\varepsilon + \frac{1}{2} v^2) + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (p - \eta \frac{\partial v}{\partial x}) v - \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) \right\} = 0$$

wobei η ein Reibungskoeffizient und λ die Wärmeleitfähigkeit bedeutet. Durch Lösen dieses Systems partieller Differentialgleichungen mit den Ausgangsbedingungen ρ_0 , v_0 , p_0 , ε_0 , T_0 für das unverbrannte Gas (Frischgas) vor der Flammenfront und ρ_∞ , v_∞ , p_∞ , ε_∞ , T_∞ für das verbrannte Gas (Schwaden) hinter der Flammenfront erhält man:

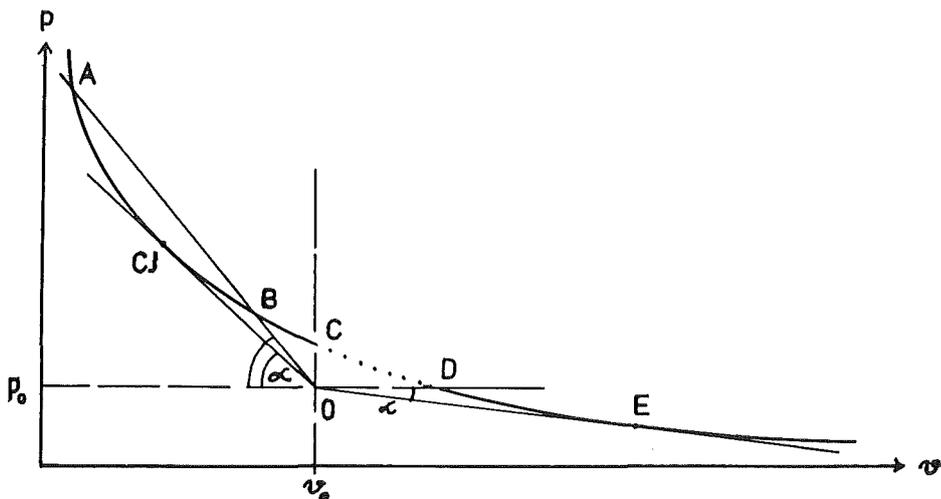
$$(2.12) \quad v_0 = v_\infty \sqrt{\frac{p_\infty - p_0}{v_0 - v_\infty}}$$

$$(2.13) \quad \varepsilon_\infty - \varepsilon_0 = \frac{1}{2} (p_\infty + p_0) (v_0 - v_\infty)$$

wobei $v=1/\rho$ das spezifische Volumen bedeutet. In diesen Gleichungen treten keine Terme mehr auf, die die Viskosität oder die Wärmeleitung

enthalten. Diese Prozesse sind für die Vorgänge innerhalb der Flammenfront zwar von großer Bedeutung, haben aber, wie aus den Gleichungen (2.12) und (2.13) unmittelbar folgt, keinen Einfluß auf die makroskopischen Eigenschaften der Flamme. Gleichung (2.12), welche die Flammengeschwindigkeit angibt, wird im p - v -Diagramm Rayleigh-Gerade genannt. Gleichung (2.13) ist die Hugoniot-Gleichung [76], die in Verbrennungsprozessen an die Stelle der Poisson'schen Adiabaten-gleichung tritt. Da die Flammengeschwindigkeit nicht mehr in ihr enthalten ist, gibt sie allein die thermodynamischen Eigenschaften des verbrannten und unverbrannten Gases vor bzw. hinter der Flammenfront an. Abb.2.2. zeigt den Verlauf der Hugoniot-Kurve in der p - v -Ebene.

Abb.2.2 Graphische Darstellung der Hugoniot-Kurve



Zu jedem Punkt (p_{∞}, v_{∞}) der Hugoniot-Kurve muß es eine Geschwindigkeit v_0 geben, die durch die Steigung der Rayleigh-Geraden durch den Ursprung (p_0, v_0) des Systems und diesen Punkt bestimmt ist. Für den Bereich $(p_{\infty} > p_0, v_{\infty} > v_0)$ existiert keine reelle Lösung der Rayleigh-Geraden, da $(p_{\infty} - p_0) / (v_0 - v_{\infty}) < 0$ wird; also kann diesem Bereich der Hugoniot-Kurve kein physikalischer Vorgang entsprechen. Die Hugoniot-Kurve besteht demnach aus zwei völlig verschiedenen und voneinander getrennten Zweigen:

- 1) der Detonation mit großer Fortschritungsgeschwindigkeit v_0 , i.allg. Detonationsgeschwindigkeit D genannt, Druckanstieg und Verdichtung in der Flammenfront ($v_0 - v_\infty > 0$), und
- 2) der laminaren Flamme mit geringer Fortschritungsgeschwindigkeit v_0 , Druckabfall und Expansion in der Flammenfront ($v_0 - v_\infty < 0$).

In den Arbeiten von Becker [73] und Döring [77] wurde bewiesen, daß die Detonation nur in einem Punkt der Hugoniot-Kurve, dem Chapman-Jouguet-Punkt (CJ-Punkt), stabil sein kann, in dem die Rayleigh-Gerade die Tangente zur Hugoniot-Kurve bildet, also wenn gilt:

$$(2.14) \quad \frac{p_\infty - p_0}{v_0 - v_\infty} = - \left(\frac{dp_\infty}{dv_\infty} \right)_S$$

Diese Beziehung ist identisch mit der von Jouguet [78] geforderten Bedingung für das Entstehen einer Detonation. Im CJ-Punkt wird die Fortschritungsgeschwindigkeit zur "normalen Detonationsgeschwindigkeit" D_0^{CJ} . Übereinstimmend mit dem experimentellen Befund einer inhärenten Detonationsgeschwindigkeit D wird von Jouguet eine solche Geschwindigkeit D_0^{CJ} gefordert und berechnet. Detonationen mit Geschwindigkeiten $D > D_0$ (Punkt A der Hugoniot-Kurve) sind instabil und gehen in die normale Detonation über. Detonationen mit $D < D_0$ widersprechen dem 2.Hauptsatz der Thermodynamik und sind nicht möglich. Dies stimmt mit den Ergebnissen späterer Experimente überein, in denen stets ein Einsetzen der Detonation mit einer Geschwindigkeit $D > D_0$ beobachtet wurde, die sich im CJ-Zustand stabilisierte.

Durch die Rankine-Hugoniot-Beziehungen in Verbindung mit dem Jouguet-Postulat wird die Existenz stabiler Detonationen und Flammen vorhergesagt. Fordert man jedoch analog zum CJ-Zustand der Detonation den entsprechenden CJ-Zustand der Verbrennung (Punkt E der H-Kurve), so findet man, daß dieses einfache, die Vorgänge innerhalb der Flammen-

front nicht berücksichtigende Modell zur quantitativen Beschreibung der laminaren Flamme ungeeignet ist. Während für Detonationen, insbesondere für detonierende Gase, eine sehr gute Übereinstimmung der experimentellen und der nach diesem, als Chapman-Jouguet-Theorie bekannten Modell berechneten Detonationsgeschwindigkeit beobachtet wurde, sind stabile Flammen mit CJ-Geschwindigkeit v_0^{CJ} unbekannt. Also müssen im Gegensatz zur Detonation für das Fortschreiten der Flamme die Prozesse innerhalb der Flammenfront von fundamentaler Bedeutung sein. Wie in den beiden folgenden Kapiteln gezeigt wird, erfolgt in der Detonation das Erhitzen des Gases und damit das Einleiten der chemischen Reaktion durch Kompression des Gases in einer Schockwelle, während in der laminaren Flamme neben der Kinetik der chemischen Reaktion der Wärmetransport und der Transport reaktiver Spezies in das Frischgas maßgebend sind.

2.3. Die eindimensionale laminare Flamme

Die experimentellen Untersuchungen zur Ozon/Sauerstoff-Verbrennung von Streng und Grosse [79,22] zeigten, daß es möglich ist, konzentrierte ozonhaltige Gasgemische und sogar reines Ozon in einer stetigen Flamme zu verbrennen, ohne daß ein Übergang zur Explosion oder zur Detonation eintritt.

Durch das Vorliegen experimenteller Werte für die Geschwindigkeit der Ozon/Sauerstoff-Flamme und die einfache Kinetik der thermischen Ozonzersetzung (wie in Kapitel 2.1.1. gezeigt wurde, kann der Reaktionsmechanismus durch nur wenige, i.allg. drei Elementarreaktionen beschrieben werden) ist die Ozonflamme für die Entwicklung und Erprobung von Modellen für die laminare Flamme von großem Interesse. So liegen zahlreiche Arbeiten vor, in denen Flammengeschwindigkeit und Struktur der Flammenfront, d.h. die Zeitabhängigkeit der Temperatur und der Konzentration der Reaktanten, für den Fall der laminaren Ozon/Sauerstoff-Flamme berechnet wurde [42,80-89]. Grundlage dieser

theoretischen Betrachtungen der Ozonflamme ist das Modell der eindimensionalen, planaren und stetigen laminaren Flamme vorgemischter, idealer Gase.

Mit Hilfe eines von Warnatz [42] entwickelten Rechenprogramms für diesen Flammentyp, der im folgenden Kapitel beschrieben werden soll, wurden Geschwindigkeit und Struktur der Flamme für Mischungen von Ozon mit Sauerstoff, Stickstoff und den Edelgasen Argon, Krypton und Xenon berechnet.

2.3.1. Modell der eindimensionalen laminaren Flamme

Eine Flamme ist charakterisiert durch eine Zone δ erhöhter Temperatur, in der die chemische Reaktion erfolgt, und der Geschwindigkeit, mit der diese in das unverbrannte Medium fortschreitet, bzw. im Fall der stationären Flamme, die Geschwindigkeit, mit der das unverbrannte Gas in die Flammenfront eintritt. Dabei wird das Frischgas durch Wärmeleitung erwärmt, gleichzeitig diffundieren aktive Spezies, die in der Flammenfront erzeugt wurden, in das Frischgas hinein. Durch diese Prozesse wird die Reaktionsgeschwindigkeit ansteigen und, da die Reaktanten verbraucht werden, ein Maximum durchlaufen. Hinter der Flammenfront existiert ein Gleichgewicht. Die Breite δ der Flammenfront ist daher abhängig von der Reaktionsgeschwindigkeit, und somit von der Temperatur und der Konzentration der Reaktanten. Letztere ist eine Funktion der Dichte ρ und damit des Initialdruckes p_0 .

Das von Warnatz [42] entwickelte Modell beschreibt eine ein-dimensionale, stetige, laminare Flamme mit planarer Flammenfront senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung. Für diesen Flammentyp sind folgende Eigenschaften charakteristisch: Die Flamme schreitet mit konstanter Geschwindigkeit v_0 fort, für die Werte von 1 bis 1000 cm/s gefunden wurden. Da die Flammengeschwindigkeit deutlich kleiner als die

normale Schallgeschwindigkeit c_0 ist, erfolgt die chemische Reaktion in der Flammenfront bei konstantem Druck, die Reaktionspartner befinden sich im Gleichgewicht. Die mittlere freie Weglänge der beteiligten Spezies ist klein gegen die Flammendicke δ . Es wirken keine äußeren Kräfte auf die Flamme ein. Thermodiffusion, Diffusion durch Druckgradienten, Wärmeverluste durch Strahlung sowie Effekte durch die Viskosität des Gases sind vernachlässigbar. Der Zustand des Gases ist durch das Gesetz für ideale Gase gegeben [90].

Die folgenden Abschätzungen sollen eine grobe Charakterisierung der Flammengeschwindigkeit v_0 und der Flammendicke δ liefern [90]: Seien ρ_0 , $\bar{\lambda}$, \bar{c}_p die ursprüngliche Dichte, die mittlere Wärmeleitfähigkeit und die mittlere spezifische Wärmekapazität des Gases, sei ferner $r = d\rho/dt$ die Reaktionsgeschwindigkeit, so gelten für die Breite δ der Flammenfront und die Flammengeschwindigkeit v_0 Näherungen:

$$(2.15) \quad \delta \approx \frac{\bar{\lambda}}{\bar{c}_p \rho_0 v_0}$$

$$(2.16) \quad v_0 \approx \frac{1}{\rho_0} \sqrt{\frac{\bar{\lambda} r}{\bar{c}_p}}$$

Die normale Flammengeschwindigkeit v_0 ist also im Gegensatz zur normalen Detonationsgeschwindigkeit D_0 , die nur von den thermodynamischen Größen und der Komposition des Gases vor und hinter der Flammenfront bestimmt ist, eine Funktion der Kinetik der chemischen Reaktion und der Transportvorgänge in der Flamme. Für eine Reaktion n -ter Ordnung in einem idealen Gas ist die Reaktionsgeschwindigkeit proportional der n -ten Potenz des Druckes. Nimmt man eine Temperaturabhängigkeit in Arrheniusform an, so erhält man für die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Flammengeschwindigkeit:

$$(2.17) \quad v_0 \propto p^{\frac{1}{2}n-1} \exp(-\frac{1}{2}E/RT_\infty) .$$

Ist für die Verbrennung eine Reaktion zweiter Ordnung geschwindigkeitsbestimmend, so wird die Flammengeschwindigkeit unabhängig vom Druck.

Den genauen Wert der Flammengeschwindigkeit erhält man als Eigenwert durch Lösen der Erhaltungsgleichungen, durch die chemische Reaktionen im eindimensionalen, stetigen Fluß beschrieben werden. Für die Kontinuität gilt:

$$(2.18) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0$$

Sei N die Anzahl der an chemischen Reaktionen in der Flammenfront beteiligten Spezies, $Y_i = m_i/m$ die Massenfraktion und D_{ij} die Diffusionskonstante für eine Spezies i mit $i=1\dots N$, $j = 1\dots N$, $i \neq j$, dann gilt für diese Spezies:

$$(2.19) \quad \rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho v \frac{\partial Y_i}{\partial x} = r_i + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_{ij} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right)$$

Führt man durch $c_p = (\partial h / \partial T)_p$ und $h = \epsilon + p/\rho$ die Temperatur als abhängige Variable ein, so erhält man unter Berücksichtigung der chemischen Reaktion und der Diffusion in der Flammenfront aus Gleichung (2.11) für die Erhaltung der Energie:

$$(2.20) \quad \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho c_p} \sum_{i=1}^N r_i h_i + \sum_{i=1}^N \frac{c_{p,i}}{c_p} D_{ij} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}$$

Warnatz [42] ersetzte in diesen Gleichungen den Diffusionsterm, der die Diffusion in einem binären System beinhaltet, durch den exakten Diffusionsfluß für ein Mehrkomponenten-System. Im Quellenterm $(1/\rho c_p) \sum r_i h_i$ werden unter Vermeidung der Annahme stationärer Konzentrationen die Reaktionen (1), (2), (3) und (4) berücksichtigt. Reaktion (5) und die Rückreaktion zu (3), $2O_2 \rightarrow O+O_3$, sind zu langsam

und daher ohne Bedeutung. Nach Einführung der zeitunabhängigen Ortsvariablen ψ erhält man durch Lösen der nun stationären Erhaltungsgleichung die Struktur der Flammenfront und, in guter Übereinstimmung mit experimentellen Werten [79,22], die Flammengeschwindigkeit für die Ozon/Sauerstoff-Flamme.

2.3.2. Die laminare Ozonflamme

Mit Hilfe des von Warnatz entwickelten Programms zur Berechnung eindimensionaler, laminarer Flammen vorgemischter Gase wurden Geschwindigkeit und Struktur der Ozonflamme für Mischungen von Ozon mit Sauerstoff, Stickstoff, sowie den Edelgasen Argon, Krypton und Xenon in Abhängigkeit von Ozonkonzentration und Druck bei einer Initialtemperatur von $T_0 = 298 \text{ K}$ berechnet. Zusätzlich wurden Ozonflammen für Ozon/Xenon-Gemische mit willkürlich gewählten Ozonkonzentrationen von 40 und 60 Mol-% Ozon unter TTR-typischen Bedingungen ($p = 3 \text{ bar}$, $T_0 = 165 \text{ K}$) berechnet. Die Ergebnisse sind vollständig in Anhang 7.1. tabellarisch wiedergegeben.

Abb.2.3 zeigt die Flammentemperatur, Abb.2.4 die Flammengeschwindigkeit für einen gewählten Druck von 0.45 bar als Funktion der Ozonkonzentration und der inerten Komponente. Die Flammentemperatur wird im wesentlichen durch den in der Energiegleichung (2.20) enthaltenen Quellenterm $(1/\rho c_p) \sum_i r_i h_i$ bestimmt. Da die Wärmekapazitäten der Edelgase nur geringfügig von dem Wert eines einatomigen, idealen Gases abweichen und die Reaktionsgeschwindigkeiten der Ozonzersetzung mit Argon, Krypton oder Xenon als dritten Stoßpartner sich für gleiche Ozonkonzentrationen nur unwesentlich voneinander unterscheiden [58], ist der Quellenterm nahezu unabhängig von der Art des Edelgases. Daher erreichen Ozon/Edelgas-Flammen bei gleicher Ozonkonzentration etwa gleiche Temperaturen. Bedingt durch die höheren Wärmekapazitäten zweiatomiger Gase werden in Ozon/Sauerstoff- und Ozon/Stickstoff-

Gemischen niedrigere Flammentemperaturen als in den entsprechenden Gemischen mit Edelgasen erreicht. Ozon/Sauerstoff- und Ozon/Stickstoff-Gemische unterscheiden sich voneinander nur minimal durch die geringfügig höheren Werte für die Wärmekapazität des Sauerstoffes [91], während die Reaktionsgeschwindigkeiten in beiden Systemen nahezu identisch sind [58]. Daher erreichen Ozon/Stickstoff-Flammen etwas höhere Temperaturen. Sauerstoff wird sowohl als Reaktionsprodukt des Ozonzerfalls gebildet als auch als Trägergas eingesetzt. Bei Temperaturen oberhalb 1700 K tritt Dissoziation des Sauerstoffs ein. Diese erfolgt endotherm und beeinflusst den Quellenterm negativ, so daß sich für höhere Ozonkonzentrationen der Temperaturanstieg verringert.

Die Flammgeschwindigkeit wird neben der Energiequelle durch Wärmetransport und Diffusion der Teilchen beeinflusst. Während die Wärmekapazität ρc_p unabhängig von der Art des Edelgases ist, nehmen die Wärmeleitfähigkeit λ und der Diffusionskoeffizient D und folglich auch die Flammgeschwindigkeit für Ozon/Edelgas-Gemische gleicher Ozonkonzentration in der Reihenfolge $Ar > Kr > Xe$ ab. In Gemischen hoher Ozonkonzentration ($X_{O_3} > 0.4$) beeinflusst der steigende Anteil an dissoziiertem Sauerstoff sowohl den Wärmetransport durch den deutlichen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bei nahezu unveränderter Wärmekapazität [93] als auch die Diffusion durch den höheren Diffusionskoeffizienten des atomaren Sauerstoffs und bewirkt einen signifikanten Anstieg der Flammgeschwindigkeit. Dieser Effekt zeigt besonders im System Ozon/Sauerstoff.

Wie Tab.2.2 anhand einer gewählten Ozonmischung von 25 Mol-% Ozon in Argon verdeutlicht, zeigen Geschwindigkeit und Temperatur der Ozonflamme eine nur geringfügige Abhängigkeit vom Initialdruck. In den Abbildungen 2.5 und 2.6 ist für verschiedene Ozongemische die Breite δ der Flammenfront als Funktion der Flammgeschwindigkeit und des Druckes graphisch dargestellt. Die Flammendicke δ ist umgekehrt proportional zu Flammgeschwindigkeit und Druck, wie für die in einer Reaktion zweiter Ordnung erfolgende Ozonzersetzung zu erwarten ist.

Abb.2.3 Flammentemperaturen v_0 für laminare Ozonflammen bei $T_0 = 298 \text{ K}$ und $p = 0.45 \text{ bar}$

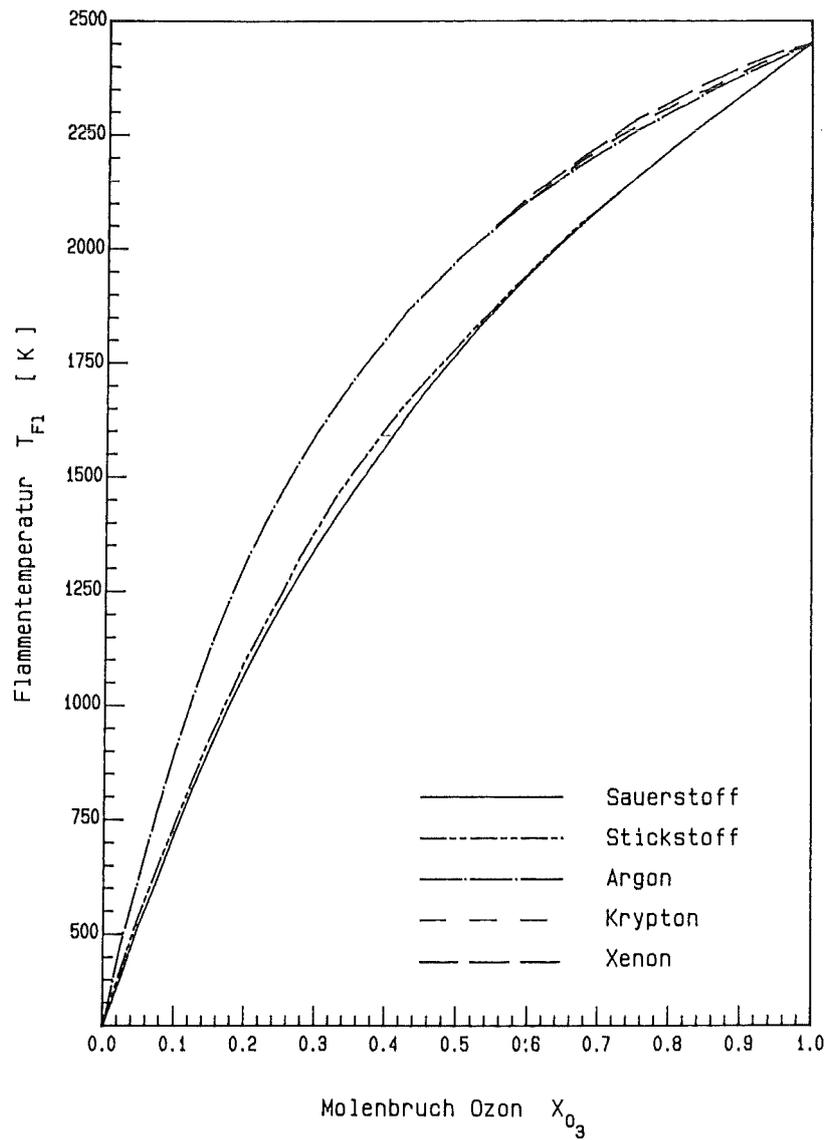


Abb.2.4 Flammengeschwindigkeiten v_0 für laminare Ozonflammen bei $T_0 = 298$ K und $p = 0.45$ bar

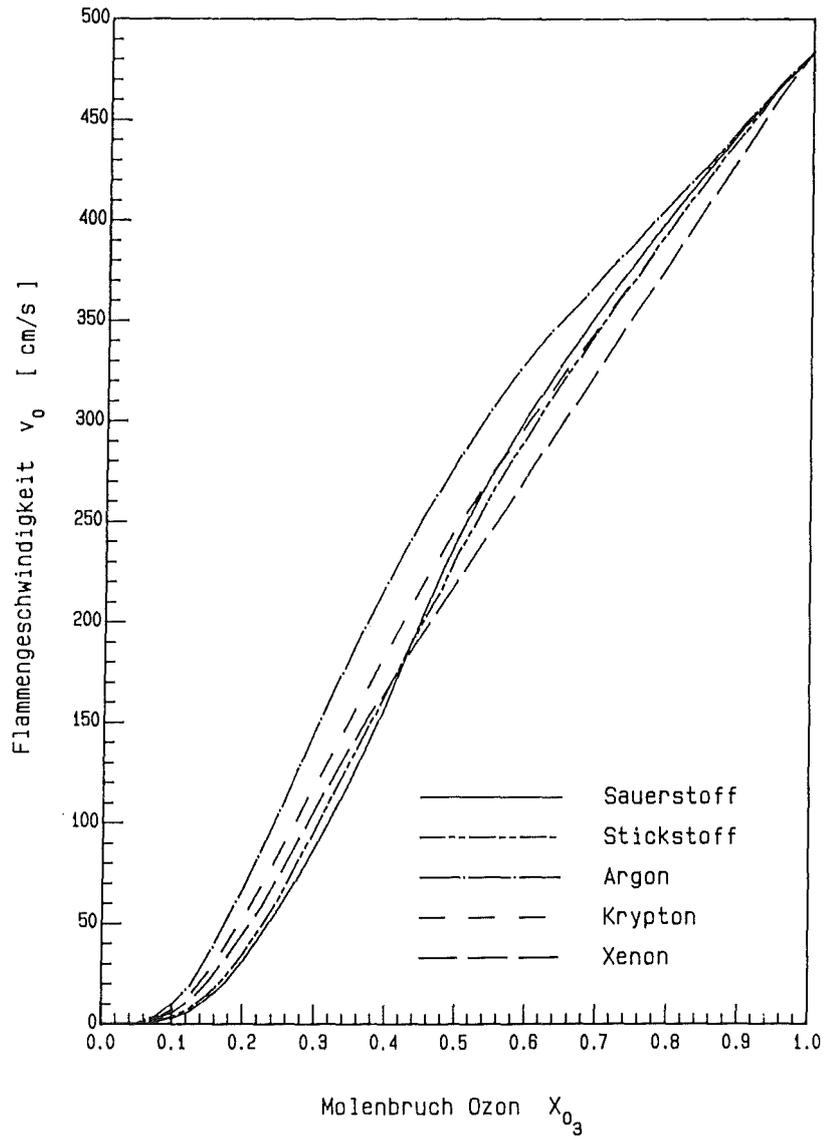
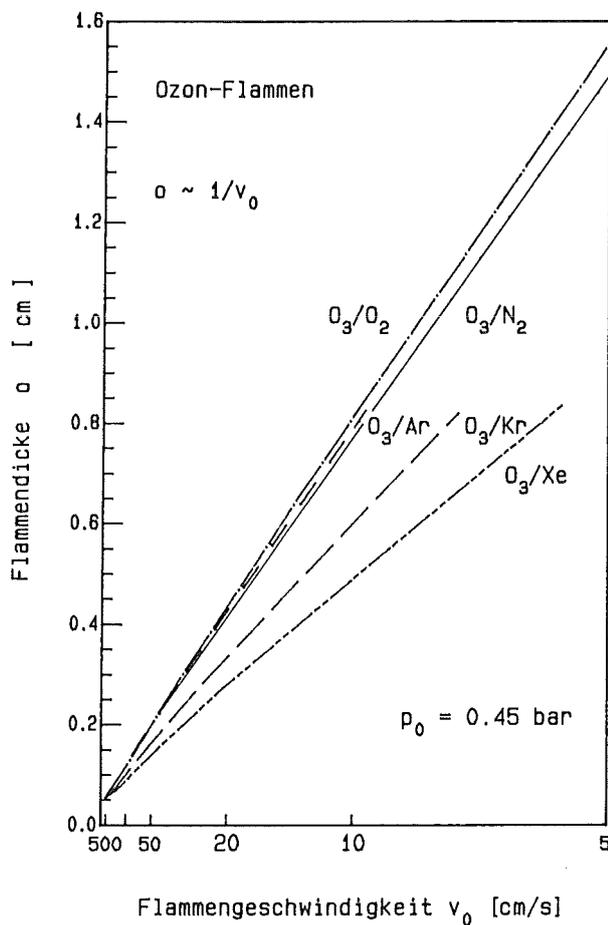


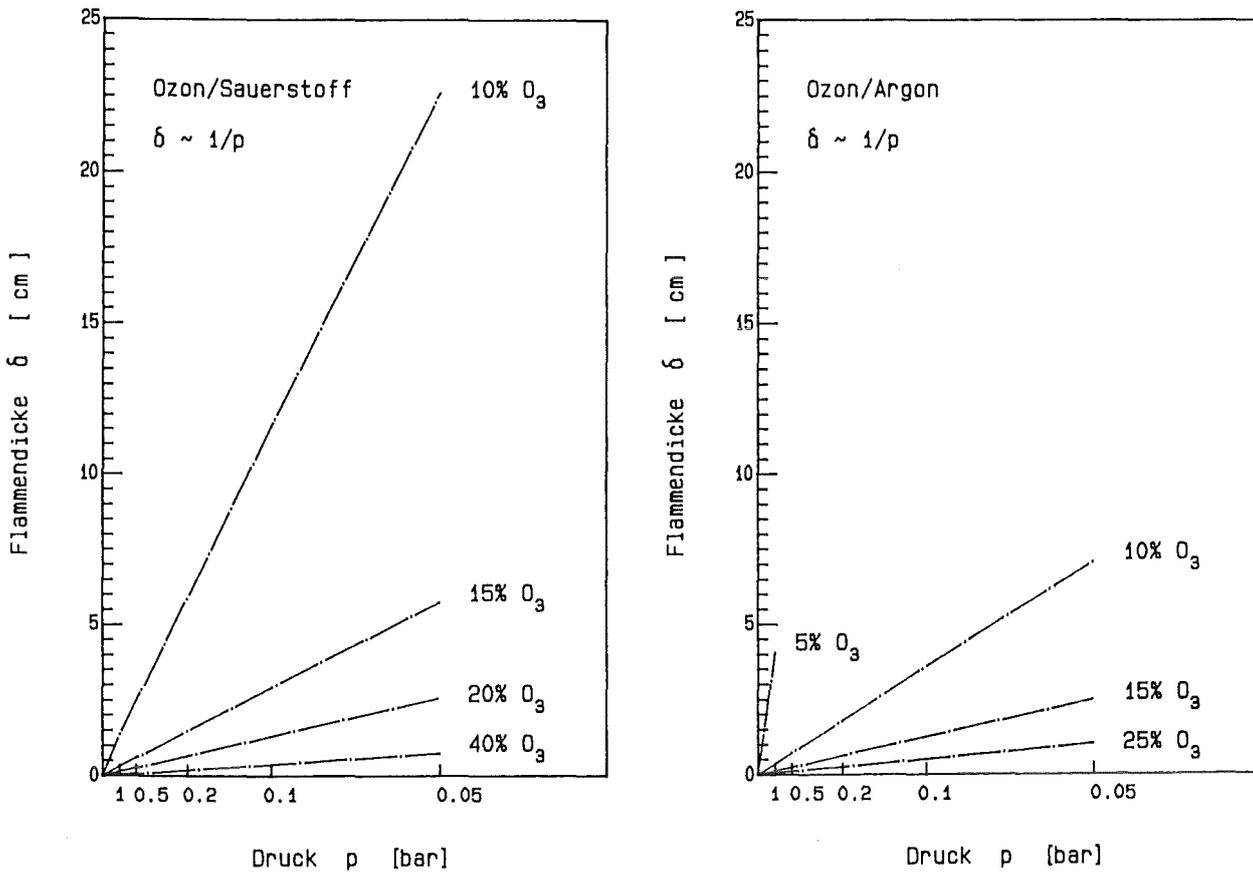
Abb.2.5 Abhängigkeit der Flammendicke δ von der Flammengeschwindigkeit



Tab.2.2 Flamme eines Ozon/Argon-Gemisches von 25 Mol-% Ozon bei $T_0 = 298 \text{ K}$

| p [hPa] | v_0 [cm/s] | T [K] | δ [cm] |
|---------|--------------|-------|---------------|
| 50 | 106.3 | 1468 | 1.01 |
| 100 | 106.2 | 1468 | 0.511 |
| 200 | 106.2 | 1468 | 0.256 |
| 450 | 106.2 | 1469 | 0.113 |
| 1000 | 106.1 | 1471 | 0.051 |

Abb.2.6 Abhängigkeit der Flammendicke δ vom Initialdruck



In den Abbildungen 2.7 sind exemplarisch einige der berechneten Flammenprofile der reinen Ozonflamme und der Ozon/Xenon-Flammen für Ausgangsbedingungen $p = 0.45$ bar und $T_0 = 298$ K, sowie $p = 3$ bar und $T_0 = 165$ K in Abhängigkeit von der Ozonkonzentration wiedergegeben. Für gleiche Ausgangsbedingungen (Ozonkonzentration, Druck, Initialtemperatur) sind die Profile der Ozon/Argon-, Ozon/Krypton- und Ozon/Xenon-Flammen identisch. Die Profile der Ozon/Stickstoff- und Ozon/Sauerstoff-Flammen unterscheiden sich von ihnen nur geringfügig in der Flammendicke und Flammentemperatur aufgrund der höheren Wärmekapazität des Stickstoffs und des Sauerstoffs.

Abb.2.7 Flammenprofile für Ozon- und Ozon/Xenon-Flammen

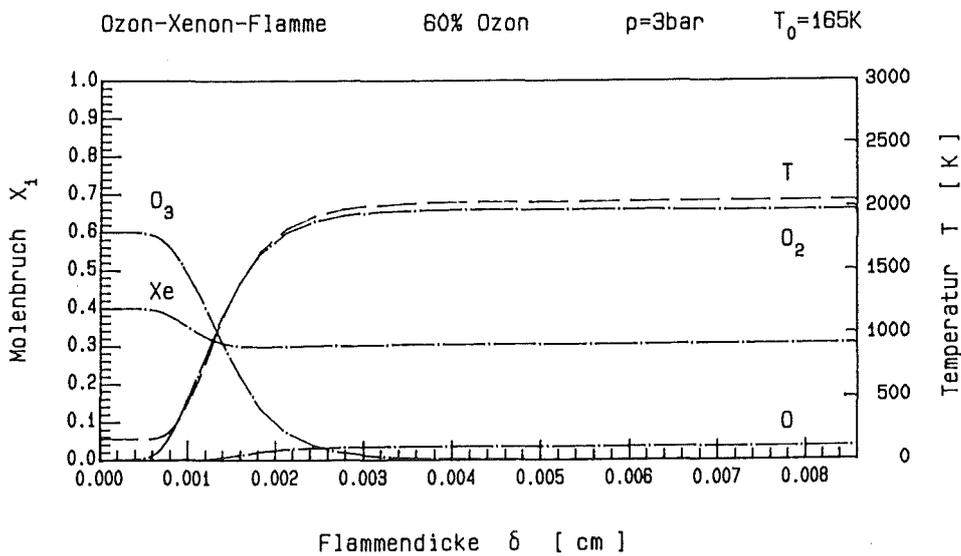
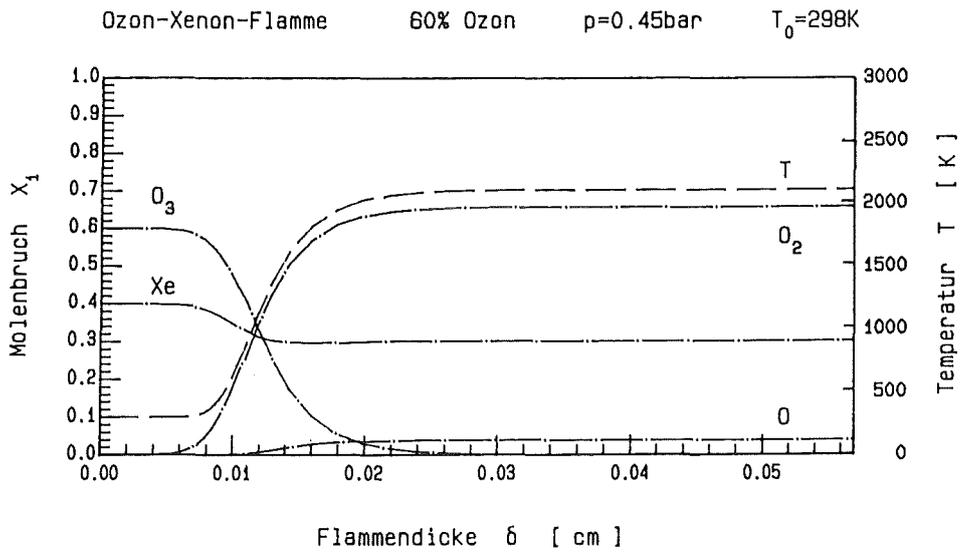
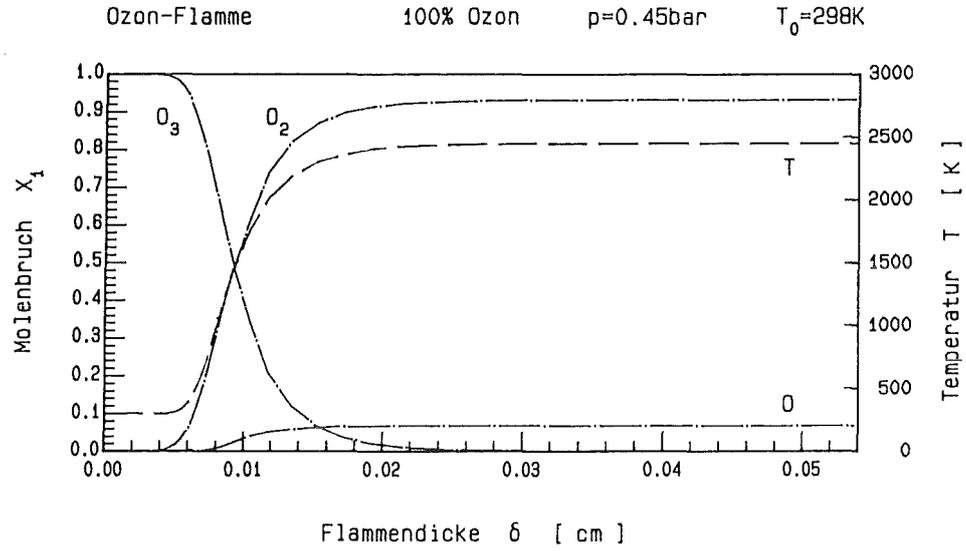
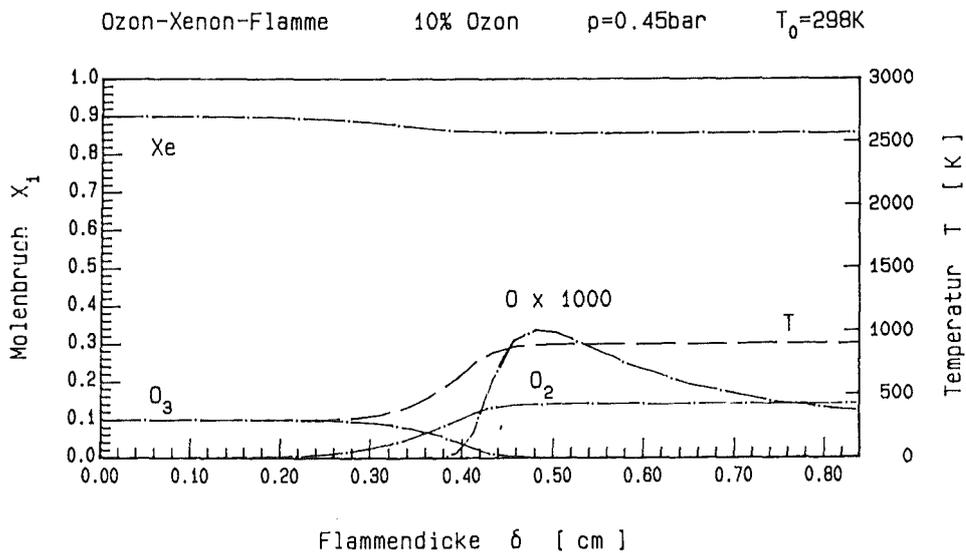
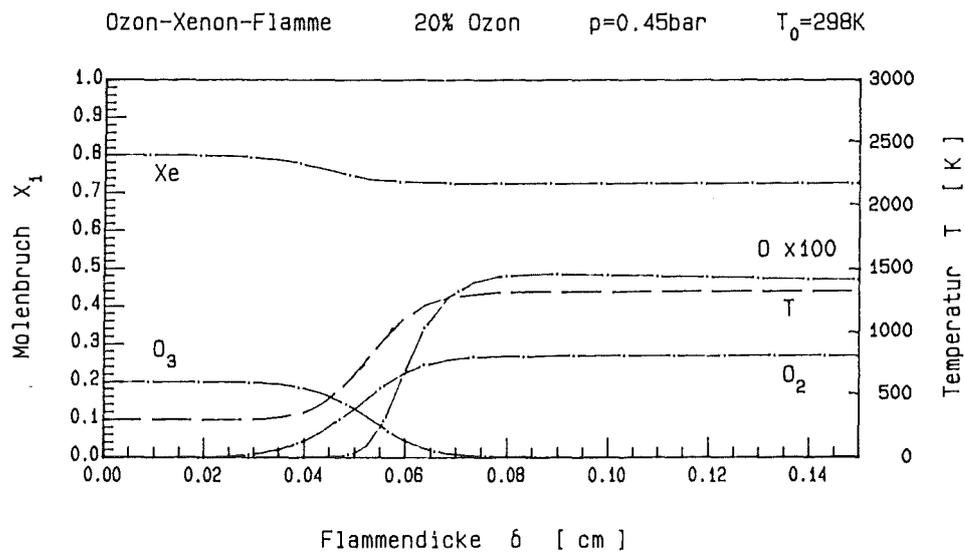
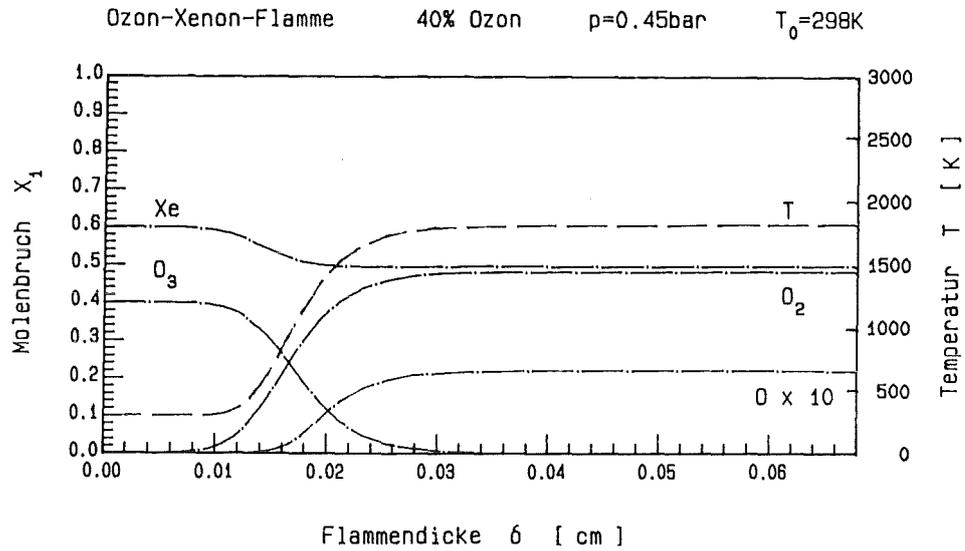


Abb.2.7 (Forts.)



2.3.3. Zündgrenzen

Die Bezeichnung 'Zündgrenze' wird gebraucht im Zusammenhang mit der Ausbildung laminarer Flammen in vorgemischten Gasen, die nicht zur Selbstzündung fähig sind, sondern einer externen Zündquelle bedürfen. Bei schwacher Zündung entsteht eine nicht-stationäre Flamme, deren Geschwindigkeit und Temperatur sich verringern werden, so daß die Reaktion zum Erliegen kommt. Bei genügend starker Zündung hingegen schreitet die Flamme mit konstanter Geschwindigkeit fort. Die Zündgrenze ist definiert als die Grenzkonzentration X_{gr} an Brennstoff; in einem brennbaren Gemisch führt eine Konzentrationsänderung über die Zündgrenze hinaus zu Gemischen, in denen keine stabile Flamme mehr möglich ist. Da ein brennbares Gemisch i.allg. aus dem Brennstoff und einem Oxidationsmittel besteht, existieren zwei Zündgrenzen: Unterschreiten der unteren Grenze führt zu Gemischen, die wegen Brennstoffmangel keine stabile Flamme erlauben, Überschreiten der oberen Grenze führt zu Gemischen, die wegen Mangels an Oxidationsmittel nicht brennbar sind. Darüber hinaus sind, wie am Beispiel der Ozonflamme gezeigt wurde, stabile Flammen in Gemischen möglich, in denen ein Stoff thermodynamisch instabil ist und ohne chemische Umsetzung mit einem anderen Stoff in exothermer Reaktion zerfällt. Für einen solchen Prozeß existiert nur eine Zündgrenze.

Zündgrenzen sind abhängig von Druck, Ausgangstemperatur, Zündenergie, Verdünnung durch ein inertes Medium (Stickstoff oder Edelgase), der Anwesenheit chemischer Inhibitoren sowie von Wandeffekten, d.h. der Geometrie des Gefäßes, welches das Gas einschließt: Betrachtet man ein zylindrisches Gefäß, so nimmt der Konzentrationsbereich, in dem ein Gemisch brennbar ist, mit wachsendem Durchmesser zu, wobei die Änderung bei geringen Durchmessern deutlich, bei größeren ($d \geq 5$ cm) nur noch gering ist. Bei Verminderung des Druckes steigt die (untere) Zündgrenze an; für ein Gemisch gegebener Zusammensetzung existiert für eine gewählte Gefäßdimension ein kritischer Wert p_{gr} , unterhalb dessen

keine stationäre Flamme möglich ist. Durch Temperaturerhöhung wird die Grenze gesenkt, da dem System weniger Energie zum Erreichen der Zündenergie zugeführt werden muß. Man findet eine lineare Abhängigkeit der Zündgrenze X_{gr} von der Temperatur T_0 . Chemische Inhibitoren verringern die Reaktionsgeschwindigkeit und damit Flammentemperatur und Flammengeschwindigkeit und bewirken ein Ansteigen der Zündgrenze [94].

In den vorherigen Kapiteln wurden stets adiabatische Prozesse betrachtet. In Wirklichkeit verursacht z.B. Wärmeübertragung auf die kalte Gefäßwand einen Energieverlust, so daß das Gas nicht zur adiabatischen Flammentemperatur T_{af} , sondern bei verminderter Brenngeschwindigkeit $m = \rho v$ zur geringeren Flammentemperatur T verbrennt. In der Erhaltungsgleichung für die Energie (2.20) ist daher ein Verlustterm L zu berücksichtigen [95]. Betrachtet man eine planare, stationäre Flamme und berücksichtigt man einen Energieverlust, der ausschließlich durch Wärmeleitung erfolgt, so ist der Verlustterm gegeben durch die Näherung $L \approx b\bar{\lambda}(T-T_0)/d^2$, wobei der Wert b für ein zylindrisches Gefäß ca. 15 beträgt. Korrigiert man die Energiegleichung um diesen Term, so erkennt man, daß es für das Fortschreiten der Flamme einen minimalen Gefäßdurchmesser geben muß, dessen Unterschreiten zum Auslöschen (Quenching) der Flamme führt. Für diesen kritischen Durchmesser d_0 (Quenchingdurchmesser) ergibt sich mit $\beta = \frac{E}{RT_{af}^2}(T_{af}-T_0)$ die Näherung [95]

$$(2.21) \quad d_0 \approx \sqrt{2e\beta b} \delta$$

In ihren experimentellen Untersuchungen der Ozon/Sauerstoff-Flamme fanden Streng und Grosse [96] für den Quenchingdurchmesser d_0 eines Rohres die empirischen Beziehungen:

$$(2.22) \quad d_0/\mu\text{m} = 10^{1.953} X_{O_3}^{-2.118} \quad \text{für } T_0 = 298 \text{ K und } p = 1 \text{ atm}$$

$$(2.23) \quad d_0/\mu\text{m} = 10^{1.953} (p/\text{atm})^{-1.111} \quad \text{für } T_0 = 298 \text{ K und } X_{O_3} = 1$$

Nach einem einfachen Modell kann die Zündung eines Gases nur erfolgen, wenn ein Volumen, gegeben durch die Flammendicke δ und die durch den Quenchingabstand d_0 gegebene Fläche A , auf die adiabatische Flammentemperatur T_{af} erhitzt wird. D.h. es ist eine Mindestzündenergie

$$(2.24) \quad h_{\min} = (\delta A) \rho_0 \bar{c}_p (T_{af} - T_0)$$

erforderlich. Die genauesten Bestimmungen der Zündenergie für Ozon/Sauerstoff-Gemische wurden von Raffel et al. [27] durchgeführt: Übereinstimmend mit theoretischen Berechnungen wurden für Ozonkonzentrationen von 20 bis 50 Mol-% bei einem Initialdruck von 0.35 bzw. 0.7 bar Zündenergien von 0.1 bis 0.2 J/cm³ (absorbierte Energiedichte) experimentell bestimmt. Für geringere Ozonkonzentrationen stieg die Zündenergie bis zu einem Wert von 1 J/cm³ für 10 Mol-% Ozon an. Gemische mit einem Ozongehalt unter 10 Mol-% konnten auch durch Einstrahlung höherer Energien (bis zu 40 J/cm²) nicht mehr gezündet werden.

2.4. Detonation

Die Detonation ist definiert als eine mit einer Schockwelle gekoppelte chemische Reaktion. In einem zündfähigen Gas können Schockwellen mechanisch erzeugt werden, oder von einer Flamme ausgesandte Kompressionswellen können sich zu einer Schockwelle versteifen. Schockwellen sind gekennzeichnet durch eine un stetige Änderung von Dichte, Druck und Temperatur des Gases und eine die normale Schallgeschwindigkeit übersteigende Fortschrit tungsgeschwindigkeit. Erreicht die Temperatur in der Schockwelle einen Wert, bei dem sich das Gas nach kurzer Induktionszeit spontan entzündet, tritt Detonation ein. Für Detonationen sind folgende Eigenschaften charakteristisch: Eine stabile Detonation schreitet mit konstanter Geschwindigkeit fort und erreicht Werte bis über 3000 m/s. Die Detonationsgeschwindigkeit wird nur von der chemischen Zusammensetzung der detonierenden Substanz

bestimmt. Sie ist unabhängig von der Geschwindigkeit der chemischen Reaktion, sofern diese nur hinreichend hoch ist. Sie ist unabhängig von Initialdruck und -temperatur, unabhängig von ihrem Entstehungsort und der Art ihrer Erzeugung (Zündung durch Flammen, Funken, mechanisch erzeugte Schockwellen) und unabhängig von Material und Durchmesser des Gefäßes, sofern dieser einen Mindestwert überschreitet.

Die erste zufriedenstellende Theorie zur Berechnung von Detonationsgeschwindigkeiten wurde von Chapman und Jouguet (CJ) entwickelt [78,99] und später durch das Modell von Zeldovich, von Neumann und Döring (ZND) über die Struktur der Detonationswelle erweitert [77,100,101]. In den folgenden Abschnitten sollen beide Modelle, sowie einige wesentliche Erscheinungen, die durch diese einfachen Theorien nicht erklärt werden, wie die Existenz von Detonationsgrenzen, Wirkung von Grenzschichten, Abkühlungseffekte und Detonations-"Spin", diskutiert werden. Ferner werden Detonationsgeschwindigkeit, -druck und -temperatur für stationäre Detonationen von gasförmigen Ozon-Sauerstoff- und Ozon-Edelgas-Mischungen nach der CJ-Theorie berechnet.

2.4.1. Die Chapman-Jouguet-Theorie

Die wesentlichen Grundzüge der Chapman-Jouguet-Theorie wurden bereits in Kapitel 2.2. diskutiert. Die CJ-Theorie beschreibt streng eindimensionale, planare, stationäre Detonationen und erlaubt nur durch Anwendung hydrodynamischer und thermodynamischer Funktionen die Berechnung der stationären Detonationsgeschwindigkeit D_0^{CJ} , sowie Druck und Temperatur des CJ-Zustandes, ausgehend von den Rankine-Hugoniot-Gleichungen und dem Chapman-Jouguet-Kriterium für die Existenz stationärer Detonationen. Dieses Kriterium besagt, daß die stationäre Detonationsgeschwindigkeit gleich der Summe aus Schallgeschwindigkeit c und Fließgeschwindigkeit v des Gases ist. Da $c_0 = (\partial p / \partial \rho)_S$, folgt:

$$(2.14) \quad \frac{P_{CJ} - P_0}{v_0 - v_{CJ}} = - \left(\frac{dp}{dv} \right)_{S,CJ}$$

Die Indices CJ und o bezeichnen den Chapman-Jouguet-Zustand bzw. den Ausgangszustand des Gases. Für adiabatische Zustandsänderungen gilt $(dp/dv)_S = -\gamma(p/v)$. Es gelten die Rankine-Hugoniot-Gleichungen; ferner gilt für ideale Gase $p v = nRT$, wobei γ den Adiabatenkoeffizienten und n die Anzahl der Mole pro Gramm bedeuten (per Definition ist $v = 1/\rho$). Sei q die in der chemischen Reaktion pro Gramm der Gasmenge freigesetzte Wärmemenge, so ist die Änderung der spezifischen inneren Energie des Gases gegeben durch:

$$(2.25) \quad \varepsilon_{CJ} - \varepsilon_0 = \bar{c}_v (T_{CJ} - T_0) - q$$

Mit der Verdichtung $\mu = \rho_{CJ}/\rho_0$ und Umformen der oben genannten Gleichungen erhält man:

$$(2.26) \quad \mu^2 - \left(1 + \frac{1}{\gamma_{CJ}}\right)\mu + \frac{n_0 T_0}{n_{CJ} T_{CJ} \gamma_{CJ}} = 0$$

$$(2.27) \quad \bar{c}_v (T_{CJ} - T_0) - q - \frac{R}{2}(\mu - 1) \left(n_{CJ} T_{CJ} + \frac{1}{\mu} n_0 T_0 \right) = 0$$

$$(2.28) \quad D_0^{CJ} = \mu \sqrt{\gamma_{CJ} n_{CJ} R T_{CJ}}$$

$$(2.29) \quad \frac{P_{CJ}}{P_0} = \mu \frac{n_{CJ} T_{CJ}}{n_0 T_0}$$

Aus diesem Gleichungssystem lassen sich alle Größen berechnen, die die makroskopischen Eigenschaften der Detonationswelle beschreiben.

2.4.2. Die Zeldovich-von Neumann-Döring-Theorie

Nach Zeldovich, von Neumann und Döring besteht eine Detonationswelle aus einer schmalen Wellenfront, der Schockwelle, in der sich die Zustandsgrößen des Gases unstetig ändern, gefolgt von einer Zone, in der die Umsetzung der zuvor komprimierten und erhitzten Gase genau wie in einer homogenen Gasreaktion erfolgt [77,100,101]. Diese in Abb.2.8 skizzierte Struktur folgt unmittelbar aus dem für die Breite einer Schockwelle typischen Wert von etwa 10^{-4} mm [102], welcher der mittleren freien Weglänge eines Teilchens entspricht [73,97]. Die Reaktion setzt ein, nachdem das Gas in der Schockwelle komprimiert und erhitzt wurde. Während die Reaktion fortschreitet, steigt die Temperatur bis zur Detonationstemperatur an. Gleichzeitig sinkt der Druck ab, da das Gas in der Reaktionszone expandiert, bis schließlich

Abb.2.8 Schematische Darstellung einer Detonationswelle und der Druckänderung in einer Detonation

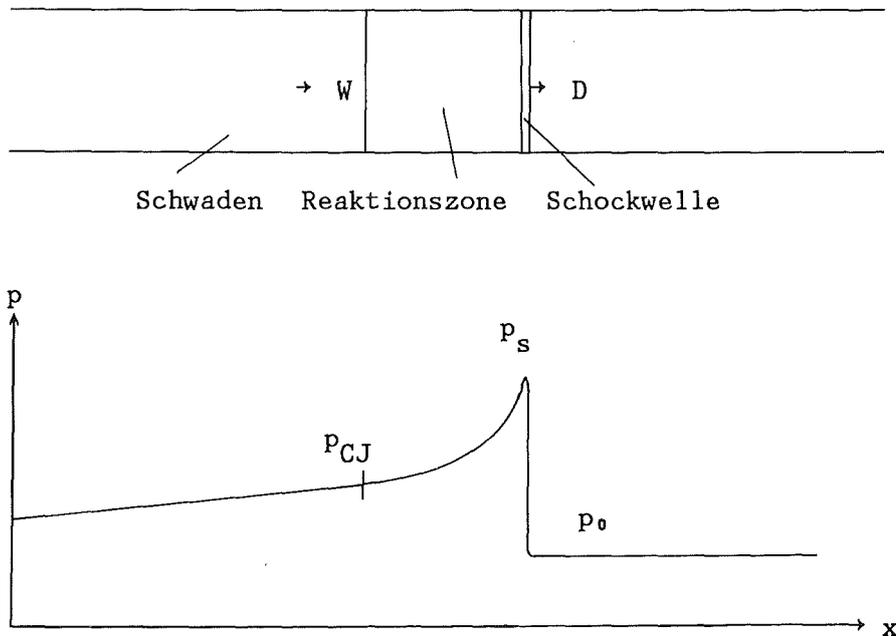
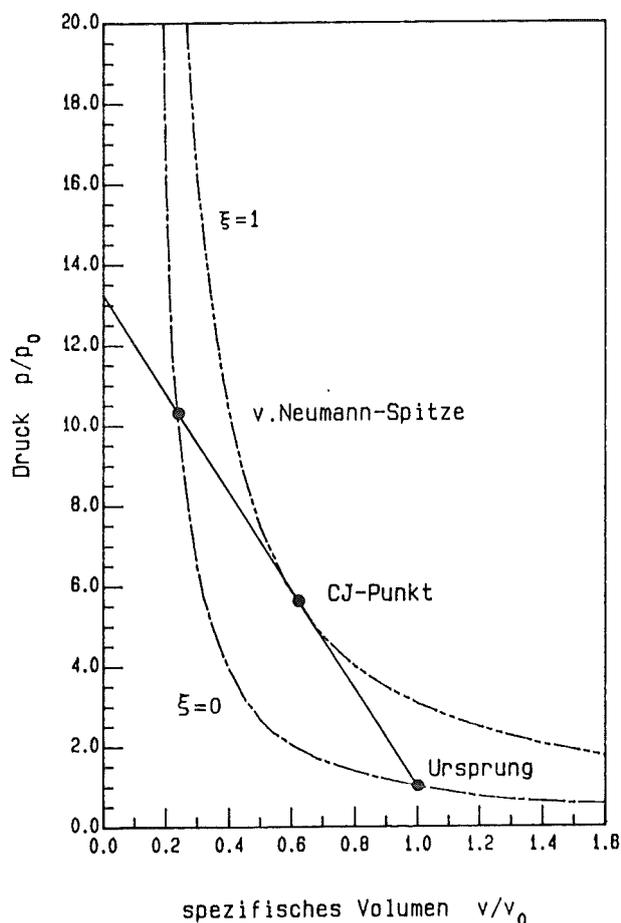


Abb.2.9 Hugoniot-Kurven für die Detonation eines Gemisches von 10 Mol-% Ozon in Sauerstoff



im CJ-Punkt der Gleichgewichtszustand erreicht wird. Dabei beeinflusst die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion nicht die Detonationsgeschwindigkeit, welche allein vom CJ-Zustand bestimmt wird, aber sie bestimmt die Länge δ der Reaktionszone. Bezeichnet man mit ξ das Fortschreiten der Reaktion, so läßt sich für jeden Wert ξ mit $0 \leq \xi \leq 1$ eine Hugoniot-Kurve zeichnen, wie dies in Abb.2.9 für $\xi=0$ (reine Schockwelle) und $\xi=1$ (Gleichgewicht) für ein 10%iges Ozon/Sauerstoff-Gemisch dargestellt ist. Der Zustand des Gases in der Schockwelle (von Neumann-Spitze) ist gegeben durch den Schnittpunkt der Hugoniot-Kurve für $\xi=0$ mit der Rayleigh-Geraden. Die Rayleigh-Gerade, welche die Detonationsgeschwindigkeit bestimmt, bildet im CJ-Punkt die Tangente

zur Hugoniot-Kurve für $\xi=1$. Der CJ-Zustand beschreibt also die rückwärtige Grenzschicht der Detonationswelle und damit den Beginn einer isentropen, nicht-stationären Verdünnungswelle, in der das Gas (Schwaden) expandiert und die Geschwindigkeit des Gases von der stationären Detonationsgeschwindigkeit auf Null absinkt [103,104]. Ausgelöst von dem ZND-Modell für stationäre Detonationen wurde die Struktur der Detonationswelle in zahlreichen experimentellen Arbeiten untersucht. Dabei wurde die von Zeldovich, v. Neumann und Döring geforderte Struktur bestätigt: Schockwelle und Reaktionszone lassen sich auf Grund ihrer unterschiedlichen Dichtegradierten voneinander unterscheiden. Ferner wurde das Absinken des Druckes um einen Faktor von ca. 2 von der "von Neumann-Spitze" zur CJ-Ebene ($p_s \approx 2p_{CJ}$) und hinter der CJ-Ebene das Einsetzen der nicht-stationären Verdünnungswelle beobachtet [105-108].

2.4.3. Nicht-ideale Detonationen

Sowohl die CJ-Theorie als auch das ZND-Modell liefern keine Aussagen über die Detonationsfähigkeit eines Stoffes. Analog zu den Zündgrenzen in Flammen werden jedoch Detonationsgrenzen, abhängig von Brennstoffkonzentration, Initialdruck und Gefäßdurchmesser, beobachtet. Für die planare Detonation im System Ozon/Sauerstoff wird die Grenzkonzentration mit ca. 9 Mol-% Ozon angegeben [109]. Ferner werden im Gegensatz zur CJ-Detonation stabile Detonationen mit einer geringeren stationären Detonationsgeschwindigkeit $D_0 < D_0^{CJ}$ beobachtet [33,34,77,110-114]. Das Auftreten solcher Detonationen zeigt mehrere Mängel der CJ-Theorie und auch des ZND-Modells auf:

Die ZND-Theorie definiert die CJ-Ebene gleichzeitig als die Grenzschicht zwischen stationärer Detonationswelle und nicht-stationärer Verdünnungswelle und als den Zustand chemischen Gleichgewichtes. Da die Breite δ einer Detonationswelle stets endlich ist (sie ist i.allg.

kleiner als 1 mm, nahe der Detonationsgrenze beträgt sie einige mm), eine chemische Reaktion sich dagegen asymptotisch dem Gleichgewicht nähert, kann folglich der Zustand des Gases an der CJ-Ebene nur ungefähr dem Gleichgewichtszustand entsprechen. Diese Abweichung muß sich mit zunehmender Reaktionsgeschwindigkeit verringern, so daß nur für hinreichend schnelle Reaktionen die CJ-Theorie in Verbindung mit dem ZND-Modell eine genaue Berechnung der stationären Detonationsgeschwindigkeit erlaubt [115-117].

Die Detonationswelle wird in beiden Modellen als streng eindimensional, die Wellenfront als planar angesehen. Wärmeleitung und Viskosität werden nicht berücksichtigt. Diese Prozesse bedingen aber bei Detonationen in Rohren einen zweidimensionalen Fluß der Gase und bewirken eine Krümmung der Wellenfront und innerhalb der Reaktionszone die Ausbildung einer Grenzschicht, die durch einen Temperaturgradienten vom Rohrrinneren zur Wand hin gekennzeichnet ist und deren Breite mit wachsender Länge δ der Reaktionszone zunimmt. Der resultierende Energieverlust führt zu einer Verringerung der stationären Detonationsgeschwindigkeit um einen Betrag ΔD_0 . Diese Schwächung der Detonation nimmt bei Verringerung des Rohrdurchmessers und fallendem Initialdruck p_0 zu, bis schließlich eine stabile Detonation unmöglich wird. Daraus folgt unmittelbar, daß für Detonationen in Rohren eine Detonationsgrenze (gegeben durch einen minimalen Rohrdurchmesser und minimalen Initialdruck bei gegebener chemischer Zusammensetzung des detonierenden Stoffes) existieren muß [77]. Tsugé [118] berechnete erstmals Werte ΔD_0 für die Ozondetonation in Rohren in guter Übereinstimmung mit experimentell ermittelten Werten [34] und lieferte ferner einen mathematischen Beweis für die Existenz von Detonationsgrenzen: Mit Hilfe von Näherungsverfahren ergibt sich ΔD_0 als Eigenwert für ein System partieller Differentialgleichungen, die unter Einbeziehung von Viskosität, Wärmeleitung und Diffusion (Gesetze von Navier-Stokes, Fourier und Fick) den Fluß des Gases in der Detonationswelle beschreiben. Unterschreitet entweder die Ozonkonzentration oder das Druck-Durchmesser-Verhältnis einen kritischen Wert, so existiert kein

Eigenwert ΔD_0 , d.h. es gibt keine Lösung für das Gleichungssystem, durch das eine Detonation beschrieben wird. Für kleine Werte ΔD_0 , d.h. für Detonationen mit einer Geschwindigkeit nahe der CJ-Geschwindigkeit, ergibt sich übereinstimmend mit experimentellen Befunden eine umgekehrt proportionale Abhängigkeit von p_0 und d :

$$(2.30) \quad \Delta D_0 / D_0^{CJ} \propto (p_0 d)^{-1}$$

Befinden sich Gasgemische nahe der Detonationsgrenze in dünnen Rohren oder betrachtet man Gemische, die nur schwer zur Detonation zu bringen sind, so werden Detonationen mit pulsierender Druckwelle beobachtet [33,98,108,113,119-126,]. Für diese Schwingungen sind folgende Eigenschaften charakteristisch: Die Amplitude dieses als Detonationsspin bezeichneten Prozesses steigt mit sinkender Brennstoffkonzentration an. Die Frequenz ν nimmt mit abnehmendem Rohrdurchmesser d zu. Die mit der Detonation verbundene Leuchterscheinung pflanzt sich schraubenförmig durch das Rohr fort. Die Detonationsgeschwindigkeit entspricht der CJ-Geschwindigkeit D_0^{CJ} . Fay gelang die theoretische Berechnung des Detonationsspins, wobei er annahm, daß die Schwingungen sich wie normale Schallwellen verhalten [127]: Ausgehend von Rayleighs Behandlung der Ausbreitung von Schallwellen in einem strömenden Medium [128] erhielt Fay die Beziehung

$$(2.31) \quad D_0^{CJ} / \nu = d [\pi(\gamma+1) / \gamma k_n],$$

wobei γ der Adiabatenkoeffizient des Gases im CJ-Zustand und k_n ein Koeffizient der Besselfunktion ist. Für $n=1$ und $k_n=1.841$ erhält man

$$(2.32) \quad D_0^{CJ} / \nu \approx 3d.$$

in Übereinstimmung mit experimentellen Beobachtungen.

2.4.4. Das Entstehen von Detonationen

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten für das Entstehen von Detonationen[129]:

1) Der Übergang vom Verbrennungsprozeß zur Detonation erfordert turbulente Flammen. Schreitet eine laminare Flamme durch ein Gefäß, i.allg. ein Rohr, fort, wird die Oberfläche der Flammenfront durch Wechselwirkung ihrer Randzone mit der Gefäßwand oder Wechselwirkung mit reflektierten Druckwellen oder Hindernissen in Fortpflanzungsrichtung gestört. Die Oberfläche der Flamme, die Brennfläche, wird sich vergrößern und falten: Die Flamme wird turbulent. Diese Vergrößerung der Brennfläche führt zur einer drastischen Steigerung der Flammengeschwindigkeit. Die von der Flammenfront ausgesandte Kompressionswelle versteift sich zur Schockwelle. Das Einsetzen der Detonation selbst erfolgt "plötzlich", d.h. es läßt sich nicht durch einen kontinuierlichen Übergang von der Flamme zur Detonation beschreiben. Dies stimmt mit experimentellen Beobachtungen überein [119] und folgt auch aus der Betrachtung der Hugoniot-Kurve, die aus zwei völlig von einander getrennten Zweigen für die Verbrennung und die Detonation besteht (Kap.2.2.).

2) Das direkte Auslösen der Detonation erfordert eine externe Zündquelle, die geeignet ist, im detonationsfähigen Medium eine Schockwelle zu erzeugen, die mit einer ihr folgenden chemischen Reaktion gekoppelt ist. Für eine solche Zündquelle, Funken oder mechanische Schocks, ist eine Mindestenergie erforderlich. Wird diese unterschritten, kommt es zur Entkopplung von Schockwelle und Reaktionszone, die Detonation wird nicht-stationär und geht in einen Verbrennungsprozeß über.

Unabhängig von der Art ihres Entstehens sind einsetzende Detonationen nicht-stationär. Sie weisen eine höhere als die stationäre Detonationsgeschwindigkeit auf, die sich zunehmend verringert, bis sich die Detonation im stationären Zustand stabilisiert [105,120,130].

2.4.5. Die Detonation ozonhaltiger Gasgemische

Wie in früheren Arbeiten bereits am System Ozon/Sauerstoff gezeigt wurde, läßt sich die CJ-Theorie auf die Detonation ozonhaltiger Gasgemische und Flüssigkeiten anwenden [31,32,33]. Zum Vergleich mit den hier ermittelten experimentellen Daten wurden nachfolgend die Detonationen von Mischungen aus Ozon und Sauerstoff oder den Edelgasen Argon, Krypton und Xenon, sowie Ozon/Xenon-Gemischen mit geringen Anteilen an Methan, Kohlenmonoxid oder Stickstoffdioxid berechnet:

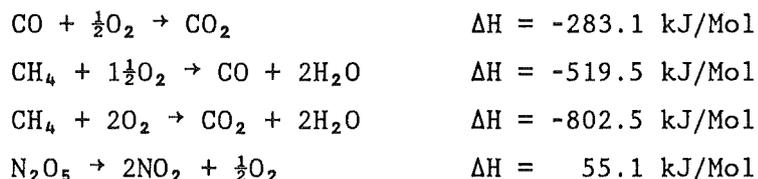
Bekannt seien Initialdruck und -temperatur sowie die Zusammensetzung des Frischgases. Wegen der per definitionem vollständigen Umsetzung des Gases in der Detonationswelle ist die Zusammensetzung des verbrannten Gases ebenfalls bekannt. Damit läßt sich die Detonationstemperatur T_{CJ} aus den Gleichungen (2.26) und (2.27) durch Iteration bestimmen (S.32), wobei hier eine Genauigkeit von 3 K gewählt wurde. q ist die Wärmetönung der Gesamtreaktion pro Gramm des Gasgemisches. Für die Detonation eines reinen Ozon/Sauerstoff- oder reinen Ozon/Edelgas-Gemisches tragen zwei Reaktionen zur Wärmetönung q bei: 1) die Zersetzung des Ozons mit einer Reaktionswärme $\Delta H_{O_3 \rightarrow 1\frac{1}{2}O_2} = -142.7$ kJ/Mol [58] und 2) die Dissoziation des Sauerstoffs, die bei Temperaturen oberhalb 1700 K zu merklichem Anteil α erfolgt, mit $\Delta H_{O_2 \rightarrow 2O} = +498.5$ kJ/Mol [58]. Dabei ergibt sich bei bekanntem Molenbruch des Ozons X_{O_3} und des Sauerstoffs X_{O_2} :

$$(2.33) \quad q = n_0 X_{O_3} (-\Delta H_{O_3 \rightarrow 1\frac{1}{2}O_2}) + n_{CJ} X_{O_2} \alpha (-\Delta H_{O_2 \rightarrow 2O})$$

Der Dissoziationsgrad α ergibt sich aus:

$$(2.34) \quad \alpha = \sqrt{K_p / (K_p + 4p)}.$$

Enthält das Gemisch neben Ozon Kohlenmonoxid, Methan oder Stickstoffdioxid, so sind die Reaktionen



zu berücksichtigen [131]. Die Werte für die Wärmekapazitäten und Adiabatenkoeffizienten wurden Tabellenwerken entnommen [92]. Für Edelgase wurden die Werte für ein einatomiges, ideales Gas eingesetzt. Aus den berechneten Werten für μ und T_{CJ} lassen sich nach den Gleichungen (2.28) und (2.29) die Geschwindigkeit D_0 und das Druckverhältnis p_{CJ}/p_0 berechnen (S.32).

Die Ausgangsbedingungen für die Rechnungen waren $p_0 = 0.4 \text{ bar}$, $T_0 = 300 \text{ K}$ und Ozonkonzentrationen bis 100 Mol-%. Die Ozonkonzentration wurde in Schritten von 1 Mol-% variiert. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 2.10, 2.11 und 2.12 für binäre Gemische zusammen mit den Werten von Stiang et al. [31] und Harper und Gordon [33], sowie in Anhang 7.2 tabellarisch wiedergegeben.

Die Darstellung der Detonationstemperatur als Funktion der Ozonkonzentration gleicht prinzipiell den entsprechenden Diagrammen für die laminare Flamme (s.S.22), wobei jedoch in der Detonation durch die Kompression μ höhere Temperaturen erreicht werden. Die hier berechneten Werte stimmen sehr gut mit denen von Streng et al. [31] überein, während sie im Bereich hoher Ozonkonzentrationen deutlich von den Ergebnissen von Harper und Gordon [33] abweichen. Harper und Gordon nahmen für den Dissoziationsgrad α des Sauerstoffs eine Größenordnung niedrigere als die hier eingesetzten Werte an und errechneten folglich höhere Temperaturen. Mit der Detonationstemperatur steigt gemäß Gleichung (2.29) auch der Detonationsdruck.

Abb.2.10

Detonationsgeschwindigkeiten
ozonhaltiger Gasgemische

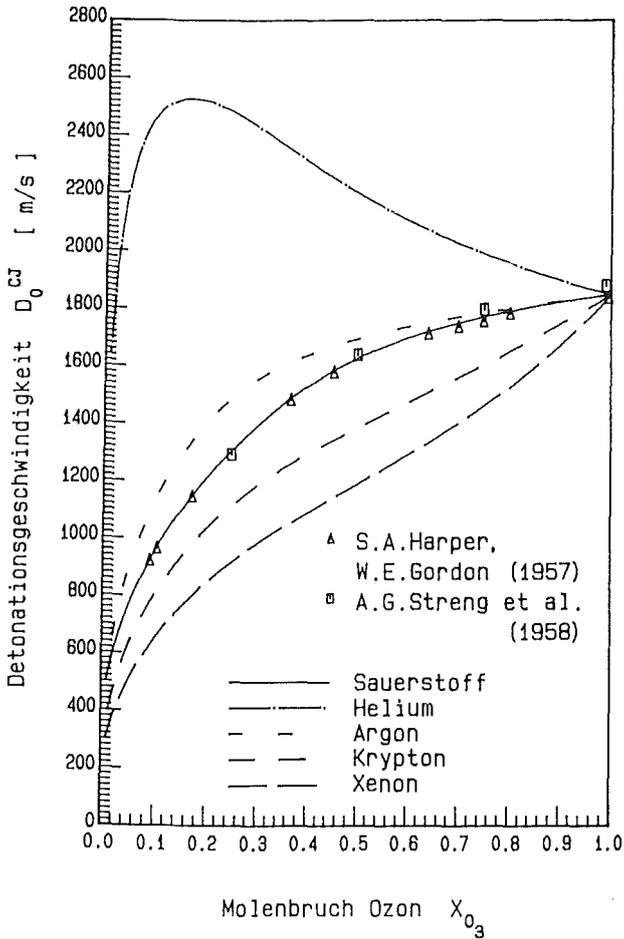
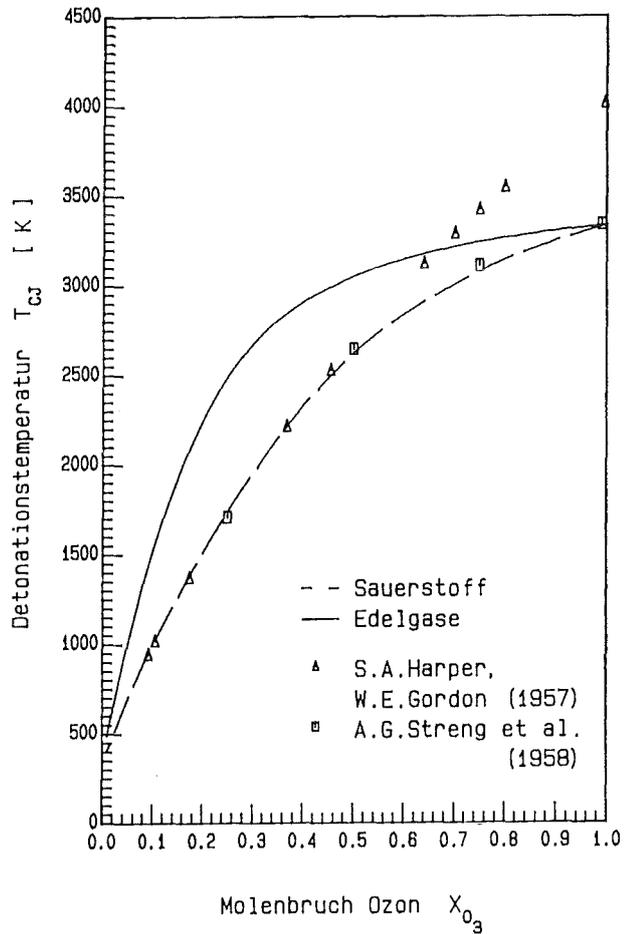


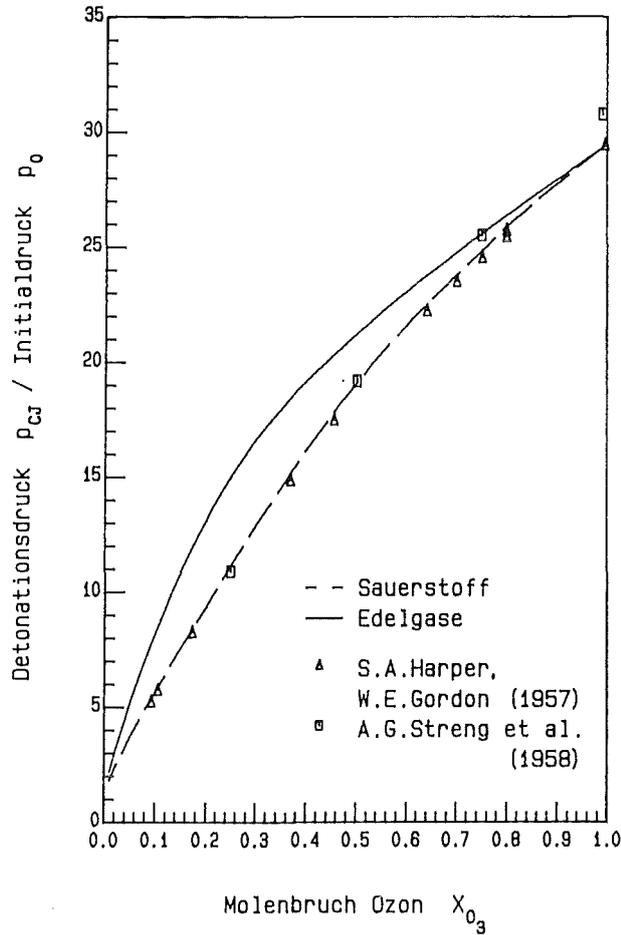
Abb.2.11

Detonationstemperaturen
ozonhaltiger Gasgemische



Die Detonationsgeschwindigkeit wird zusätzlich von der Dichte des Gases, hier ausgedrückt durch die Molzahl pro Masseneinheit, beeinflusst. Im $D_0^{CJ}-X_{O_3}$ -Diagramm lassen sich die Kurven für Ozon/Argon- und Ozon/Sauerstoff-Gemische wegen ihrer ähnlichen Dichten direkt miteinander vergleichen: Gemäß der höheren Werte für den Adiabatenkoeffizienten γ , der Kompression μ und der Detonationstemperatur T_{CJ} werden im System Ozon/Argon höhere Detonationsgeschwindigkeiten erreicht. Ozon/Edelgas-Gemische unterscheiden sich voneinander nur durch die Dichte; entsprechend nimmt die Detonationsgeschwindigkeit in

Abb.2.12 Detonationsdrücke ozonhaltiger Gasgemische



der Reihenfolge $He > Ar > Kr > Xe$ ab. Der Einfluß der Dichte wird besonders deutlich im System Ozon/Helium: Für niedrige Ozonkonzentrationen steigt die Detonationsgeschwindigkeit sehr rasch auf einen hohen Wert an; bei steigender Ozonkonzentration bewirkt die zunehmende Dichte des Gases, daß sich die Steigung der Kurve trotz der Zunahme der Reaktionsenthalpie und der Temperatur derartig verringert, daß die Detonationsgeschwindigkeit nach Erreichen eines Maximalwertes zu dem Wert für reines Ozon abfällt.

2.5. Adiabatische Explosionen in geschlossenen Gefäßen

Unter einer Explosion versteht man das spontane Einsetzen einer raschen Wärmeentwicklung durch eine chemische Reaktion, hervorgerufen durch eine drastische Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit. Das Entstehen einer Druckwelle ist eine Folge der Explosion. Man unterscheidet zwei Explosionsarten:

- 1) die Kettenexplosion; sie tritt ein, wenn bei einer Kettenreaktion durch Kettenverzweigung die Zahl der Kettenträger und damit die Reaktionsgeschwindigkeit ansteigt (z.B. Knallgasreaktion);
- 2) die Wärmeexplosion (thermische Explosion); sie liegt vor, wenn die Wärmeentwicklung einer exothermen Reaktion die Reaktionsgeschwindigkeit beschleunigt, was zu erhöhter Wärmeentwicklung und somit zu einer weiteren Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit führt.[132]

Die Ozonexplosion ist eine Wärmeexplosion, denn wie bereits in 2.1.1. gezeigt wurde, wird bei der thermischen Zersetzung des Ozons ausschließlich das nicht als Kettenträger wirksame $O(^3P)$ gebildet.

2.5.1. Modell von Flamm und Mache

Wird ein zündfähiges Gas in einem geschlossenen Behälter zur Explosion gebracht, so erfolgt die Verbrennung des Gases in einer schmalen Zone, der Flammenfront, die sich, beginnend an der Zündquelle, durch das gesamte Volumen fortpflanzt. Dabei wird das Gas in der Reaktionszone infolge der Temperaturerhöhung in Fortpflanzungsrichtung der Flamme adiabatisch expandieren, während das Gas außerhalb der

Flamme komprimiert wird, so daß die Verbrennung nur zu Beginn bei konstantem Druck erfolgt. Sei ξ der Anteil des verbrannten Gases an der Gesamtmenge. Die Verbrennung erfolge in einer dünnen Schicht $d\xi$. Die Indices u und b bezeichnen das unverbrannte bzw. das verbrannte Gas. Seien $p_0 = p(\xi=0)$ der ursprüngliche Druck und $T_0 = T_u(\xi=0)$ die ursprüngliche Temperatur des unverbrannten Gases (Frischgas). Dann verbrennt die erste Schicht $d\xi$ bei dem Druck p_0 und zu der Temperatur $T_b(\xi=0)$. Alle weiteren Schichten werden auf den Druck $p = p(\xi)$ komprimiert, nehmen dabei Temperaturen $T_u(\xi)$ an und verbrennen zu höheren Drücken und Temperaturen $T_b(\xi)$, bis schließlich nach dem Verbrennen der letzten Schicht $d\xi$ und gleichzeitiger Kompression des Gases die Maximalwerte $p_e = p(\xi=1)$ und $T_e = T_b(\xi=1)$ erreicht werden. Durch die chemische Reaktion ändert sich die Molzahl um den Faktor $\mu = \Sigma n_b / \Sigma n_u$. Anwendung der Poisson'schen Adiabatangleichung auf das Frischgas und auf das verbrannte Gas und Integration der Gleichungen über alle Werte von ξ führt zu:

$$(2.35) \quad \frac{p_e}{p_0} = \frac{K}{RT_0} (\bar{\gamma}_b - 1) - \frac{\bar{\gamma}_u - \bar{\gamma}_b}{\bar{\gamma}_u - 1} + 1$$

$$(2.36) \quad T_e = \left(\frac{K}{R} + \frac{\bar{\gamma}_u}{\bar{\gamma}_u - 1} \left(\frac{p_e}{p_0} \right)^{(\bar{\gamma}_u - 1)/\bar{\gamma}_u} T_0 \right) \frac{\bar{\gamma}_b - 1}{\bar{\gamma}_b} \frac{1}{\mu}$$

mit

$$(2.37) \quad K = \mu \bar{C}_{p,b} T_b(\xi=0) - \bar{C}_{p,u} T_0,$$

wobei $\bar{\gamma}_u$ bzw. $\bar{C}_{p,u}$ der mittlere Adiabatenkoeffizient bzw. den mittlere molare Wärmeleitfähigkeit des Frischgases zwischen den Temperaturen T_0 und $T_u(\xi=1)$, und $\bar{\gamma}_b$ und $\bar{C}_{p,b}$ die entsprechenden Größen des verbrannten Gases zwischen den Temperaturen $T_b(\xi=1)$ und T_e bedeuten. Ferner gilt:

$$(2.38) \quad \xi = (p(\xi) - p_0) / (p_e - p_0).$$

Aus diesen Gleichungen lassen sich für bekannte Werte p_0 , T_0 , sowie bekannter chemischer Zusammensetzung des unverbrannten, wie des verbrannten Gases der Explosionsdruck p_e und die Explosionstemperatur T_e berechnen [133].

2.5.2. Explosionsdrücke und -Temperaturen für ozonhaltige Gasgemische

Die in Ozonexplosionen in geschlossenen Gefäßen erreichten Maximalwerte des Druckes p_e und der Temperatur T_e wurden für Gemische von Ozon mit Sauerstoff, Stickstoff und Edelgasen nach dem Modell von Flamm und Mache berechnet. Die hierfür gemachten Annahmen und Vereinfachungen sollen im folgenden Text kurz erläutert werden: Die Verbrennung der ersten Gasschicht ist noch nicht durch Kompression beeinflusst. Die hier erreichte Temperatur $T_b(\xi=0)$ muß daher der Temperatur T_{af} der adiabatischen, laminaren Flamme, die sich nach dem in 2.3.2. diskutierten Modell berechnen läßt, entsprechen. Für ein Gemisch von 50 Mol-% Ozon in Sauerstoff bei den Ausgangsbedingungen $T_0 = 300$ K und $p_0 = 0.45$ bar erhält man nach Warnatz [42] $T_{af} = 1778$ K. Aus den Gleichungen (2.35), (2.36) und (2.37) erhält man durch Iteration die Temperaturen $T_u(\xi=1) = 468$ K und $T_e = 1911$ K, sowie die Konstante K und den Explosionsdruck $p_e/p_0 = 9.11$. Ersetzt man die mittleren Wärmekapazitäten $\bar{C}_{p,u}$ und $\bar{C}_{p,b}$, sowie die mittleren Adiabatenkoeffizienten $\bar{\gamma}_u$ und $\bar{\gamma}_b$ durch die Werte $C_{p,u} = C_{p,u}(T_0)$, $C_{p,b} = C_{p,b}(T_{af})$ und $\gamma_u = \gamma_u(T_0)$, $\gamma_b = \gamma_b(T_{af})$, so wird die Rechnung erheblich vereinfacht. Die Konstante K ist dann gegeben durch:

$$(2.39) \quad K = \mu C_{p,b} T_{af} - C_{p,u} T_0.$$

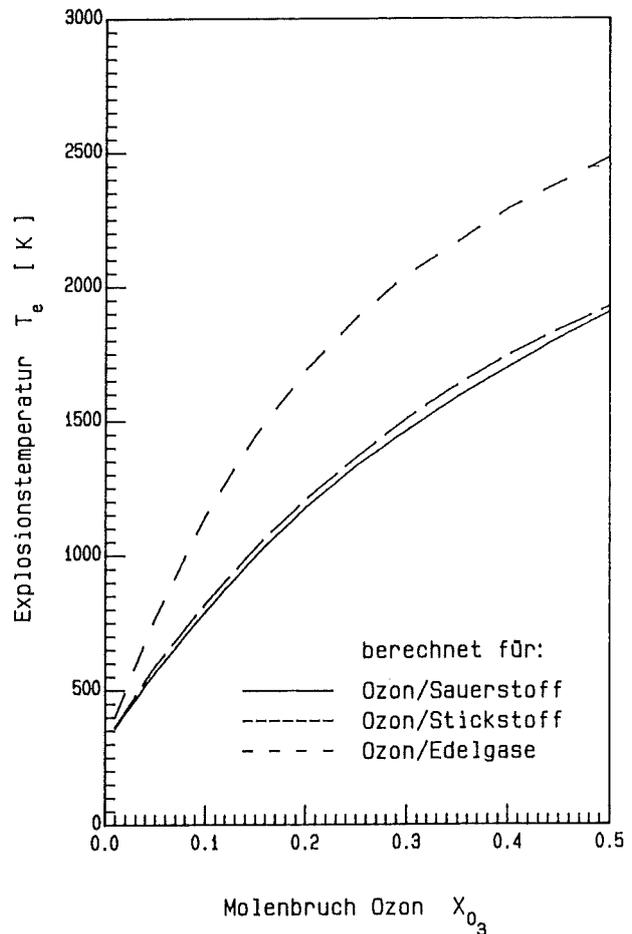
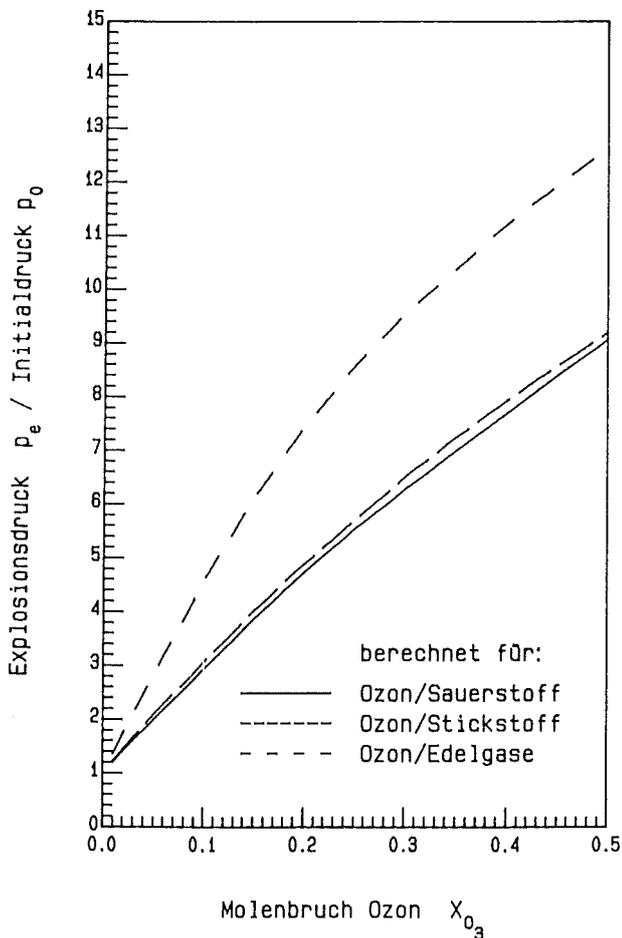
Aus den Gleichungen (2.35) und (2.36) erhält man durch Iteration die Werte $T_e = 1905$ K und $p_e = 9.07$. Diese Ergebnisse unterscheiden sich nur unwesentlich von den unter Verwendung mittlerer Wärmekapazitäten und mittlerer Adiabatenkoeffizienten berechneten Werten. Für Gemische mit

Ozonkonzentrationen unterhalb von 50 Mol-% werden die Abweichungen noch geringer sein. Diese Vereinfachung, die zu einer bedeutenden Erleichterung der Iteration führt, ist also erlaubt.

Die Ausgangsbedingungen für die Rechnung waren $p_0 = 0.45$ bar, $T_0 = 300$ K und Ozonkonzentrationen bis 50 Mol-%. Die Ozonkonzentration wurde in Schritten von 1 Mol-% variiert. Für den Adiabatenkoeffizienten γ des Ozons wurde der Wert für ein dreiatomiges, ideales Gas, $\gamma = 1.29$, angenommen [134]. Für Edelgase wurden die Werte einatomiger, idealer Gase, $\gamma = 1.67$ und $C_p = 5/2 R$, eingesetzt. Die Werte γ , C_p aller übrigen Komponenten wurden Tabellenwerken entnommen ($C_p(O_3)$: [135], sonstige: [92]). Die Ergebnisse sind in Abb.2.13 und Abb.2.14 dargestellt. Ihre vollständige tabellarische Wiedergabe befindet in Anhang 7.3.

Abb.2.13
Explosionsdrücke
ozonhaltiger Gasgemische

Abb.2.14
Explosionstemperaturen
ozonhaltiger Gasgemische



Die Darstellung der Explosionstemperatur als Funktion der Ozonkonzentration gleicht prinzipiell den entsprechenden Diagrammen für die laminare Flamme (s.S.22), wobei jedoch für die Explosion die adiabatische Kompression des Frischgases zu höheren Temperaturen führt. Mit der Temperatur steigt der Explosionsdruck, wobei im wesentlichen der Adiabatenkoeffizient des Trägergases ($\gamma \approx 1.67$ für einatomige Gase und $\gamma \approx 1.4$ für zweiatomige Gase) die Höhe der erreichten Werte bedingt.

3. Experimentelle Untersuchungen

Das Explosionsverhalten des gasförmigen Ozons wurde in Gemischen mit Sauerstoff, Stickstoff, Helium, Argon, Krypton, Xenon und Dichlordifluormethan in Abhängigkeit von der Ozonkonzentration, dem Initialdruck und der Geometrie des Reaktionsgefäßes untersucht. Die Ergebnisse der Ozon/Sauerstoff-Experimente dienen in erster Linie dem Vergleich mit den Ergebnissen früherer Arbeiten [23,26-30]. Aus den Ozon/Helium-Versuchen können zusätzliche Informationen über den Mechanismus der Explosionen erhalten werden, da sich Helium durch seine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit stark von den schweren Edelgasen unterscheidet ($\lambda_{\text{He}} \approx 10 \lambda_{\text{Ar}}$).

Für Mischungen von Ozon mit Sauerstoff und den Edelgasen Argon, Krypton und Xenon wurden die Detonationsgeschwindigkeiten als Funktion der Ozonkonzentration und in Ozon/Xenon-Gemischen zusätzlich in Abhängigkeit vom Initialdruck experimentell bestimmt. Ferner wurde der Einfluß einer Füllkörperpackung, wie sie in der im KfK erprobten Anlage zur kryogenen Spaltdelgasabtrennung "KRETA" eingesetzt wird, auf die Detonation des Ozons im System Ozon/Xenon untersucht. Darüber hinaus wurde der Einfluß geringer Mengen an CO , CH_4 und NO_2 auf die Explosion (O_3/Ar) bzw. Detonation (O_3/Xe) eines Ozon/Edelgas-Gemisches bestimmt.

Abb. 3.1 Versuchsanordnung zur Untersuchung von Ozon-Explosionen

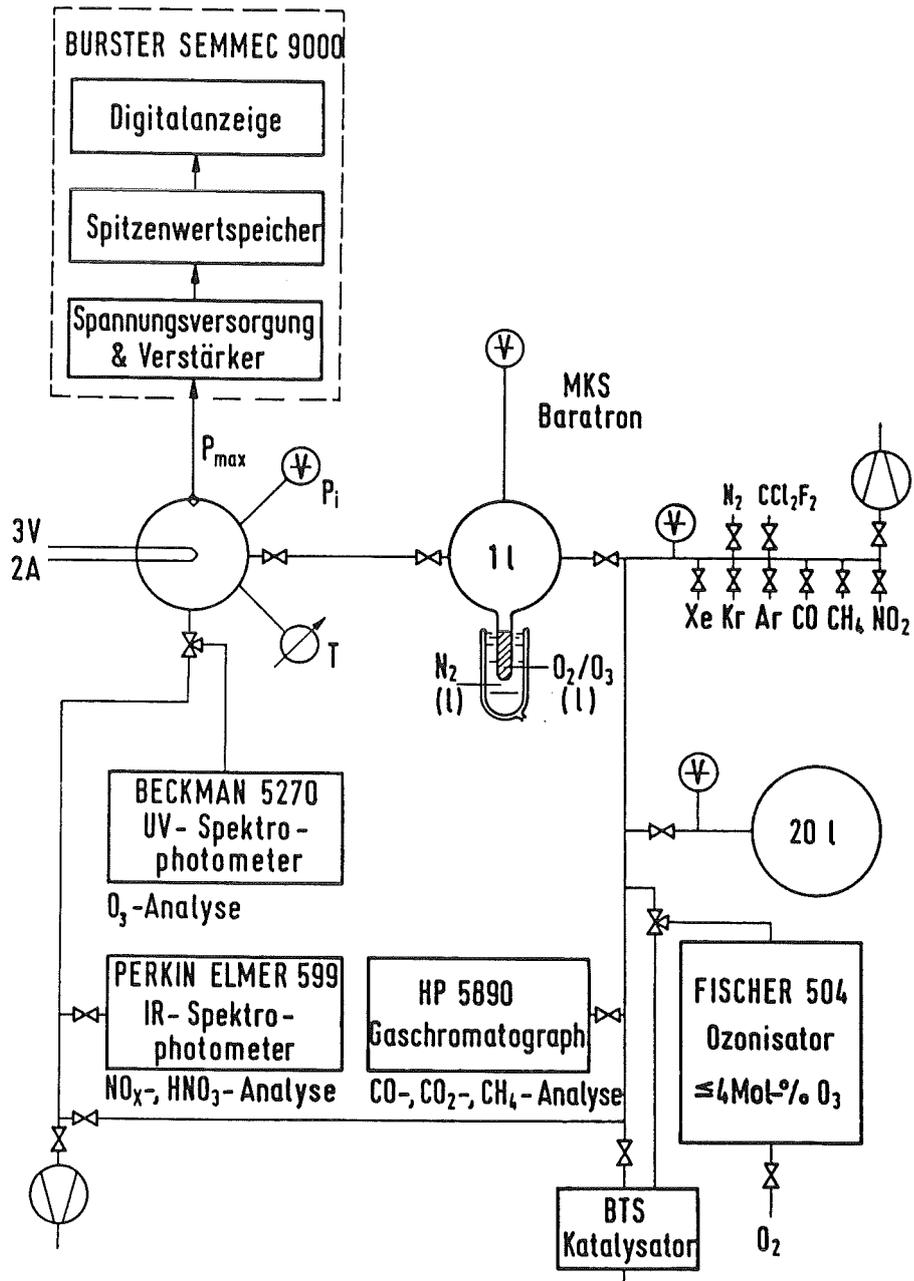
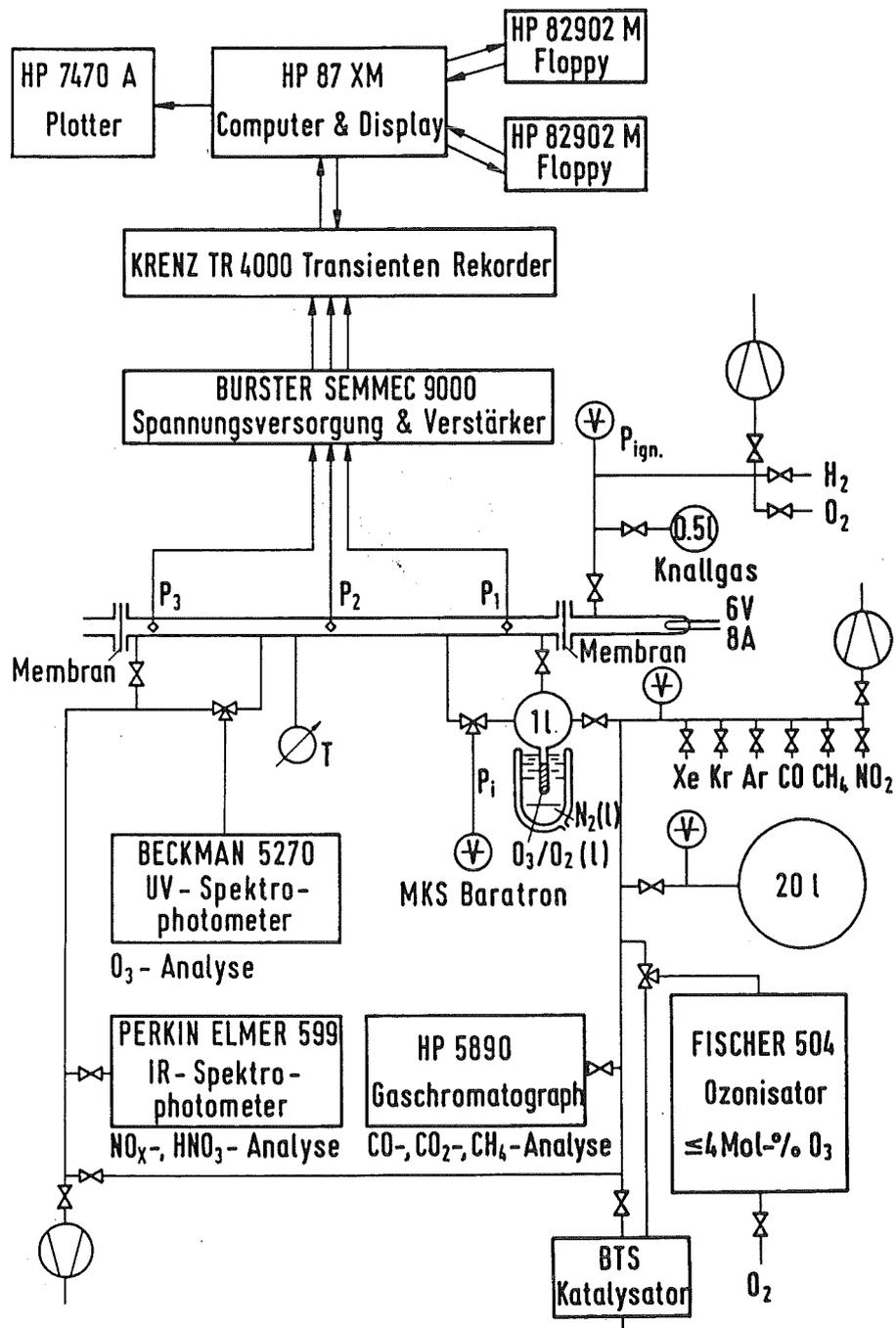


Abb.3.2 Versuchsanordnung zur Untersuchung von Ozon-Detonationen



3.1. Aufbau und Durchführung der Versuche

Die zur Untersuchung von Ozon-Explosionen und Ozon-Detonationen entwickelten Versuchsanordnungen sind in den Abb.3.1 und 3.2 (S.48 f) schematisch dargestellt. Wesentliche Bestandteile sind die Anordnung zur Herstellung der Gasgemische, das Reaktionsgefäß und Systeme zur Druckmessung und Gasanalytik.

3.1.1. Herstellung der Gasgemische

Die heute gebräuchlichste Methode zur Ozondarstellung ist die Umsetzung von reinem Sauerstoff durch stille Entladung in einem aus der "Siemens'schen Röhre" [136,137] entwickeltem Ozonisator. Das hier eingesetzte Gerät (Modell OZT-504, Fa.Fischer, Bonn-Bad Godesberg) liefert Ozon bis zu einer Konzentration von 4 Mol-% in Sauerstoff.

Dieses Gemisch wurde in dem geeichten Rohr des kugelförmigen Mischungsgefäßes mit flüssigem Stickstoff auskondensiert. Der Sauerstoff wurde vollständig verdampft und abgepumpt. Nach Zugabe des Inertgases aus einem 20-Liter-Vorratsbehälter wurde das Ozon verdampft und das Gemisch in das vorher evakuierte Reaktionsgefäß überführt. (Zur Herstellung konzentrierter O_3/O_2 -Gemische wurde der Sauerstoff nur zum Teil entfernt und das verbliebene Gemisch verdampft.) Die Prozesse wurden durch Druckmessung (MKS-Baratron Druckmeßsystem, MKS Instruments) genau kontrolliert.

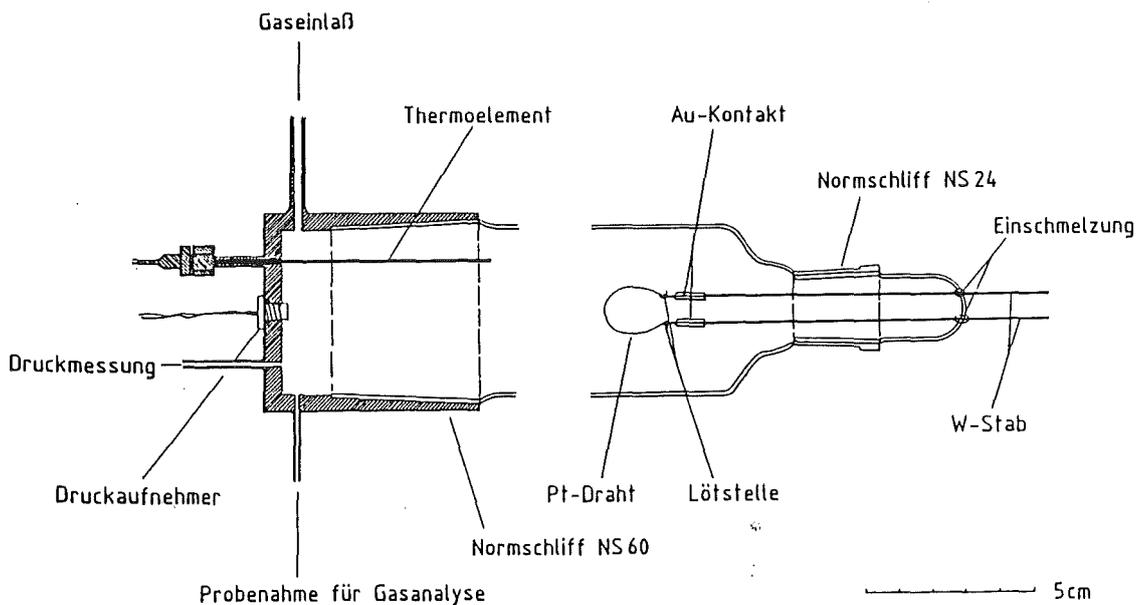
Durch Belüftungs- und Abgasleitungen, die mit einem ozon-zersetzendem Kupfer-Katalysator (BASF-Katalysator R3-11 (=BTS-Katalysator), BASF, Ludwigshafen) versehen waren, konnte die Freisetzung von Ozon an die Laborluft verhindert werden.

3.1.2. Reaktionsgefäße

Zur Untersuchung der Ozon-Explosion und -Detonation wurden Glasgefäße unterschiedlicher Geometrie eingesetzt.

Adapter aus Edelstahl für Gaseinlaß, Probenahme, Druck- und Temperaturmeßinstrumente waren durch mit Kollodin gedichtete Normschliffe mit dem Gefäß verbunden. Die Temperatur wurde mit einem Eisen/Konstantan-Thermoelement von 0.5% Genauigkeit gemessen. Die Zündung erfolgte elektrisch (3V,2A) mit einem 40 mm langen, 0.1 mm starken Pt-Draht, der mit einer speziellen Durchführung im Zentrum einer Kugel oder am Ende eines zylindrischen Gefäßes angebracht war. Abb.3.3 zeigt Zündmechanismus und Adapter für ein zylindrisches Reaktionsgefäß. Die Abmessungen der Gefäße, die zur Untersuchung der Ozon-Explosion eingesetzt wurden, sind in Tab.3.1. zusammengefaßt.

Abb.3.3 Zündung und Adapter mit Druck- und Temperaturmeßinstrumenten eines zylindrischen Reaktionsgefäßes



Tab.3.1 Reaktionsgefäße zur Untersuchung von Explosionen

| Gefäß | d[cm] | l[cm] | V[cm ³] |
|----------|-------|-------|---------------------|
| Kugel | 12.4 | - | 1000 |
| Zylinder | 2.0 | 50 | 160 |
| Zylinder | 3.5 | 50 | 500 |
| Zylinder | 5.0 | 50 | 1000 |
| Zylinder | 5.0 | 100 | 2000 |
| Zylinder | 7.5 | 50 | 2200 |

Zylindrische Gefäße wurden horizontal ausgerichtet. In der Kugel befanden sich Zündmechanismus und Druckaufnehmer (Erfassung des Explosionsdruckes, s.S.54) ebenfalls in der Waagrechten. Durch diese Anordnung wurde ein Einfluß der Wärmekonvektion auf das Meßergebnis ausgeschlossen.

Die Untersuchung von Ozon-Detonationen erfolgte in einem Glasrohr von 535 cm Länge und 2 cm Innendurchmesser. Das Rohr war durch eine 0.1 mm starke Polyethylenmembran in eine 65 cm lange Zündkammer und einen 470 cm langen Meßteil getrennt. Um Reflexionen der Schockwelle zu vermeiden, wurde das Rohrende ebenfalls mit einer Membran verschlossen. (Bei dem Einsatz einer 50 cm langen Füllkörperpackung mußte das Rohr verkürzt werden: Wie in Abb.3.4 gezeigt wird, war das Rohr in Höhe des letzten Druckaufnehmers durch einen Adapter fest verschlossen.)

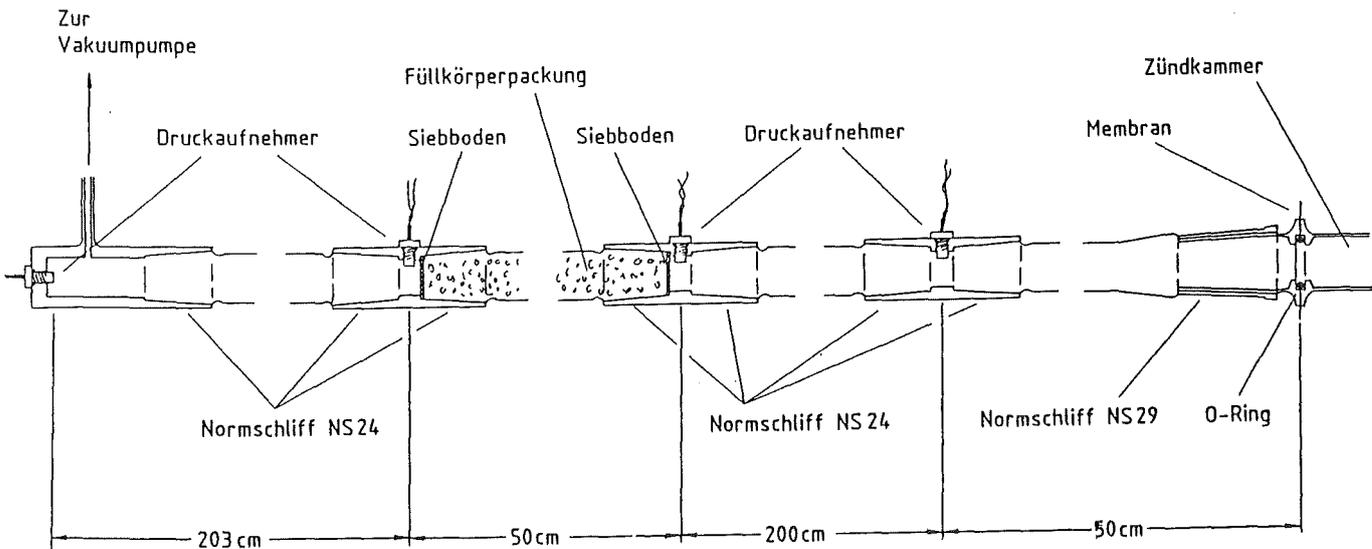
Die Detonation des Ozons wurde durch Explosion eines bezogen auf die Wasserbildung stöchiometrischen Knallgasgemisches in der Zündkammer eingeleitet. Die Zündung des Knallgases, das aus einem 500ml-Behälter eingespeist wurde, erfolgte wiederum elektrisch. Wegen der hohen Wärmetönung der Knallgasreaktion (58 kJ/Mol H₂O) und wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffs (1812 µJ/cmsK bei 25°C) waren ein stärkerer Pt-Draht (0.3 mm) und eine höhere elektrische Leistung (8V,6A) erforderlich.

In der Mitte des Rohres konnten unterschiedlich lange Füllkörperpackungen eingebaut werden. Eine solche Packung bestand aus einem Rohrstück, welches zwischen zwei Siebböden aus Edelstahl mit 1 mm Porengröße Edelstahlwendeln vom Durchmesser 3×3 mm ("Braunschweiger Wendeln") enthielt. Das Fortschreiten der Druckwelle wurde an mehreren Positionen, u.a. unmittelbar vor und hinter der Füllkörperpackung, gemessen (Tab.3.2). Abb.3.4 zeigt das Detonationsrohr mit Füllkörperpackung.

Tab.3.2 Abmessung des Detonationsrohres und Abstand der Meßpositionen von der Zündkammer

| Gesamt- Länge[cm] | Länge der Packung[cm] | Meßposition[cm] | | | |
|----------------------|--------------------------|-----------------|-----|-----|-----|
| | | I | II | III | IV |
| 535 | — | 50 | 250 | 450 | — |
| 545 | 10 | 50 | 250 | 260 | 460 |
| 568 | 50 | 50 | 250 | 300 | 503 |

Abb.3.4 Detonationsrohr mit Füllkörperpackung



3.1.3. Druckmessung

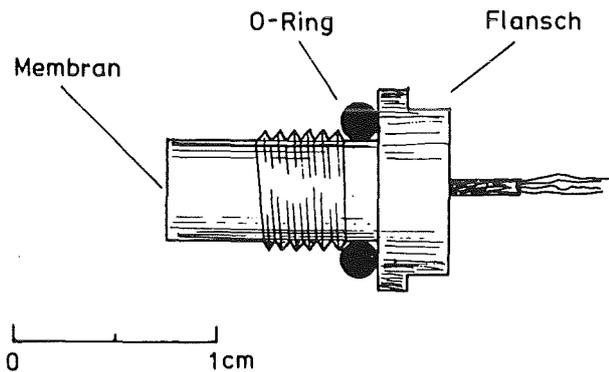
Die Bestimmung der Ozonkonzentration erfordert eine möglichst genaue Messung des Initialdruckes, während das Registrieren des Explosionsdruckes bzw. der Detonationswelle eine möglichst schnelle Methode verlangt.

Der Druck vor der Explosion bzw. Detonation wurde mit einem "DPI-100"-Druckmeßgerät (Druck Ltd., Groby, Leicestershire, England) für einen Meßbereich von 0-10 bar Absolutdruck 'A' und mit einer Genauigkeit von ± 0.5 % bzw. mit einem "MKS-Baratron"-Druckmeßsystem (s.S.48), bestehend aus Meßkopf (Typ 310HS-1000SP, Meßbereich: 0-10 bar A), Spannungsversorgungs-, Verstärker- und Heizungselement (Typ 170M-6C) und Anzeigegerät (Typ 170M-25D), registriert. Die Genauigkeit dieses Systems beträgt ± 0.08 % der Anzeige und zusätzlich ± 0.001 % des Vollausschlages 'FS'. Ferner ist eine Temperaturabhängigkeit von ± 5 ppm/°C zu berücksichtigen.

Der Maximaldruck während der Explosion wurde mit einem "SENSOTEC"-Subminiatur-Druckaufnehmer (Fa. Burster, Gernsbach) in Verbindung mit einem "SEMMEC-9000"-Meßsystem (Burster, Gernsbach), bestehend aus Spannungsversorgung, Verstärker, Spitzenwertspeicher und Anzeigegerät registriert. Die Funktionsweise des Druckaufnehmers ist die der Wheatstone'schen Brücke, wobei die druckempfindliche Membran den variablen Widerstand, einen Dehnungsmeßstreifen, beeinflusst. Eingesetzt wurde ein korrosionsbeständiger Aufnehmer des Typs "S" (Eigenfrequenz: 20 kHz, Linearität α : 0.2729 mV/bar, Absolutdruck: 0-10 bar) mit aufgeschweißter Edelmetallmembran von 4.75mm Durchmesser (Abb.3.5). Die Genauigkeit des Aufnehmers beträgt $\delta = \pm 1/75$, hinzu kommt eine Temperaturabhängigkeit von ± 0.05 %/°C der Linearität und $\pm 1/3000$ /°C des Vollausschlages bezogen auf die Differenz $\Delta\theta$ zwischen aktueller Temperatur θ minus 23°C. Die Genauigkeit des SEMMEC-9000 Systems wird mit den Werten ± 0.05 % (Spannungsversorgung), ± 0.005 %

und $\pm 0.25\%$ (Verstärker), $\pm 0.1\%$ des Vollausschlags (Spitzenwertspeicher) und $\pm 0.05\%$ (Anzeigegerät) und die Anstiegszeit des Spitzenwertspeichers mit 1 ms/V angegeben.

Abb.3.5 Bau des "SENSOTEC-S"-Subminiatur-Druckaufnehmers



Zur Messung der zeitlichen Druckänderung während der Detonation wurden 3 bzw. 4 "SENSOTEC-S"-Subminiatur-Druckaufnehmer (Linearität in mV/bar : $\alpha_1=0.2729$, $\alpha_2=0.2629$, $\alpha_3=0.2059$, $\alpha_4=0.2741$) in Verbindung mit den Speise- und Verstärkereinheiten des SEMMEC-9000 Meßsystems und einem Transienten-Rekorder (Modell TR-4000, Krenz-Electronics GmbH., Hirzenhain), bestehend aus einem Controller und 4 schnellen Analog-Digital-Convertern (2K Speicherplätze, 8 bit Auflösung, 200kHz), eingesetzt. Die gewählte Abtastrate betrug 50 bzw. $100\mu\text{s}$. Das Meßsystem wurde mit dem Signal des dem Ort der Zündung nächsten Druckaufnehmers getriggert. Auswertung und Abspeichern der Meßdaten erfolgte durch einen HP-87XM Computer (Hewlett-Packard S.A.).

3.1.4. Gasanalyse

Die vor und nach der Zündung im Reaktionsgefäß vorhandene Ozonmenge wurde durch Messung der UV-Absorption (ACTA-M VII Spektralphotometer, Modell 5270, Beckman Instruments GmbH.) bei einer Wellenlänge von $\lambda = 253.65$ nm bestimmt. Für diese Wellenlänge beträgt der Extinktionskoeffizient ϵ des Ozons $\epsilon = 131.8 \text{ cm}^{-1}$ [138]. Verwendet wurde eine Quarzküvette von 0.1 cm optischer Länge. Der Partialdruck des Ozons p_{O_3} in bar ergibt sich aus

$$(3.1) \quad p_{\text{O}_3} = E \frac{1}{\epsilon \ell} T \frac{1.0133 \text{ bar}}{273.2 \text{ K}}$$

mit E = gemessene Extinktion, T = gemessene Temperatur, ℓ = Absorptionsweg in cm. Die Genauigkeit der gemessenen Extinktion beträgt $\Delta E = 0.003$ für $0 \leq E < 1$, $\Delta E = 0.01$ für $1 \leq E < 2$ und $\Delta E = 0.03$ für $2 \leq E < 3$.

Die aus NO_2 durch Reaktion mit Ozon gebildeten Stickstoffverbindungen wurden vor und nach der Zündung durch Messung der IR-Absorption (IR-Spektrophotometer, Modell 599, Perkin-Elmer, Überlingen) in einer 10cm breiten Küvette mit AgCl-Fenster nachgewiesen.

Die Konzentration an CH_4 , CO und CO_2 wurde mit einem Gaschromatographen (Modell HP5890, Hewlett-Packard) unter Verwendung von Helium als Trägergas mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 20ml/min) bestimmt. Die Gasgemische wurden mit zwei Trennsäulen (Porapak Q 10 ft und Molekularsieb 5A 10 ft) analysiert.

3.2. Ergebnisse

In den folgenden beiden Kapiteln sind die Ergebnisse der Versuche zur Ozonexplosion und zur Ozondetonation beschrieben. Die Meßdaten sind graphisch wiedergegeben, wobei als gemessene, charakteristische Größen für die Explosion das Verhältnis von Maximaldruck zu Initialdruck und für die Detonation deren Fortschrittgsgeschwindigkeit als Funktion der experimentell bestimmten Ozonkonzentration aufgetragen sind.

Die Beobachtungen bezüglich der Zündgrenzen, Detonationsgrenzen, des Überganges von der Explosion zur Detonation, sowie des Einflusses von Kohlenmonoxid, Methan und Stickstoffdioxid sind zusätzlich in Tabellenform wiedergegeben. Auf die vollständige, tabellarische Wiedergabe aller Meßdaten innerhalb des Textes wurde wegen deren Vielzahl bewußt verzichtet. Sie findet sich in Anhang 7.4 (Ozonexplosion) und Anhang 7.5 (Ozondetonation).

3.2.1. Versuche zur Ozonexplosion

Die Abhängigkeit der Ozonexplosion vom Trägergas, welche bei einem Initialdruck von 0.45 bar in einem Rohr von 5 cm Durchmesser und 50 cm Länge untersucht wurde, ist in Abb.3.6 dargestellt.

Bei allen untersuchten Trägergasen wurden für die Ozonexplosion Zündgrenzen beobachtet, welche als Sprung in der p_{\max}/p_0 vs X_{O_3} -Kurve erscheinen und, wie Abb.3.7 zeigt, durch den Übergang von der unvollständigen zur vollständigen Umsetzung $Y(-O_3)$ des Ozons gekennzeichnet sind. Ozon/Edelgas-Gemische zeigen die niedrigste Zündgrenze, hier ausgedrückt als Molenbruch X_{gr} an Ozon, bei innerhalb der Meßgenauigkeit identischen Werten für die Trägergase Argon ($X_{gr} = 7.9 \pm 0.2 \%$),

Krypton ($X_{gr} = 7.7 \pm 0.3$) und Xenon ($X_{gr} = 7.7 \pm 0.4$ %). Die Zündgrenzen steigen in der Reihenfolge Xe = Kr = Ar < He < N₂ < O₂ < CCl₂F₂ an und sind zunehmend weniger scharf definiert.

Abb.3.6 Explosion von Gemischen des Ozons mit verschiedenen Trägergasen

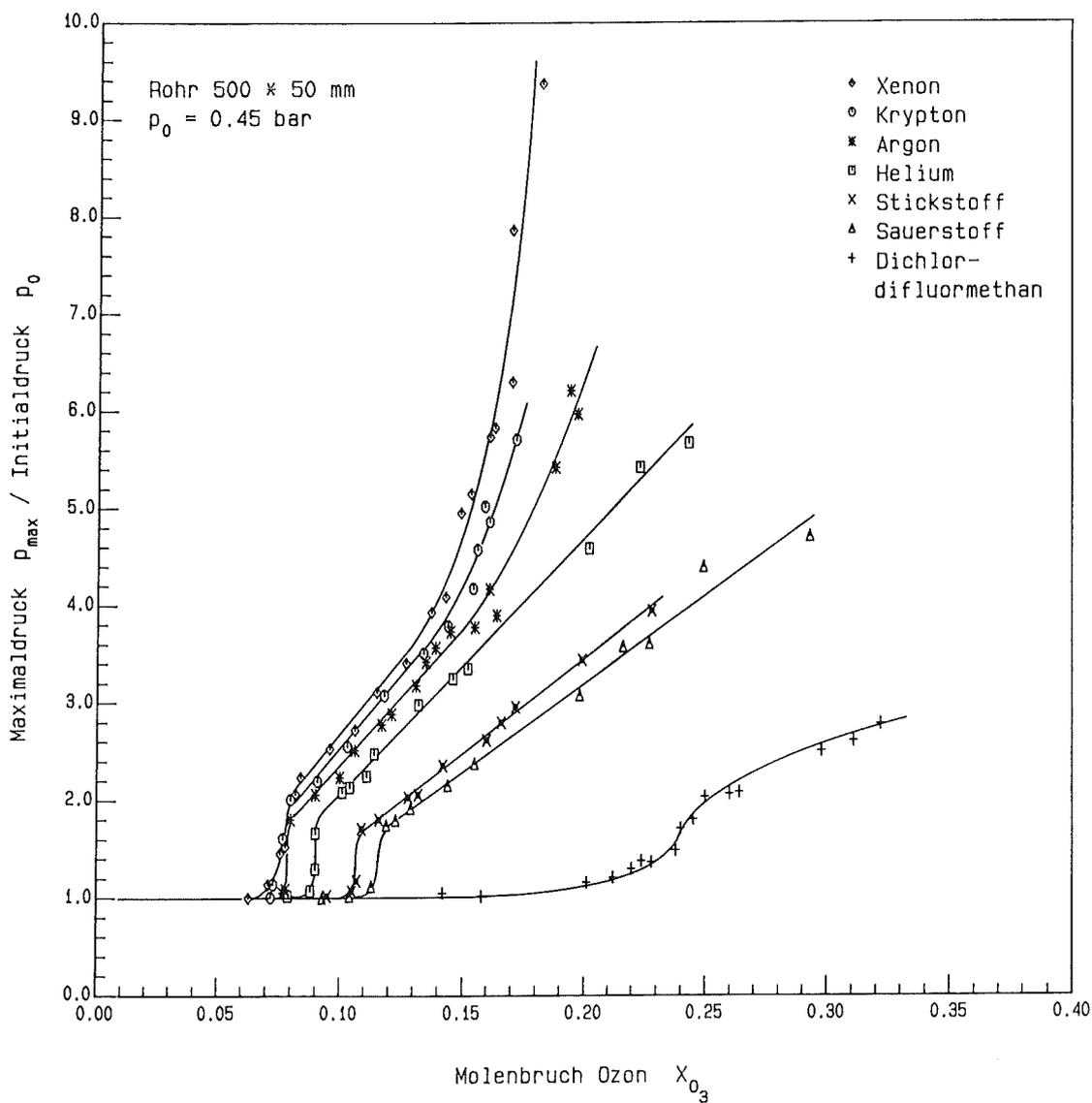
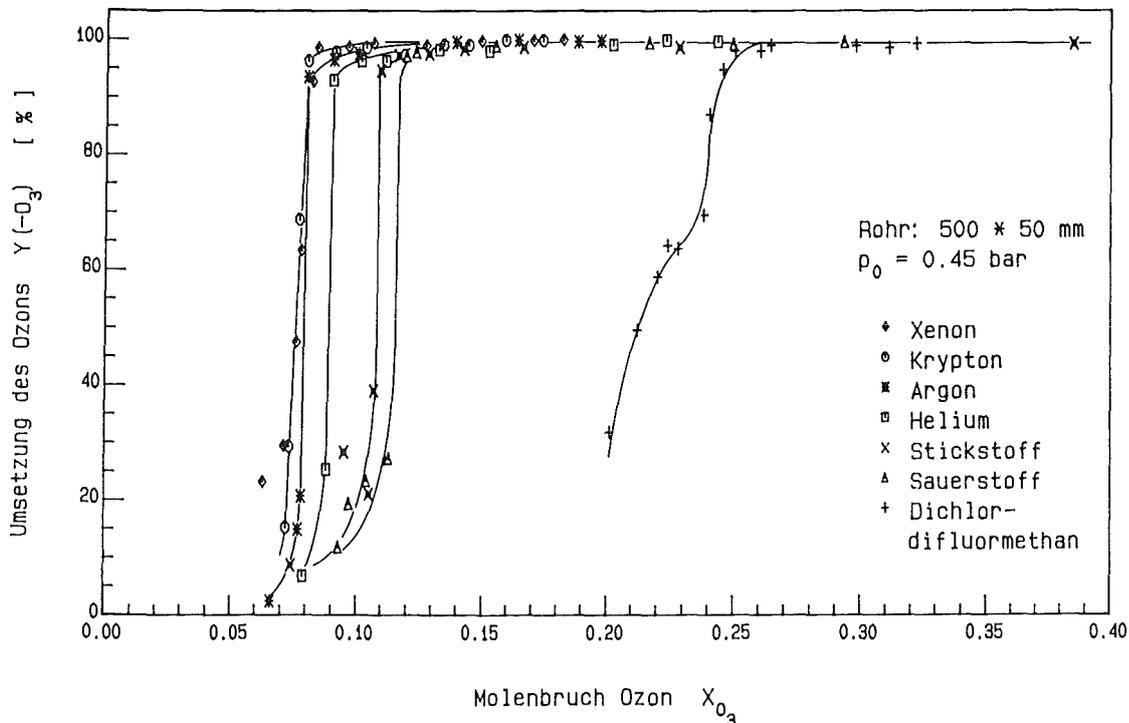


Abb.3.7 Umsetzungsgrad $Y(-O_3)$ des Ozons nach der Zündung



Oberhalb der Zündgrenze erfolgt ein linearer Anstieg des Maximaldruckes mit der Ozonkonzentration, der in der Reihenfolge $Xe = Kr = Ar \approx He > N_2 \approx O_2 > CCl_2F_2$ abnimmt und für Gemische mit den Edelgasen Xenon, Krypton und Argon in einen exponentiellen Anstieg übergeht. Dieser Übergang zu exponentiellem Druckanstieg erfolgt in Gemischen mit Xenon bei einem Ozongehalt von $X_{O_3} > 0.13$, mit Krypton bei $X_{O_3} > 0.14$ und Argon bei $X_{O_3} > 0.16$. Explosionen solcher Gemische waren i.allg. von einer Leuchterscheinung, die sich als das Gefäß durchheilende Lichtpunkte beschreiben läßt, und Geräuschentwicklung begleitet. Lichtpunkte und Geräusch wurden auch in den Systemen Ozon/Helium für $X_{O_3} \geq 0.2$, sowie Ozon/Sauerstoff und Ozon/Stickstoff für $X_{O_3} \geq 0.3$ beobachtet. In zwei Versuchen wurde die zeitliche Druckänderung während der Explosion eines Ozon/Xenon-Gemisches für Konzentrationen oberhalb 13 Mol-% Ozon mit Hilfe eines Oszilloskops (Hamec 802) bzw. eines Transientenrekorders aufgezeichnet (Abb.3.8 und 3.9). Wie Abb.3.9 zeigt, erfolgt nach einem zunächst stetigen

Druckanstieg über 100 ms eine un stetige Druckänderung, mit der gleichzeitig eine pulsierende Druckwelle mit einer Frequenz von $\nu = 0.5$ kHz einsetzt.

Abb.3.8 p-t-Diagramm einer "Explosion" von 17.0 Mol-% Ozon in Xenon, aufgezeichnet mit einem Oszilloskop

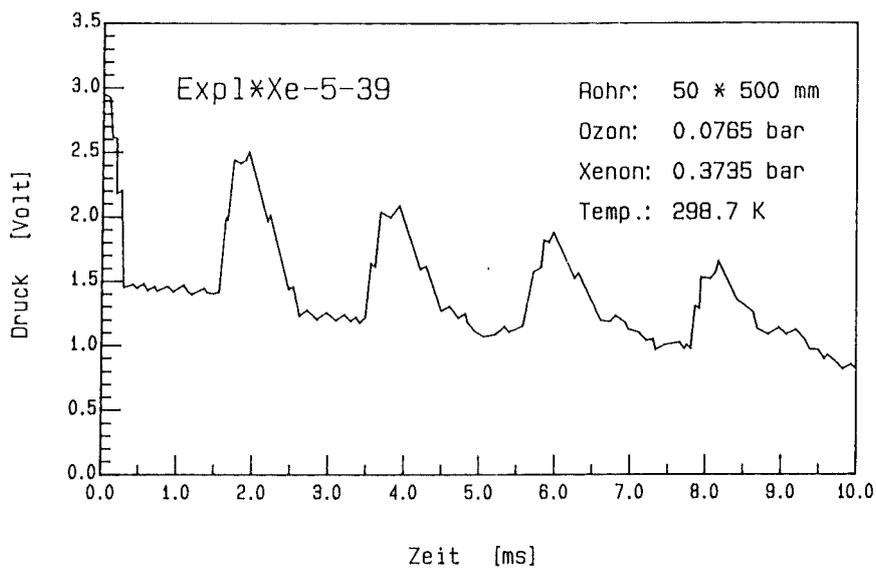
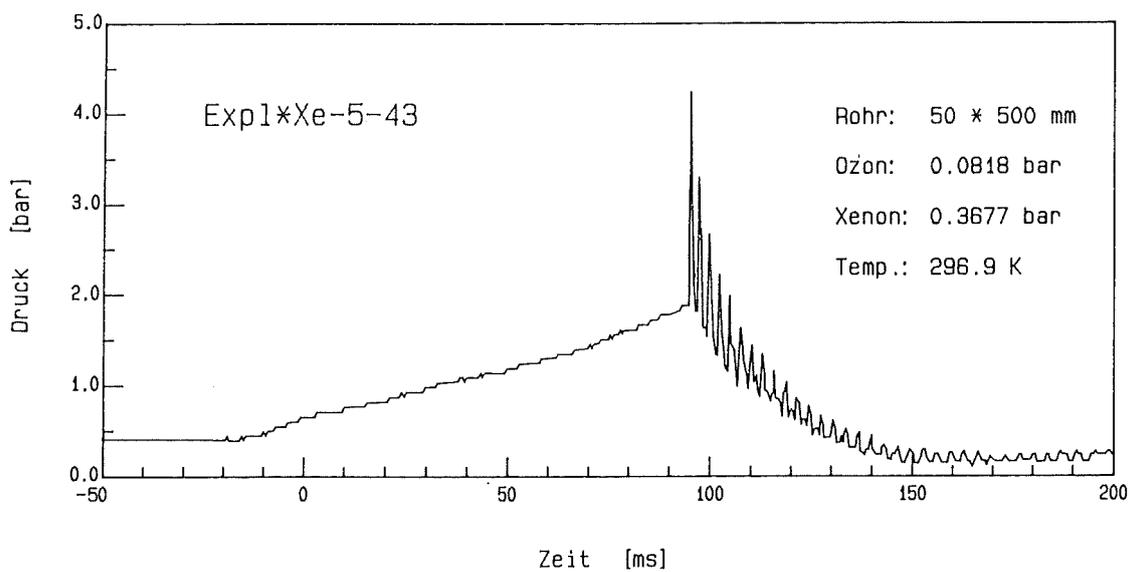


Abb.3.9 p-t-Diagramm einer "Explosion" von 18.2 Mol-% Ozon in Xenon, aufgezeichnet mit einem Transientenrekorder



Wie Tab.3.3 verdeutlicht, sind die in diesen beiden Versuchen gemessenen Maximaldrücke niedriger als die nach der CJ-Theorie berechneten Drücke p_{CJ}/p_0 für eine Detonation, überschreiten jedoch deutlich die nach Flamm und Mache berechneten Werte p_e/p_0 für eine Explosion.

Tab.3.3 Übergang von der Explosion zur Detonation

| Versuch | Expl*Xe-5-39 | Expl*Xe-5-43 |
|----------------------|--------------|---------------------|
| p-t-Messung | Oszilloskop | Transientenrekorder |
| Ozonkonzentration | 17.0 Mol-% | 18.2 Mol-% |
| p_{max}/p_0 : | | |
| Meßwert | 7.86 | 9.37 |
| nach Flamm/Mache | 5.93 | 6.18 |
| nach Chapman/Jouguet | 11.78 | 12.33 |

Nach der Zündung stellt sich im Reaktionsgefäß ein Enddruck p_{end} ein, der durch die Reaktion $O_3 \rightarrow 1\frac{1}{2}O_2$ um den Wert $\Delta p = \frac{1}{2}p_{O_3} \times Y(-O_3)$ gegenüber dem Initialdruck erhöht ist. Im System Ozon/Dichlordifluormethan wurde ein höherer Enddruck $p_{end} > p_0 + \frac{1}{2}p_{O_3} \times Y(-O_3)$, sowie eine deutliche Rußentwicklung im Reaktionsgefäß beobachtet, was eine Zersetzung des Dichlordifluormethans anzeigt. Auf eine Analyse der Zersetzungsprodukte wurde verzichtet. Die Rußentwicklung führte dazu, daß nach Abschluß der Versuche mit Dichlordifluormethan das Reaktionsgefäß mit seinen Zuleitungen ersetzt werden mußte.

Die Abhängigkeit der Ozonexplosion von der Geometrie des Reaktionsgefäßes wurde für unterschiedliche Trägergase bei einem Initialdruck von ca. 0.45 bar untersucht. Die Meßwerte für Explosionen in einer Kugel und in horizontal ausgerichteten Rohren verschiedenen Durchmessers sind zusammen mit den nach der Theorie von Flamm und Mache berechneten Werten für adiabatische Explosionen (s.Kap.2.5.2.) in den Abbildungen 3.10, 3.11 und 3.12 wiedergegeben. Explosionen, die im Zentrum einer Kugel ausgelöst wurden, weisen die niedrigsten Zündgrenzen auf, die gemessenen Maximaldrücke nähern sich den theoretischen Werten an. Die Abweichungen der gemessenen

p_{\max}/p_0 vs X_{O_3} -Kurve von der berechneten Kurve ist hier am geringsten und beträgt ca. -20 % (Abb.3.10 und 3.11). Für Explosionen in Röhren erfolgt der Anstieg der gemessenen Maximaldrücke linear mit der Ozonkonzentration. Es treten deutliche Abweichungen von den theoretischen Kurven auf, die mit Verringerung des Rohrdurchmessers zunehmen. Die Zündgrenze verschiebt sich für engere Röhre geringfügig zu höheren Ozonkonzentrationen. Ferner verringern sich mit abnehmendem Rohrquerschnitt die Explosionsdrücke p_{\max} und auch die Neigung zu detonationsartigem Verhalten der Ozon/Edelgas-Gemische, die sich im p_{\max}/p_0 vs X_{O_3} -Diagramm durch exponentiellen Druckanstieg und Schneiden der theoretischen Kurven für Explosionen ausdrückt.

Abb.3.10 Explosionen des Ozons in Gemischen mit Sauerstoff in verschiedenen Gefäßen

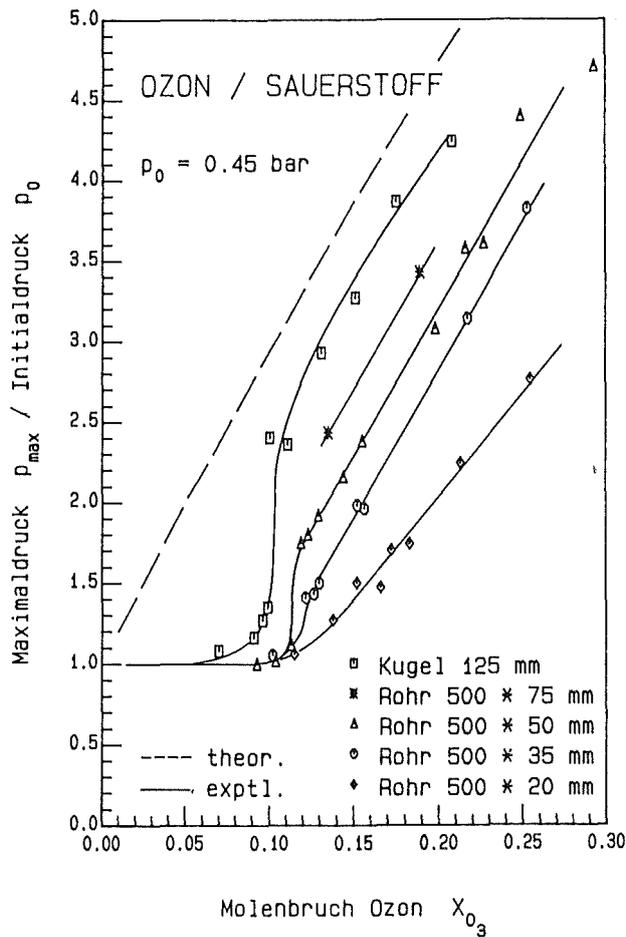


Abb.3.11
Explosionen des Ozons
in Gemischen mit Argon
in verschiedenen Gefäßen

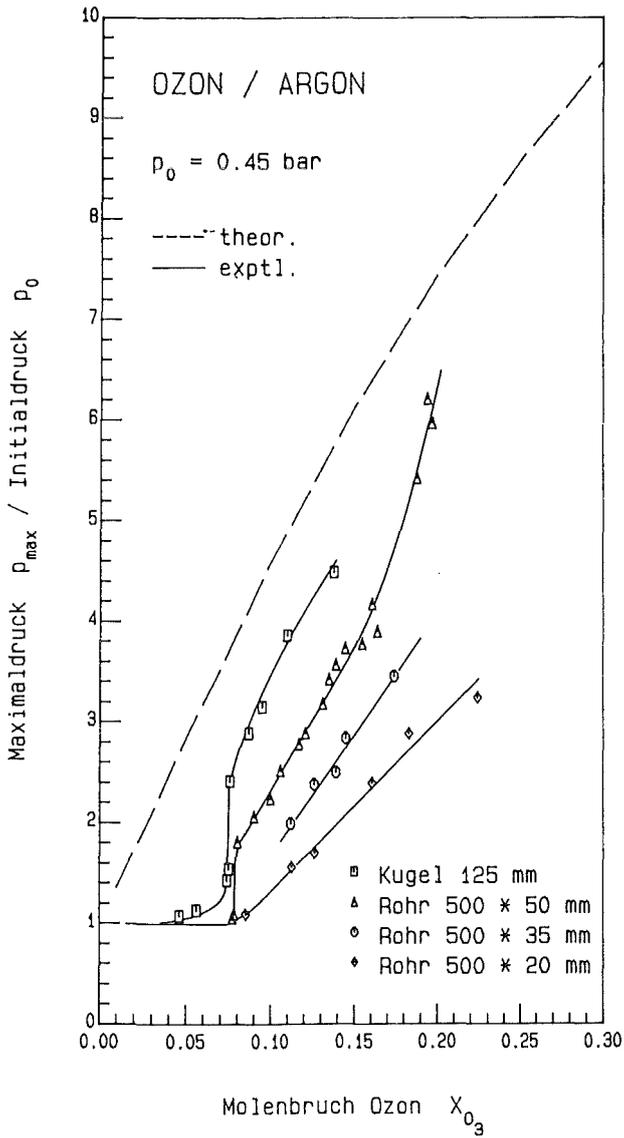


Abb.3.12
Explosionen des Ozons
in Gemischen mit Xenon
in verschiedenen Gefäßen

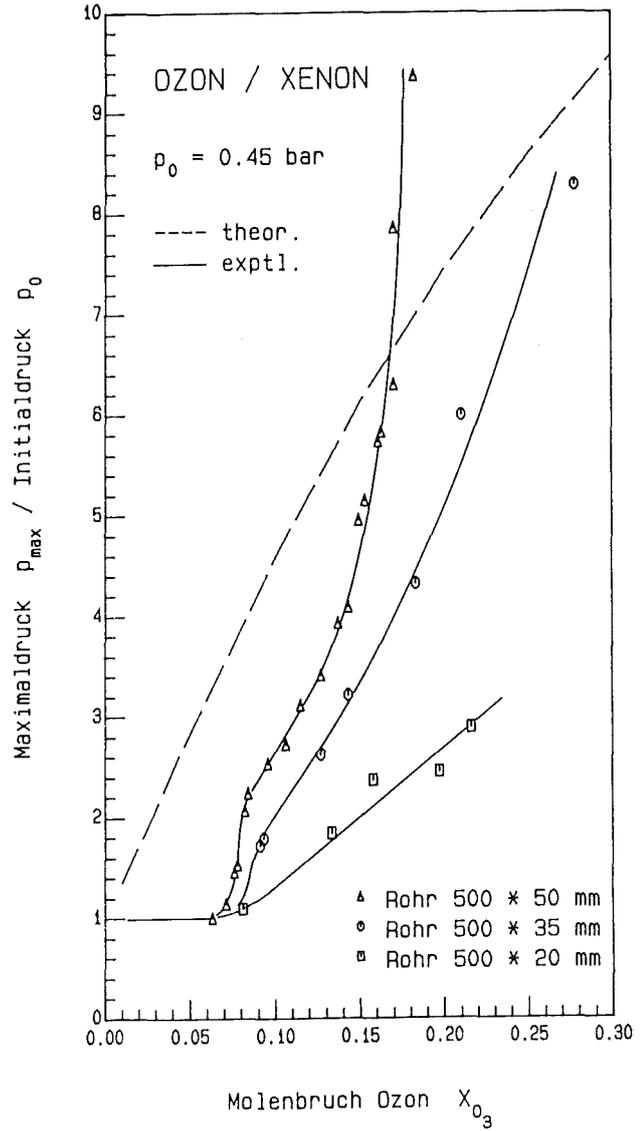
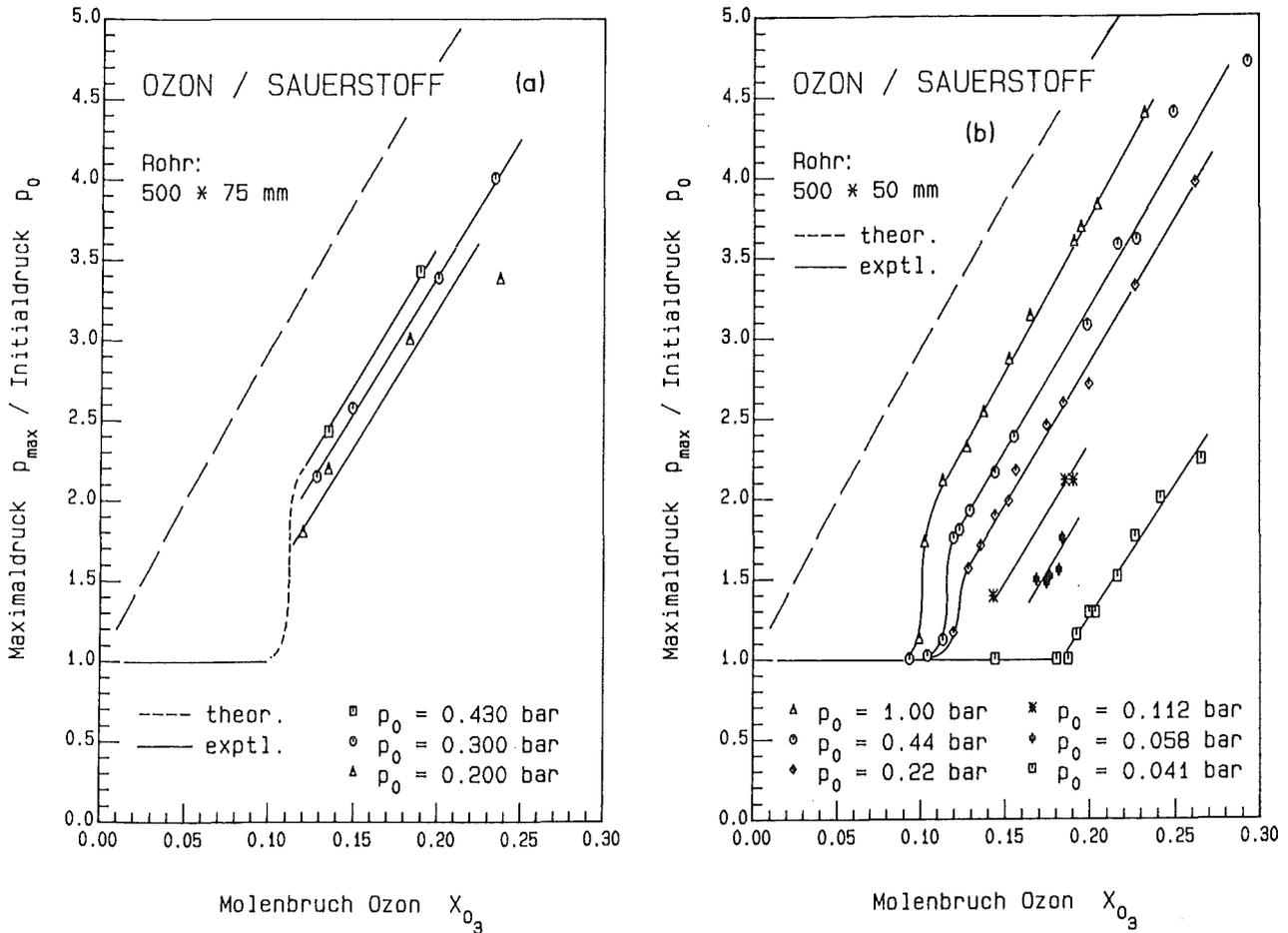
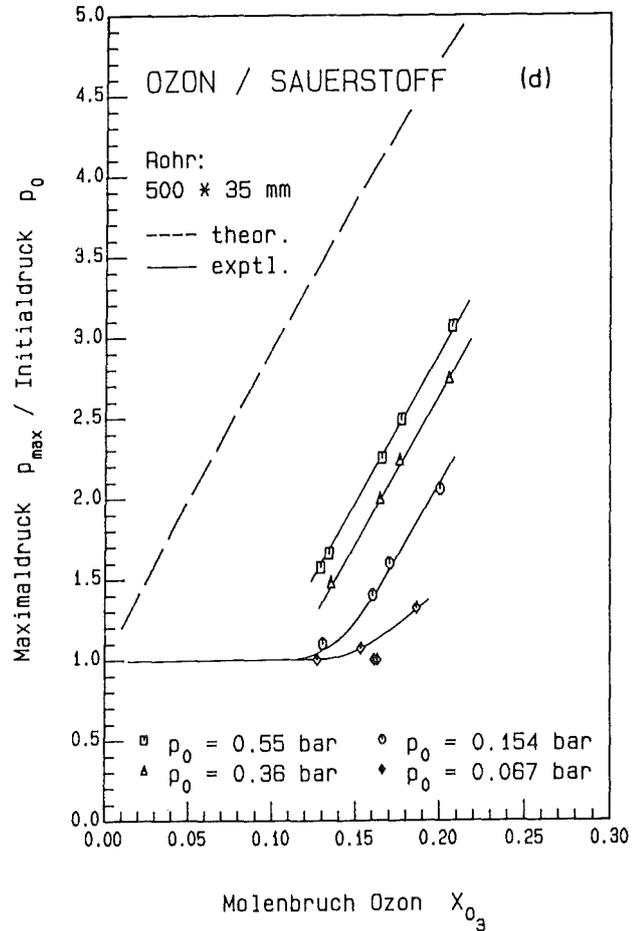
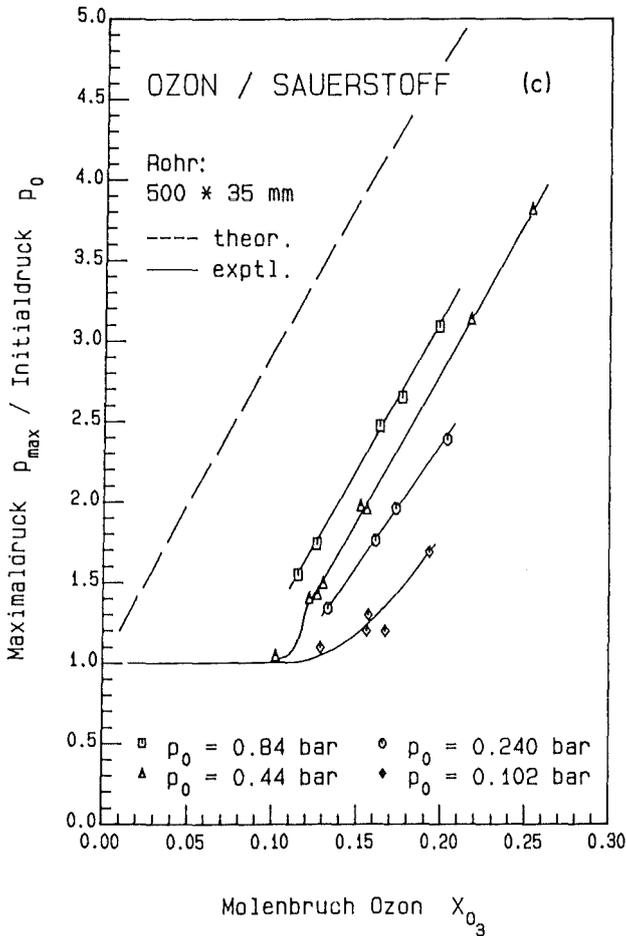


Abb.3.13 Explosion von Ozon/Sauerstoff-Gemischen in verschiedenen Gefäßen bei unterschiedlichen Initialdrücken



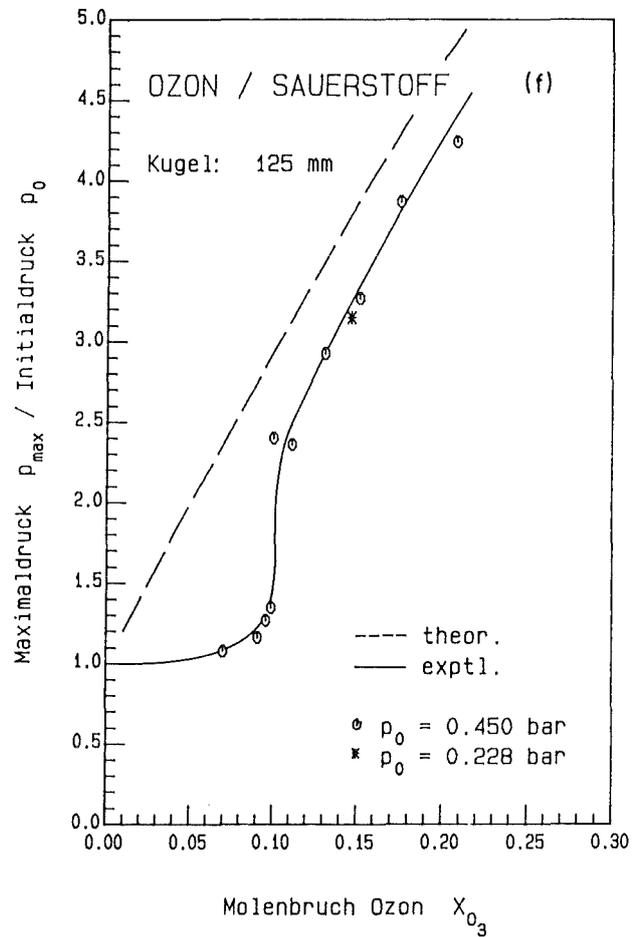
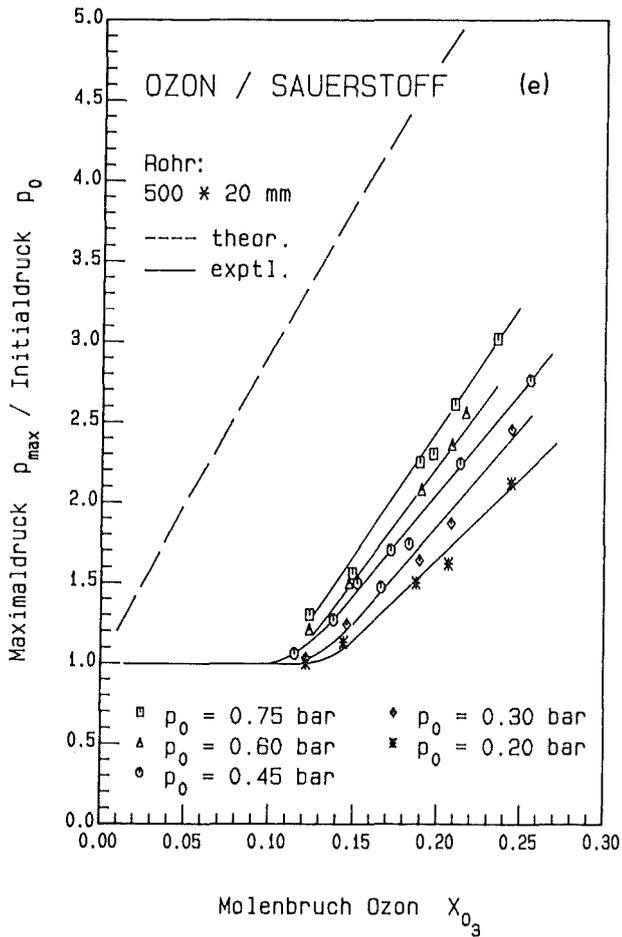
Neben dem Trägergas und der Geometrie der Versuchsanordnung wurde der Initialdruck p_0 des Gases variiert. Abb.3.13 und Abb.3.14 zeigen die Meßwerte für Ozonexplosionen mit den Trägergasen Sauerstoff und Stickstoff in verschiedenen Gefäßen bei unterschiedlichen Initialdrücken zusammen mit den berechneten Werten für adiabatische Explosionen. Die entsprechenden Ergebnisse für die Systeme Ozon/Argon und Ozon/Xenon sind in den Abbildungen 3.15 und 3.16 zusammengefaßt.

Abb.3.13 (Forts.)



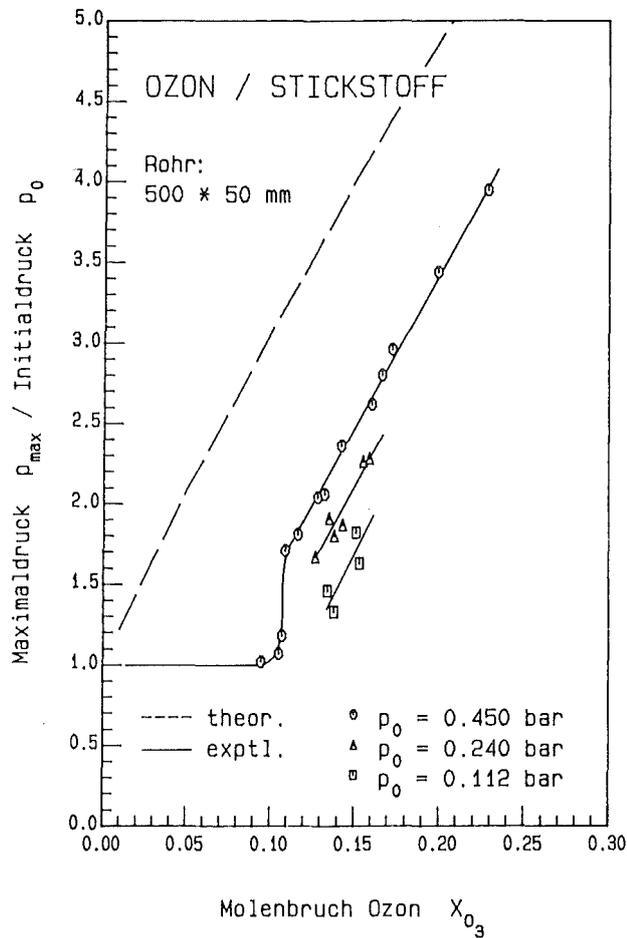
Bei Explosionen in Rohren bewirkt die Verringerung des Initialdruckes ein Ansteigen der Zündgrenzen zu höheren Ozonkonzentrationen sowie eine Abnahme der Größe p_{max}/p_0 und damit eine größere Abweichung der gemessenen von den berechneten Werten. Gleichfalls nimmt die Neigung der Ozon/Edelgas-Gemische zur Detonation mit fallendem Initialdruck ab. Bei Explosionen, die im Zentrum einer Kugel ausgelöst wurden, wurde keine Abhängigkeit des p_{max}/p_0 -Verhältnisses vom Initialdruck beobachtet.

Abb.3.13 (Forts.)



Die für unterschiedliche Trägergase, Gefäßgeometrien und Initialdrücke bestimmten Zündgrenzen für die Ozonexplosion sind in Tab.3.4 für die Kugelgeometrie, in Tab.3.5 für Rohre unterschiedlichen Durchmessers wiedergegeben.

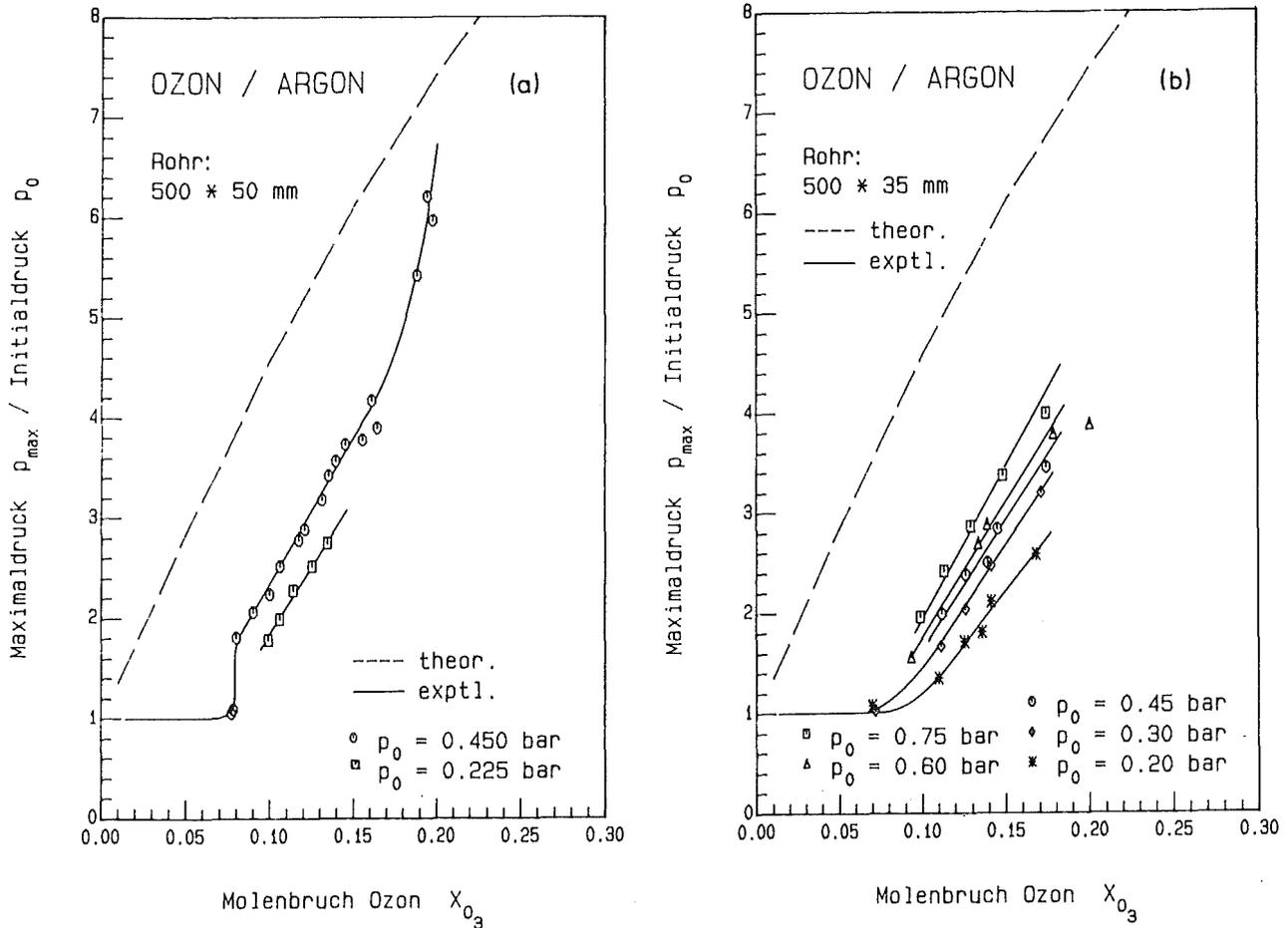
Abb.3.14 Explosion von Ozon/Stickstoff-Gemischen bei verschiedenen Initialdrücken



Tab.3.4 Zündgrenzen der Ozonexplosion in einer Kugel bei $T_0 \approx 298$ K

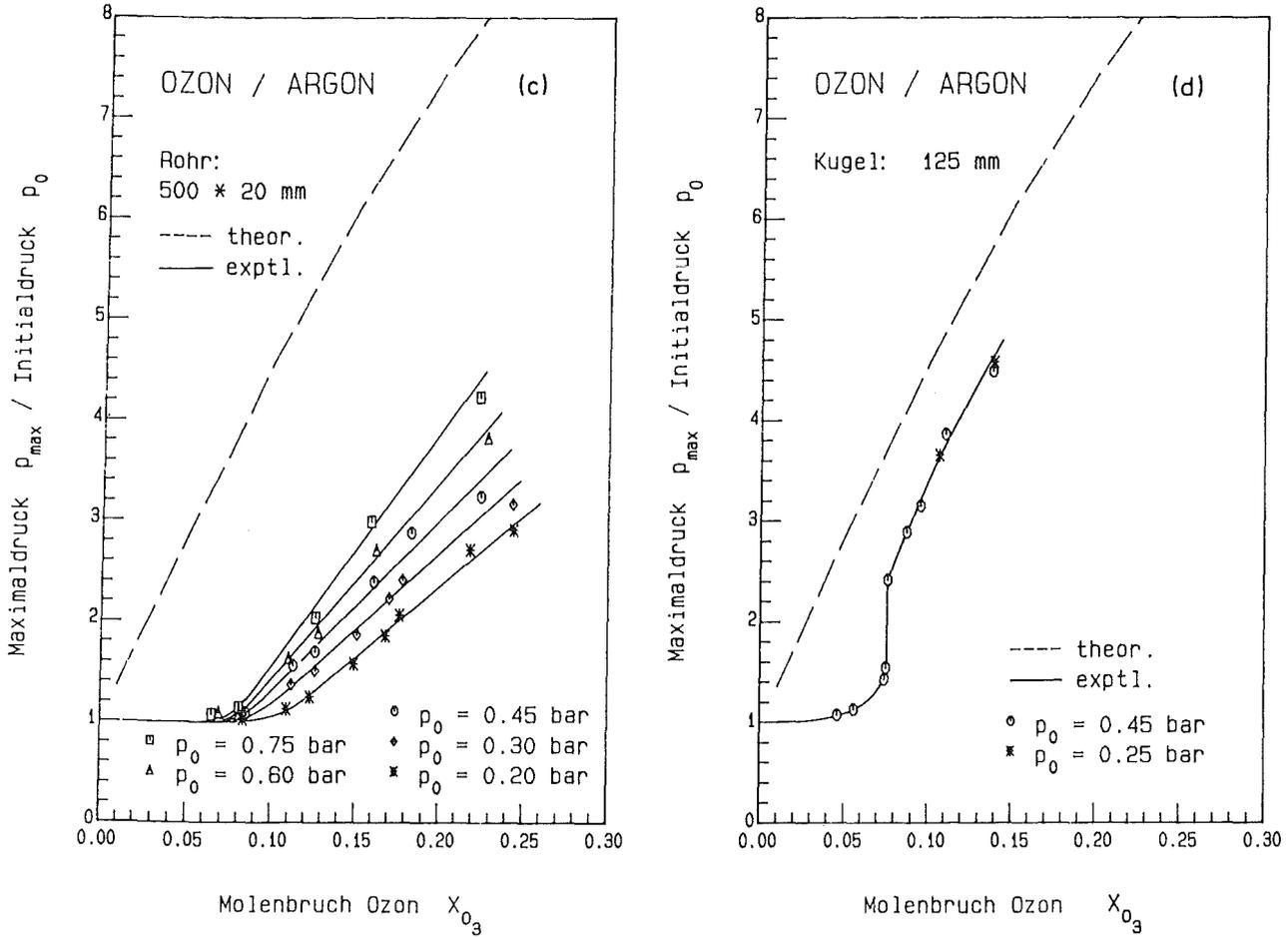
| Trägergas | d[mm] | p_0 [bar] | X_{gr} [%] |
|----------------|-------|-------------|----------------|
| Ar | 124 | 0.45 | 7.6 ± 0.2 |
| O ₂ | 124 | 0.45 | 10.0 ± 0.1 |

Abb.3.15 Explosion von Ozon/Argon-Gemischen in verschiedenen Gefäßen bei unterschiedlichen Initialdrücken



In einem Rohr von 20 mm Durchmesser wurde für keines der hier untersuchten Systeme eine scharf ausgeprägte Zündgrenze, sondern ein eher kontinuierlicher Übergang zur Explosion beobachtet. Abb.3.17 zeigt die Zündgrenzen für Ozonexplosionen in Rohren als Funktion des Initialdruckes und des Gefäßdurchmessers und illustriert den Anstieg der Zündgrenze bei fallendem Initialdruck und bei Verringerung des Durchmessers.

Abb.3.15 (Forts.)



Wurde der zum Zünden des Gases verwendete Pt-Draht von 40 mm auf 25 mm verkürzt, konnte ein Ozon/Argon-Gemisch mit 8.7 Mol-% Ozon bei einem Druck von 0.45 bar in einem 50 mm breiten Rohr nicht mehr zur Explosion gebracht werden. Die Zündgrenze stieg hier von 7.9 ± 0.2 Mol-% Ozon auf 8.8 ± 0.2 Mol-% (vgl. Tab.3.5, S.73). Dagegen bewirkt eine Verlängerung des Pt-Drahtes über 40 mm hinaus kein Absinken der Zündgrenze.

Abb.3.16 Explosion von Ozon/Xenon-Gemischen in verschiedenen Gefäßen bei unterschiedlichen Initialdrücken

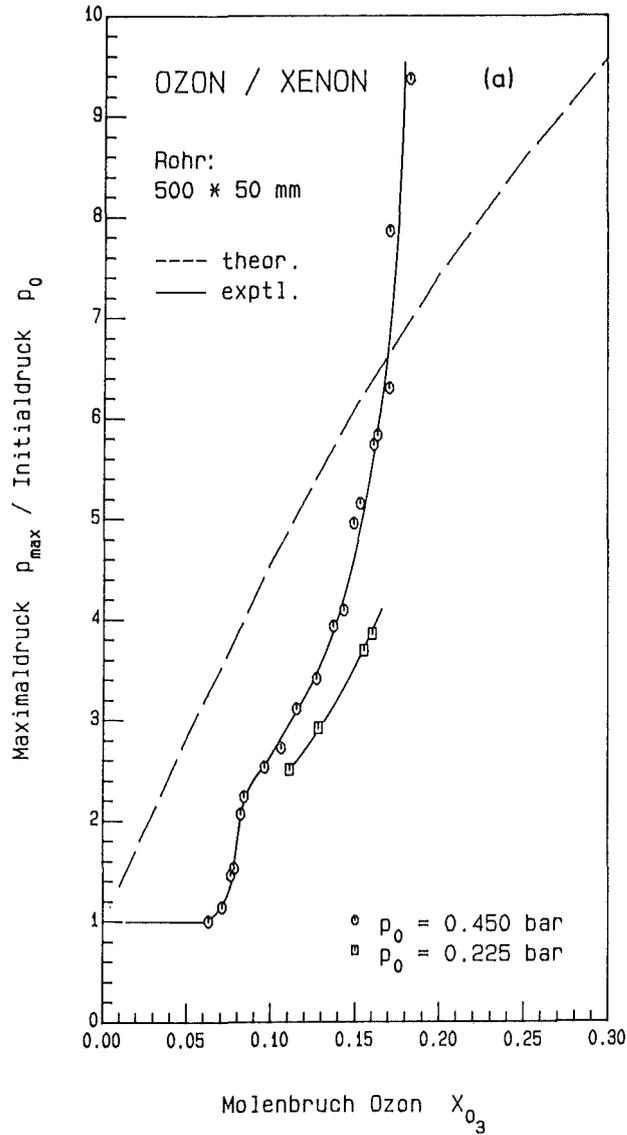


Abb.3.16 (Forts.)

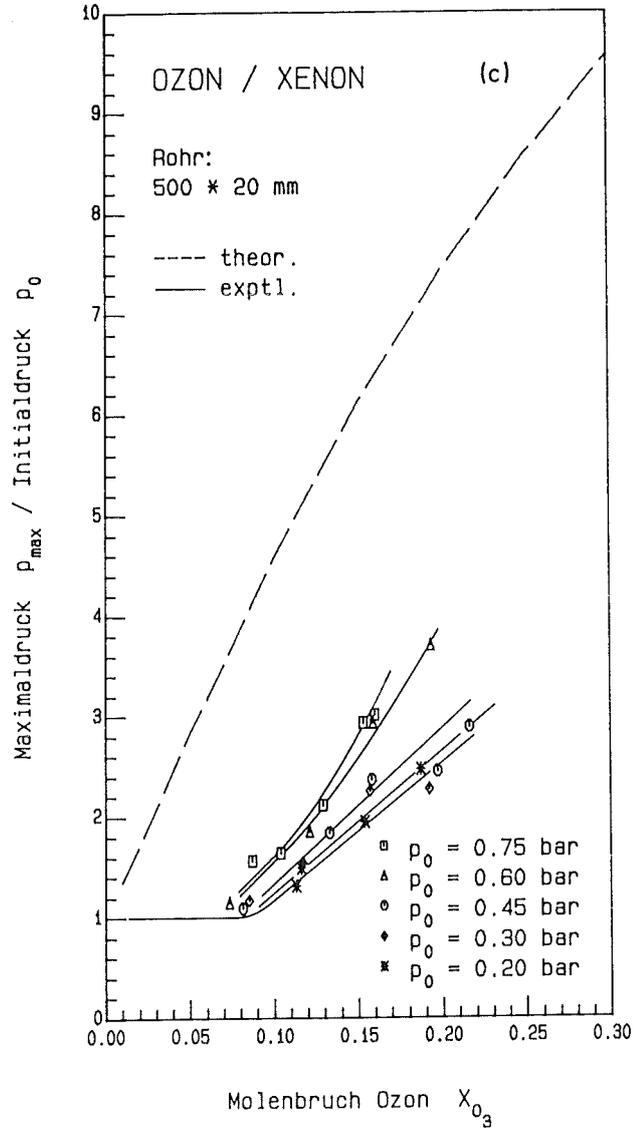
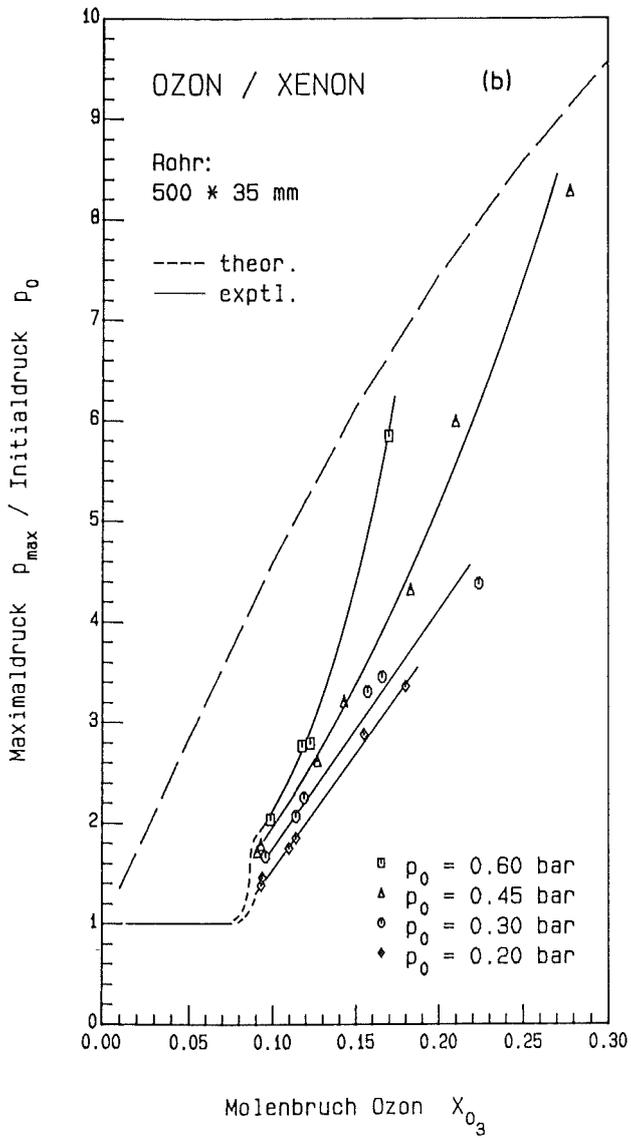
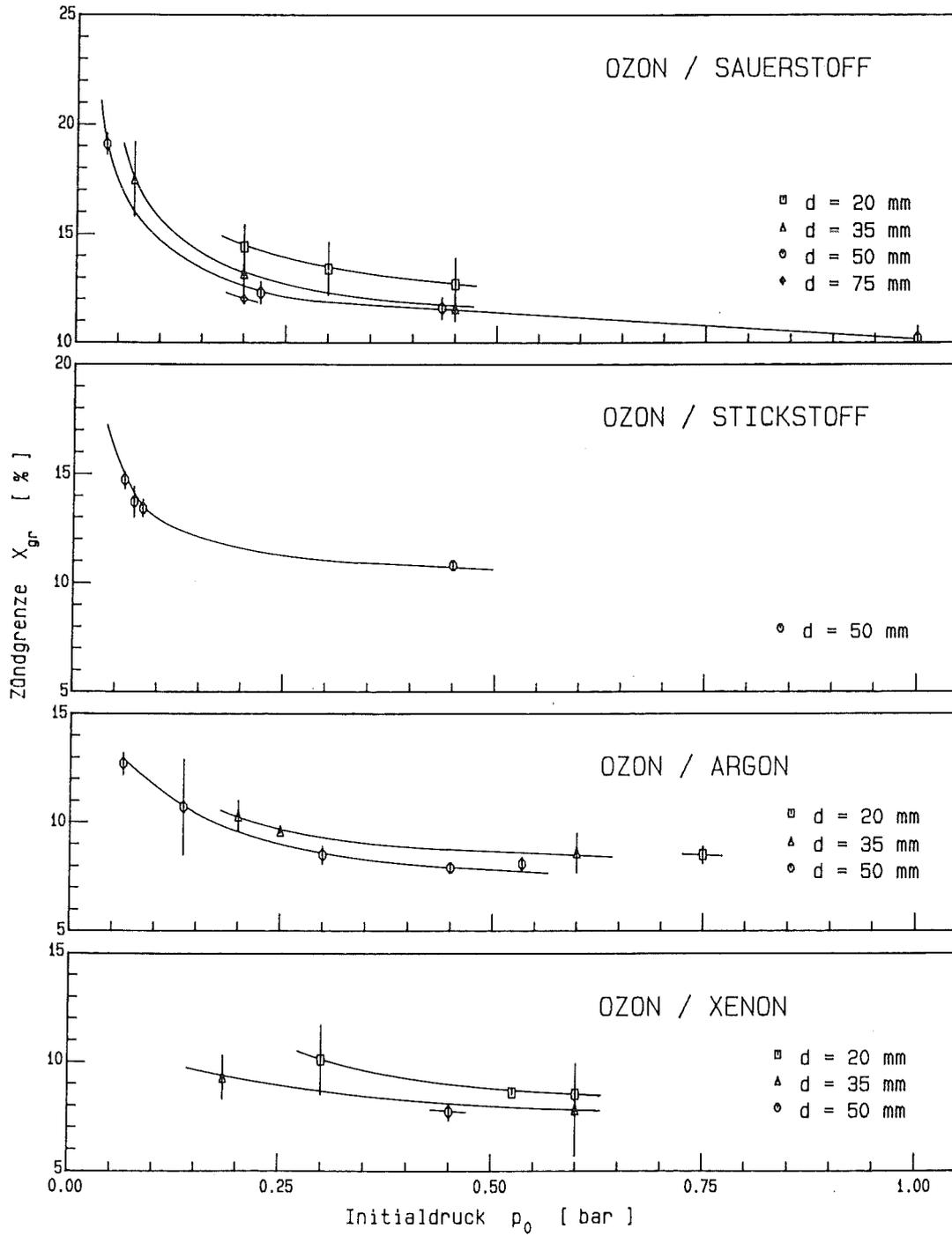


Abb.3.17 Zündgrenzen für Ozonexplosionen in Rohren



Tab.3.5 Zündgrenzen der Ozonexplosion in Rohren bei $T_0 \approx 298$ K

| Trägergas | d [mm] | p_0 [bar] | X_{gr} [%] |
|---------------------------------|--------|-------------|--------------|
| O ₂ | 75 | 0.200 | ≤ 12 |
| O ₂ | 50 | 0.035 | 19.1±0.9 |
| O ₂ | 50 | 0.220 | 12.3±0.5 |
| O ₂ | 50 | 0.435 | 11.6±0.5 |
| O ₂ | 50 | 1.000 | 10.2±0.3 |
| O ₂ | 35 | 0.068 | 17.5±1.7 |
| O ₂ | 35 | 0.200 | 13.2±1.0 |
| O ₂ | 35 | 0.450 | 11.6±0.6 |
| O ₂ | 20 | 0.200 | 14.4±1.0 |
| O ₂ | 20 | 0.300 | 13.4±1.2 |
| O ₂ | 20 | 0.450 | 12.7±1.2 |
| N ₂ | 50 | 0.061 | 14.7±0.4 |
| N ₂ | 50 | 0.072 | 13.7±0.7 |
| N ₂ | 50 | 0.083 | 13.4±0.4 |
| N ₂ | 50 | 0.45 | 10.8±0.2 |
| CCl ₂ F ₂ | 50 | 0.43 | 22.5±2.5 |
| He | 50 | 0.45 | 8.9±0.2 |
| Ar | 50 | 0.063 | 12.7±0.5 |
| Ar | 50 | 0.135 | 10.7±2.2 |
| Ar | 50 | 0.300 | 8.5±0.4 |
| Ar | 50 | 0.45 | 7.9±0.2 |
| Ar | 50 | 0.535 | 8.1±0.3 |
| Ar | 35 | 0.20 | 10.3±0.7 |
| Ar | 35 | 0.25 | 9.6±0.1 |
| Ar | 35 | 0.60 | 8.6±0.9 |
| Ar | 20 | 0.75 | 8.5±0.4 |
| Kr | 50 | 0.45 | 7.7±0.3 |
| Xe | 50 | 0.45 | 7.7±0.4 |
| Xe | 35 | 0.184 | ≤ 9.3 |
| Xe | 35 | 0.60 | 7.8±2.1 |
| Xe | 20 | 0.30 | 10.1±1.6 |
| Xe | 20 | 0.525 | 8.6±0.1 |
| Xe | 20 | 0.60 | 8.5±0.3 |

Zuletzt wurde der Einfluß der WAA-typischen Verunreinigungen Kohlenmonoxid, Methan und Stickstoffdioxid auf die Explosion eines Ozon/Edelgas-Gemisches untersucht.

Als geeignetes Trägergas wurde Argon gewählt: Die Zündgrenzen, der Druckanstieg mit der Ozonkonzentration dp_{\max}/dX_{O_3} und die Höhe der erreichten Maximaldrücke sind sehr ähnlich dem System Ozon/Xenon, welches für die Tieftemperaturrektifikation (TTR) von größtem Interesse ist. Dagegen ist die Tendenz zur Detonation im Vergleich zu den Systemen Ozon/Xenon und Ozon/Krypton am wenigsten stark ausgeprägt. Die Versuche wurden in einer Kugel von 124 mm Durchmesser durchgeführt, da für die Kugelgeometrie die Abweichungen vom Idealverhalten am geringsten sind.

Eingesetzt wurden Kohlenmonoxid in einer Konzentration von ca. 5 Mol-%, sowie Methan und Stickstoffdioxid in Konzentrationen von jeweils ca. 1 Mol-% bezogen auf das Trägergas. Die Meßergebnisse sind zusammen mit den Vergleichswerten für die Explosion reiner Ozon/Argon-Gemische in den Druck vs Konzentration-Diagrammen Abb.3.19, 3.20 und 3.21 dargestellt.

Bei der Herstellung CO-haltiger Gemische wurde ein beträchtlicher, aber nicht reproduzierbarer Anteil des Kohlenmonoxids durch spontane Reaktion mit Ozon zu Kohlendioxid umgesetzt. Um die aktuelle CO-Konzentration vor der Zündung genauer angeben zu können wurden zusätzliche Ozon/Edelgas/Kohlenmonoxid-Gemische hergestellt und analysiert (Blindversuche). Für die aktuelle CO-Konzentration ergibt sich als Mittel aus 13 Messungen ein Wert von 36.5 ± 17.5 % der ursprünglichen Konzentration, also hier 1.8 ± 0.9 Mol-%. Diese Zugabe von Kohlenmonoxid bewirkt eine nur geringfügige Verschiebung der Zündgrenze zu niedrigeren Ozonkonzentrationen. Sie beträgt hier 6.8 ± 0.4 Mol-% Ozon gegenüber 7.5 ± 0.2 Mol-% Ozon im reinen Ozon/Argon-Gemisch. Es wird jedoch ein wesentlich steilerer Anstieg des Explosionsdruckes mit der Ozonkonzentration zu deutlich höheren Maximalwerten beobachtet (Abb.3.19).

Tab.3.6 zeigt für jeweils ein Gemisch unterhalb, oberhalb und im Bereich der Zündgrenze die Rate der Ozonzersetzung $Y(-O_3)$ und der CO_2 -Bildung $Y(CO_2)$.

Tab.3.6 Analyse einiger $O_3/Ar/CO$ -Gemische unterschiedlicher Ausgangskonzentrationen X_{O_3} nach der Zündung

| X_{O_3} [%] | $Y(-O_3)$ [%] | X_{CO} [%] | X_{CO_2} [%] | $Y(CO_2)$ [%] |
|---------------|---------------|--------------|----------------|--------------------|
| 6.4 | 68.2 | 2.24 | 1.90 | 0 |
| 7.1 | 98.2 | 1.28 | 3.35 | $0 \leq Y \leq 54$ |
| 9.1 | 98.5 | 0.02 | 4.00 | 98.5 ± 1 |

Kohlenmonoxid wird in Gemischen oberhalb der Zündgrenze vollständig zu Kohlendioxid umgesetzt. Für Ozonkonzentrationen oberhalb 10 Mol-% brennt die O_3 -CO-Flamme, wie Abb.3.18 für ein $O_3/Ar/CO$ -Gemisch mit einer Ozonkonzentration von 12.3 Mol-% zeigt, mit intensiv blauer Flamme.

Abb.3.18 Explosion eines Gemisches von 12.3 Mol-% Ozon und 1.8 Mol-% Kohlenmonoxid in Argon bei einem Initialdruck von 0.28 bar

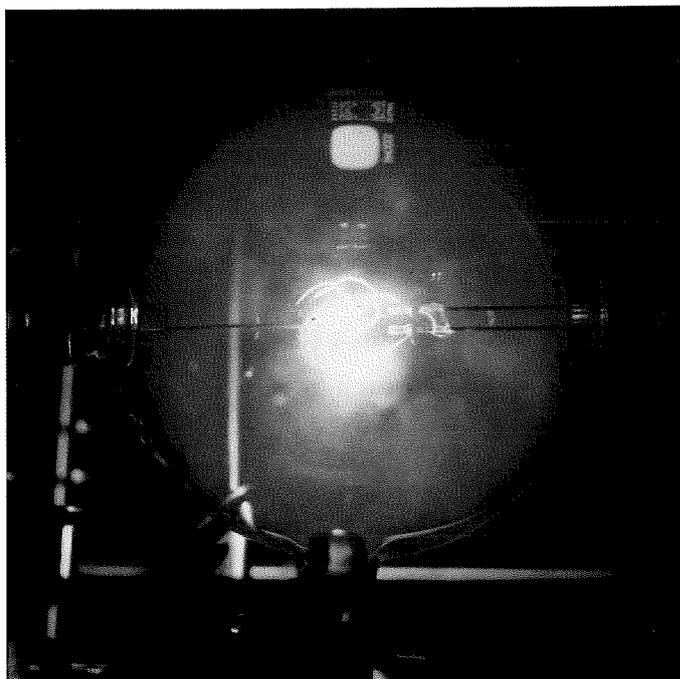
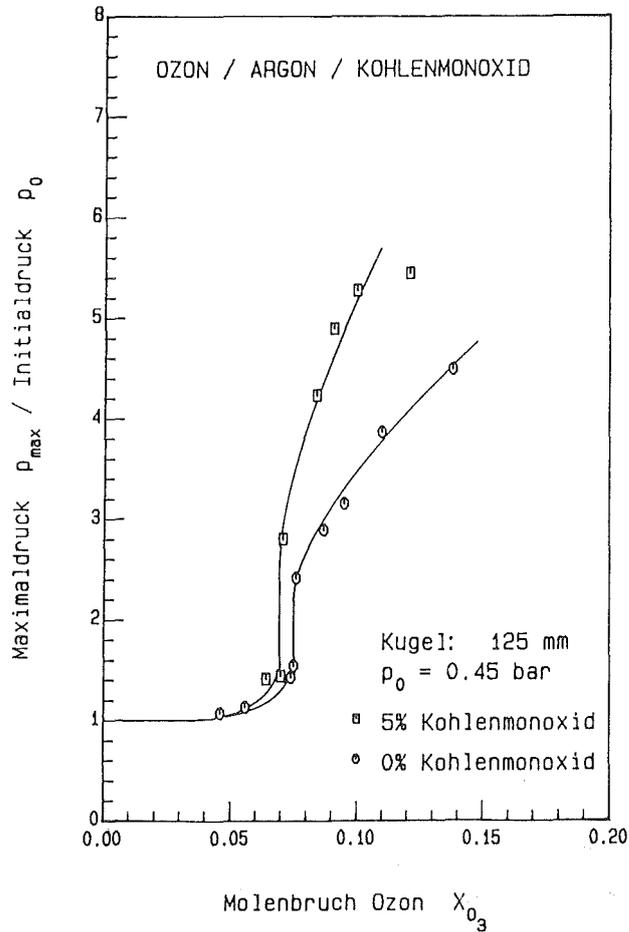
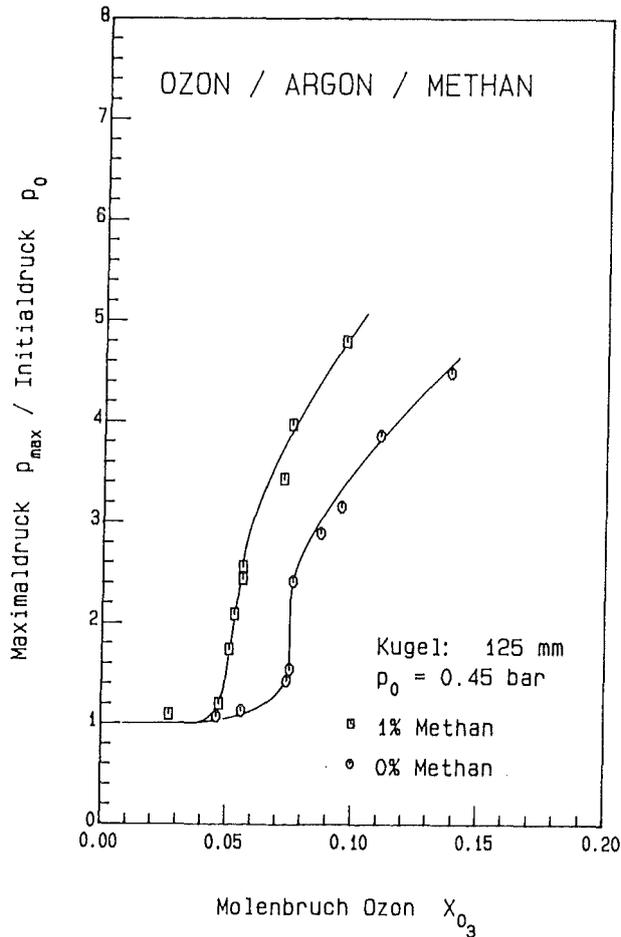


Abb.3.19 Einfluß geringer Konzentrationen an Kohlenmonoxid auf die Explosion von Ozon/Argon-Gemischen



Zusatz von 1 % Methan zu einem Ozon/Argon-Gemisch führt zu einer deutlichen Verringerung der Zündgrenze von 7.5 ± 0.2 Mol-% Ozon auf 5.2 ± 0.4 Mol-% Ozon und zu wesentlich höheren Explosionsdrücken (Abb.3.20). Explosionen in Gemischen mit einer Ozonkonzentration oberhalb 9 Mol-% sind von Leuchterscheinung und Geräusentwicklung begleitet. Wie die in Tab.3.7 zusammengefaßten Ergebnisse der Gasanalyse zeigen, enthielt das eingesetzte Methan keinen nachweisbaren

Abb.3.20 Einfluß geringer Konzentrationen an Methan auf die Explosion von Ozon/Argon-Gemischen



Anteil an Kohlenoxiden, auch trat vor der Zündung keine Bildung von CO oder CO_2 durch Reaktion des Methan mit Ozon ein. Für Mischungen unterhalb oder im Bereich der Zündgrenze wurde eine unvollständige Umsetzung des Methans zu CO_2 beobachtet. In Gemischen, deren Ozongehalt deutlich die Zündgrenze überschreitet, wurde Methan nahezu vollständig verbrannt. Kohlenmonoxid konnte als Endprodukt der Methanverbrennung nur einmal in signifikanter Konzentration nachgewiesen werden.

Tab.3.7 Analyse einiger O₃/Ar/CH₄-Gemische unterschiedlicher Ausgangskonzentrationen X_{o,O₃} nach der Zündung

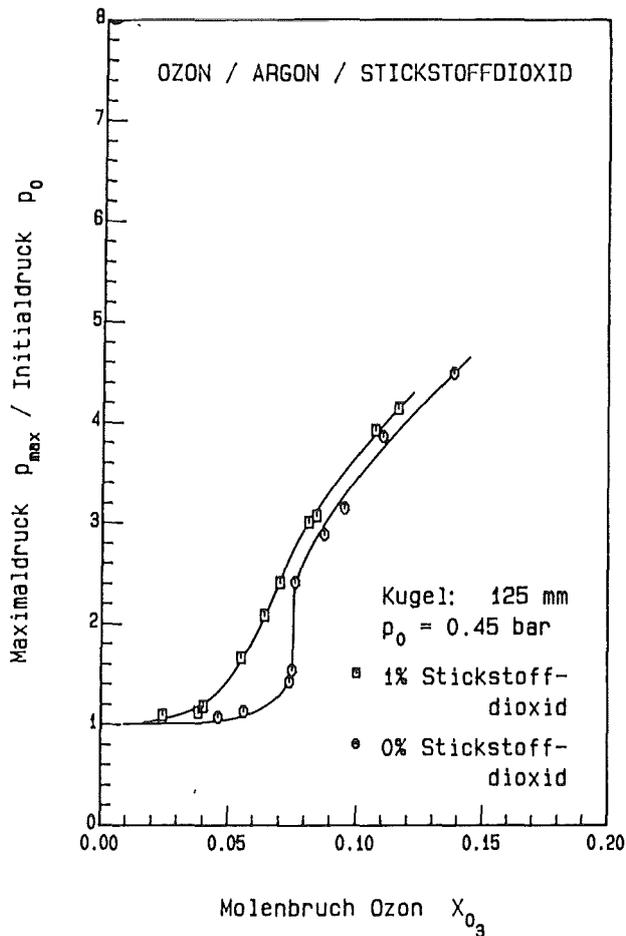
| X _{o,O₃} [%] | Y(-O ₃) [%] | X _{CH₄} [%] | X _{CO} [%] | X _{CO₂} [%] | Y(-CH ₄) [%] | Bemerkungen |
|----------------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------|
| 0 | - | 0.96 | 0 | 0 | - | Blindprobe |
| 2.7 | 50.4 | 0.89 | 0 | 0.26 | 22.6 | |
| 5.1 | 80.1 | 0.63 | 0 | 0.44 | 41.1 | |
| 5.3 | 92.2 | 0.52 | 0.03 | 0.36 | 42.9 | |
| 5.6 | 98.0 | 0.60 | 0 | 0.30 | 33.3 | |
| 5.6 | 98.2 | 0.44 | 0.20 | 0.29 | 52.7 | |
| 9.6 | 98.7 | 0.016 | 0.002 | 0.87 | 98.0 | |

Bei der Herstellung von Gasgemischen mit Stickstoffdioxid-zusatz verschwand die Braunfärbung des Gases durch Reaktion des Stickstoffdioxids mit Ozon. Das Produktgemisch neigt zu spontaner Explosion: Es wurden zwei spontane Explosionen im Mischungsgefäß und eine weitere im Reaktionsgefäß beobachtet. Während der Untersuchung des NO₂-Einflusses auf die Ozondetonation (hier wurde Xenon als Trägergas eingesetzt, s.S.90), kam es im Mischungsgefäß zu zwei weiteren Selbstzündungen des Gases, die zur Detonation und zur Zerstörung der Versuchsanordnung führten.

Die Zündgrenze ist für Ozon/Argon-Gemische mit NO₂-Zusatz deutlich zu niedrigeren Ozonkonzentrationen verschoben und nicht mehr scharf ausgeprägt. Für Ozonkonzentrationen oberhalb 8 Mol-% wurden nur geringfügig höhere Maximaldrücke als in reinen Ozon/Argon-Gemischen beobachtet (Abb.3.21). Für Ozonkonzentrationen oberhalb von 10 Mol-% ist die Explosion von Leuchterscheinung und Geräusentwicklung begleitet. Nach der Explosion wird eine deutliche Braunfärbung, die die Rückbildung des Stickstoffdioxids anzeigt, beobachtet. Das vor der Explosion durch Reaktion von Stickstoffdioxid mit Ozon entstandene, farblose N₂O₅ konnte zunächst nicht durch IR-Spektroskopie nachgewiesen werden, da die eingesetzten Konzentrationen äußerst gering waren (unter den gewählten Bedingungen betrug der Initialdruck 0.45 bar und

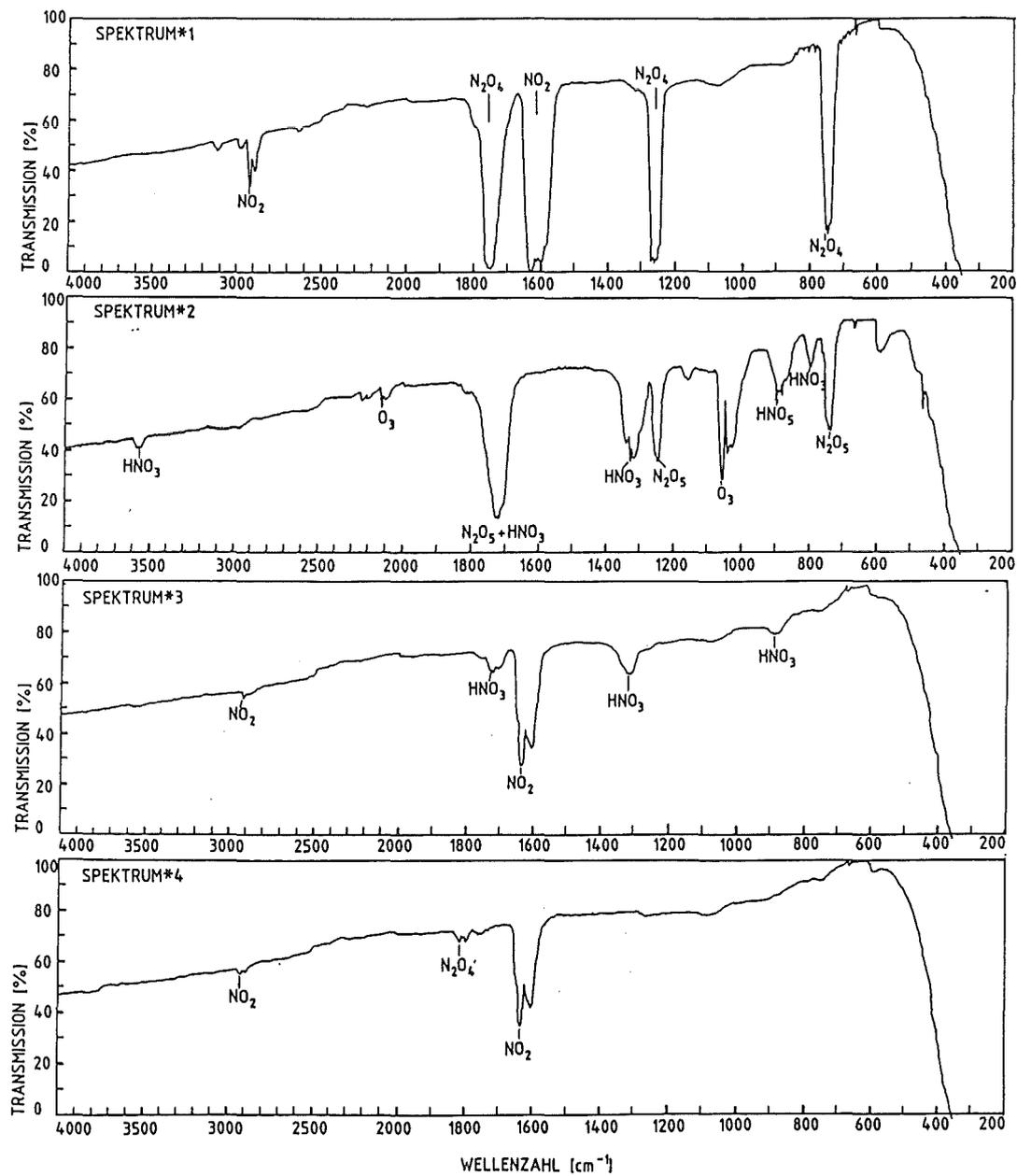
folglich der N_2O_5 -Partialdruck ca. 0.002 bar) und das entstandene N_2O_5 - vermutlich in der Meßzelle - durch Hydrolyse vollständig zu HNO_3 umgesetzt wurde.

Abb.3.21 Einfluß geringer Konzentrationen an Stickstoffoxiden auf die Explosion von Ozon/Argon-Gemischen



Zum Nachweis des N_2O_5 wurden Ozon/Edelgas/Stickstoffdioxid-Gemische mit höherem Stickstoffdioxidgehalt (2.5 Mol-% NO_2/N_2O_4 in Argon und 7.4 Mol-% NO_2/N_2O_4 in Xenon) hergestellt und IR-spektroskopisch analysiert. Einige der Spektren sind in Abb.3.22 wiedergegeben.

Abb.3.22 Infrarotspektren des $\text{NO}_2/\text{N}_2\text{O}_4$ und dessen Reaktionsprodukte mit Ozon



Spektrum*1 zeigt das Ausgangsgemisch, bestehend aus Xenon mit 7.4Mol-% $\text{NO}_2/\text{N}_2\text{O}_4$. Mit Hilfe der Gleichgewichtsbedingung $K = p_{\text{NO}_2} / (p_{\text{N}_2\text{O}_4})^2$ und $K_{298} = 6.80 \text{ bar}^{-1}$ [139] ergibt sich für einen Druck von 480 hPa folgende Zusammensetzung: $p_{\text{NO}_2} = 29.6 \text{ hPa}$, $p_{\text{N}_2\text{O}_4} = 5.9 \text{ hPa}$ und $p_{\text{Xe}} = 44.5 \text{ hPa}$. Das Spektrum zeigt die Absorptionsbanden von NO_2 und N_2O_4 : Eine Bande mittlerer Intensität bei einer Wellenzahl ν von 2919 cm^{-1} , sowie starke und sehr starke Absorption bei 1750 cm^{-1} , 1620 cm^{-1} , 1265 cm^{-1} und 750 cm^{-1} [140,66].

Spektrum*2 zeigt neben Ozon die durch Reaktion von NO_2 und N_2O_4 mit Ozon entstandenen Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen: In das Mischungsgefäß mit 98.8 hPa eines Ozon/Sauerstoff-Gemisches wurde das Xenon/ $\text{NO}_2/\text{N}_2\text{O}_4$ -Gemisch der oben beschriebenen Zusammensetzung eingeleitet, bis sich ein Druck von 450 hPa einstellte. Die braune Färbung des Stickstoffdioxids verschwand völlig, während die Blaufärbung durch Ozon erhalten blieb. Die Messung der UV-Absorption ergab eine Ozonkonzentration von 11 Mol-% im Produktgemisch. Aus diesen Angaben und der Annahme, daß NO_2 und N_2O_4 zunächst vollständig zu N_2O_5 umgesetzt wurden, d.h. die Hydrolyse des N_2O_5 zu Salpetersäure wird hier vernachlässigt, läßt sich die Zusammensetzung des Ausgangs- sowie des Produktgemisches berechnen. Tab.3.8 faßt die Partialdrücke der Komponenten zusammen.

Tab.3.8 Partialdrücke der Ausgangs- und Endstoffe für die Bildung von N_2O_5 aus NO_2 und N_2O_4

| Ausgangsstoff | p_0 [hPa] | Endstoff | p_0 [hPa] |
|------------------------|-------------|--------------------------|-------------|
| O_3 | 63.4 | O_3 | 50.0 |
| O_2 | 35.4 | O_2 | 48.8 |
| NO_2 | 23.2 | } N_2O_5 | 15.2 |
| N_2O_4 | 3.6 | | |
| Xe | 336.0 | Xe | 336.0 |
| Summe | 461.6 | Summe | 450.0 |

Das Produktgemisch wurde in die IR-Meßzelle überführt und bei einem Druck von 385 hPa 10 Min nach seiner Herstellung zur Messung gebracht, die nach weiteren 12 Min abgeschlossen war. In Spektrum*2 wurde neben Ozon (Absorptionsbanden bei 2105 cm^{-1} , 1110 u. 1042 cm^{-1} [141,142]) Distickstoffpentoxid (1715 cm^{-1} , 1240 cm^{-1} , 740 cm^{-1} [64]), sowie dessen Hydrolyseprodukt, die Salpetersäure (3550 cm^{-1} , 1712 u. 1706 cm^{-1} , 1331 u. 1325 cm^{-1} , 879 cm^{-1} , 762 cm^{-1} [66,143]), nachgewiesen. Vergleich der Ozonabsorption mit einem Referenzspektrum (62 % Transmission T bei $\tilde{\nu} = 2105\text{ cm}^{-1}$ für $p_{\text{O}_3} = 100.7\text{ hPa}$) ergab, daß die Oxonkonzentration in dieser Zeit auf 4.6 Mol-% abgesunken war. Entsprechend ergab sich für N_2O_5 (Referenz: 27 % T bei $\tilde{\nu} = 1240\text{ cm}^{-1}$, 37 % T bei $\tilde{\nu} = 740\text{ cm}^{-1}$ für $p_{\text{N}_2\text{O}_5} = 4\text{ hPa}$ [66]) ein Partialdruck von $p_{\text{N}_2\text{O}_5} = 1.6 \pm 0.4\text{ hPa}$, was ein Verlust von 87 % durch Hydrolyse bedeutet.

Spektrum*3 ist typisch für die untersuchten Gasgemische nach der Explosion und wurde nach der Zündung eines Gemisches von 14.3 Mol-% Ozon in Argon mit einem ursprünglichen $\text{NO}_2/\text{N}_2\text{O}_4$ -Anteil von 2.5 Mol-% bei einem Druck von 355 hPa aufgenommen. Man erkennt deutlich die Rückbildung des NO_2 (3.8 hPa) neben einem geringen Anteil an Salpetersäure.

Spektrum*4 ist ein Referenzspektrum und zeigt die IR-Absorption von Stickstoffdioxid bei geringen Konzentrationen. Hier wurden 370 hPa eines Gemisches von Argon mit einem Anteil von 1 Mol-% $\text{NO}_2/\text{N}_2\text{O}_4$, entsprechend 3.6 hPa NO_2 und 0.1 hPa N_2O_4 , eingesetzt.

Die Beschreibung der Experimente, die zur Untersuchung der Ozonexplosion durchgeführt wurden, schließt mit der Betrachtung der experimentellen Fehler. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Fehler der Druck- und Konzentrationsmeßwerte nicht in die p-X-Diagramme eingezeichnet. Sie sollen daher an dieser Stelle diskutiert werden. Die experimentellen Fehler der Meßgrößen (Ozonkonzentration, Explosionsdruck) wurden unter Verwendung der Herstellerangaben bezüglich der Genauigkeit der Meßsysteme nach dem Gauss'schen Gesetz für die Fortpflanzung mittlerer, quadratischer Fehler berechnet.

Der Fehler der gemessenen Ozonkonzentrationen beträgt i.allg. ± 0.5 bis ± 2.0 % des Ozon-Molenbruches X_{O_3} . Abweichungen ergeben sich sowohl für besonders niedrige als auch für besonders hohe Ozonkonzentrationen, sowie für Gemische bei niedrigem Initialdruck, da die Konzentration diesem umgekehrt proportional ist (X_{O_3} berechnet sich aus: $X_{O_3} = p_{o,O_3}/p_o$). Ferner wurden in Gemischen mit Helium bzw. Argon bei höherem Ozonanteil ($X_{O_3} > 0.16$), sowie Gemischen mit einem Zusatz ozonzersetzender Stoffe, Methan und Stickstoffdioxid, ein rascher Zerfall des Ozons in der UV-Meßzelle beobachtet. Die Ozonkonzentration wurde hier durch Extrapolation der Absorption vs Zeit-Kurve abgeschätzt. In einigen Versuchen war sogar eine Ozonbestimmung durch Messung der UV-Absorption nicht mehr möglich, sondern der Ozongehalt wurde aus der Differenz der Drücke vor und nach der Explosion bestimmt. Bei vollständiger Umsetzung des Ozons gemäß $O_3 \rightarrow 1.5 O_2$ resultiert der ursprüngliche Partialdruck p_{o,O_3} des Ozons aus $p_{o,O_3} = 2(p_{end} - p_o)$. Der Fehler ergibt sich hier aus der Genauigkeit der Druckmessung. Die Fehler der Ozonbestimmung, die den oben aufgeführten Wert von ± 2.0 % überschreiten, sind in Tab.3.9 zusammengefaßt.

Tab.3.9 Fehler ΔX_{O_3} der Ozonbestimmung

| Trägergas | Reaktionsgefäß | p_o [bar] | ΔX_{O_3} [%] | Bemerkungen |
|----------------------|----------------|-------------|----------------------|-------------------------|
| O ₂ | Rohr 500×50 mm | 0.112 | ≤ 2.1 | |
| O ₂ | Rohr 500×50 mm | 0.058 | ≤ 2.9 | |
| O ₂ | Rohr 500×50 mm | 0.040 | ≤ 5.4 | |
| O ₂ | Rohr 500×35 mm | 0.102 | ≤ 2.4 | |
| O ₂ | Rohr 500×35 mm | 0.067 | < 3.2 | |
| N ₂ | Rohr 500×50 mm | 0.112 | ≤ 2.3 | |
| He | Rohr 500×50 mm | 0.45 | ≤ 2.5 | für $X_{O_3} \geq 0.24$ |
| Ar | Rohr 500×50 mm | 0.45 | ≤ 3.2 | für $X_{O_3} \geq 0.18$ |
| Xe | Rohr 500×35 mm | 0.45, 0.20 | ≤ 2.2 | |
| Ar+1%CH ₄ | Kugel 124 mm | 0.45 | 3.7 | |
| Ar+1%NO ₂ | Kugel 124 mm | 0.45 | 4.0 | |

Der prozentuale Fehler des gemessenen Maximaldruckes Δp_{\max} und damit auch der Fehler des Druckverhältnisses $\Delta(p_{\max}/p_0)$ fällt mit steigenden Werten p_{\max} . Da der Maximaldruck eine Funktion der Ozonkonzentration, des Trägergases, der Geometrie des Reaktionsgefäßes, sowie des Initialdruckes ist, gilt:

- a) Der prozentuale Fehler der Druckmessung fällt mit steigender Ozonkonzentration (Tab.3.10).

Tab.3.10 Fehler der Druckmessung für die Explosion von Ozon/Krypton-Gemischen in einem 500×50 mm Rohr bei $p_0 = 0.45$ bar

| | | | | |
|-----------------------|-----|------|------|------|
| X_{O_3} [%] | 8.0 | 10.3 | 13.4 | 15.4 |
| Δp_{\max} [%] | 3.0 | 2.5 | 2.1 | 1.9 |

- b) Für gleiche Ozonkonzentration, gleiche Gefäßgeometrie und gleichen Initialdruck ist der prozentuale Fehler des Explosionsdruckes für Ozon/Edelgas-Gemische am geringsten (Tab.3.11).

Tab.3.11 Fehler der Druckmessung für die Ozonexplosion in einem 500×50 mm Rohr bei $p_0 \approx 0.45$ bar und $X_{O_3} \approx 0.14$

| | | | | | | | |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|----------------|----------------|---|
| Trägergas | Xe | Kr | Ar | He | N ₂ | O ₂ | CCl ₂ F ₂ ¹⁾ |
| Δp_{\max} [%] | 1.9 | 2.0 | 2.1 | 1.8 | 2.6 | 3.1 | 3.0 |

- c) Für gleiches Trägergas und gleiche Werte der Ozonkonzentration und des Initialdruckes nimmt der prozentuale Fehler des Explosionsdruckes mit wachsendem Gefäßdurchmesser ab (Tab.3.12).

¹⁾ $X_{O_3} = 0.26$

Tab.3.12 Fehler der Druckmessung für die Explosion von Ozon/Argon-Gemischen bei $X_{O_3} = 0.13$ und $p_0 = 0.45$ bar in einem 500mm langen Rohr

| | | | |
|-----------------------|-----|-----|-----|
| d [mm] | 50 | 35 | 20 |
| Δp_{\max} [%] | 2.2 | 4.9 | 6.7 |

d) Für gleiche Ozonkonzentration, gleiches Trägergas und gleiche Gefäßgeometrie nimmt der prozentuale Fehler des Explosionsdruckes mit fallendem Initialdruck zu (Tab.3.13 und Tab.3.14).

Tab.3.13 Fehler der Druckmessung für die Explosion von Ozon/Argon-Gemischen bei $X_{O_3} = 0.16$ in einem 500×20 mm Rohr.

| | | | | | |
|-----------------------|------|------|------|------|------|
| p_0 [bar] | 0.75 | 0.60 | 0.45 | 0.30 | 0.20 |
| Δp_{\max} [%] | 2.6 | 3.4 | 4.8 | 8.3 | 14.3 |

Tab.3.14 Fehler der Druckmessung für die Explosion von Ozon/Sauerstoff-Gemischen bei $X_{O_3} \approx 0.20$ in einem 500×35 mm Rohr.

| | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| p_0 [bar] | 0.833 | 0.546 | 0.446 | 0.358 | 0.236 | 0.155 | 0.103 | 0.068 |
| Δp_{\max} [%] | 2.4 | 3.3 | 1.8 | 5.3 | 8.9 | 15.0 | 28.7 | ≈ 50 |

Für detonationsartige Vorgänge treten bei Messung des Maximaldruckes mit dem Spitzenwertspeicher systematische Fehler auf, da, wie die Abbildungen 3.8 und 3.9 (s.S.60) zeigen, die Anstiegszeit des Spitzenwertspeichers von 1 ms/Volt für diese schnellen Prozesse zu langsam ist: In Versuch Expl*Xe-5-39 wurde die zeitliche Druckänderung mit einem Oszilloskop registriert (Abb.3.8). Die Auswertung des p-t-Diagramms ergab einen Maximaldruck von 3.54 bar. Die Abweichung des mit dem Spitzenwertspeichers gemessenen Wertes (2.83 bar) von diesem beträgt -20 %. In einem weiteren Versuch (Expl*Xe-5-43) wurde das Meßsignal mit einem Transientenrekorder aufgezeichnet und ein Maximaldruck von 4.22 bar gegenüber einem Wert von 3.04 bar, gemessen mit dem Spitzenwertspeicher, registriert. Die Abweichung beträgt hier -28 %.

Für den Anstieg der ersten Druckschwingung ergibt sich $dp/dt = 2.375\text{bar}/0.5\text{ms}$ bzw. $dU/dt = 1.9\text{V}/0.5\text{ms}$, d.h. der Anstieg des Meßsignals erfolgt um einen Faktor von Vier schneller als die vom Hersteller angegebene Zeit des Spitzenwertspeichers. Folglich sind die Meßwerte für detonationsartige Vorgänge deutlich zu niedrig. Nimmt man die beiden hier beschriebenen Versuche für die Explosion eines Ozon/Xenon-Gemisches mit Ozonkonzentrationen von 17.0 und 18.2 Mol-% zum Maßstab (die hier gemessenen Drücke sind die höchsten), beträgt die Abweichung der Meßwerte vom tatsächlichen Maximaldruck bis zu -30 %.

3.2.2. Versuche zur Ozondetonation

Die Detonation des Ozons im Gemisch mit Sauerstoff oder den Edelgasen Argon, Krypton und Xenon wurde experimentell bei einem Initialdruck von 0.4 bar untersucht. Die Gemische wurden durch die Explosion von 0.4 bar Knallgas gezündet. Im System Ozon/Xenon wurden sowohl der Initialdruck des Gemisches (0.15 bar bis 0.4 bar) als auch die Knallgasmenge (0.25 bar bis 0.4 bar) variiert.

Die Meßergebnisse für Gemische nahe der Detonationsgrenze sind in Tab.3.15 aufgeführt. Die Werte D_1 , D_2 bedeuten die im ersten bzw. zweiten Abschnitt der Meßstrecke registrierte Geschwindigkeit der Druckwelle. Bei einer Knallgasmenge von 0.4 bar wurde für die Ozon/Edelgas-Gemische eine Detonationsgrenze von ca. 7 Mol-% Ozon beobachtet. Bei Verringerung der Knallgasmenge steigt die Detonationsgrenze deutlich an und erreicht für Ozon/Xenon-Gemische Werte zwischen 11.1 und 15.5 Mol-% für 0.3 bar Knallgas und zwischen 17 und 28 Mol-% für 0.25 bar Knallgas.

Aus den Meßsignalen (p-t-Kurven) ergaben sich auch für Gemische nahe der Detonationsgrenze keine Hinweise auf das Auftreten des Detonatonsspins.

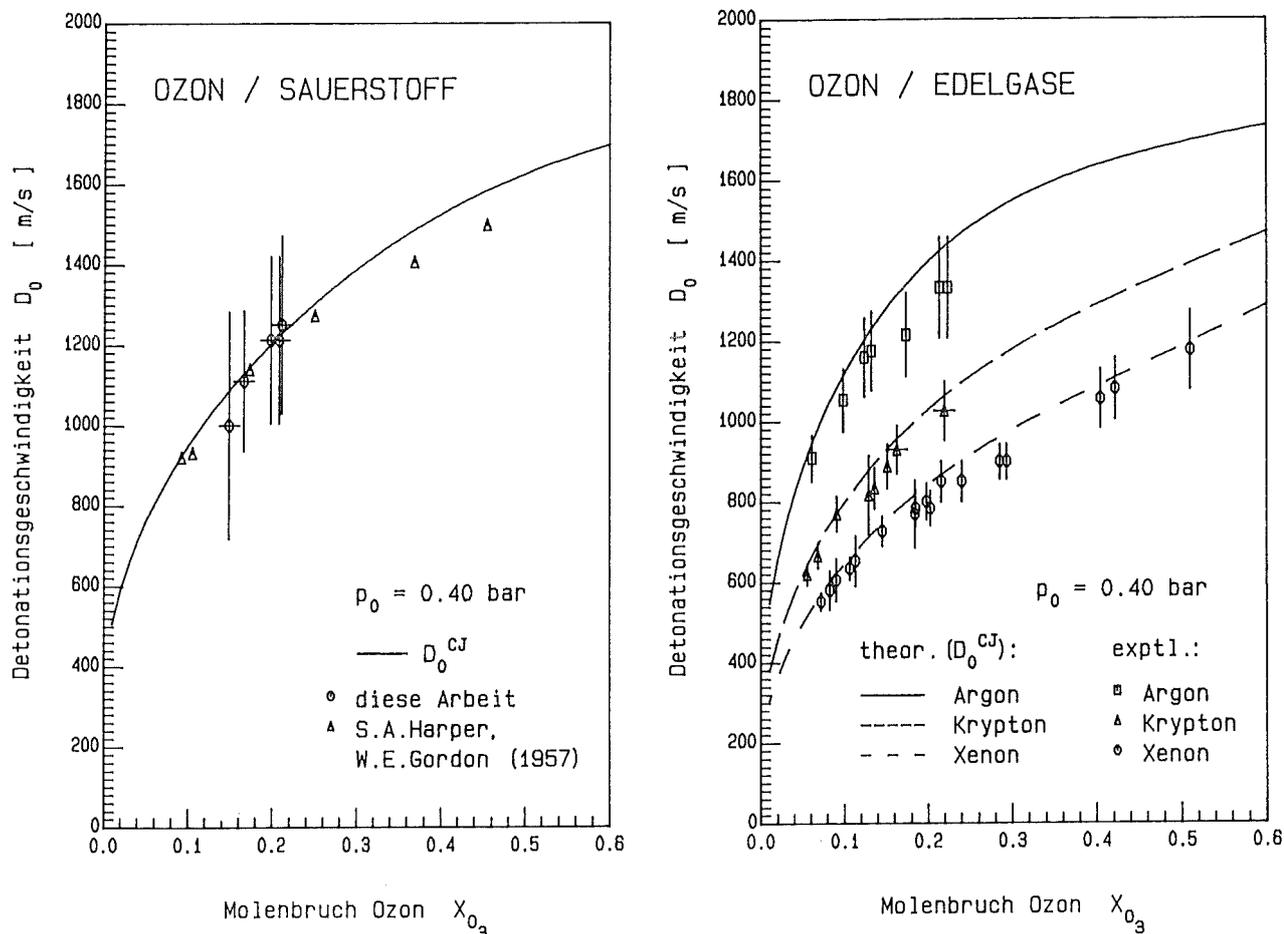
Tab.3.15 Detonationsgrenzen

| Träger- gas | p_0 [bar] | Ozon [Mol-%] | Knallgas [bar] | Y(-O ₃) [%] | D ₁ [m/s] | D ₂ [m/s] | D ₀ ^{CJ} [m/s] | Detona- tion |
|----------------|----------------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| O ₂ | 0.4006 | 7.3 | 0.40 | 4.9 | 465 | 408 | 854 | keine D. |
| O ₂ | 0.4038 | 14.9 | 0.40 | 99.7 | 1000 | 1000 | 1087 | stabil |
| Ar | 0.3996 | 6.1 | 0.40 | 99.3 | 909 | 909 | 945 | stabil |
| Ar | 0.3992 | 7.2 | 0.40 | 2.1 | 449 | 400 | 1000 | keine D. |
| Ar | 0.4006 | 9.9 | 0.40 | 99.6 | 1053 | 1053 | 1116 | stabil |
| Kr | 0.3999 | 5.5 | 0.40 | 99.2 | 625 | 615 | 640 | stabil |
| Kr | 0.4002 | 5.7 | 0.40 | 99.2 | 625 | 321 | 649 | instabil |
| Kr | 0.3999 | 6.8 | 0.40 | 99.3 | 667 | 682 | 682 | stabil |
| Xe | 0.3891 | 4.5 | 0.40 | 99.5 | 455 | 263 | 478 | instabil |
| Xe | 0.3967 | 6.2 | 0.40 | 5.0 | 278 | 230 | 538 | keine D. |
| Xe | 0.3993 | 7.2 | 0.40 | 99.5 | 548 | 556 | 569 | stabil |
| Xe | 0.3061 | 11.1 | 0.30 | 1.7 | 270 | 223 | 672 | keine D. |
| Xe | 0.2888 | 15.5 | 0.30 | 99.6 | 758 | 758 | 764 | stabil |
| Xe | 0.2203 | 14.4 | 0.25 | 3.0 | nicht registr. | | 742 | keine D. |
| Xe | 0.2030 | 17.2 | 0.25 | 99.3 | 276 | 191 | 795 | keine D. |
| Xe | 0.1754 | 28.5 | 0.25 | 99.5 | 909 | 889 | 961 | stabil |
| Xe | 0.1911 | 29.3 | 0.25 | 99.6 | 909 | 889 | 970 | stabil |

In stabilen Detonationen wurde fast immer eine Leuchterscheinung in Form des Rohr durchheilender Funken beobachtet.

Als experimentelle Detonationsgeschwindigkeit D_0 sind die Mittelwerte aus den Meßgrößen D_1 und D_2 zusammen mit Literaturwerten für das System Ozon/Sauerstoff und den nach der CJ-Theorie berechneten Werten für die hier untersuchten Systeme in Abb. 3.23 als Funktion der Ozonkonzentration aufgezeichnet. Die experimentellen Detonationsgeschwindigkeiten sind unabhängig vom Initialdruck und stimmen innerhalb der Fehlergrenzen mit den CJ-Geschwindigkeiten überein, sind jedoch stets geringfügig niedriger als diese. Die Höhe des Meßfehlers ergibt sich aus der gewählten Abtastfrequenz des Transientenrekorders (plus/minus 1 Kanal).

Abb.3.23 Detonationsgeschwindigkeiten



Aus den gemessenen Detonationsgeschwindigkeiten wurden nach der CJ-Theorie, d.h. unter Verwendung der Gleichungen (2.26), (2.28) und (2.29) (s.S.32), die experimentellen Werte für Detonationstemperatur und Detonationsdruck durch Iteration berechnet. Dieser Weg war notwendig, da diese beiden Größen nicht direkt meßbar sind. So erlaubt die Ausrichtung der Druckaufnehmer senkrecht zur Stömungsrichtung der Gase nicht das Erfassen des Gesamtdrucks (vgl. S.94). Die Ergebnisse sind in Abb. 3.24 für die Temperatur und in Abb. 3.25 für den Druck

gemeinsam mit den theoretischen Werten dargestellt. Entsprechend den gemessenen Detonationsgeschwindigkeiten sind die experimentellen Temperaturen und Drücke geringfügig niedriger als die theoretischen Werte.

Abb. 3.24 Detonationstemperaturen

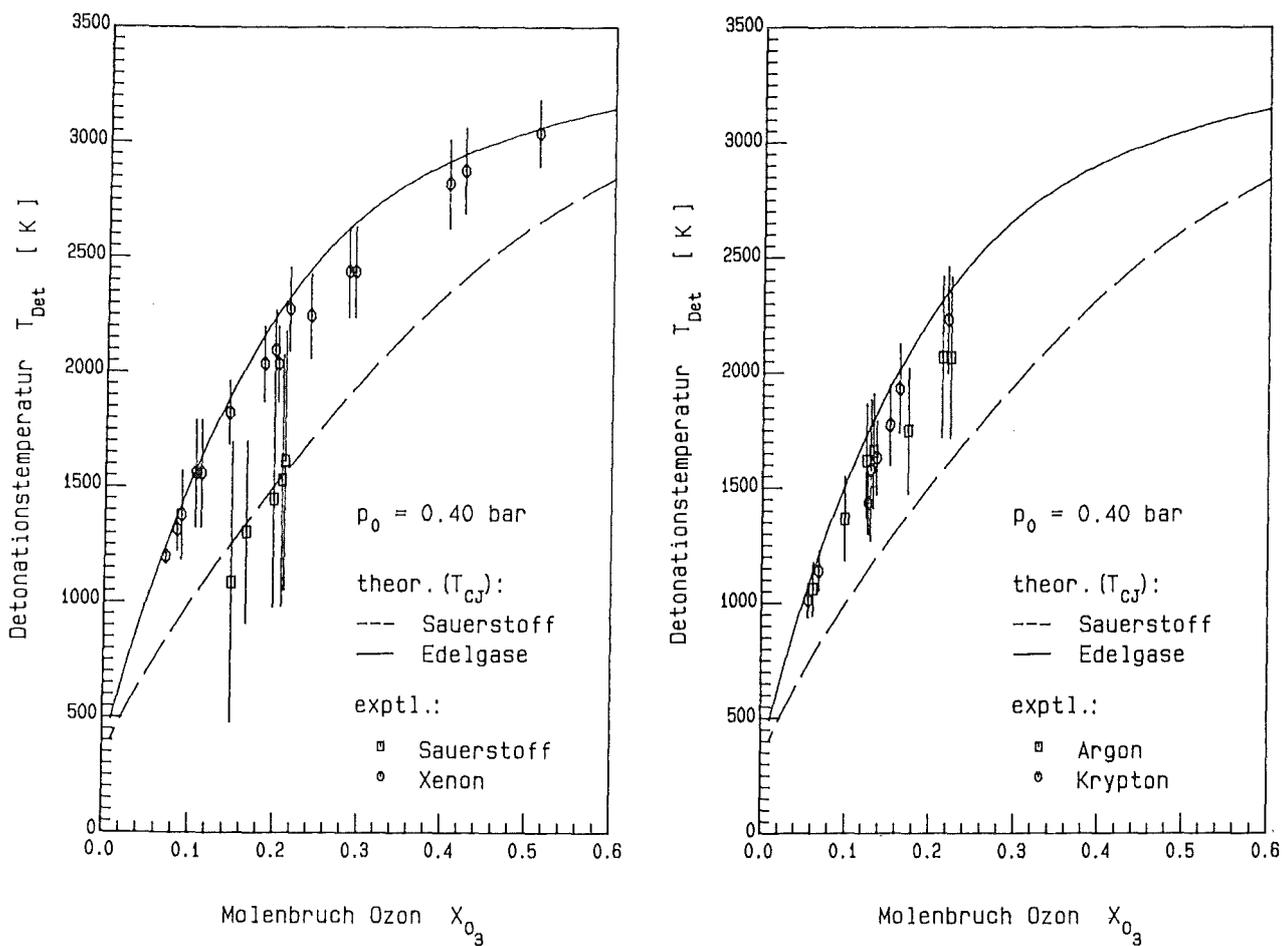
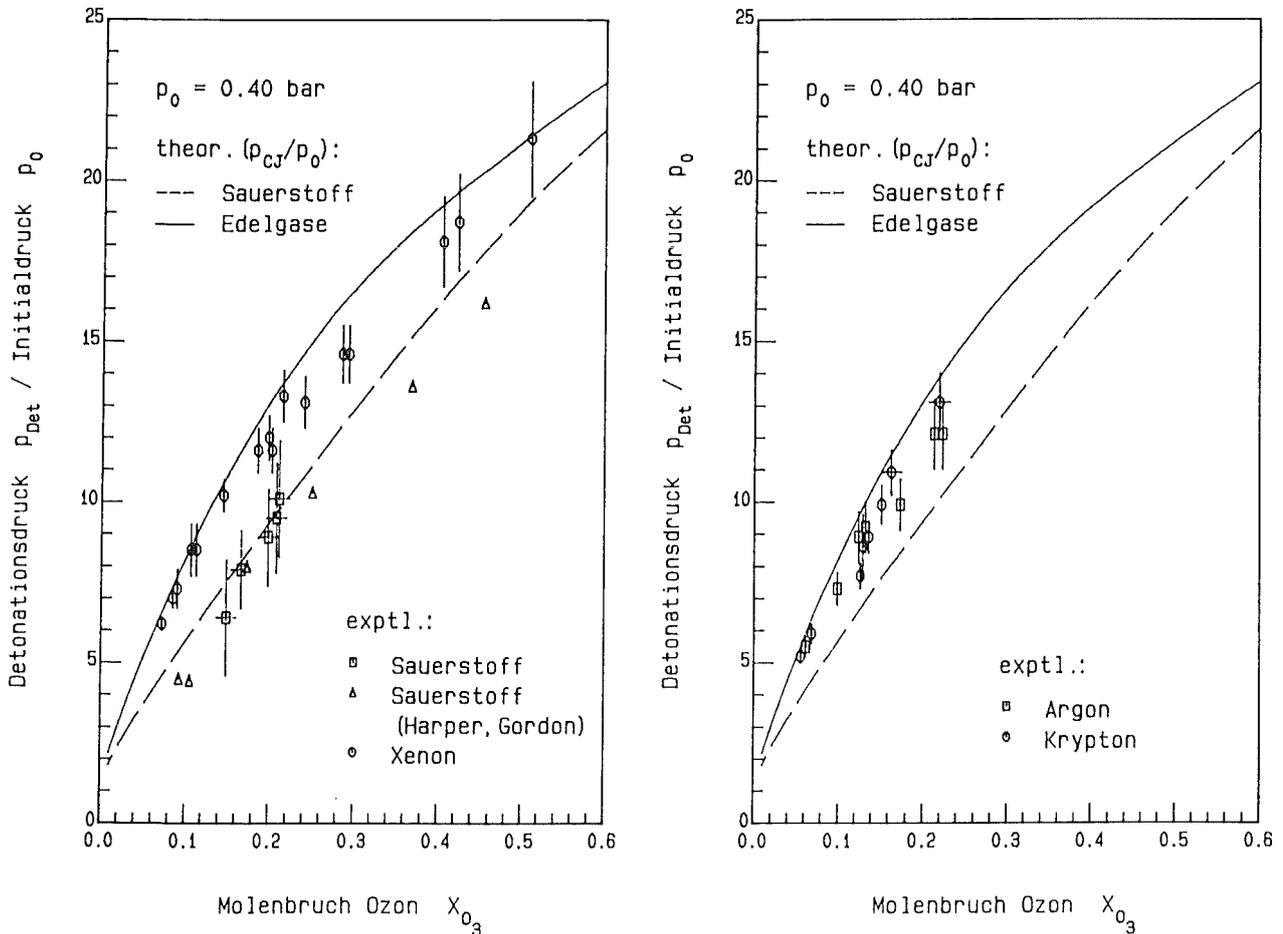


Abb.3.25 Detonationsdrücke



Der Einfluß der WAA-typischen Verunreinigungen, Kohlenmonoxid, Methan und Stickstoffdioxid, auf die Detonation eines Ozon/Edelgas-Gemisches wurde bei einem Initialdruck von 0.4 bar untersucht. Als geeignetes Trägergas wurde wegen seiner hohen Dichte Xenon gewählt: Das System Ozon/Xenon zeigt die niedrigsten Detonationsgeschwindigkeiten, daher sollten Effekte durch Verunreinigungen hier am deutlichsten zu beobachten sein. Eingesetzt wurden Kohlenmonoxid in einer Konzentration von ca. 5 Mol-%, Methan und Stickstoffdioxid in

Konzentrationen von jeweils ca. 1 Mol-% bezogen auf das Trägergas. Die Analyse der ozonhaltigen Gemische vor der Zündung ergab, daß ein Großteil des Kohlenmonoxids und ein geringer Anteil des Methans durch spontane Reaktion mit Ozon zu Kohlendioxid oxidiert worden war (Tab.3.16 und Tab.3.17).

Tab.3.16 Analyse der O₃/CO/Xe-Gemische vor der Zündung

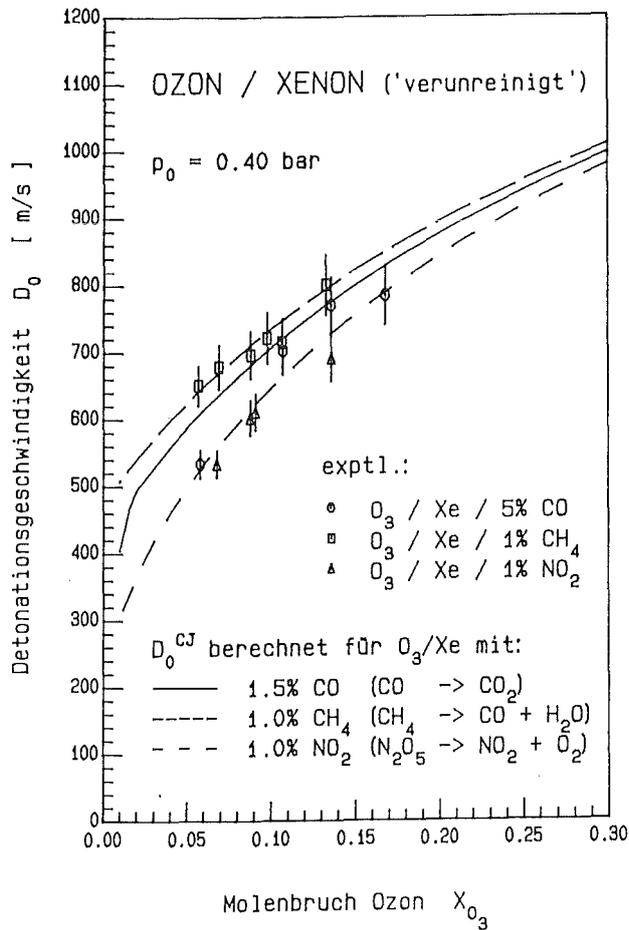
| X _{O₃} [%] | X _{CO} [%] | X _{CO₂} [%] |
|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 5.8 | 1.40 | 3.06 |
| 10.7 | 2.20 | 2.57 |
| 13.6 | 1.43 | 4.10 |
| 16.8 | 0 | 2.57 |

Tab.3.17 Analyse der O₃/CH₄/Xe-Gemische vor der Zündung

| X _{O₃} [%] | X _{CH₄} [%] | X _{CO} [%] | X _{CO₂} [%] |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| - | 0.97 | 0 | 0 |
| 5.7 | 0.98 | 0 | 0.37 |
| 6.9 | 0.89 | 0 | 0.31 |
| 8.8 | 0.82 | 0 | 0.22 |
| 9.8 | 0.82 | 0 | 0.25 |
| 10.7 | 0.81 | 0 | 0.28 |
| 13.3 | 0.76 | 0 | 0.50 |

Die Detonation dieser Gemische wurde durch die Zündung von jeweils 0.4 bar Knallgas eingeleitet. Dabei wurde für CO-haltige Gemische mit einer Ozonkonzentration oberhalb 10 Mol-% eine blaue Flamme beobachtet. Abb.3.26 zeigt die experimentell bestimmten sowie die theoretischen Detonationsgeschwindigkeiten als Funktion der Ozonkonzentration. Bei der Berechnung der Detonationsgeschwindigkeiten wurde angenommen, daß für CO-haltige Gemische ca. 2/3 der ursprünglichen CO-Menge zum Zeitpunkt der Zündung bereits zu CO₂ oxidiert war

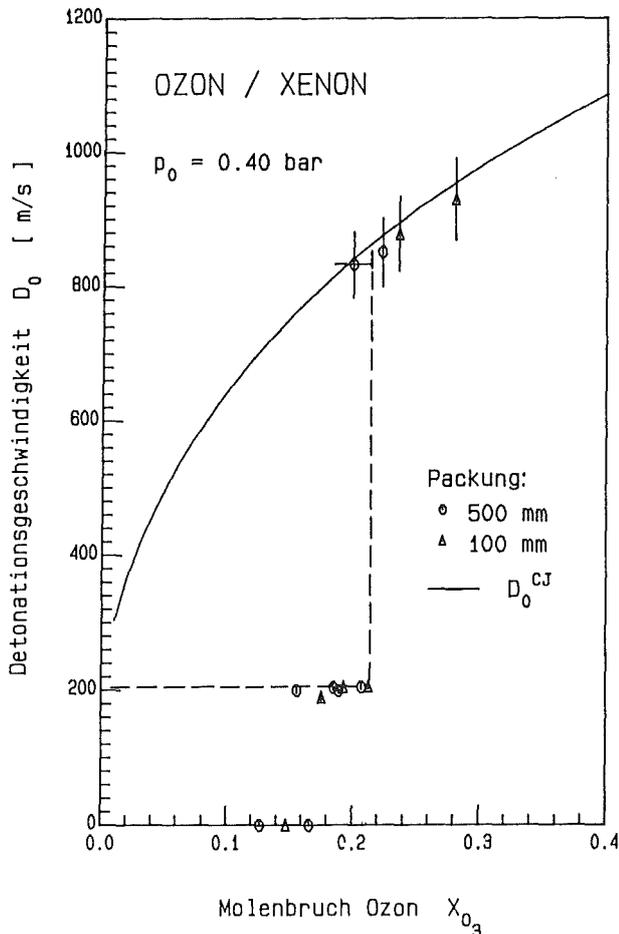
Abb.3.26 Einfluß WAA-typischer Verunreinigungen auf die Detonation eines Ozon/Xenon-Gemisches



und für CH_4 -haltige Gemische die Reaktion innerhalb der Detonationswelle nicht zu CO_2 sondern zu CO führt. Übereinstimmend mit den berechneten Werten wurde für den Zusatz von 1 Mol-% Methan ein deutlicher, für den Zusatz von real 1.5 Mol-% Kohlenmonoxid ein geringerer Anstieg der Detonationsgeschwindigkeit festgestellt. Stickstoffdioxid in einer Konzentration von 1 Mol-% beeinflusst die Detonationsgeschwindigkeit nicht.

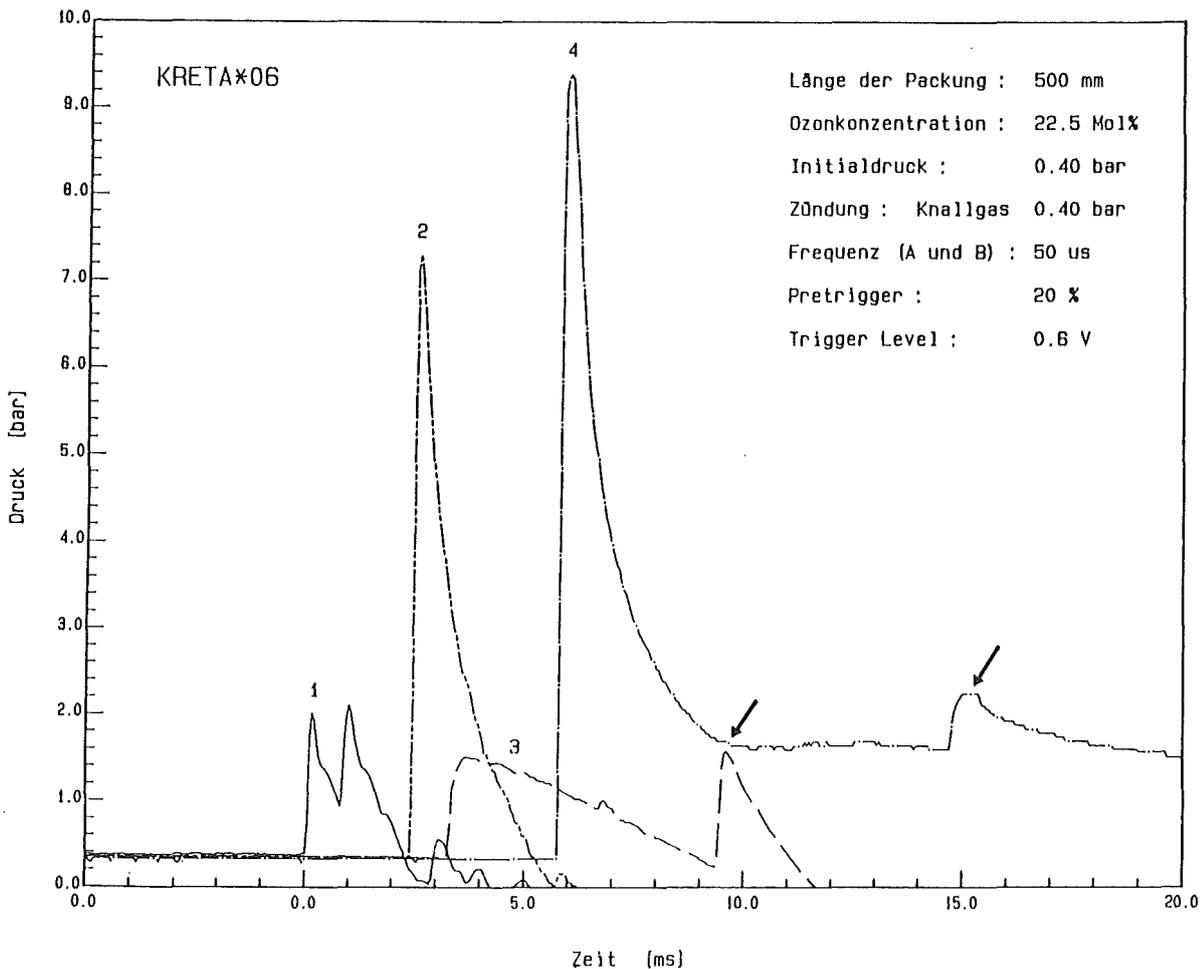
Bei Einsatz einer Füllkörperpackung wurden unabhängig von deren Länge Detonationen im Rohrabschnitt hinter der Packung erst bei Ozonkonzentrationen oberhalb von 21.1 ± 1.6 Mol-% beobachtet. Die hier gemessenen Detonationsgeschwindigkeiten entsprechen den Werten, die für Ozon/Xenon-Gemische in einem 20 mm breiten Rohr bestimmt wurden, und sind geringfügig niedriger als die CJ-Geschwindigkeiten (Abb.3.27). Für Ozondetonationen unterhalb dieser Grenze von 21.1 Mol-% wurde in fast allen Versuchen im Rohrabschnitt hinter der Packung eine vollständige Umsetzung des Ozons beobachtet, die in einer beinahe ohne Druckanstieg fortschreitenden Flamme erfolgte. Die Geschwindigkeit dieser Flammen betrug im Mittel 195 ± 7 m/s, ein Wert, der der normalen Schallgeschwindigkeit für ein Ozon/Xenon-Gemisch mit einer Ozonkonzentration von 20 Mol-% (190 m/s) entspricht.

Abb.3.27 Detonation in einer simulierten Füllkörperkolonne



In den Abbildungen 3.28 und 3.29 sind die Meßsignale für die Detonation zweier Ozon/Xenon-Gemische in der simulierten Füllkörperkolonne wiedergegeben. Form und Höhe der Signale sind durch die Anordnung der Druckaufnehmer bedingt: Ist der Aufnehmer senkrecht zur Strömungsrichtung des Mediums angeordnet, so erfaßt er nur den statischen Druck, bei paralleler Anordnung wird der Gesamtdruck, nämlich die Summe aus statischem und dynamischem Druck, erfaßt. Die Druckaufnehmer in den Meßpositionen 1, 2 und 3 waren senkrecht zur Rohrachse angeordnet, dabei befanden sich die Positionen 2 und 3 im Abstand von 5 mm vor bzw. hinter den Siebböden der Packung. Der Druckaufnehmer in Position 4 war in Richtung der Rohrachse im Zentrum des fest verschlossenen Rohrendes eingeschraubt (s.S.53, Abb.3.4). Da eine auf eine

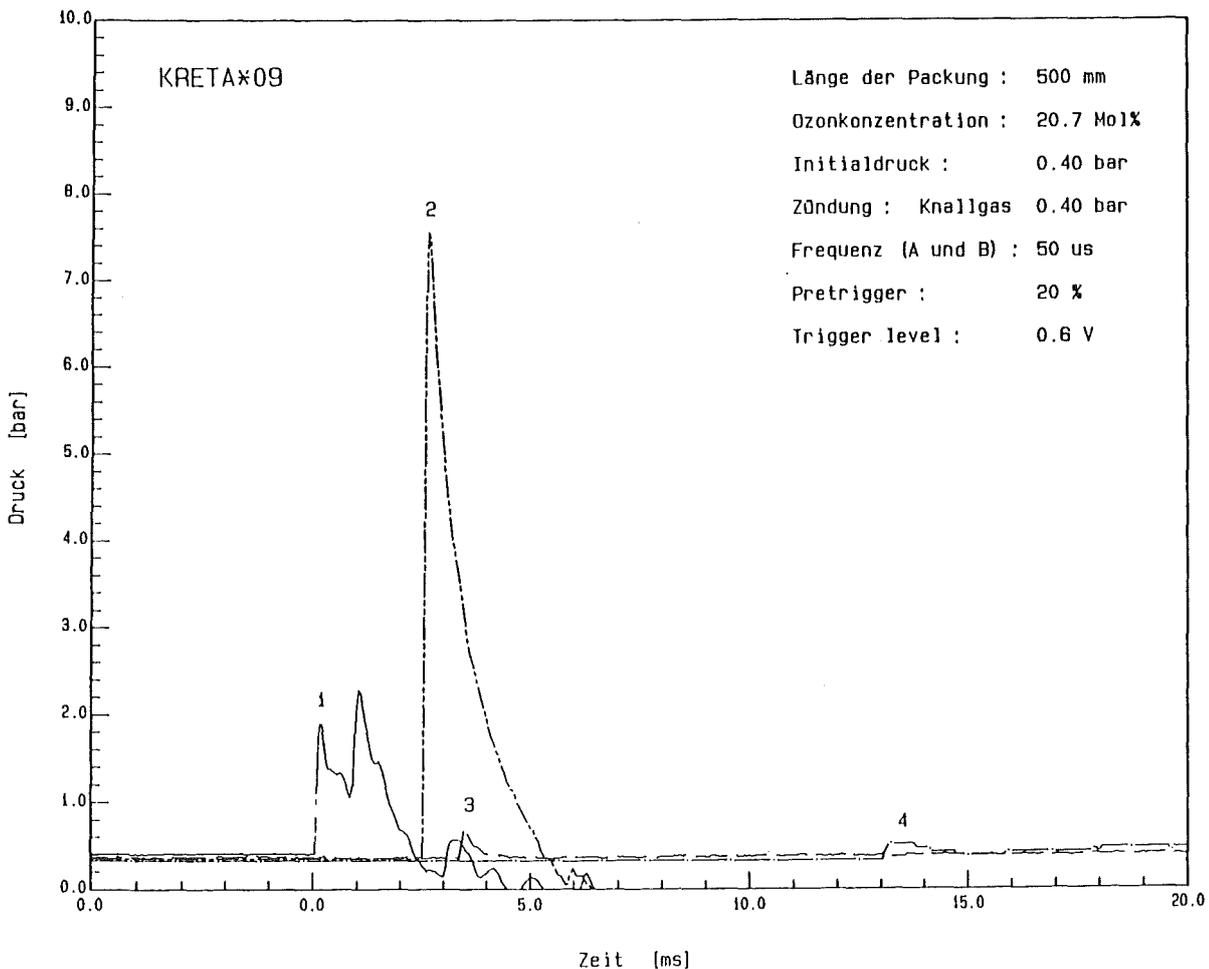
Abb.3.28 Fortschreiten einer Detonation in einer Füllkörperkolonne



Fläche auftreffende Schockwelle reflektiert wird, muß Aufnehmer 4 einen Druck anzeigen, der im Idealfall doppelt so hoch wie der Gesamtdruck sein muß. Bedingt durch die Auflösung des Meßsystems wird sich die durch das Meßsignal gegebene Fläche verdoppeln, d.h. der gemessene Maximalwert wird geringfügig niedriger sein als der zweifache Maximaldruck.

Abb. 3.28 zeigt eine Detonation, die in beiden Teilen des Rohres, sowohl vor als auch hinter der Packung erfolgt: Signal 1 zeigt entsprechend der Versuchsanordnung einen Druckanstieg zu einem relativ geringen Maximalwert. Das zweite Druckmaximum wird durch Reflexion der Druckwelle am Gaseinlaß, der sich nahe der Position 1 befindet, verursacht. Signal 4 steigt zu einem Maximalwert von 9.49 bar an, der

Abb.3.29 Fortschreiten einer Detonation in einer Füllkörperkolonne



nur geringfügig niedriger ist als der Detonationsdruck für ein entsprechendes Ozon/Xenon-Gemisch in einem 20 mm breiten Rohr (10.22 bar). Signal 2 zeigt die gleiche Form und einen vergleichbar steilen Druckanstieg wie Signal 4 zu einem allerdings etwas niedrigeren Maximalwert von 7.38 bar. Siebboden und Füllkörper wirken also einerseits wie eine feste, undurchlässige Wand und reflektieren die Schockwelle. Das in Vergleich zu Signal 4 niedrigere Druckmaximum wird durch die Anordnung des Druckaufnehmers und die teilweise Durchlässigkeit der Packung für die Druckwelle verursacht. Signal 3 weist entsprechend der Versuchsanordnung einen relativ geringen Maximaldruck auf und ist zudem durch den Weg der Druckwelle durch die Packung in seiner Amplitude geschwächt und stark verbreitert. Die mit Pfeilen markierten zweiten Maxima der Signale 3 und 4 sind auf Reflexionen der Druckwelle an der Füllkörperpackung bzw. am Rohrende zurückzuführen. Da hier das Ozon bereits vollständig zu Sauerstoff umgesetzt war, wurde keine Detonation, sondern eine Schockwelle mit abnehmender Intensität und Geschwindigkeit beobachtet. In diesem Versuch wurden im Rohrabschnitt vor der Füllkörperpackung eine mittlere Geschwindigkeit von 832 ± 35 m/s, innerhalb der Packung 589 ± 120 m/s und hinter der Packung 829 ± 59 m/s gemessen. (vgl.: Die experimentell bestimmte, normale Detonationsgeschwindigkeit für ein Gemisch von 22.2 Mol-% Ozon in Xenon in einem 20 mm breiten Rohr beträgt 831 ± 35 m/s). Der hohe Meßfehler für die Geschwindigkeiten innerhalb und hinter der Packung wird durch die starke Verbreiterung des Signals 3 verursacht.

Abb.3.29 zeigt eine Ozondetonation, die die Füllkörperpackung nicht durchdringt: Die Signale der Meßpositionen 1 und 2 sind in ihrer Form und in den erreichten Maximalwerten den entsprechenden Signalen des oben beschriebenen Versuches vergleichbar (s.Abb.3.28). Dagegen zeigen die Signale 3 und 4 eine nur sehr schwache Druckwelle mit abnehmender Intensität. Die gemessenen mittleren Geschwindigkeiten betragen hier 808 ± 33 m/s vor der Packung, 592 ± 121 m/s innerhalb und 209 ± 4 m/s hinter der Packung gegenüber einer normalen Detonationsgeschwindigkeit von 811 ± 33 m/s für das entsprechende Gasgemisch.

4. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche zur Oxonexplosion und Ozondetonation wurden mit den Aussagen der hier diskutierten Modelle der Flamme, der Explosion und der Detonation und gegebenenfalls mit Literaturwerten verglichen und interpretiert.

4.1. Ozonexplosion

Diskutiert wurden die im Experiment beobachteten deutlichen Abhängigkeiten des Explosionsdruckes und der Zündgrenze von dem Trägergas, der Geometrie der Versuchsanordnung (Kugel, Rohre verschiedenen Durchmessers und Längen), dem Initialdruck und dem Trägergas zugesetzte Verunreinigungen (CO , CH_4 , NO_2). Explosionsdruck, Explosionstemperatur und Flammengeschwindigkeiten wurden für Gemische von 15 Mol-% Ozon mit Edelgasen (Ar, Kr, Xe) in Gefäßen unterschiedlicher Geometrie bei unterschiedlichen Initialdrücken durch Iteration berechnet. Ferner wurde für einige ausgewählte Beispiele bestimmt, ob unter den gegebenen Versuchsbedingungen ein Übergang von der Explosion zur Detonation erfolgen kann oder unmöglich ist.

4.1.1. Explosionsdrücke

In allen Versuchsreihen zur Ozonexplosion wurde eine Abhängigkeit des Explosionsdruckes von der Ozonkonzentration und dem Trägergas beobachtet. Die Deutung des Einflusses dieser beiden Faktoren auf das Explosionsverhalten ist trivial: Mit der Ozonkonzentration steigt die Wärmetönung Δh für die Ozonzersetzung und somit die Explosionstemperatur; bei sonst gleichen Ausgangsbedingungen ist diese bei verschiedenen Trägergasen nach $T \approx \Delta h/c_p + T_0$ abhängig von der Wärmekapazität des Gemisches.

Die Versuche zur Ozonexplosion wurden in Gefäßen zweier völlig unterschiedlicher Geometrien durchgeführt: a) in einer Kugel mit Zündung des Gases in deren Zentrum und b) in einem Rohr, wobei die Zündung in einem Rohrende erfolgte.

Wird ein Gasgemisch im Zentrum einer Kugel gezündet, so kann die Flamme nur radial zur Gefäßwand hin fortschreiten. Ein solcher Prozeß stellt ein eindimensionales System dar. Verluste treten hier nur in geringem Maße 1) in der äußersten Gasschicht durch Wärmeübertragung auf die kalte Gefäßwand und 2) durch Wärmestrahlung des IR-aktiven Ozons im durch adiabatische Kompression erwärmten Frischgas auf (das Produkt O_2 und das intermediäre $O(^3P)$ sind nicht IR-aktiv). Das Modell von Flamm und Mache für die adiabatische Explosion eines Gases in einem geschlossenen Gefäß läßt sich daher auf die Kugelgeometrie anwenden: Es wird keine Abhängigkeit des Verhältnisses von Explosionsdruck p_{max} zu Initialdruck p_0 vom Initialdruck beobachtet. Die experimentell bestimmte Druck-Ozonkonzentration-Kurve folgt dem Verlauf der theoretischen Kurve. Die Meßwerte p_{max} sind jedoch um 20 % niedriger als die berechneten Werte p_e (Abb. 3.13f, 3.15d). Für diese Abweichung lassen sich zwei Ursachen nennen: 1) Dieses Modell der adiabatischen Explosion ist eine Näherung; d.h. die Rechnungen, die zu den Gleichungen (2.38) und (2.39) führen, enthalten einige Vereinfachungen. So werden z.B. in

einer Differenz die Wärmekapazitäten des Gases bei konstantem Volumen C_v durch die Wärmekapazitäten bei konstantem Druck C_p ersetzt, um die Integrierbarkeit der resultierenden Gleichungen zu erreichen [133]. 2) Es wird ein adiabatischer Prozeß angenommen. In Wirklichkeit geben die äußeren Gasschichten, sobald sie durch Kompression erwärmt werden, einen geringen Teil ihrer Energie durch Wärmeleitung an die kalte Gefäßwand ab. Ferner treten durch das IR-aktive Ozon Verluste durch Wärmestrahlung im komprimierten, erwärmten Frischgas auf.

Während hier auf die Wärmestrahlung nicht weiter eingegangen werden soll, sollen am Beispiel eines Ozon/Argon-Gemisches die Verluste durch Wärmeleitung durch eine einfache Näherung abgeschätzt werden: Nur die äußerste Gasschicht soll Wärme an die Gefäßwand abgeben, während Kompression und Verbrennung der inneren Schichten rein adiabatisch erfolgen. Seien ζ die Breite der äußersten Schicht, A die Kugeloberfläche, T_{\max} die maximale und T_0 die ursprüngliche Temperatur des Gases. Dann ist der Verlust innerhalb einer Zeit t gegeben durch $q_- \approx \bar{\lambda}(T-T_0)\frac{A}{\zeta}t$. Durch diesen Verlust verringert sich die Temperatur des Gases um die Differenz $\Delta T = T_{\max} - T$. Daraus folgt für den Wärmeverlust $q_- \approx \bar{c}_p \rho V (T_{\max} - T_0)$. Das Volumen der Gasschicht beträgt $V = A \times \zeta$. Somit erhält man:

$$(4.1) \quad \Delta T \approx \frac{\bar{\lambda}}{\bar{c}_p \rho \zeta^2} (T_{\max} - T_0) t.$$

$\bar{\lambda}$ bedeutet hier die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Gases zwischen den Temperaturen T_{\max} und T_0 , \bar{c}_p die mittlere, spezifische Wärmekapazität des Gases zwischen den Temperaturen T_{\max} und T . Die Normierung der Temperaturdifferenz ΔT führt zu der Größe $\Delta \tau$. $\Delta \tau$ ist definiert durch $\Delta \tau = (T_{\max} - T)/(T_{\max} - T_0)$ und ist ein anschauliches Maß für den Wärmeverlust. Man erhält:

$$(4.2) \quad \Delta \tau \approx \frac{\bar{\lambda}}{\bar{c}_p \rho \zeta^2} t.$$

Sei ξ der Anteil des verbrannten Gases an der Gesamtmenge. Für den Druck $p = p(\xi)$ gilt die Näherung $\xi \approx (p-p_0)/(p_e-p_0)$; der Enddruck p_e ist bekannt (s.Kap.2.5.1.). Es lassen sich also für jeden Wert ξ der aktuelle Druck $p(\xi)$ und mit Hilfe der Adiabategleichungen auch Volumen und Temperatur des verbrannten, sowie des unverbrannten Gases angeben. Da Temperatur T und Druck p des Frischgases somit stets bekannt sind, läßt sich für die Verbrennung des Gases innerhalb einer Zone $d\xi$ nach Warnatz [42] eine Flammgeschwindigkeit $v(\xi)$ mit den Ausgangsbedingungen $T(\xi)$ und $p(\xi)$ berechnen. Die Flammgeschwindigkeit ist zu Beginn des Prozesses ($\xi \approx 0$) gleich der in Kapitel 2.3.2. berechneten Geschwindigkeit v_0 laminarer Flammen und steigt mit zunehmenden Werten für Temperatur und Druck des Frischgases deutlich an. Die Ergebnisse für das gewählte Beispiel sind in Tab.4.1 wiedergegeben. Betrachtet wird die Explosion eines Ozon/Argon-Gemisches mit $X_{O_3} = 15$ Mol-%, $p_0 = 0.45$ bar und $T_0 = 300$ K in einer Kugel von 1 Liter Inhalt. Der Explosionsdruck für dieses Gemisch beträgt nach Flamm und Mache [133] $p_e/p_0 = 6.12$ (s.S.169, Tab.7.16). Die Umsetzung des Gases erfolge in 10 Schichten $\Delta\xi = 0.1$. Das Volumen $V(\xi)$ des verbrannten Gases ergibt sich aus $V(\xi) = \xi V_0 (p/p_0)^{-1/\gamma}$ und wird durch den Radius $r = \sqrt[3]{\frac{3}{4}V(\xi)/\pi}$ ausgedrückt. T_{af} ist die jeweilige Flammentemperatur des Gases.

Tab.4.1 Adiabatische Explosion eines Ozon/Argon-Gemisches in einer Kugel mit $X_{O_3} = 15$ Mol-%, $p_0 = 0.45$ bar, $T_0 = 300$ K und $V_0 = 1$ L

| ξ | p/p_0 | T [K] | r [cm] | v [cm/s] | T_{af} [K] |
|-------------|---------|---------|----------|------------|--------------|
| ≈ 0 | 1.00 | 300 | 0.00 | 33.7 | 1129 |
| 0.1 | 1.51 | 351 | 4.17 | 51.2 | 1173 |
| 0.2 | 2.02 | 392 | 4.87 | 68.9 | 1208 |
| 0.3 | 2.54 | 427 | 5.25 | 87.6 | 1237 |
| 0.4 | 3.05 | 458 | 5.51 | 107.2 | 1264 |
| 0.5 | 3.56 | 486 | 5.69 | 127.4 | 1287 |
| 0.6 | 4.07 | 511 | 5.84 | 148.2 | 1307 |
| 0.7 | 4.58 | 535 | 5.95 | 170.9 | 1327 |
| 0.8 | 5.10 | 557 | 6.05 | 193.9 | 1345 |
| 0.9 | 5.61 | 577 | 6.14 | 217.6 | 1361 |
| 1.0 | 6.12 | 597 | 6.20 | 244.5 | 1378 |

Die Zeit t , in der die Wärmemenge q_{L} abgegeben wird, sei gleich der Zeit t_j , in der eine Gasschicht $\Delta\xi = \xi_j - \xi_{j-1}$ verbrennt ($j = 1 \dots 10$). Diese ist gegeben durch $t_j = (r_j - r_{j-1}) / \bar{v}_j$. Da die Flammgeschwindigkeit innerhalb $\Delta\xi$ nicht konstant ist, sondern von v_{j-1} zu v_j ansteigt, wird die mittlere Geschwindigkeit $\bar{v}_j = \frac{1}{2}(v_j + v_{j-1})$ eingesetzt. Gleichung (4.2) enthält als weitere Unbekannte die Dichte ρ des Gases und die Temperatur T_{max} . Für ein ideales Gas gilt $\rho = p/RTM$, wobei M die Masse für 1 Mol des Gasgemisches angibt. $T_{\text{max},j}$ ist diejenige Temperatur, die das vom Volumen $V_j = A \times \zeta_j$ eingeschlossene Frischgas nach Verbrennung der Zone $\Delta\xi = \xi_j - \xi_{j-1}$ durch Kompression annehmen würde, wenn kein Wärmeverlust erfolgt. Für den adiabatischen Prozeß gilt $\xi = (p - p_0) / (p_e - p_0)$. Für $\Delta\xi = \xi_j - \xi_{j-1}$ folgt daher $\Delta\xi = (p_j - p_{j-1}) / (p_e - p_0)$. Da p_{j-1} bereits bekannt ist, läßt sich p_j berechnen. Einsetzen des Ergebnisses für p_j in die Adiabatengleichung ergibt den Wert $T_{\text{max},j}$. Man erhält schließlich:

$$(4.3) \quad \Delta\tau = \frac{\bar{\lambda} R M}{c_p \zeta_j^2} \frac{T_j}{p_j} \frac{r_j - r_{j-1}}{\frac{1}{2}(v_j - v_{j-1})}$$

Aus dieser Gleichung läßt sich für jedes ξ_j durch Iteration die Temperatur T_j und somit auch der Druck p_j/p_0 des Gases in der äußersten Schicht berechnen. Tab.4.2 zeigt den berechneten Druck- und Temperaturanstieg in dieser Schicht während der schrittweisen Verbrennung des Gases. Wird die äußerste Gasschicht verbrannt ($j=10$), sind an Stelle von Volumen, Temperatur, Wärmekapazität, Adiabatenkoeffizient und Wärmeleitfähigkeit des Frischgases die entsprechenden Größen des verbrannten Gases zu berücksichtigen. Die benötigten Daten wurden Tabellenwerken entnommen ($C_p(O_3, O_2)$: [91], $C_p(\text{Ar})$ und $\chi(O_2, \text{Ar})$: [92], $\lambda(O_2, \text{Ar})$: [93], $\lambda(O_3)$: [135]). Für $\chi(O_3)$ wurde der Wert 1.29 eines dreiatomigen, idealen Gases eingesetzt [134]. Die durch die Verbrennung bewirkte Expansion des Gases wird durch die Zunahme der Schichtdicke ζ für $\xi = 1$ deutlich.

Tab.4.2 Temperatur- und Druckanstieg innerhalb der äußersten Gasschicht bei der Explosion eines Ozon/Argon-Gemisches in einer Kugel mit $X_{O_3} = 15$ Mol%, $p_0 = 0.45$ bar, $T_0 = 300$ K und $V_0 = 1$ L

| ξ | ζ [cm] | $\Delta\tau_\zeta$ [%] | T_ζ [K] | p_ζ/p_0 |
|-------------|--------------|------------------------|---------------|---------------|
| ≈ 0 | 0.21 | -- | 300 | 1.00 |
| 0.1 | 0.21 | 84 | 308 | 1.07 |
| 0.2 | 0.17 | 15 | 349 | 1.49 |
| 0.3 | 0.15 | 7.1 | 384 | 1.91 |
| 0.4 | 0.13 | 4.7 | 414 | 2.34 |
| 0.5 | 0.12 | 2.9 | 442 | 2.78 |
| 0.6 | 0.11 | 2.3 | 468 | 3.22 |
| 0.7 | 0.10 | 1.7 | 491 | 3.67 |
| 0.8 | 0.09 | 1.6 | 509 | 4.02 |
| 0.9 | 0.08 | 1.5 | 533 | 4.54 |
| 1.0 | 0.20 | 2.2 | 1320 | 4.96 |

Nach diesem einfachen Modell sinkt der Explosionsdruck von dem Wert $p_e/p_0 = 6.12$ für den adiabatischen Prozeß nach Flamm und Mache [133] auf einen Wert von $p_e/p_0 = 4.96$ für einen Vorgang, der geringe Verluste durch Wärmeleitung in der Randzone des Gasvolumens erlaubt. Experimentell wurde für das hier gewählte Ozon/Argon-Gemisch ein Explosionsdruck von $p_{max}/p_0 = 4.85 \pm 0.15$ bestimmt. Das Meßergebnis stimmt innerhalb der Fehlergrenze mit dem berechneten Wert $p_e/p_0 = 4.96$ überein. D.h. die beobachtete Differenz zwischen Meßwerten und den streng nach der Theorie von Flamm und Mache [133] berechneten Drücken wird durch das Auftreten von Wärmeverlusten innerhalb der äußeren Gasschichten durch Wärmeübertragung auf die Gefäßwand erklärt.

Wird ein brennbares Gemisch in einem Rohr eingeschlossen und erfolgt die Zündung an einem Ende des Rohres, so pflanzt sich die Flamme in Richtung der Rohrachse fort. Da die Temperatur der Gefäßwand während der Verbrennung nahezu konstant bleibt (sie entspricht der Ausgangstemperatur T_0 des Systems), bildet sich ein Temperaturgradient senkrecht zur Rohrachse aus, welcher einen Wärmefluß zur Wand hin bewirkt und zu einer Krümmung der Flammenfront führt. Ein solcher Prozeß stellt ein mehrdimensionales System dar.

existiert. Daher soll der Einfluß der zylindrischen Geometrie auf die Verbrennung bzw. die Explosion ozonhaltiger Gasgemische anhand einer einfachen Näherung erklärt werden:

Das Gas sei in einem zylindrischen Gefäß des Durchmessers d und der Länge ℓ eingeschlossen. Die Flamme schreite entlang der Rohrachse (x -Richtung) mit der Geschwindigkeit $v(x)$ fort, die Flammenfront sei planar. Der Energieverlust erfolge nur durch Wärmeleitung radial zur Gefäßwand hin. Sei T_{\max} die maximale Temperatur des verbrannten Gases in Achsennähe, die ursprüngliche Temperatur T_0 gleich der Temperatur des Gases in Wandnähe, $\bar{\lambda}$ die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Gases zwischen diesen Temperaturen, dann ist der Verlust q_- innerhalb einer Zeit t gegeben durch den mittleren Temperaturgradienten $(T_{\max} - T_0)/\frac{1}{2}d$, die mittlere Wärmeleitfähigkeit und die Zylinderoberfläche A gemäß der Näherung $q_- \approx 2\bar{\lambda}(T_{\max} - T_0)At/d$. Die Temperatur des Gases nimmt durch den Wärmeverlust um den Betrag $\Delta T = T_{\max} - T$ ab. Für den Verlust q_- gilt daher $q_- \approx \bar{c}_p \rho V \Delta T$. Innerhalb der Zeit t legt die Flamme den Weg Δx zurück. Oberfläche A und Volumen V dieser Zone sind gegeben durch $A = \pi d \Delta x$ und $V = \frac{1}{4} \pi d^2 \Delta x$. Die Zeit t ist gegeben durch $t = \Delta x / v$. Somit erhält man für die Temperaturabnahme:

$$(4.4) \quad \Delta T \approx \frac{8\bar{\lambda}(T_{\max} - T_0)}{\bar{c}_p \rho d^2} \frac{\Delta x}{v}$$

Mit $\Delta\tau = (T_{\max} - T)/(T_{\max} - T_0)$ folgt:

$$(4.5) \quad \Delta\tau \approx \frac{8\bar{\lambda}}{\bar{c}_p \rho d^2} \frac{\Delta x}{v}$$

Die Temperatur des Gases sei zu Beginn des Prozesses gleich der Temperatur T_{af} der adiabatischen, eindimensionalen, laminaren Flamme. Die Verbrennung des Gases erfolge in zehn Schritten, dabei ändere sich der Anteil ξ des verbrannten Gases an der Gesamtmenge um jeweils $\Delta\xi = 0.1$. Jede dieser zehn Zonen fülle den ganzen Querschnitt $\frac{1}{4}\pi d^2$ des Rohres aus. Die Verbrennung der ersten Zone erfolge adiabatisch.

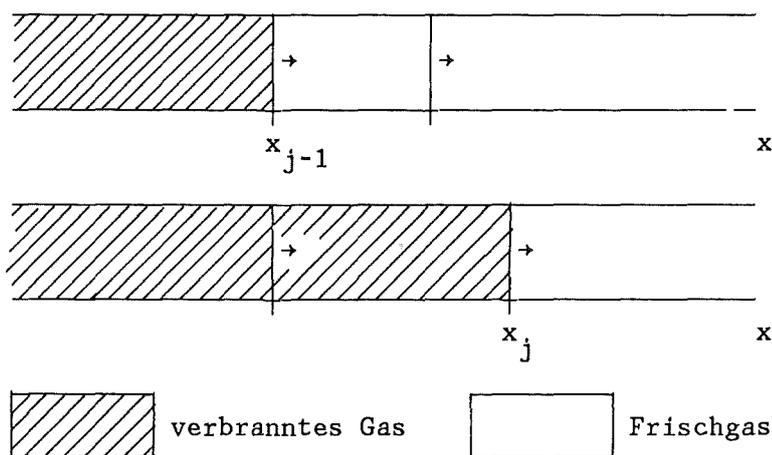
Diese Annahme ist sicher nicht korrekt, ermöglicht aber die Einbeziehung der bei dem Zünden des Gases diesem zugeführten Energie. Die hier eingesetzte Methode, das Zünden mittels elektrisch erhitztem Pt-Draht, ist ungenau: Auch nach erfolgter Zündung wird dem Gas Energie zugeführt und dieses weiter aufgeheizt. Dieser zusätzliche Energiebetrag sei gerade so groß, daß der Verlust durch Wärmeleitung vollständig ausgeglichen wird, so daß die Verbrennung der ersten Gasschicht scheinbar adiabatisch erfolgt. Diese Annahme ist nicht nur sinnvoll, sie erwies sich im weiteren Verlauf der Rechnungen als notwendig: Für einige Systeme, in denen eine Explosion des Gases beobachtet wurde, ergab die Rechnung ohne die Annahme der adiabatischen Verbrennung der ersten Zone das Erlöschen der Flamme.

Während der Verbrennung aller weiterer Zonen gibt das verbrannte, heiße Gas Energie durch Wärmeleitung an die Gefäßwand ab. Folglich ist die am Ende einer Zone erreichte Flammentemperatur T_f niedriger als die Temperatur T_{af} der entsprechenden adiabatischen Flamme. Die durch die Verbrennung zur Temperatur T_f bewirkte Kompression und Erwärmung des Frischgases erfolge jedoch adiabatisch. Diese Annahme ermöglicht es, aus der Flammentemperatur T_f die Temperatur T_u des Frischgases und schließlich mit Hilfe der Adiabaten-gleichung $p^{(1-\gamma)/\gamma} T_u = p_0^{(1-\gamma)/\gamma} T_0$ den Druck p zu berechnen:

Wie bereits für den Fall der Ozonexplosion in einer Kugel gezeigt wurde (s.S.100), lassen sich für adiabatische Explosionen mit den Modellen von Flamm und Mache [133] und Warnatz [42] der Druck $p(\xi)$, die Frischgastemperatur $T_u(\xi)$, die Flammentemperatur $T_{af}(\xi)$ und die Flammengeschwindigkeit $v_0(\xi)$ für jeden Wert ξ berechnen (s.Anhang 7.6). Trägt man die Flammentemperaturen gegen die Frischgastemperaturen auf, erhält man eine Grafik, aus der sich für jede Flammentemperatur T_f die zugehörige Frischgastemperatur T_u bestimmen läßt. Die Ermittlung der Flammengeschwindigkeiten v der nicht-adiabatischen Flammen erfolgt analog.

Bei der Berechnung des Energieverlustes nach Gleichung (4.5) ist zu berücksichtigen, daß während der Verbrennung einer Gaszone sich innerhalb dieser sowohl Temperatur, Druck und Volumen des Gases, als auch die Geschwindigkeit der Flamme ändern. Das Gesamtvolumen des Gases ist gegeben durch $V_0 = \frac{1}{4}\pi d^2 \ell$, das unkomprimierte Frischgas nimmt den Anteil $(1-\xi)V$ ein. Für das Volumen $V = \frac{1}{4}\pi d^2 x$ des auf den Druck p komprimierten Frischgases gilt nach der Adiabatengleichung $V = (1-\xi)V_0(p/p_0)^{-1/\gamma}$. Die Zeit $t = \Delta x/v$, in der die Wärmemenge q_j abgegeben wird, sei gleich der Zeit t_j (mit $j = 1..10$), in der eine Gaszone $\Delta\xi = \xi_j - \xi_{j-1}$ verbrennt.

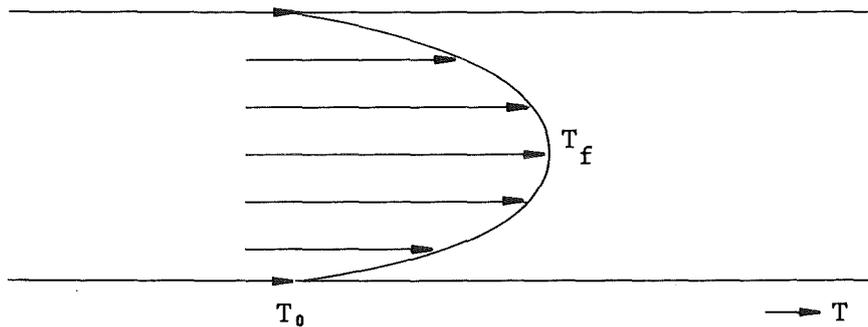
Abb.4.1 Verbrennung einer Zone j eines in einem Rohr eingeschlossenen Gases



Wie Abb.4.1 zeigt, legt die Flamme innerhalb dieser Zeit die Strecke $\Delta x = x_j - x_{j-1}$ mit $x_j = (1-\xi_j)\ell(p_j/p_0)^{-1/\gamma}$ und $x_{j-1} = (1-\xi_{j-1})\ell(p_{j-1}/p_0)^{-1/\gamma}$ zurück, wobei sich die Flammengeschwindigkeit von v_{j-1} in x_{j-1} zu v_j in x_j ändert. Die gesuchte Temperaturabnahme in der Ebene x_j ist definiert durch $\Delta T_j = T_{\max,j} - T_{f,j}$. Es ist $T_{f,j}$ die Flammentemperatur, die in x_j erreicht wird und $T_{\max,j}$ die Temperatur, die in x_j erreicht würde, wenn kein Wärmeverlust erfolgt. $T_{\max,j}$ ist leicht zu ermitteln: Für die Zone $j-1$ sind Flammentemperatur $T_{f,j-1}$, Frischgastemperatur $T_{u,j-1}$ und

Druck p_{j-1} bereits bekannt. Erfolgt die Verbrennung der j -ten Zone adiabatisch, so ändert sich der Druck gemäß $\xi \approx (p-p_0)/(P_e-p_0)$ um $\xi_j - \xi_{j-1} \approx (p_j - p_{j-1})/(P_e - p_0)$. Da in dieser Gleichung alle Größen außer p_j bekannt sind, läßt sich dieser berechnen. Einsetzen von p_j in die Adiabatengleichung liefert die Temperatur $T_{u,j}$ des Frischgases, welche durch graphische Auswertung zu $T_{\max,j}$ führt. Gleichung (4.5) enthält als weitere Unbekannte die Dichte ρ des Gases. Für ein ideales Gas gilt $\rho = p/RTM$. Nimmt man für die Temperaturverteilung einen Rotationsparaboloiden an (Abb.4.2), so ist die mittlere Temperatur des Gases in der Ebene x_j gegeben durch $\bar{T}_j = \frac{1}{2}(T_{f,j} - T_0)$. Damit ergibt sich für die Dichte $\rho_j = p_j/RT_jM$.

Abb.4.2 Temperaturprofil einer nicht-adiabatischen Flamme in einem Rohr



Die Flammgeschwindigkeit zeigt die gleiche radiale Abhängigkeit wie die Temperatur: Sie nimmt in Achsennähe den maximalen Wert v an und sinkt in Wandnähe ab auf den Wert Null, beträgt also im Mittel $v = \frac{1}{2}v$. Da sich ferner die Flammgeschwindigkeit entlang der Strecke $\Delta x_j = x_j - x_{j-1}$ ändert, folgt $\bar{v}_j = \frac{1}{4}(v_j + v_{j-1})$. Somit erhält man für $\Delta\tau_j$:

$$(4.6) \quad \Delta\tau_j = \frac{8\bar{\lambda}RM(T_{f,j} - T_0)}{\bar{c}_p d^2 p_j} \frac{x_j - x_{j-1}}{\frac{1}{2}(v_j + v_{j-1})},$$

Diese Gleichung ermöglicht die Berechnung von $T_{f,j}$ durch Iteration, wobei die Größen mit Index $j-1$ die Ergebnisse der vorausgegangenen Rechnung, die Größen mit Index j , ausgenommen $T_{max,j}$, die geschätzten Werte sind. Die Rechnungen wurden durchgeführt für Ozon/Edelgas-Gemische unter Variation

- a) des Trägergases,
- b) des Initialdruckes p_0 ,
- c) des Gefäßdurchmessers d und
- d) der Gefäßlänge l .

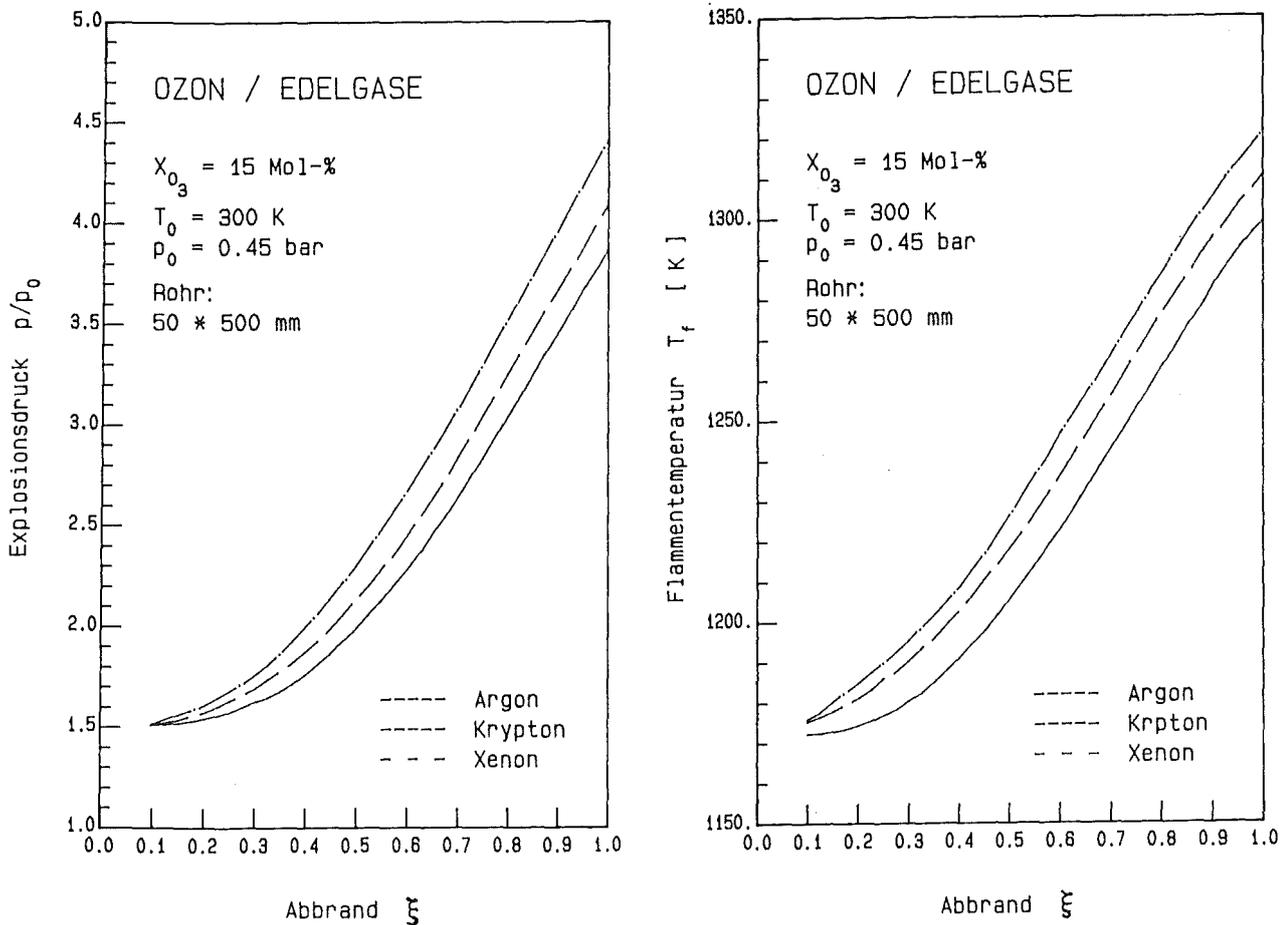
Die Ausgangsbedingungen waren:

- a) $X_{O_3} = 15$ Mol-%; Trägergase: Argon, Krypton, Xenon;
 $T_0 = 300$ K; $p_0 = 0.45$ bar; $d = 50$ mm; $l = 500$ mm;
- b) $X_{O_3} = 15$ Mol-%; Trägergas: Xenon; $T_0 = 300$ K;
 $p_0 = 0.45$ bar, 0.23 bar; $d = 50$ mm; $l = 500$ mm;
- c) $X_{O_3} = 15$ Mol-%; Trägergas: Xenon; $T_0 = 300$ K;
 $p_0 = 0.45$ bar; $d = 50$ mm, 35 mm, 20 mm; $l = 500$ mm;
- d) $X_{O_3} = 15$ Mol-%; Trägergas: Xenon; $T_0 = 300$ K;
 $p_0 = 0.45$ bar; $d = 50$ mm; $l = 500$ mm, 1000 mm.

Die Daten für Wärmeleitfähigkeiten, Wärmekapazitäten und Adiabatenkoeffizienten wurden Tabellenwerken entnommen ($\lambda(O_2, Ar, Kr, Xe)$: [93], $C_p(O_2)$ und $\gamma(O_2)$: [92]). Für die Wärmekapazitäten und Adiabatenkoeffizienten der Edelgase wurden die Werte $C_p = 5/2 \times R$ und $\gamma = 5/3$ einatomiger, idealer Gase angenommen. Die Ergebnisse sind graphisch in den Abbildungen 4.3 bis 4.6 sowie tabellarisch in Anhang 7.6 wiedergegeben.

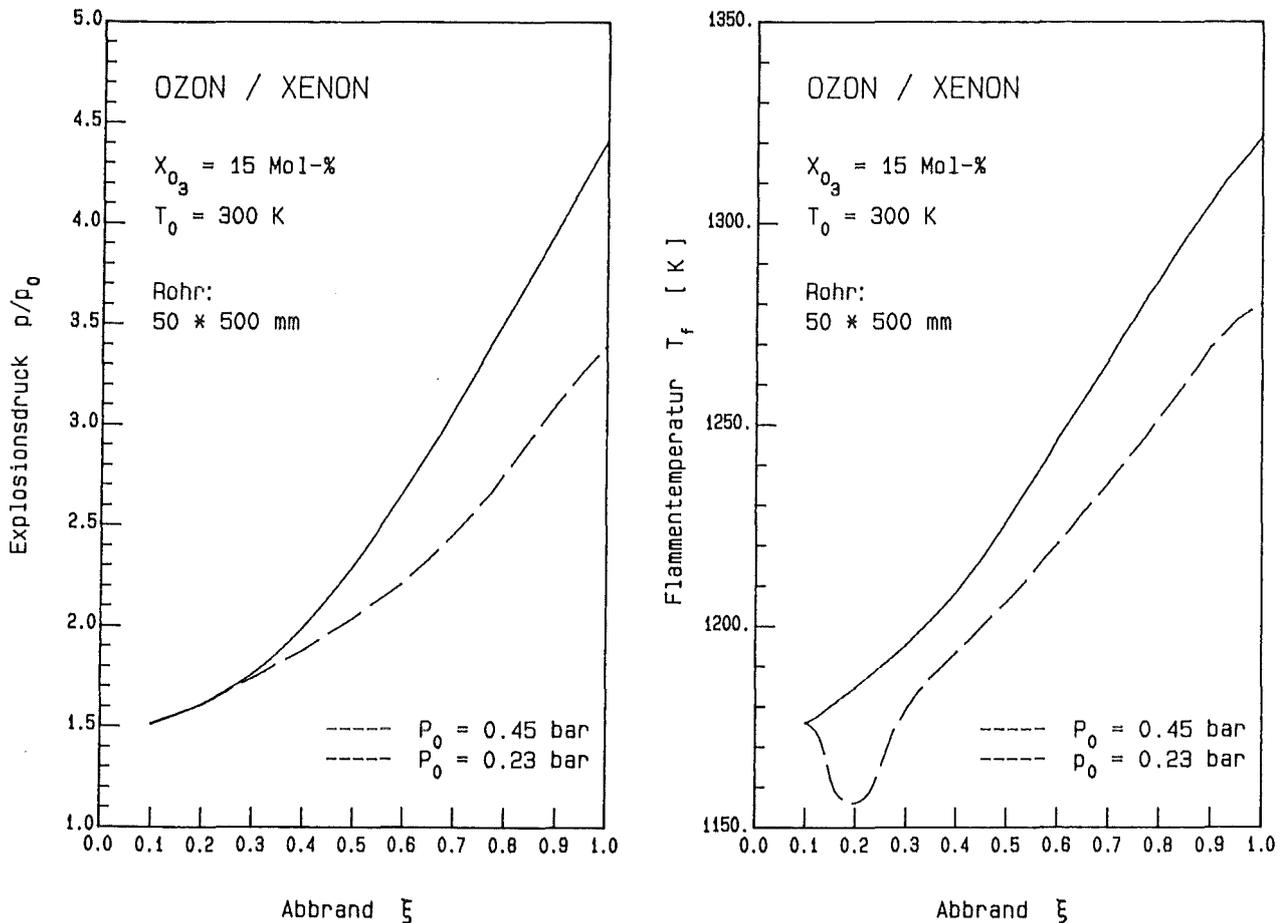
Wie im Experiment wurde eine nur geringe Abhängigkeit des Explosionsdruckes von dem als Träger eingesetzten Edelgas (außer Helium) festgestellt (Abb.4.3 und S.58, Abb.3.6). Bei gleicher Wärmekapazität und gleichen Ausgangsbedingungen T_0 , p_0 , d und l bestimmen allein Wärmeleitfähigkeit und Flammgeschwindigkeit die Temperaturabnahme ΔT und somit letztlich den Explosionsdruck $p(\xi=1)$. Der Einfluß der Wärmeleitfähigkeit, die drastisch in der Reihenfolge $Ar > Kr > Xe$ abnimmt, wird gemäß Gl.(4.5) durch die in gleicher Reihenfolge

Abb.4.3 Druck- und Temperaturanstieg in nicht-adiabatischen Explosionen von Ozon/Edelgas-Gemischen



abnehmende Flammgeschwindigkeit gemildert. Es resultiert eine nur geringe Abnahme des Explosionsdruckes $p(\xi=1)$ in der Reihenfolge $Xe > Kr > Ar$. Somit läßt sich auch ohne Kenntnis der Flammgeschwindigkeit die deutliche Verringerung des experimentell bestimmten Explosionsdruckes p_{max} bei der Verwendung von Helium als Trägergas erklären: Helium besitzt eine extrem hohe Wärmeleitfähigkeit, die etwa das 10-fache der des Argons beträgt [93]. Ferner zeigen die hier berechneten Explosionsdrücke in Übereinstimmung mit den experimentellen Beobachtungen eine deutliche Abhängigkeit von dem Initialdruck p_0 , dem

Abb.4.4 Druck- und Temperaturanstieg in nicht-adiabatischen Explosionen von Ozon/Xenon-Gemischen bei unterschiedlichen Initialdrücken



Gefäßdurchmesser d und der Gefäßlänge ℓ . Der Initialdruck p_0 bestimmt den aktuellen Druck $p(\xi)$ und somit die Dichte des Gases zu jedem Zeitpunkt $t(\xi)$. Folglich steigt der Wärmeverlust, hier ausgedrückt durch die Größe $\Delta\tau$, mit abnehmendem Initialdruck und führt schließlich zu einem Absinken des Explosionsdruckes $p(\xi=1)$ (Abb.4.4 und S.70, Abb.3.16). Der Wärmeverlust ist eine Funktion des mittleren Temperaturgradienten sowie des Verhältnisses von Gefäßoberfläche zu Gefäßvolumen und ist daher dem Quadrat des Durchmessers d umgekehrt proportional (Gl.(4.5)). Jede Änderung von d muß sich daher deutlich auf den

Abb.4.5 Druck- und Temperaturanstieg in nicht-adiabatischen Explosionen von Ozon/Xenon-Gemischen bei unterschiedlichen Gefäßdurchmessern

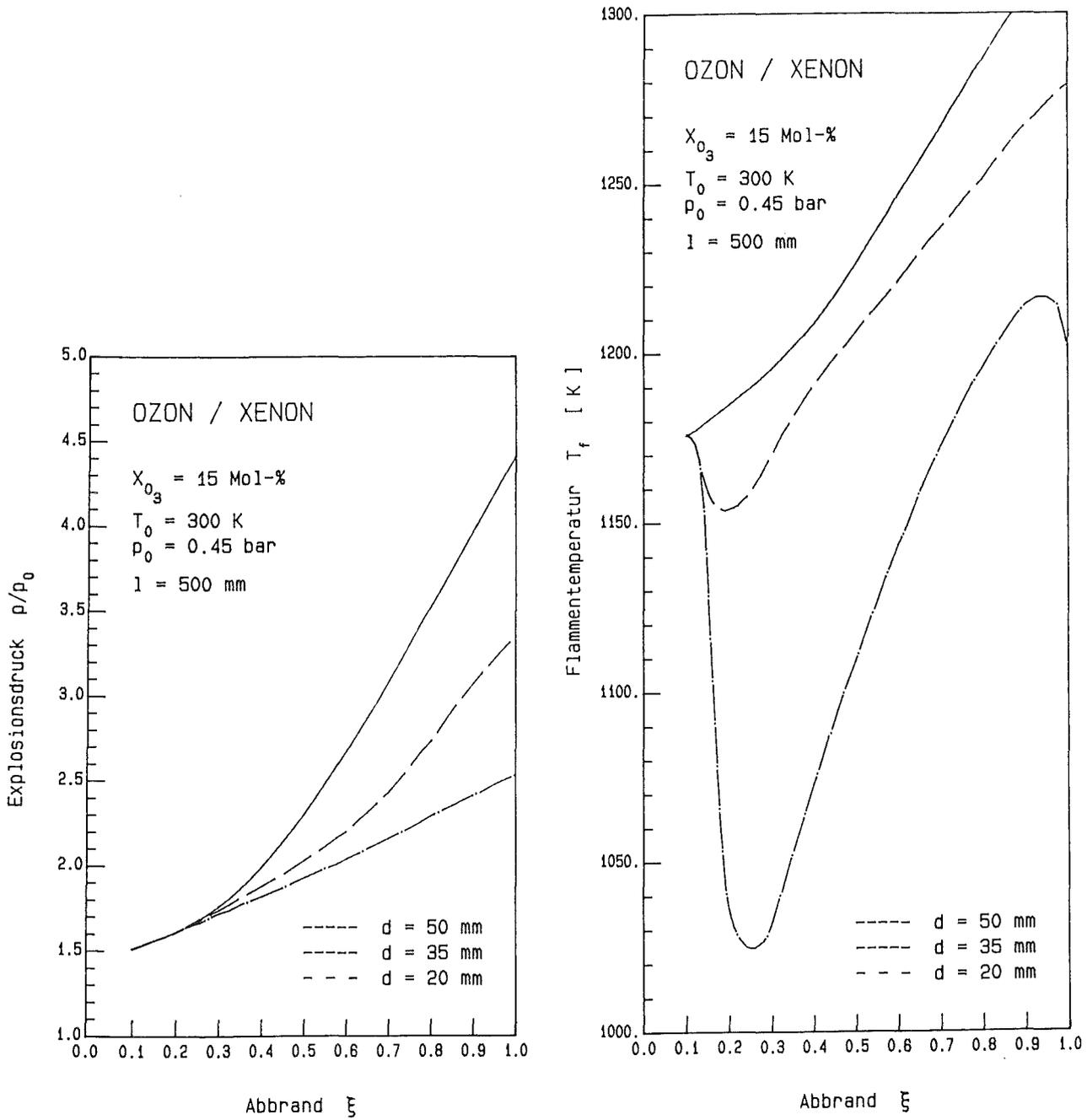
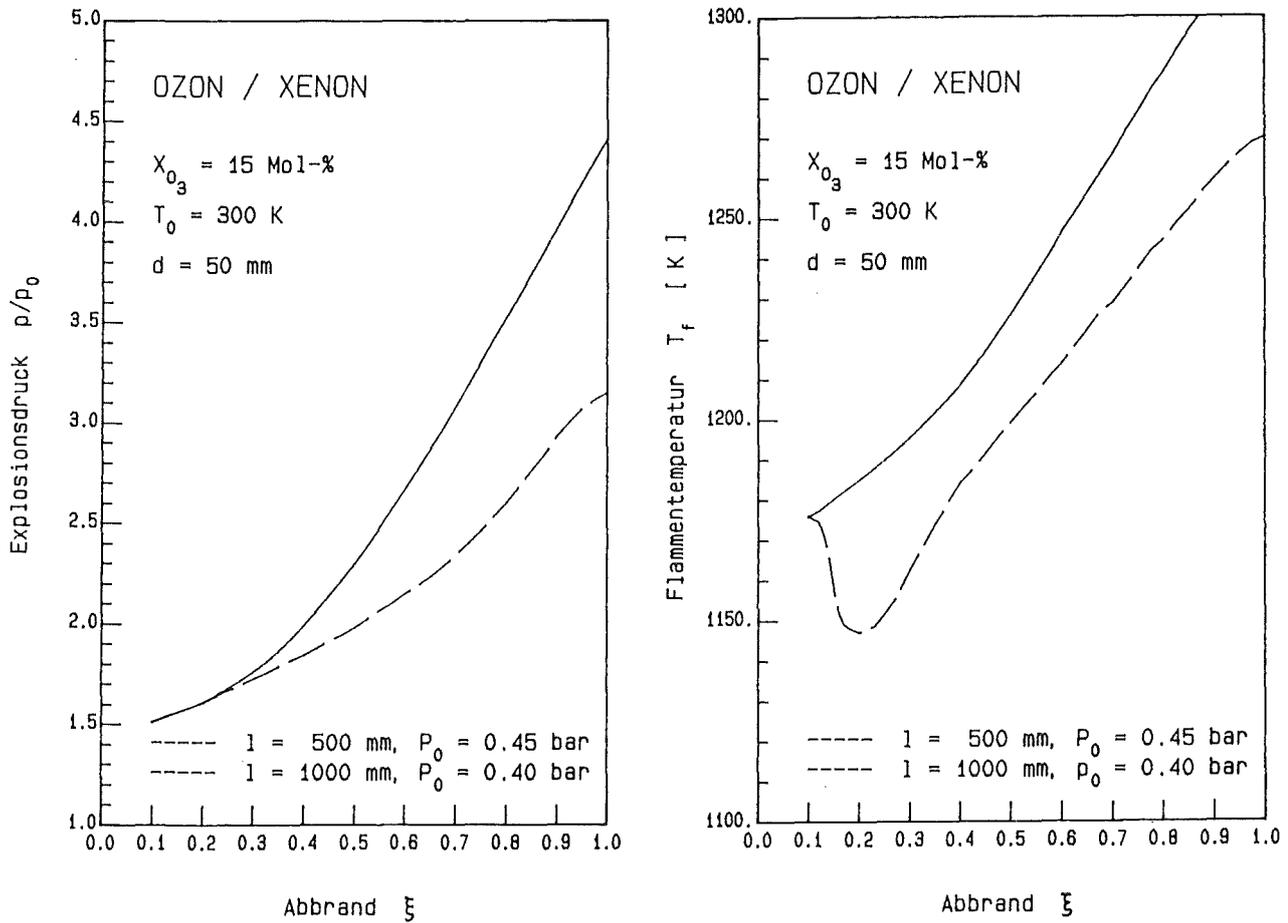


Abb.4.6 Druck- und Temperaturanstieg in nicht-adiabatischen Explosionen von Ozon/Xenon-Gemischen bei unterschiedlichen Gefäßlängen



Wärmeverlust und damit letztlich auch auf den Explosionsdruck auswirken. Folglich wurden bei Verringerung des Rohrdurchmessers eine deutliche Abnahme des Explosionsdruckes berechnet ($p(\xi=1)$) und im Experiment (p_{\max}) beobachtet (Abb.4.5 und S.64, Abb.3.12). Mit wachsender Rohrlänge l vergrößert sich die Zeit t , innerhalb der die Flamme das gesamte Rohr durchheilt, bzw. die Zeit t , innerhalb der das Gas Wärme an die Rohrwand abgibt. In der Anwendung von Gleichung (4.5) resultieren breitere Intervalle Δx . Folglich steigt der Wärmeverlust mit zunehmender Rohrlänge an, der Explosionsdruck nimmt entsprechend ab (Abb.4.6 und Anhang 7.6, Tab.7.33).

Tab.4.3 faßt die berechneten Explosionsdrücke $p(\xi=1)$ für die hier betrachteten Systeme zusammen und setzt sie in Relation zu den entsprechenden experimentellen Werten p_{\max} . Da "Explosionen" der Ozon/Edelgas-Gemische bei einem Ozonanteil von 15 Mol-% i.allg. detonationsartigen Charakter zeigen (z.B. S.60, Abb.3.9 und S.118, Tab.4.5), wurden die experimentellen Explosionsdrücke durch lineare Extrapolation der Maximaldruck vs Ozonkonzentration-Meßkurven bestimmt.

Tab.4.3 Experimentelle und theoretische Werte für die Explosionsdrücke verschiedener Ozon/Edelgas-Systeme ($X_{O_3} = 15$ Mol-%, $T_0 = 300$ K)

| Trägergas | p_0 [bar] | d [mm] | l [mm] | p_{\max}/p_0 | $p(\xi=1)/p_0$ | Δp [%] |
|-----------|-------------|----------|----------|----------------|----------------|----------------|
| Argon | 0.45 | 50 | 500 | 3.75 ± 0.1 | 3.90 | 4 |
| Krypton | 0.45 | 50 | 500 | 4.00 ± 0.1 | 4.09 | 3 |
| Xenon | 0.45 | 50 | 500 | 4.20 ± 0.1 | 4.41 | 5 |
| Xenon | 0.23 | 50 | 500 | 3.55 ± 0.1 | 3.39 | -5 |
| Xenon | 0.45 | 35 | 500 | 3.35 ± 0.1 | 3.35 | ± 0 |
| Xenon | 0.45 | 20 | 500 | 2.00 ± 0.1 | 2.53 | 27 |
| Xenon | 0.40 | 50 | 1000 | 3.00 ± 0.2 | 3.15 | 5 |

Das hier beschriebene Modell der nicht-adiabatischen Explosion ist eine einfache Näherung: Flamm und Maches Modell der adiabatischen Explosion wurde um eine Näherung für den Energieverlust durch Wärmeleitung erweitert und unter Einbeziehung der Theorie der eindimensionalen, adiabatischen, laminaren Flamme auf das Problem nicht-adiabatischer Explosionen angewandt. Dabei erfolgte die Berechnung des Explosionsdruckes durch numerische Integration über nur zehn Zeit- bzw. Raumintervalle. Dennoch sind die Abweichungen Δp der berechneten Explosionsdrücke $p(\xi=1)$ von den Meßwerten p_{\max} nur gering. Die sehr gute Übereinstimmung von theoretischen und experimentellen Ergebnissen zeigt: Für die Ozonexplosion in Rohren treten Abweichungen von der adiabatischen Explosion auf, nämlich die beobachtete Abhängigkeit des Explosionsdruckes von Trägergasen gleicher Wärmekapazität, Initial-

druck, Durchmesser und Länge des Rohres. Diese werden durch einen Wärmeverlust, der allein durch Wärmeleitung erfolgt, hinreichend erklärt.

4.1.2. Übergang von der Explosion zur Detonation

In einigen Versuchen zur Ozonexplosion, insbesondere bei Gemischen von Ozon mit Argon, Krypton und Xenon, wurden Explosionen beobachtet, die von Leuchterscheinungen (Funken, Blitze) und Geräusentwicklung begleitet waren. Für diese Ozon/Edelgas-Gemische wurde ferner ein exponentieller Anstieg des Explosionsdruckes mit der Ozonkonzentration registriert (S.58, Abb.3.6). In zwei Versuchen wurden sogar höhere als die nach Flamm und Mache berechneten Explosionsdrücke gemessen (s.S.61, Tab.3.3). Die Aufzeichnung der zeitlichen Druckänderung zeigte einen unstetigen Druckanstieg (S.60, Abb.3.9). Aus der Beobachtung einer Geräusentwicklung während der "Explosionen" folgt, daß hier die Fortschritungsgeschwindigkeit der Flammenfront die normale Schallgeschwindigkeit überschritt. Also lagen hier Detonationen vor, obwohl nie Drücke gemessen wurden, die den CJ-Werten entsprachen. Diese Diskrepanz wird jedoch durch die Trägheit des Meßsystems erklärt. Hier ist vor allem die für eine Registrierung von Detonationsdrücken zu langsame Anstiegszeit des Spitzenwertspeichers zu nennen (s. Fehlerdiskussion, S.85). Bei der Aufzeichnung der zeitlichen Druckänderung mittels eines Transientenrekorders wurde mit 2 kHz eine zu niedrige Wandlerfrequenz vorgewählt: Bei einsetzenden Detonationen tritt stets Detonationsspin auf, dessen Frequenz ν sich nach der von Fay [127] formulierten Gleichung

$$(2.31) \quad \nu = D_0^{CJ} k_n / [d\pi(\gamma+1)]$$

berechnen läßt (S.37). Für ein Ozon/Xenon-Gemisch mit einem Anteil von 18.2 Mol-% Ozon ist $D_0^{CJ} = 812$ m/s, $T_{CJ} = 2137$ K und $\gamma = 1.571$. Der Rohrdurchmesser beträgt hier $d = 5$ cm. Es ergibt sich für die Frequenz

des Detonationsspins $\nu = 3.6$ kHz, ein Wert, der etwa doppelt so hoch ist wie die vorgewählte Wandlerfrequenz. Die pro Kanal des ADC's aufgezeichneten Druckmeßwerte sind demnach über mehrere Maxima und Minima der Druckwelle gemittelt und sind folglich zu niedrig.

Für das Einsetzen einer Detonation ist es notwendig, daß die Verbrennung des Gases von der anfangs laminaren Flamme in eine turbulente Flamme übergeht. Die turbulente Flamme, die mit einer Geschwindigkeit v_t fortschreitet, erzeugt vor sich im Frischgas eine Schockwelle mit der Geschwindigkeit v_s . Erreicht das Gas in dieser Schockwelle für einen bestimmten Zeitraum, der Induktionszeit, die Zündtemperatur, so tritt Detonation ein. Nach Lee [129] läßt sich die erforderliche Geschwindigkeit der turbulenten Flamme berechnen nach:

$$(4.7) \quad v_t \approx \frac{4(\gamma-1) v_s}{(\gamma+1)^3 q},$$

wobei q gleich der spezifischen Verbrennungswärme ist und für Ozon 3 kJ/g beträgt. Die Geschwindigkeit v_s der Schockwelle läßt sich aus den Rankine-Hugoniot-Gleichungen (2.12) und (2.13) berechnen: Da in einer Schockwelle keine chemische Reaktion erfolgt, bleibt die Anzahl der Teilchen unverändert. Mit der Zustandsgleichung für ideale Gase $p v = nRT$, der Näherung für die spezifische Energie $\epsilon_s - \epsilon_o = \bar{c}_v (T_s - T_o)$ und der Definition $\mu = v_o/v_s$ lassen sich die Rankine-Hugoniot-Gleichungen umformen zu:

$$(4.8) \quad \bar{c}_v (T_s - T_o) - \frac{1}{2}(\mu-1)nR(T_s - \frac{1}{\mu}T_o) = 0$$

$$(4.9) \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\mu-1} nR(\mu T_s - T_o)}.$$

Wie innerhalb dieses Textes noch gezeigt wird, entzündet sich ein brennbares Ozongemisch, wenn es auf eine Temperatur von 750 K erhitzt wird (s.S.121). Somit ist die Temperatur T_s der Schockwelle bekannt. Die

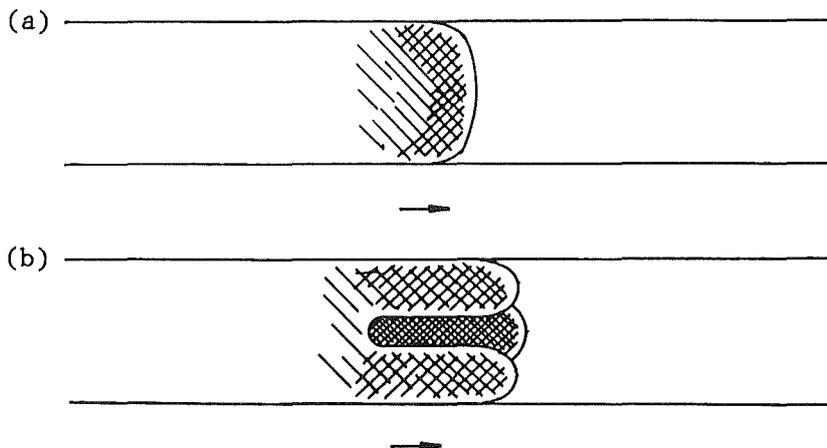
Daten für Wärmekapazitäten und Adiabatenkoeffizienten wurden Tabellenwerken entnommen ($C_p(O_3, O_2)$: [92] und $\gamma(O_2)$: [92]). Für die Wärmekapazitäten und Adiabatenkoeffizienten der Edelgase wurden die Werte $C_v = 3/2 \times R$ und $\gamma = 5/3$ einatomiger, idealer Gase angenommen. Für $\gamma(O_3)$ wurde der Wert 1.29 eines dreiatomigen, idealen Gases eingesetzt [134]. Tab.4.4 faßt die für verschiedene Ozon/Trägergas-Gemische berechneten Geschwindigkeiten der Schockwellen und der turbulenten Flammen zusammen und setzt letztere in Relation zu den entsprechenden Geschwindigkeiten v_0 der adiabatischen, laminaren Flammen.

Tab.4.4 Kritische Flammgeschwindigkeiten für das Einsetzen von Detonationen in Ozonflammen

| Trägergas | X_{O_3} [%] | v_s [m/s] | v_t [m/s] | v_0 [m/s] | v_t/v_0 |
|------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Ozon | 100 | 980 | 30 | 4.84 | 6 |
| Xenon | 15 | 465 | 4.6 | 0.21 | 22 |
| Krypton | 15 | 570 | 8.6 | 0.25 | 34 |
| Argon | 15 | 790 | 22 | 0.34 | 65 |
| Argon | 20 | 805 | 24 | 0.67 | 35 |
| Sauerstoff | 15 | 990 | 34 | 0.13 | 260 |
| Sauerstoff | 30 | 985 | 33 | 0.87 | 33 |

Abb.4.7 Schematische Darstellungen der Flammenoberflächen

(a) laminarer und (b) turbulenter Flammen in Rohren [129]



Der Übergang von einer laminaren in eine turbulente Flamme ist gleichbedeutend mit einer Änderung der Flammenstruktur: Die ursprünglich planare oder konische Flammenoberfläche wird in sich gefaltet (Abb.4.7). Die durch Faltung bewirkte Vergrößerung der Oberfläche führt zu einem deutlichen Anstieg der Brenngeschwindigkeit. Mit der Brenngeschwindigkeit erhöht sich die pro Zeiteinheit freiwerdende Energie, folglich steigen die Flammentemperatur und die Flammengeschwindigkeit deutlich an. Nach einer von Lee [129] zitierten Faustregel verzwanzigfacht sich die Flammengeschwindigkeit beim Übergang zur Turbulenz: $v_t \approx 20 \times v_0$. Die Geschwindigkeit der turbulenten Flamme bleibt dann nahezu konstant, bis eine erneute Faltung der Flammenoberfläche eintritt. Dann erhöht sich die Flammengeschwindigkeit wiederum um das 20-fache der Geschwindigkeit der laminaren Flamme. Bezeichnet man die Anzahl der Faltungen der Flammenoberfläche, also den Grad der Turbulenz, mit 'f', so erhält man in grober Näherung für die Geschwindigkeit turbulenter Flammen:

$$(4.10) \quad v_t \approx f \times 20 \times v_0$$

Aus diesen Überlegungen folgt unmittelbar: Das nach Lee [129] berechnete Verhältnis v_t/v_0 (Tab.4.4) ist ein Maß für die Neigung einer beliebigen, laminaren Ozonflamme über das Zwischenstadium der Turbulenz in eine Detonation überzugehen. Reines Ozon wird demnach sofort detonieren, sobald die Oberfläche der laminaren Flamme durch äußere Einwirkung gestört wird. Ein Ozon/Xenon-Gemisch mit einem Anteil von 15 Mol-% Ozon detoniert, sobald die anfangs laminare Flamme in Turbulenz übergeht. Für die entsprechenden Ozon/Krypton- und Ozon/Argon-Flammen reicht der Übergang zur einfachen Turbulenz nicht mehr aus, um eine Detonation einzuleiten, sondern es ist eine zwei- bzw. dreifache Faltung der Flammenoberfläche notwendig. Damit wird das Einsetzen von Detonationen zunehmend erschwert und somit unwahrscheinlich. Im entsprechenden Ozon/Sauerstoff-Gemisch ist eine Anzahl von $f = 13$ Faltungen erforderlich, um die notwendige Flammengeschwindigkeit $v_t = 260 \times v_0$ zu erreichen. Eine Detonation ist hier also unmöglich.

Erhöht man jedoch den Ozonanteil auf 20 Mol-% im Argon-Gemisch oder auf 30 Mol-% im Sauerstoff-Gemisch, so erreicht man geeignete Voraussetzungen für das Einsetzen von Detonationen.

Lee's Modell über das Einsetzen von Detonationen soll nun auf die Ozonexplosion in geschlossenen Rohren angewandt werden: Da in den hier durchgeführten Versuchen Rohre von kurzer Länge ($\ell = 50$ cm und $\ell = 100$ cm) benutzt wurden, muß der Übergang von der laminaren zur turbulenten Flamme bereits bei geringem Abbrand des Gases erfolgen, damit im verbleibendem Frischgas eine Detonation einsetzen kann. Hier wurde ein Abbrand von $\xi = 0.3$ angenommen. Bei diesem Wert zeigt die Geschwindigkeit v_ℓ der laminaren Flamme bereits eine Abhängigkeit von dem Initialdruck p_0 , dem Gefäßdurchmesser d und der Gefäßlänge ℓ (Anhang 7.6, Tab.7.50 bis 7.56), während die Geschwindigkeiten der Schockwelle und der turbulenten Flamme gemäß der Rankine-Hugoniot-Gleichungen und des Modells von Lee unabhängig von diesen Parametern sind. Wegen der kurzen Gefäßlängen kann nur ein Übergang zu der einfachen, turbulenten Flamme erfolgen. Höhere Turbulenzen mit mehrfacher Faltung der Flammenoberfläche sind hier nicht möglich. Tab.4.5 faßt die Vorhersage einer Detonation nach dem Modell von Lee und die experimentellen Beobachtun-

Tab.4.5 Kritische Flammengeschwindigkeiten für das Einsetzen von Detonationen in Ozon/Edelgas-Gemischen mit $X_{O_3} = 15$ Mol-%, $T_0 = 300$ K und $\xi = 0.3$ in Rohren

| Trägergas | p_0 [bar] | d [mm] | ℓ [mm] | v_ℓ [m/s] | v_t [m/s] | v_t/v_ℓ | Detonation | |
|-----------|-------------|----------|-------------|----------------|-------------|--------------|------------|--------------|
| | | | | | | | theor. | beob. |
| Argon | 0.45 | 50 | 500 | 0.55 | 22 | 40 | nein | nein |
| Krypton | 0.45 | 50 | 500 | 0.44 | 8.6 | 20 | ja | ja |
| Xenon | 0.45 | 50 | 500 | 0.39 | 4.6 | 12 | ja | ja |
| Xenon | 0.23 | 50 | 500 | 0.32 | 4.6 | 14 | ja | ja |
| Xenon | 0.45 | 35 | 500 | 0.32 | 4.6 | 14 | ja | kein Meßwert |
| Xenon | 0.45 | 20 | 500 | 0.14 | 4.6 | 33 | nein | nein |
| Xenon | 0.40 | 50 | 1000 | 0.29 | 4.6 | 16 | ja | nein |

gen für Ozon/Edelgas-Gemische mit einem Ozonanteil von 15 Mol-% in in unterschiedlichen Versuchsanordnungen zusammen. Die Aussagen der Theorie über das Einsetzen von Detonationen stimmen, abgesehen von einer Ausnahme, mit den experimentellen Beobachtungen überein. Für das System Ozon/Krypton mit $X_{O_3} = 15$ Mol-%, $T_0 = 300$ K, $p_0 = 0.45$ bar, $d = 50$ mm und $l = 500$ mm wird die Detonationsgrenze richtig vorhergesagt ($v_t/v_{\ell} \approx 20$). Folglich läßt sich Lee's Modell auf Flammen und Explosionen ozonhaltiger Gasgemische anwenden. Gleichzeitig wird das hier beschriebene Modell der nicht-adiabatischen Explosion erhärtet.

4.1.3. Zündgrenzen

Für alle hier untersuchten Ozon/Trägergas-Systeme wurden für die Ozonexplosion Zündgrenzen beobachtet.

Vergleicht man die hier gemessenen Werte für die Zündgrenze mit den experimentellen Ergebnissen von Schumacher [25], Cook et al. [26] und Raffel et al. [27] für das System Ozon/Sauerstoff, sowie von Yastrebov und Kobozev [35] für verschiedene Ozon/Trägergas-Systeme (Tab.4.6, Tab.4.7), so findet man: Die hier gemessenen Zündgrenzen für Ozon/Sauerstoff-Gemische entsprechen den Meßwerten von Cook et al. und Raffel et al. und sind deutlich niedriger als die Daten von Schumacher. Gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Yastrebov und Kobozev wurde für die Systeme Ozon/Sauerstoff und Ozon/Stickstoff beobachtet, während hier für Ozon/Argon ein um 12 % geringerer Wert bestimmt wurde (7.9 Mol-%). Diese Abweichungen werden durch unterschiedliche Methoden der Ozonbestimmung sowie der Zündung des Gases erklärt: Schumacher [25] sowie Yastrebov und Kobozev [35] bestimmten die Ozonkonzentration aus der Differenz zwischen Initialdruck p_0 und Enddruck p_{end} (s.S.83), gemessen mit einem Flüssigkeitsmanometer (Hg oder H_2SO_4). Diese Methode ist weit weniger genau als die hier und in der Arbeit von Raffel et al. [27] eingesetzte UV-Spektroskopie (s. Fehlerdiskussion, S.82f). Raffel

Tab.4.6 Zündgrenzen ozonhaltiger Gasgemische in einer eindimensionalen Versuchsanordnung ($T_0 = 300 \text{ K}$)

| Träger- gas | Versuchs- anordnung | p_0 [bar] | X_{gr} [Mol-%] | Autor | Bemerkung |
|----------------|------------------------|-------------|------------------|-------------------|------------------------------|
| Ar | Kugel, 124mm ϕ | 0.45 | 7.5 ± 0.2 | diese Arbeit | |
| O ₂ | Kugel, 124mm ϕ | 0.45 | 9.8 ± 0.2 | diese Arbeit | |
| O ₂ | Kugel, 99mm ϕ | 1.0133 | 9.3 ± 0.3 | Cook et al.(26) | E=0.44J |
| O ₂ | Kugel, 99mm ϕ | 1.0133 | 10.9 ± 0.6 | Cook et al.(26) | E=0.17J |
| O ₂ | Kugel, 110mm ϕ | 1.0133 | 11 | Schumacher (23) | |
| O ₂ | Zylinder | 0.35-0.7 | 10 | Raffel et al.(27) | $j_{ign} = 1 \text{ J/cm}^3$ |

Tab.4.7. Zündgrenzen ozonhaltiger Gasgemische in einer zweidimensionalen Versuchsanordnung (50 mm breites Rohr, $T_0 = 300 \text{ K}$)

| Trägergas | p_0 [bar] | X_{gr} [Mol-%] | Autor | Bemerkung |
|---------------------------------|-------------|------------------|-------------------------|----------------------------|
| O ₂ | 1.000 | 10.2 ± 0.3 | diese Arbeit | |
| O ₂ | 1.0133 | 10.4 | Yastrebov, Kobozev [35] | |
| O ₂ | 1.0133 | 11.8 | Schumacher [23] | |
| N ₂ | 0.45 | 10.8 ± 0.2 | diese Arbeit | |
| N ₂ | 1.0133 | 10.4 | Yastrebov, Kobozev [35] | |
| CCl ₂ F ₂ | 0.43 | 22.5 ± 2.5 | diese Arbeit | |
| CCl ₄ | 1.0133 | » 10.4 | Yastrebov, Kobozev [35] | |
| Ar | 0.45 | 7.9 ± 0.2 | diese Arbeit | $l(\text{Pt})=40\text{mm}$ |
| Ar | 0.45 | 8.8 ± 0.2 | diese Arbeit | $l(\text{Pt})=25\text{mm}$ |
| Ar | 1.0133 | 8.8 | Yastrebov, Kobozev [35] | |

et al. [27] zeigten am System Ozon/Sauerstoff, daß die Zündenergie, angegeben als absorbierte Energiedichte j , mit sinkender Ozonkonzentration deutlich zunimmt und im Konzentrationsbereich von 10 Mol-% Ozon unendlich steil ansteigt. Die Bestimmung der Zündgrenzen erfordert

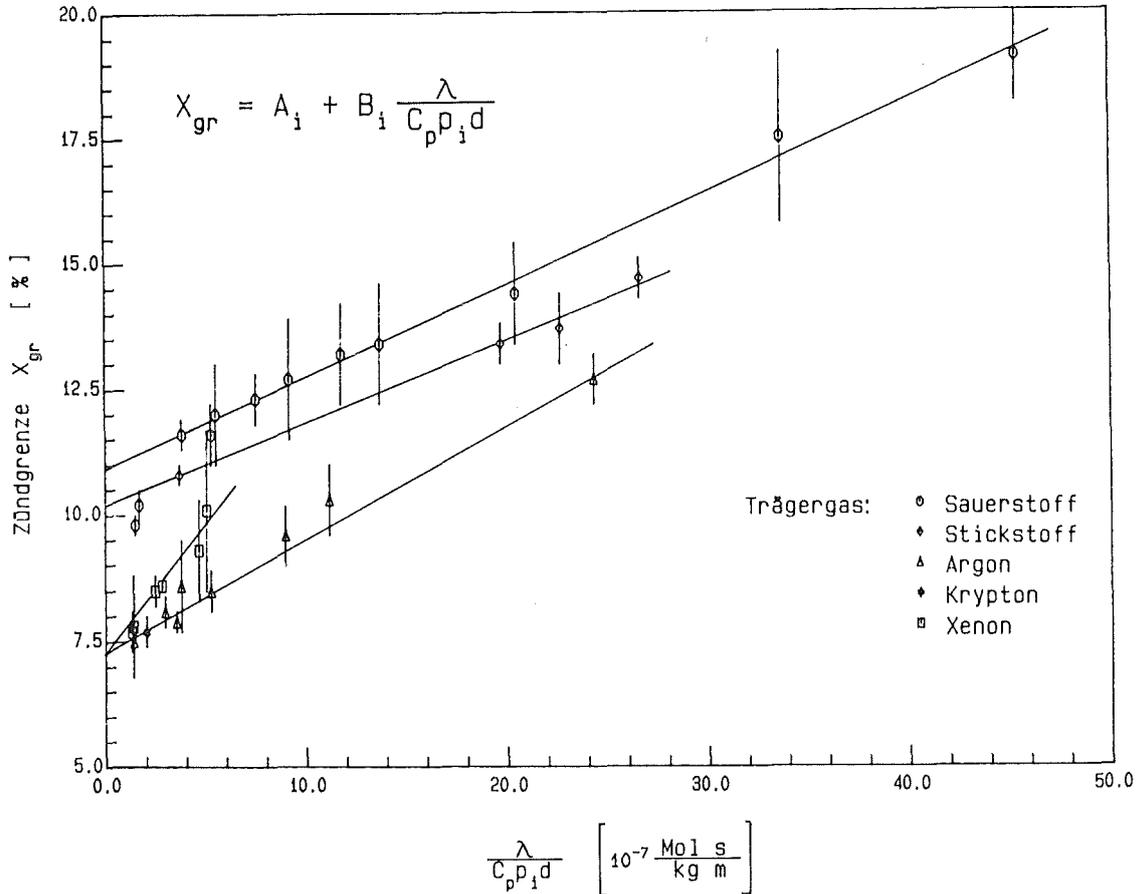
daher eine reproduzierbare Energiequelle. Die Autoren der hier zitierten Arbeiten zündeten das Gasgemisch entweder durch einen elektrisch erhitzten Pt-Draht [23], durch Funken [26,35] oder mit einem Laser [27]. Die Arbeiten von Schumacher sowie von Yastrebov und Kobozev enthalten keine Angaben über die Höhe des Energiewertes. Werden Pt-Drähte zur Zündung verwendet, so müssen neben der Konstanz von Spannung und Stromstärke auch die gleiche Länge der Drähte gegeben sein: Bei Verkürzung des Pt-Drahtes von 40 mm auf 25 mm steigt die Zündgrenze für Ozon/Argon-Gemische in einem 50 mm breiten Rohr bei einem Initialdruck von 0.45 bar von 7.9 ± 0.2 Mol-% Ozon auf 8.8 ± 0.2 Mol-% Ozon (s.S.67). In einem Rohr von 20 mm Durchmesser wurde für keines der hier untersuchten Systeme eine scharf ausgeprägte Zündgrenze, sondern ein eher kontinuierlicher Übergang zur Explosion beobachtet (Abb.3.10-3.12). Dies stimmt mit den Ergebnissen von Cook et al. [26] überein, die für Explosionen von Ozon/Sauerstoff-Gemischen in einer Kugel von 25 mm Durchmesser ebenfalls keine scharfe Grenze beobachteten.

Für Explosionen in Rohren bei einem Initialdruck $p_0 < 1$ bar wurde eine Abhängigkeit der Zündgrenze, ausgedrückt als Molenbruch X_{gr} an Ozon, von Initialdruck, Durchmesser des Rohres, sowie Wärmeleitfähigkeit und molarer Wärmekapazität des Gasgemisches der Form

$$(4.11) \quad X_{gr} = A_i + B_i \frac{\lambda}{c_p p_0 d}$$

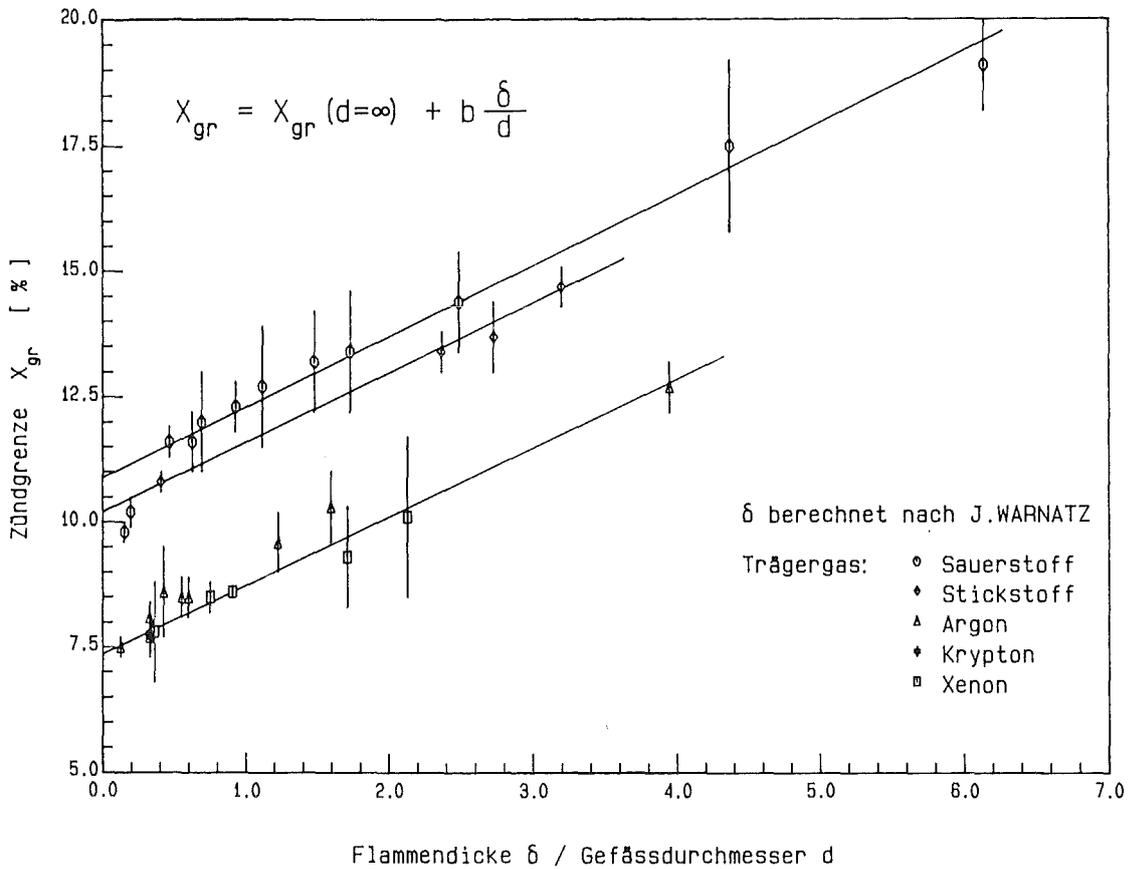
gefunden, wobei der Index i das jeweilige Ozon/Trägergas-System bezeichnet (Abb.4.8). Die Schnittpunkte A_i der Geraden mit der Ordinaten ($A_{O_2} = 10.8 \pm 0.2$, $A_{N_2} = 10.2 \pm 0.4$, $A_{Edelgas} = 7.3 \pm 0.3$) entsprechen den Zündgrenzen für adiabatische, eindimensionale Flammen, da hier kein Einfluß durch Wandeffekte vorliegt ($d = \infty$). Die Temperatur dieser Flammen beträgt für alle hier berechneten Ozon/Trägergas-Systeme $T_{af} = 750 \pm 5$ K (s.S.22, Abb.2.3) und entsprechen der Zündtemperatur für Ozon. Es wird postuliert, daß die Zündtemperatur für jede Zündgrenze gleich ist und 750 K beträgt. Folglich ist auch die Flammgeschwindig-

Abb.4.8 Zündgrenzen für die Ozonexplosion in Rohren



keit für jede Zündgrenze in einem gewählten Ozon/Trägergas-System gleich und entspricht dem Wert v_0 für $X_{O_3} = X_{gr}(d=\infty)$. Da für die Flammendicke δ nach Gl. (2.15) die einfache Näherung $\delta = \bar{\lambda} / \bar{c}_p \rho_0 v_0$ gilt, lassen die in Gl. (4.11) formulierten, experimentellen Ergebnisse darauf schließen, daß für die Zündgrenze von Ozon in Rohren die Gesetzmäßigkeit $X_{gr} = a + b \frac{\delta}{d}$ mit $a = X_{gr}(d=\infty)$ gegeben ist. Setzt man für die Flammendicke δ die nach Warnatz [42] berechneten und für nicht-adiabatische Flammen korrigierten Werte ein (da δ umgekehrt proportional der Flammengeschwindigkeit ist, wird $\delta_{adiab.}$ mit dem Quotienten aus adiabatischer und nicht-adiabatischer Flammengeschwindigkeit multipliziert. Letztere ist gleich v_0 von $X_{gr}(d=\infty)$.), so erhält

Abb.4.9 Zündgrenzen für die Ozonexplosion in Rohren



man erwartungsgemäß, wie Abb.4.9 zeigt, für die Zündgrenzen den Zusammenhang

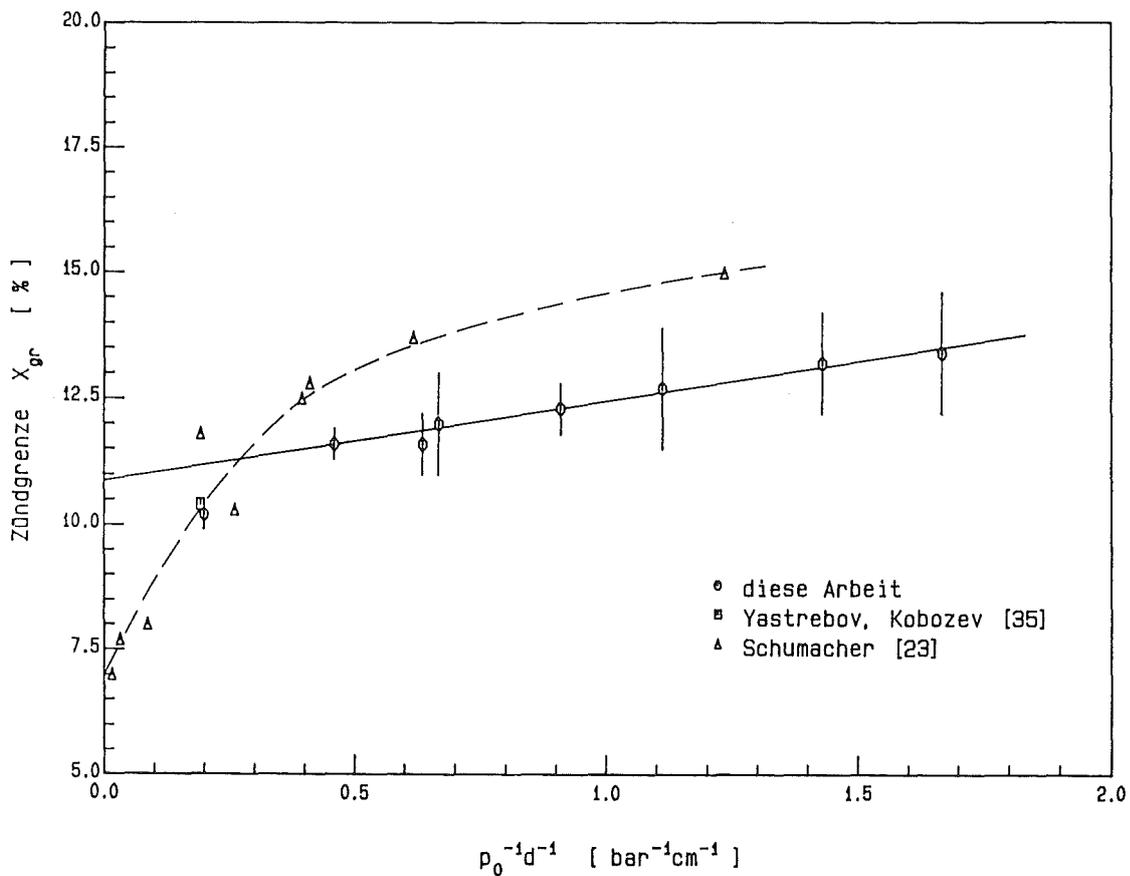
$$(4.12) \quad X_{gr} = X_{gr}(d=\infty) + b \frac{\delta}{d},$$

mit $b = (1.47 \pm 0.05) \times 10^{-2}$ Mol-% für die hier untersuchten Trägergase.

Im System Ozon/Sauerstoff wurde bei dem Druck $p_0 = 1$ bar eine geringere als die durch Gleichung (4.12) gegebene Zündgrenze beobachtet (Abb.4.10). Schumacher [25] fand bei hohen Initialdrücken (25 atm - 40 atm) ein Absinken der Zündgrenze zu auffallend geringen Ozonkonzentrationen (7 Mol-%). Für Drücke oberhalb von 1 bar ist das

Modell des idealen Gases nicht mehr streng anwendbar, da Kovolumen und Viskosität zunehmend an Bedeutung gewinnen. Damit kann das Modell der adiabatischen, laminaren Flamme, das störungsfreie, viskositätsfreie, ideale Gase annimmt (s.S.18), nicht mehr in seiner ursprünglichen Form auf die Explosion eines Gases in einem geschlossenen Gefäß angewandt werden. Da die Schichten $d\xi$ des Gases nicht mehr frei expandieren können, erfolgt auch zu Beginn des Prozesses ($\xi=0$) die Verbrennung nicht mehr bei konstantem Druck, sondern führt zu einem Druckanstieg innerhalb der Schicht $d\xi$. Daher nimmt das Gas bereits bei der Zündung eine höhere Temperatur als die der adiabatischen, laminaren Flamme an. Folglich sinkt die Zündgrenze zu niedrigeren Ozonkonzentrationen ab.

Abb.4.10 Zündgrenzen für die Ozon/Sauerstoff-Explosion in Rohren in Abhängigkeit von Initialdruck p_0 und Durchmesser d ($T_0=300$ K)



4.1.4. Einfluß WAA-typischer Verunreinigungen

Werden ozonhaltigen Gemischen geringe Konzentrationen an Kohlenmonoxid, Methan oder Stickstoffdioxid zugesetzt, so wird ein Absinken der Zündgrenze sowie ein Anstieg des Explosionsdruckes beobachtet (s.S.76-79, Abb.3.19, 3.20, 3.21).

Wie bereits in Abb.4.9 gezeigt wurde, ist die Zündgrenze umgekehrt proportional der Flammengeschwindigkeit v_0 , die durch Lösen der Differentialgleichungen für die adiabatische, eindimensionale, laminare Flamme als Eigenwert des Gleichungssystems erhalten wird (s.Kap.2.3.1.). Der in einer adiabatischen Explosion erreichte Enddruck p_e ist eine Funktion jener Temperatur T_b des verbrannten Gases, die zu Beginn des Prozesses ($\xi = 0$) erreicht wird. Dies ist die Temperatur T_{af} der adiabatischen, laminaren Flamme (s.Kap.2.5.). Sowohl Kohlenmonoxid und Methan als auch das durch Reaktion von Stickstoffdioxid mit Oxon gebildete Distickstoffpentoxid reagieren in der Flamme und bewirken eine gegenüber der reinen Ozon/Inertgas-Flamme veränderte Thermodynamik und Kinetik der chemischen Reaktionen. Folglich wird der Quellentem $(1/\rho c_p) \sum_i h_i$ der Energiegleichung (Gl.2.20, S.19) drastisch beeinflusst:

Die Verbrennung von CO zu CO₂ und die von CH₄ zu CO₂ und H₂O sind stark exotherm [131]:



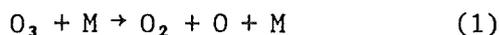
Entsprechend einer Konzentration von durchschnittlich 1.8 Mol-% Kohlenmonoxid beträgt die hier zusätzlich freigesetzte Energie ca. -5.1 kJ pro Mol Gasgemisch (vgl.: Für eine Ozonkonzentration von 10 Mol-% beträgt die Wärmetönung -14.3 kJ pro Mol Gasgemisch). Dieser zusätzliche Energiebetrag bewirkt einen Anstieg der Flammentemperatur und damit auch der Flammengeschwindigkeit. Folglich müssen die Zündgrenze auf

eine geringere Ozonkonzentration absinken und die Explosionstemperatur sowie der Explosionsdruck auf höhere Werte ansteigen. Das Gleiche gilt für den Zusatz von ca. 1 Mol-% Methan. Hier werden ca. -8.0 kJ pro Mol Gasgemisch zusätzlich freigesetzt. Darüber hinaus führt die Reaktion von Ozon mit Methan zu einer Vielzahl von Radikalen und anderen reaktiven Spezies (s.S.11; [70]), die einen rascheren Ozonabbau bewirken. Daher wird neben einem deutlichen Anstieg des Explosionsdruckes ein im Vergleich zur CO-Beimischung weit stärkeres Absinken der Zündgrenze beobachtet.

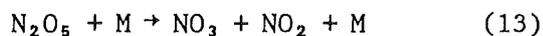
Stickstoffdioxid reagiert bereits bei Raumtemperatur spontan mit Ozon unter Bildung des in heterogener Reaktion äußerst hydrolyseempfindlichen Distickstoffpentoxids. Die in der Flamme erfolgende Umsetzung von N_2O_5 zu NO_2 ist schwach endotherm [131]:



D.h. hier wird die Wärmetönung der Gesamtreaktion entsprechend einer N_2O_5 -Konzentration von max. 0.5 Mol-% um max. 0.3 kJ pro Mol Gasgemisch verringert. Im Gegensatz zu den Systemen Ozon/Inertgas, Ozon/Inertgas/Kohlenmonoxid und Oxon/Inertgas/Methan ist hier nicht die Zersetzung des Ozons



sondern die Disproportionierung des Distickstoffpentoxids



geschwindigkeitsbestimmend (s.Kap.2.1.2). Für eine Temperatur von 750 K betragen die Reaktionsgeschwindigkeiten $k_1 = 7.6 \times 10^7 \text{ cm}^3 \text{ Mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [42] und $k_{13} = 7.8 \times 10^{11} \text{ cm}^3 \text{ Mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [143]. Sowohl N_2O_5 als auch die hier entstehenden Stickstoffoxide sind äußerst reaktiv und bewirken einen raschen Ozonabbau. Hier beeinflusst allein die Kinetik den Quellenterm

der Energiegleichung und bewirkt so einen Anstieg der Flammentemperatur und der Flammgeschwindigkeit. Daher wird bei Stickstoffdioxidzusatz ein, wenn auch geringer, Anstieg des Explosionsdruckes sowie ein drastischer Effekt auf die Zündgrenze beobachtet: Die Zündgrenze wird nicht nur zu geringeren Ozonkonzentrationen verschoben, sie ist zudem nicht mehr scharf definiert. Dies erklärt auch die Neigung von Ozon/Inertgas/Stickstoffdioxid-Gemischen zu spontanen Explosionen. Daß hier sowohl das Verschwinden einer scharf ausgeprägten Zündgrenze als auch Spontanexplosionen im Reaktionsgefäß beobachtet wurden, ist ein Indiz dafür, daß die bei der IR-spektroskopischen Untersuchung des Gasgemisches festgestellte Hydrolyse des N_2O_5 zu Salpetersäure nicht im Mischungsgefäß während der Herstellung des Gemisches oder im Reaktionsgefäß sondern erst nach der Probenahme in der Meßzelle erfolgte.

4.2. Ozondetonation

Die in binären Gemischen sowie in Gemischen mit zusätzlichen, geringen Anteilen an Wasser, Kohlenmonoxid, Methan oder Stickstoffdioxid bestimmten Detonationsgeschwindigkeiten wurden mit den entsprechenden Werten der Chapman-Jouguet-Detonation verglichen. Ferner wurden ein möglicher Einfluß des zur Zündung eingesetzten Knallgases auf die Ozondetonation und die Auswirkung von Füllkörperpackungen auf das Fortschreiten von Detonationen diskutiert.

4.2.1. Detonationsgeschwindigkeit

Für die Detonation von gasförmigem Ozon in Gemischen mit Sauerstoff, Argon, Krypton oder Xenon wurden Detonationsgeschwindigkeiten experimentell bestimmt, die gut mit den entsprechenden Chapman-Jouguet-Geschwindigkeiten D_0^{CJ} übereinstimmen, obgleich sie stets geringfügig niedriger sind als diese (s.S.88, Abb.3.23). Die CJ-Theorie beschreibt eine streng planare Detonationswelle, die nur in einem unendlich breiten Rohr realisiert werden kann, denn in jedem endlich breiten Rohr führt die Wechselwirkung des Gases mit der Rohrwand zu einer Krümmung der Wellenfront in Wandnähe und somit zur Verringerung der Detonationsgeschwindigkeit (s.Kap.2.4.3.). Daher werden für das hier eingesetzte Rohr mit einem Durchmesser von 20 mm geringere als die nach der CJ-Theorie berechneten Werte erwartet und beobachtet. Die Abweichung $\Delta D_0/D_0^{CJ}$ der experimentellen von der CJ-Geschwindigkeit beträgt -1.5 bis -6.5 % und entspricht den von Getzinger et al.[34] bestimmten Werten für Ozon/Sauerstoff-Gemische mit hohen Ozonkonzentrationen (Tab.4.8).

Tab.4.8 Abweichung der experimentell bestimmten Detonationsgeschwindigkeit von der CJ-Geschwindigkeit

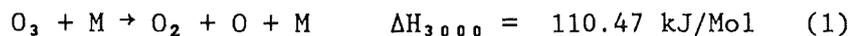
| Trägergas | X_{O_3} [%] | D_0 [m/s] | D_0^{CJ} [m/s] | $\Delta D_0/D_0^{CJ}$ | Autor |
|------------|---------------|-------------|------------------|-----------------------|----------------------|
| Argon | 13.2 | 1177 ± 98 | 1229 | -4.2 % | diese Arbeit |
| | 21.3 | 1333 ± 126 | 1423 | -6.3 % | diese Arbeit |
| Krypton | 21.9 | 1026 ± 74 | 1063 | -3.5 % | diese Arbeit |
| Xenon | 40.4 | 1040 ± 78 | 1090 | -4.6 % | diese Arbeit |
| | 51.0 | 1177 ± 98 | 1195 | -1.5 % | diese Arbeit |
| Sauerstoff | 80 | 1747 | 1793 | -2.6 % | Getzinger et al.[34] |
| | 85 | 1766 | 1812 | -2.5 % | Getzinger et al.[34] |
| | 90 | 1785 | 1831 | -2.5 % | Getzinger et al.[34] |
| | 95 | 1804 | 1841 | -2.4 % | Getzinger et al.[34] |

4.2.2. Einfluß von Knallgas und WAA-typischen Verunreinigungen

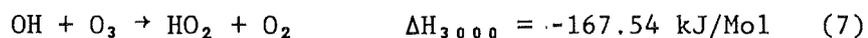
In den Versuchen zur Ozondetonation wurden Temperaturen bis zu 3000 K erreicht (s.S.89, Abb.3.24). Dies sind Temperaturen, die eine Reaktion von intermediärem $O(^3P)$ mit in der Apparatur vorhandenen Spuren von Wasser erlauben (s.S.9). Durch die Zündung mit Knallgas werden neben beträchtlichen Mengen Wasser intermediär OH-Radikale gebildet. Treten diese Produkte in das Ozon/Trägergas-Gemisch ein, so ist ein Abbau des Ozons durch Kettenreaktion mit OH und HO_2 als Kettenträger wahrscheinlich.

Es wurde gezeigt, daß die Versuchsergebnisse sehr gut mit dem Modell von Chapman und Jouguet beschrieben werden können. Dieses Modell berücksichtigt nur thermodynamische Daten, jedoch keine kinetische Prozesse. Der genaue Reaktionsmechanismus der Ozonzersetzung ist daher für das Ergebnis (Temperatur und Detonationsgeschwindigkeit) ohne Bedeutung, sofern die Energiebilanz der Gesamtreaktion unverändert bleibt. Für beide Reaktionsmechanismen,

a) die durch OH-Radikale unbeeinflusste Ozonzersetzung



b) sowie den Ozonabbau durch Kettenreaktion



gilt für die Gesamtreaktion



Temperatur und Geschwindigkeit der Detonation sind demnach unabhängig von OH-Radikalen.

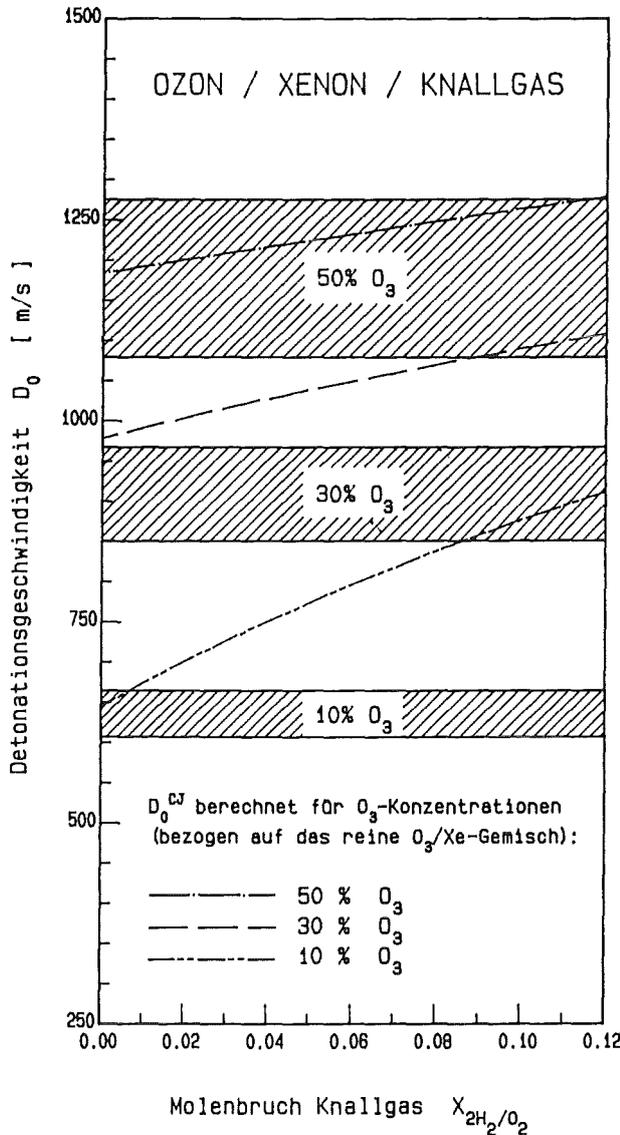
Nach der ZND-Theorie wird eine Detonation durch Kompression der Gase in einer Schockwelle eingeleitet. Die Breite der Schockwelle beträgt ca. 0.1 μm . Anschließend erfolgt in der Reaktionszone, deren Länge einige mm betragen kann, die chemische Umsetzung der Gase, die schließlich durch die CJ-Ebene in die nicht-stationären Schwaden übertreten (s.2.4.2.). Nach einem Modell von Tsugé läßt sich der Einfluß der Rohrwand, der zur Krümmung der Schockfront und innerhalb der Reaktionszone zur Ausbildung einer Grenzschicht entlang der Wand führt, berechnen (s.2.4.3.). In beiden Modellen wird die Strömung der Gase als laminar vorausgesetzt. Also kann keine Vermischung von verbrannten und unverbrannten Gasen erfolgen. Zieht man jedoch Turbulenz (z.B durch die Membran, Unebenheit der Gefäßwand, Verbindungsstücke) und damit eine solche Vermischung der Gase, hier speziell von Knallgas und Ozon, in Erwägung, so ist die Reaktion



bei der Berechnung von Detonationstemperatur und -geschwindigkeit mit zu berücksichtigen.

Abb.4.11 zeigt die nach der CJ-Theorie berechneten Detonationsgeschwindigkeiten für verschiedene Ozon/Xenon-Gemische bei steigendem Knallgasgehalt. Die maximale Knallgaskonzentration von $X_{\text{H}_2/\text{O}_2} = 0.12$ entspricht dabei dem homogenen Gemisch der gesamten zum Zünden des Ozons eingesetzten Knallgasmenge mit dem Ozon/Xenon-Gemisch und ist unter den gewählten Versuchsbedingungen nicht realisierbar. Ferner sind die experimentell bestimmten Detonationsgeschwindigkeiten in Abb.4.11 als schraffierte Zonen, deren Breite der jeweiligen Meßgenauigkeit entspricht, eingezeichnet. Die Berechnungen der Detonationsgeschwindigkeiten zeigen, daß die Detonation von Gemischen geringer Ozonkonzentration ($X_{\text{O}_3} = 0.1$) durch Vermischung mit Knallgas

Abb.4.11 Einfluß von Knallgas auf die Detonation von Ozon/Xenon-Gemischen



drastisch, die Detonation von Gemische mit hoher Ozonkonzentration ($X_{O_3} = 0.5$) dagegen nur schwach beeinflusst werden kann. Der Vergleich der experimentellen Daten für Ozon/Xenon-Detonationen mit den berechneten Kurven zeigt, daß für Gemische mit Ozonkonzentrationen $X_{O_3} \leq 0.3$ keine signifikante Vermischung von Knallgas und Oxon/Xenon auftritt. Für höhere Konzentrationen wird eine solche Vermischung,

würde sie eintreten, die Detonationsgeschwindigkeit nur innerhalb der experimentellen Fehler beeinflussen. Dieses Ergebnis stimmt überein mit den hier diskutierten Modellen, nach denen sich das Gas auch unmittelbar vor der Schockfront in Ruhe befindet und sich die Zustandsgrößen des Gases erst in der Schockwelle (unstetig) ändern, wobei die Bewegung des verdichteten Gases durch die Gleichungen für die laminare Strömung beschrieben wird.

Durch Zusatz von Kohlenmonoxid zu einem Ozon/Xenon-Gemisch wird dessen Detonationsgeschwindigkeit entsprechend der Wärmetönung der Reaktion



erhöht. Vor dem Einleiten der Detonation verringerte sich bereits die CO-Konzentration von 5 Mol-% auf im Mittel 1.4 ± 1.0 Mol-% (s.S.91, Tab.3.17). Daher beträgt die zu berücksichtigende, zusätzliche Energie -4.2 kJ pro Mol der gesamten Gasmenge (vgl.: für eine Ozonkonzentration von 10 Mol-% beträgt die Wärmetönung -14.3 kJ pro Mol Gasgemisch). Wie die Abb.4.12 verdeutlichen, stimmen mit Ausnahme eines Versuches, in dem eine geringere Detonationsgeschwindigkeit registriert wurde, die Meßwerteinnerhalb der Fehlergrenze mit der für eine CO-Konzentration von 1.5 Mol-% berechneten D_0 vs X_{O_3} -Kurve überein: In diesem Versuch wurde eine Ozonkonzentration von 5.4 Mol-%, also ein Wert unterhalb der Zündgrenze (s.S.76, Abb.3.19), bestimmt.

Zusatz von Methan zu einem Ozon/Xenon-Gemisch erhöht dessen Detonationsgeschwindigkeit entsprechend der Wärmetönung der Reaktion



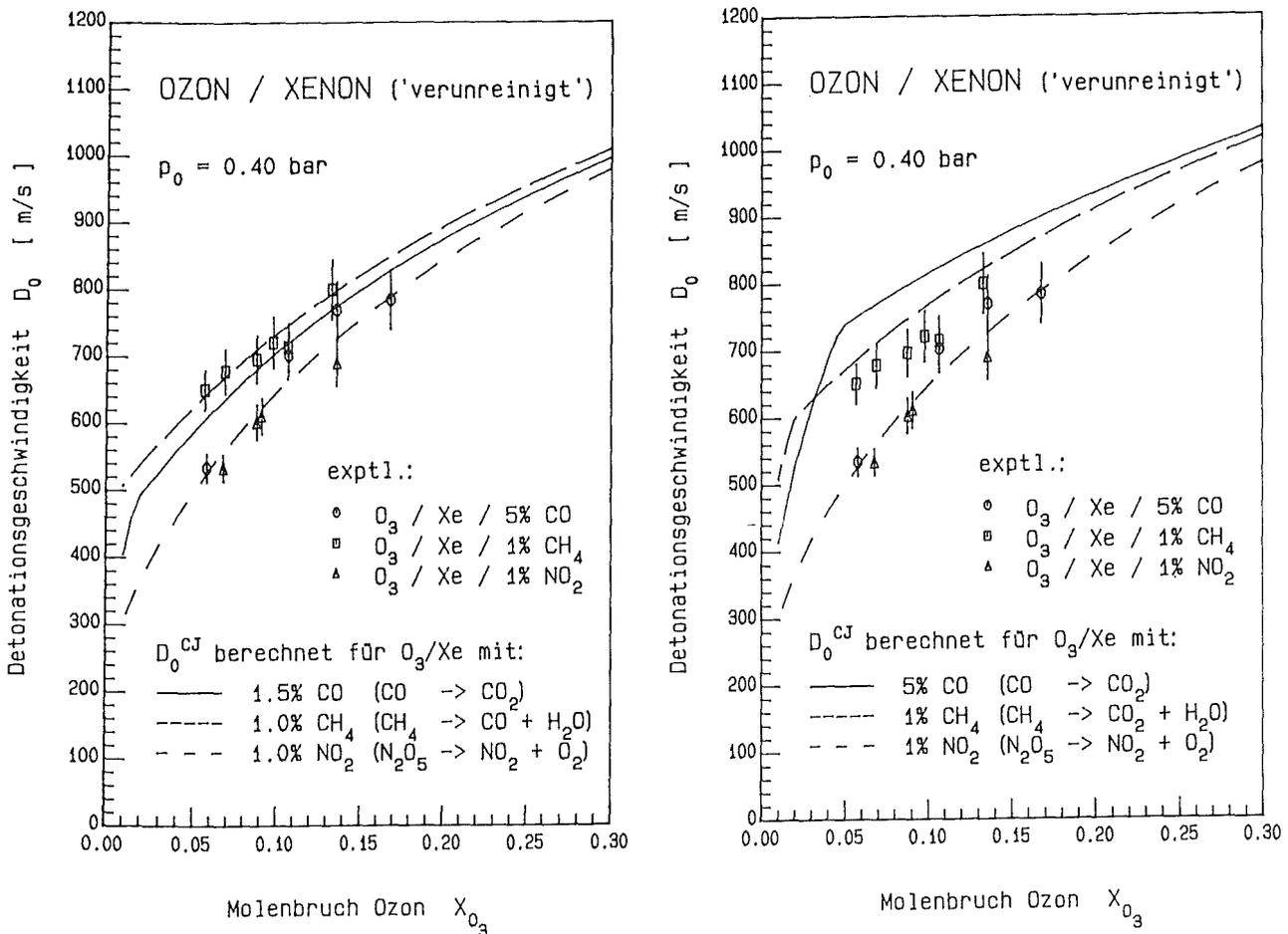
d.h. bei der hier gewählten Konzentration von 1 Mol-% Methan um einen zusätzlichen Energiebetrag von -5.2 kJ pro Mol Gasgemisch. Für die mit Berücksichtigung dieser Reaktion berechneten Detonations-

geschwindigkeiten wurde eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Werten gefunden. Nimmt man dagegen eine Reaktion



mit hier $\Delta H = -8 \text{ kJ}$ pro Mol Gasgemisch an, so wird, wie in den Abb.4.12 gezeigt wird, eine weniger gute Übereinstimmung von experimentellen und theoretischen Werten beobachtet. Wie bereits in den Arbeiten von Kistiakowsky et al. [106,112] berichtet wurde, führt die Detonation von Kohlenwasserstoff-haltigen Gemischen innerhalb der Detonationswelle nur bis zum Kohlenmonoxid. Die weitere Oxidation zum Endprodukt Kohlendioxid erfolgt in den nicht-stationären Schwaden, die mit geringerer Geschwindigkeit fortschreiten, und kann demnach nicht zur Detonationstemperatur und -Geschwindigkeit beitragen [130].

Abb.4.12 Einfluß WAA-typischer Verunreinigungen auf die Detonation von Ozon/Xenon-Gemischen



Zusatz von 1 Mol-% Stickstoffdioxid bewirkt keine meßbare Änderung der Detonationsgeschwindigkeit für Ozon/Xenon-Gemische, da die Wärmetönung für die schwach endotherme Reaktion



hier sind entsprechend 0.5 Mol-% N_2O_5 ca. 0.3 kJ pro Mol Gasgemisch zu berücksichtigen, zu keiner signifikanten Änderung der Energiebilanz führt (vgl.: für eine Ozonkonzentration von 10 Mol-% beträgt die Wärmetönung 14.3 kJ pro Mol Gasgemisch).

4.2.3. Detonationen in simulierten Füllkörperkolonnen

Der Einsatz von Füllkörperpackungen, bestehend aus Edelstahlwendeln 3x3 mm, zeigte, daß eine solche Packung unabhängig von ihrer Länge das Fortschreiten von Detonationen verhindert: Detonationen von Ozon/Xenon-Gemischen mit Ozonkonzentrationen bis zu 21.1 Mol-% bei einem Initialdruck von 0.4 bar pflanzen sich nicht durch eine Packung von 100 mm oder 500 mm Länge fort. Für die hier beobachtete Detonationsgrenze ist demnach neben dem Initialdruck nur der Durchmesser der Siebbodenöffnungen (1 mm) und der Metallwendeln (3 mm) verantwortlich, übereinstimmend mit der in Kapitel 2.4.3. formulierten Aussage über die Existenz von Detonationsgrenzen, die durch eine kritische Brennstoffkonzentration, einen kritischen Initialdruck und einen kritischen Durchmesser charakterisiert sind.

Hier ist der Vergleich mit dem Auslöschen von Ozon/Xenon-Flammen von Interesse. Nach den empirische Formeln von Streng und Grosse [96] für das Auslöschen von Ozon/Sauerstoff-Flammen findet man durch Kombination der Gleichungen (2.22) und (2.23)

$$(2.22) \quad d_o/\mu\text{m} = 10^{1.953} X_{\text{O}_3}^{-2.118} \quad \text{für } T_o = 298 \text{ K und } p = 1 \text{ atm}$$

$$(2.23) \quad d_o/\mu\text{m} = 10^{1.953} (p/\text{atm})^{-1.111} \quad \text{für } T_o = 298 \text{ K und } X_{\text{O}_3} = 1$$

für ein Ozon/Sauerstoff-Gemisch mit einer Ozonkonzentration von 21.1 Mol-% und einem Initialdruck von 0.4 bar einen Quenchingdurchmesser von $d_o(\text{O}_2) = 6.8 \text{ mm}$ für das Auslösen der Flamme in einem Rohr. Der Quenchingdurchmesser $d_o(\text{Xe})$ für die entsprechende Ozon/Xenon-Flamme läßt sich mit Hilfe der Näherung

$$(2.21) \quad d_o \approx \sqrt{2e\beta b} \delta$$

abschätzten (s.S.29). Ozon/Sauerstoff- und Ozon/Xenon-Flammen unterscheiden sich in der Flammendicke δ und im Zeldovich-Parameter β durch die Flammentemperatur. Mit $\beta = \frac{E}{RT_{af}^2} \times (T_{af} - T_o)$ erhält man

$$(4.13) \quad \frac{d_o(\text{Xe})}{d_o(\text{O}_2)} \approx \frac{T_{af}(\text{O}_2)}{T_{af}(\text{Xe})} \sqrt{\frac{T_{af}(\text{Xe}) - T_o}{T_{af}(\text{O}_2) - T_o}} \frac{\delta(\text{Xe})}{\delta(\text{O}_2)}$$

Aus den nach Warnatz [42] berechneten Flammenprofilen (Tab.7.2 und 7.5) erhält man für eine Ozonkonzentration von 21.1 Mol-% und einen Initialdruck von 0.4 bar

$$(4.14) \quad d_o(\text{Xe}) = 0.53 d_o(\text{O}_2).$$

Der kritische Durchmesser für das Auslösen der Ozon/Xenon-Flamme in einem Rohr beträgt somit $d_o(\text{Xe}) \approx 3.6 \text{ mm}$. Dieser Wert entspricht dem Durchmesser des eingesetzten Füllkörpers (3 mm). Wie diese Abschätzung zeigt, ist also die Detonationsgrenze, hier ausgedrückt als kritischer Durchmesser, identisch mit der durch den Quenchingdurchmesser für das Auslösen der Flamme gegebenen Zündgrenze.

5. Zusammenfassung

Da Radiolyse von Sauerstoff bei tiefen Temperaturen das thermodynamisch instabile und daher explosive und detonationsfähige Ozon bildet, sind für die Sicherheitsbetrachtung kerntechnischer Anlagen zur kryogenen Abtrennung des radioaktiven Spaltprodukts Krypton-85 aus dem Auflöserabgas einer WAA umfangreiche Kenntnisse über das Explosions- und Detonationsverhalten des Ozons erforderlich.

In dieser Arbeit wurden die Ozonexplosion sowie die Ozon-detonation experimentell und theoretisch untersucht. Grundlagen der Berechnungen waren Modelle der eindimensionalen, laminaren Flamme, der adiabatischen Explosion und der idealen Detonation. Ergänzend wurden die Kinetik des thermischen Ozonzerfalls, die Zündgrenzen und das Quenching von Flammen, die nicht-ideale Detonation und das Einsetzen von Detonationen diskutiert.

Für die Ozonexplosion wurde als die charakteristische Größe der Explosionsdruck als Funktion von Ozonkonzentration, Trägergas, Initialdruck, Gefäßgeometrie und WAA-typischer Verunreinigungen bestimmt. Die Abhängigkeit der Explosion von Ozonkonzentration und Trägergas wurde durch einfache, thermodynamische Funktionen erklärt. Der hier beobachtete Einfluß von Initialdruck und Geometrie wies auf einen nicht-adiabatischen Prozeß hin, der auf Energieverluste durch Wärmeleitung zurückgeführt werden konnte. Die Erweiterung bestehender Theorien um eine Näherung für den Wärmeverlust führte hier zu einem einfachen Modell, das eine nicht-adiabatische Explosion erstmals quantitativ beschreibt. Die beobachtete Neigung ozonhaltiger Gemische, von einer Explosion in eine Detonation überzugehen, konnte durch das Auftreten von Turbulenzen bereits zu Beginn des Explosionsvorganges verstanden werden. Die Anwendung einer diesbezüglichen Theorie auf die nicht-adiabatische Ozonexplosion lieferte Aussagen für das Einsetzen von Detonationen in sehr guter Übereinstimmung mit den experimentellen Beobachtungen.

Aus den Meßwerten für die Zündgrenzen konnte eine empirische Formel abgeleitet werden, die die Zündgrenze als Funktion von Trägergas, Initialdruck und Gefäßgeometrie beschreibt und eine Bestimmung der Zündtemperatur für Ozon (750 ± 5 K) ermöglichte. Verursacht durch das nicht-ideale Verhalten der Gase, treten jedoch Abweichungen von dieser Systematik bei höheren Initialdrücken auf.

Zündgrenze und Explosionsdruck ozonhaltiger Gemische wurden bereits durch geringe Mengen an Kohlenmonoxid, Methan oder Stickstoffdioxid beeinflusst: a) Kohlenmonoxid und Methan beeinflussen durch ihre stark exotherme Verbrennung die Thermodynamik der Gesamtreaktion und führen zu einem deutlichem Anstieg des Explosionsdruckes; b) Stickstoffoxide und die Reaktionsprodukte des Methan verändern die Kinetik des Ozonzerfalls und bewirken ein deutliches Absinken der Zündgrenze. Stickoxide verursachen eine besonders drastische Änderung des Explosionsverhaltens: Das ozonhaltige Gemisch neigt hier zur Spontanexplosion.

Für Ozon/Dichlordifluormethan-Gemische wurde eine Berechnung des Explosionsdruckes durch die Bildung polymerer Zersetzungsprodukte des CCl_2F_2 in der Flamme verhindert. Aufgrund des experimentellen Befundes, der auffallend hohen Zündgrenze und den niedrigen Explosionsdrücken, und der für die "Edelgaswäsche" reduzierten Wahrscheinlichkeit der radiolytischen Ozonbildung ist dieses Verfahren vom Standpunkt der Ozonproblematik weitaus sicherer als die kryogene Spaltdelgasabtrennung.

Versuche zur Ozondetonation - es wurde als charakteristische Größe die Detonationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Ozonkonzentration, Initialdruck und WAA-typischen Verunreinigungen bestimmt - ergaben, daß sich die Ozondetonation sehr gut durch die klassische Theorie von Chapman und Jouguet beschreiben läßt. Bedingt durch Wandeffekte waren die Meßwerte allerdings geringfügig niedriger als die theoretischen Ergebnisse, die nur für ideale Detonationen

gelten. Die CJ-Theorie liefert somit obere Grenzwerte für die Charakteristika der Ozondetonation und stellt folglich eine geeignete Grundlage für Sicherheitsbetrachtungen dar. Die hier gemessenen Detonationsgrenzen sind eine Funktion der Zündenergie (hier: der einleitenden Schockwelle) und des Rohrdurchmessers: Für Ozon/Xenon-Gemische, gezündet mit ca. 0.4 bar Knallgas in einem 20 mm breiten Rohr, beträgt die Detonationsgrenze ca. 7 Mol-% Ozon und steigt bei Einsatz einer Füllkörperpackung von 3 mm Porengröße auf ca. 21 Mol-% Ozon an. Diese Packung, die mit dem in der kerntechnischen Anlage zur ⁸⁵Krypton-Separierung "KRETA" eingesetzten Typ identisch ist, stellt somit ein wirksames Hindernis für das Fortschreiten von Detonationen dar.

6. Literatur

- [1] E.Henrich, K.Ebert, Proc.18th DOE Nuclear Airborne Waste Management and Air Cleaning Conference, Baltimore, USA, 12-16 August 1984, S.780 (1985).
- [2] E.Henrich, R.v.Ammon, K.Ebert, Proc.18th DOE Nuclear Airborne Waste Management and Air Cleaning Conference, Baltimore, USA, 12-16 August 1984, S.1004 (1985).
- [3] Empfehlung der "Strahlenschutzkommission"SSK vom 24.02.83 zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe bei einer WAA.
- [4] H.Stockberger, H.Sartorius, A.Sittkus, Z.Naturforschung 32a, 1249(1977).
- [5] E.Henrich, R.v.Ammon, E.Hutter, 5.PWA Statusbericht 1984, KfK 3740 ,S.183, (1984).
- [6] E.Henrich, R.v.Ammon, Atomenergie-Kerntechnik 46, 81(1985).
- [7] H.Gutowski, E.Schröder, Atomenergie-Kerntechnik 33, 277(1979).
- [8] A.W.Boyd, O.A.Miller, E.B.Selkirk, Can.J.Chem. 55, 203(1977).
- [9] D.W.Brown, L.A.Wall, J.Phys.Chem. 65, 915(1961).
- [10] W.Cleuren, J.Ceulemans, P.Huyskens, priv.Mitteilung.
- [11] M.T.Dmitriev, J.Appl.Chem.(USSR) 41, 34(1968).
- [12] J.D.Gault, K.W.Logan, H.R.Danner, Nucl.Safety 14, 466(1973).
- [13] J.A.Ghormley, C.J.Hochanadel, J.W.Boyle, J.Chem.Phys. 50, 419(1969).
- [14] G.R.A.Johnson, J.M.Warman, Disc.Farad.Soc, 37, 87(1964).
- [15] J.F.Kircher, J.S.McNulty, J.L.Farling, A.Levy, Radiat.Research 13, 452(1960).
- [16] G.M.Meaburn, D.Penner, J.LeCalve, M.Bourene, J.Phys.Chem. 72, 3920(1968).
- [17] S.Y.Psezhetzsky, I.Y.Myasnikov, N.A.Buneev, Acad.Sciences USSR, Symp.on Radiat.Chem., S.133(1955).
- [18] J.F.Riley, ORNL-3176, 33(1961); ORNL-3488, 42(1963);

- ORNL-3650, 147(1963).
- [19] J.T.Sears, J.W.Sutherland, J.Phys.Chem. 72, 1166(1968).
- [20] C.Willis, A.W.Boyd, M.J.Young, D.A.Armstrong, Can.J.Chem. 48, 1505(1970).
- [21] C.Willis, A.W.Boyd, M.J.Young, Can.J.Chem. 48, 1515(1970).
- [22] A.G.Streng, Explosivstoffe 10, 225(1960).
- [23] J.Duhayon, J.P.Goumondy, A.Leudet, J.C.Rousseau, Europ. Patentamt, Nr. 0008 273/B1 (6.8.79).
- [24] C.L.Bendixsen, "1974 Operation of the ICPP Rare Gas Recovery Facility", ICP-1057(1975).
- [25] H.J.Schumacher, An.Asoc.Quim.Argent. 41, 230(1953).
- [26] G.A.Cook, E.Spadinger, A.D.Kiffer, C.V.Klumpp, Ind.Eng.Chem. 48, 736(1956).
- [27] B.Raffel, J.Warnatz, J.Wofrum, J.Appl.Phys.B 37, 189(1985).
- [28] B.Lewis, G.v.Elbe, J.Am.Chem.Soc. 55, 511(1933).
- [29] B.Lewis, G.v.Elbe, J.Chem.Phys. 2, 283,291,294,665(1934).
- [30] B.Lewis, G.v.Elbe, J.Chem.Phys. 3, 63(1935); J.Am.Chem.Soc. 57, 1399(1935).
- [31] A.G.Streng, C.S.Stokes, L.A.Streng, J.Chem.Phys. 29, 458(1958).
- [32] R.O.Miller, J.Phys.Chem. 63, 1054(1959).
- [33] S.A.Harper, W.E.Gordon, Advan.Chem.Ser. 21, 28(1959).
- [34] R.W.Getzinger, J.R.Bowen, A.K.Oppenheim, M.Boudart, 10th Symp.(Internatl.) on Comb., Combustion Institute, Pittsburgh, Penn., 779 (1965).
- [35] V.V.Yastrebov, N.I.Kobozev, Russ.J.Phys.Chem. 33, 118(1959).
- [36] S.W.Benson, "The Foundations of Chemical Kinetics", McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 400ff, (1960).
- [37] S.W.Benson, A.E.Axworthy, J.Chem.Phys. 26, 1718(1957); 42, 2614(1965).
- [38] W.M.Jones, N.Davidson, J.Am.Chem.Soc. 84, 2868(1962).
- [39] J.V.Michael, J.Chem.Phys. 54, 4450(1971).
- [40] K.L.Wray, J.Chem.Phys. 38, 1518(1963).
- [41] R.E.Center, R.T.V.Kung, J.Chem.Phys. 62, 801(1975).
- [42] J.Warnatz, Ber.Bunsenges.Phys.Chem. 82, 192(1978).

- [43] J.H.Kiefer, R.W.Lutz, J.Chem.Phys. 42, 1705(1965).
- [44] G.v.Elbe, B.Lewis, J.Am.Chem.Soc. 55, 507(1933).
- [45] R.E.Duff, Phys.Fluids 1, 242(1958).
- [46] S.R.Byron, J.Chem.Phys. 30, 1380(1959).
- [47] D.L.Matthews, Phys.Fluids 2, 170(1959).
- [48] M.Camac, A.Vaughan, J.Chem.Phys. 34, 460(1961).
- [49] O.L.Anderson, United Aircraft Corporation, Research Laboratories, Rept. R-1822-1 August (1961).
- [50] W.S.Watt, A.L.Myerson, J.Chem.Phys. 51, 1638(1969).
- [51] M.Billiotte, H.Guenoche, C.Sedes, Entropie 38, 5(1971).
- [52] W.D.Breashears, P.F.Bird, J.Chem.Phys. 55, 4017(1971).
- [53] F.Kaufman, Progress in Reaction Kinetics 1, 3(1961).
- [54] F.Kaufman, J.R.Kelso, J.Chem.Phys. 40, 1162(1964);
Disc.Farad.Soc. 37, 26(1964).
- [55] J.W.Linnett, D.G.M.Marsden, Proc.Roy.Soc.(London)
A234, 489(1956).
- [56] W.B.DeMore, O.F.Raper, J.Chem.Phys. 44, 1780(1966).
- [57] D.M.Scott, R.J.Cvetanovic, J.Chem.Phys. 54, 1449(1971).
- [58] D.L.Baulch, D.D.Drysale, J.Duxbury, S.J.Grant, "Evaluated Data
for High Temperature Reactions", Vol.3, Butterworth, London (1976).
- [59] W.D.McGrath, R.G.W.Norrish, Nature 182, 235(1958); Proc.Roy.
Soc.(London) A254, 317(1960).
- [60] P.H.Frank, Th.Just, Ber.Bunsenges.Phys.Chem. 89, 181(1985).
- [61] P.Harteck, S.Dondes, J.Chem.Phys. 26, 1734(1957).
- [62] L.M.Arin, P.Warneck, J.Phys.Chem. 76, 1514(1972).
- [63] D.Garvin, J.Am.Chem.Soc. 76, 1523(1954).
- [64] J.W.Birks, B.Shoemaker, T.J.Beck, D.M.W.Hinton, J.Chem.Phys.
65, 5181(1976).
- [65] R.A.Graham, H.S.Johnston, J.Chem.Phys. 60, 4628(1974).
- [66] R.E.Nightingale, A.R.Downie, D.L.Rotenberg, B.Crawford, R.A.Ogg,
J.Phys.Chem. 58, 1047(1954).
- [67] C.H.Wu, E.D.Morris, H.Niki, J.Phys.Chem. 77, 2507(1973).
- [68] R.A.Graham, H.S.Johnston, J.Phys.Chem. 82, 254(1978).
- [69] C.C.Kirscher, J.J.Margitan, S.P.Sander,

- J.Phys.Chem. 88, 4370(1984).
- [70] G.Rotzoll, J.Phys.Chem. 90, 677(1986).
- [71] E.Mallard, H.Chatelier, Compt.rend. 93, 145(1881).
- [72] E.Mallard, H.Chatelier, Ann.mines 4, 274,379(1883).
- [73] R.Becker, Z.Physik 8, 23(1922).
- [74] R.G.Kirkwood, W.W.Wood, J.Chem.Phys. 22, 1915(1954).
- [75] F.A.Williams, "Combustion Theory", Chapt.2.
Cummings Publishing Company, Inc., Menlo Park, Calif.(1985).
- [76] Hugoniot, J.de l'ecole polytechn. 57, 3(1887); 58, 1(1889).
- [77] W.Döring, Ann.Physik 43, 421(1943).
- [78] E.Jouguet, J.math. 1, 345(1905); 2, 5(1906).
- [79] A.G.Streng, A.V.Grosse, J.Am.Chem.Soc. 79, 1517(1957);
6th Symp.(Internatl.) on Combustion, Reinhold Publ. Corp.,
New York, 264 (1957).
- [80] B.Lewis, G.v.Elbe, J.Chem.Phys. 2, 537(1934);
Chem.Revs. 21, 347(1937).
- [81] H.O.Hirschfelder, C.F.Curtiss, D.E.Campbell, J.Phys.Chem. 57,403(1957).
- [82] R.Sandri, Can.J.Chem. 34, 313,324(1956); 35, 474(1957).
- [83] E.S.Campbell, Chem.Engineer.Sci. 20, 311(1965).
- [84] F.Cramarossa, G.Dixon-Lewis, Combust.Flame 16, 243(1971).
- [85] K.A.Wilde, *ibid.* 18, 43(1972).
- [86] L.Bledjian, *ibid.* 20, 5(1973).
- [87] S.B.Margolis, J.Computat.Phys. 27, 410(1978).
- [88] J.M.Heimerl, T.P.Coffee, Combust.Flame 39, 301(1980).
- [89] B.Rogg, I.S.Wichman, *ibid.* 62, 271(1985).
- [90] F.A.William, "Combustion Theory", (s.[75]), Chapt.5.
- [91] D.R.Stull, H.Prophet, "JANAF Thermochemical Tables", 2nd Ed.,
Nat.Stand.Ref.Data Ser., Nat.Bur.Stand.(U.S.), 37 (1971).
- [92] J.Hilsenrath, et al., "Tables of Thermodynamic and Transport
Properties", Pergamon Press, New York (1960).
- [93] N.B.Vargaftik, "Tables on the Thermophysical Properties of
Liquids and Gases in Normal and Dissociated States", 2nd Ed.,

- John Wiley & Sons, Inc., New York (1975).
- [94] L.A.Loavachev, V.S.Babkin, V.A.Bunev, A.V.V'Yun, V.N.Krivulin, A.N.Baratov, *Combust.Flame* 20, 259(1973).
- [95] F.A.William, "Combustion Theory", (s.[75]), Chapt.8.
- [96] A.G.Streng, A.V.Grosse, *Combust.Flame* 5, 81(1961).
- [97] S.W.Benson, "The Foundations of Chemical Kinetics", (s.[75]), 463f,471ff.
- [98] G.B.Kistiakowsky, *Industr.Engneer.Chem.* 43, 2794(1951).
- [99] D.L.Chapman, *Phil.Mag.* 47, 90(1899).
- [100] Y.B.Zeldovich, *J.Exptl.Theoret.Phys.(USSR)* 10, 542(1940).
- [101] J.v.Neumann, "Theory of Stationary Detonation Waves", OSRD Rept.549(1942).
- [102] Th.Just, H.G.Wagner, *Z.Elektrochem.* 64, 501(1960).
- [103] J.G.Kirkwood, W.W.Wood, *J.Chem.Phys.* 22, 1915(1954).
- [104] H.M.PEEK, Z.W.Salzburg, *J.Chem.Phys.* 20, 763(1952).
- [105] G.B.Kistiakowsky, P.H.Kydd, *J.Chem.Phys.* 22, 1940(1954).
- [106] G.B.Kistiakowsky, P.H.Kydd, *J.Chem.Phys.* 23,271(1955); 25, 824(1956).
- [107] R.E.Duff, H.T.Knight, J.P.Rink, *Phys.Fluids* 1, 393(1958).
- [108] W.Pusch, H.G.Wagner, *Ber.Bunsenges.Phys.Chem.* 69, 503(1965).
- [109] T.Fujiwara, *J.Phys.Soc.Japan*, 28, 1350(1970).
- [110] B.Lewis, J.B.Friauf, *J.am.chem.Soc.* 52, 3905(1930).
- [111] G.B.Kistiakowsky, H.T.Knight, M.E.Malin, *J.Am.Chem.Soc.* 73, 2972(1951).
- [112] G.B.Kistiakowsky, H.T.Knight, M.E.Malin, *J.Chem.Phys.* 22, 876,884(1954).
- [113] R.E.Duff, H.T.Knight, H.R.Wright, *J.Chem.Phys.* 22, 1617(1954).
- [114] H.M.PEEK, R.G.Thrap, *J.Chem.Phys.* 26, 740(1957).
- [115] G.B.Kistiakowsky, W.G.Zinman, *J.Chem.Phys.* 23, 1889(1955).
- [116] W.W.Wood, J.G.Kirkwood, *J.Chem.Phys.* 25, 1276(1956).
- [117] R.E.Duff, *J.Chem.Phys.* 28, 1193(1958).
- [118] S.Tsugé, *Combust.Sci.Technol.* 3, 195(1971).
- [119] W.A.Bone, R.P.Fraser, W.H.Wheeler, *Phil.Trans.Roy.Soc.(London)*

- A235, 29(1935).
- [120] A.J.Mooradian, W.E.Gordon, J.Chem.Phys. 19, 1166(1951).
- [121] C.Campbell, D.W.Woodhead, J.Chem.Soc. 129, 3010(1926);
130, 1572(1927).
- [122] C.Campbell, A.C.Finch, J.Chem.Soc. 1928, 2094.
- [123] W.A.Bone, R.P.Fraser, Phil.Trans.Roy.Soc.(london),
A228, 197(1929); A230, 371(1932).
- [124] G.B.Kistiakowsky, H.T.Knight, M.E.Malin, J.Chem.Phys. 22, 994(1954).
- [125] R.E.Duff, H.T.Knight, J.Chem.Phys. 20, 1493(1952).
- [126] W.E.Gordon, A.J.Mooradian, A.S.Harper, 7th Symp.(Internatl.) on
Comb., Butterworth, London, 758 (1959).
- [127] J.A.Fay, J.Chem.Phys. 20, 942(1952).
- [128] Lord Rayleigh, "Theory of Sound", Dover Publications, New York(1945).
- [129] J.H.S.Lee, Ann.Rev.Phys.Chem. 28, 75(1977).
- [130] D.J.Berets, E.F.Greene, G.B.Kistiakowsky, J.Am.Chem.Soc.
72, 1080,1086(1950).
- [131] Handbook of Chemistry and Physics, 64th Ed., CRC-Press, 1983/84
- [132] F.A.Williams, "Combustion Theory", 2.Aufl., (s.[75]), S.576.
- [133] W.Jost, "Verbrennungsvorgänge in Gasen", Springer Verl.,
Berlin, 1919, S.147ff.
- [134] H.Horvath, L.Bilitzky, J.Hüttner, "Ozone", R.J.H.Clark(Hsg.),
Topics in Inorganic and General Chemistry, Monograph 20, Elsevier,
Amsterdam, S.24f, (1985).
- [135] A.L.Horvath, "Physical Properties of Inorganic Compounds",
Edward Arnold Publ.Ltd., London, S.282, (1985).
- [136] W.v.Siemens, Poggendorf Ann. 102, 120(1857).
- [137] M.Berthelot, Ann.chim.Phys. 10, 165(1877).
- [138] M.Griggs, J.Chem.Phys. 49, 857(1968).
- [139] S.E.Novick, B.J.Howard, W.Klemperer, J.Chem.Phys. 57, 561(1972).
- [140] G.Herzberg, "Infrared and Raman Spectra", D.van Nostrand Comp.,
Inc., Princeton, New Jersey, S.184,284, (1960).
- [141] G.Herzberg, "Infrared and Raman Spectra", (s.[140]), S.286.
- [142] M.K.Wilson, R.M.Badger, J.Chem.Phys. 16, 741(1948).
- [143] G.E.McGraw, D.L.Bernitt, I.C.Hisatsune, J.Chem.Phys. 42, 237(1965).

7. Anhang

7.1 Laminare Flammen verschiedener Ozon/Trägergas-Gemische

Tab.7.1 Ozon/Sauerstoff-Flammen

| X_{O_3} [%] | p_0 [bar] | δ [cm] | T [K] | v_0 [cm/s] |
|---------------|-------------|---------------|-------|--------------|
| 5 | 0.45 | 50.8 | 518 | 0.1 |
| 6 | 0.45 | 24.0 | 558 | 0.3 |
| 7 | 0.45 | 12.5 | 598 | 0.6 |
| 10 | 0.05 | 22.6 | 719 | 3.0 |
| 10 | 0.1 | 11.6 | 719 | 2.9 |
| 10 | 0.2 | 5.89 | 719 | 2.9 |
| 10 | 0.45 | 2.72 | 719 | 2.8 |
| 10 | 1.0 | 1.32 | 719 | 2.7 |
| 15 | 0.05 | 5.75 | 906 | 12.8 |
| 15 | 0.1 | 2.92 | 906 | 12.8 |
| 15 | 0.2 | 1.47 | 907 | 12.8 |
| 15 | 0.45 | 0.657 | 908 | 12.7 |
| 15 | 1.0 | 0.304 | 908 | 12.5 |
| 20 | 0.05 | 2.58 | 1069 | 31.8 |
| 20 | 0.1 | 1.31 | 1070 | 31.8 |
| 20 | 0.2 | 0.657 | 1071 | 31.7 |
| 20 | 0.45 | 0.293 | 1074 | 31.6 |
| 20 | 1.0 | 0.133 | 1077 | 31.4 |
| 25 | 0.05 | 1.56 | 1215 | 58.4 |
| 25 | 0.1 | 0.790 | 1216 | 58.3 |
| 25 | 0.2 | 0.395 | 1217 | 58.4 |
| 25 | 0.45 | 0.175 | 1220 | 58.1 |
| 25 | 1.0 | 0.080 | 1224 | 57.9 |
| 40 | 0.05 | 0.740 | 1568 | 159.4 |
| 40 | 0.1 | 0.370 | 1569 | 159.4 |
| 40 | 0.2 | 0.185 | 1571 | 159.3 |
| 40 | 0.45 | 0.082 | 1575 | 159.5 |
| 40 | 1.0 | 0.037 | 1577 | 159.3 |
| 50 | 0.45 | 0.075 | 1778 | 235.2 |
| 60 | 0.45 | 0.066 | 1949 | 303.5 |
| 75 | 0.45 | 0.060 | 2156 | 379.3 |
| 100 | 0.45 | 0.054 | 2451 | 483.5 |

Tab.7.2 Ozon/Argon-Flammen

| X_{O_3} [%] | p_0 [bar] | δ [cm] | T [K] | v_0 [cm/s] |
|---------------|-------------|---------------|-------|--------------|
| 5 | 1.0 | 4.06 | 619 | 0.7 |
| 10 | 0.05 | 7.09 | 898 | 9.9 |
| 10 | 0.1 | 3.59 | 898 | 9.9 |
| 10 | 0.2 | 1.80 | 899 | 9.9 |
| 10 | 0.45 | 0.80 | 899 | 9.9 |
| 10 | 1.0 | 0.362 | 900 | 9.9 |
| 15 | 0.05 | 2.47 | 1127 | 33.7 |
| 15 | 0.1 | 1.25 | 1127 | 33.7 |
| 15 | 0.2 | 0.625 | 1128 | 33.7 |
| 15 | 0.45 | 0.278 | 1129 | 33.7 |
| 15 | 1.0 | 0.125 | 1131 | 33.6 |
| 20 | 0.05 | 1.42 | 1314 | 67.8 |
| 20 | 0.1 | 0.714 | 1314 | 67.8 |
| 20 | 0.2 | 0.357 | 1314 | 67.8 |
| 20 | 0.45 | 0.159 | 1315 | 67.8 |
| 20 | 1.0 | 0.072 | 1317 | 67.7 |
| 25 | 0.05 | 1.01 | 1468 | 106.3 |
| 25 | 0.1 | 0.511 | 1468 | 106.2 |
| 25 | 0.2 | 0.256 | 1468 | 106.2 |
| 25 | 0.45 | 0.113 | 1469 | 106.2 |
| 25 | 1.0 | 0.051 | 1471 | 106.1 |
| 40 | 0.45 | 0.070 | 1811 | 218.8 |
| 40 | 1.0 | 0.032 | 1812 | 218.7 |
| 60 | 0.45 | 0.065 | 2105 | 331.2 |
| 75 | 0.45 | 0.060 | 2259 | 389.2 |
| 100 | 0.45 | 0.054 | 2451 | 483.5 |

Tab.7.3 Ozon/Stickstoff-Flammen

| X_{O_3} [%] | p_0 [bar] | δ [cm] | T [K] | v_0 [cm/s] |
|---------------|-------------|---------------|-------|--------------|
| 10 | 0.45 | 2.15 | 739 | 3.4 |
| 15 | 0.45 | 0.570 | 932 | 14.5 |
| 20 | 0.45 | 0.264 | 1100 | 34.9 |
| 25 | 0.45 | 0.162 | 1246 | 62.8 |
| 40 | 0.45 | 0.091 | 1614 | 170.8 |
| 50 | 0.45 | 0.078 | 1792 | 233.1 |
| 60 | 0.45 | 0.068 | 1953 | 293.1 |
| 75 | 0.45 | 0.060 | 2162 | 371.0 |
| 100 | 0.45 | 0.054 | 2451 | 483.5 |

Tab.7.4 Ozon/Krypton-Flammen

| X_{O_3} [%] | p_0 [bar] | δ [cm] | T [K] | v_0 [cm/s] |
|---------------|-------------|---------------|-------|--------------|
| 10 | 0.45 | 0.815 | 901 | 7.1 |
| 15 | 0.45 | 0.278 | 1131 | 25.4 |
| 20 | 0.45 | 0.156 | 1318 | 53.1 |
| 25 | 0.45 | 0.111 | 1473 | 85.7 |
| 40 | 0.45 | 0.070 | 1815 | 185.7 |
| 60 | 0.45 | 0.057 | 2109 | 299.6 |
| 75 | 0.45 | 0.059 | 2266 | 371.9 |
| 100 | 0.45 | 0.054 | 2451 | 483.5 |

Tab.7.5 Ozon/Xenon-Flammen

| X_{O_3} [%] | p_0 [bar] | δ [cm] | T [K] | v_0 [cm/s] |
|---------------|-------------|---------------|-------|--------------|
| 10 | 0.45 | 0.836 | 901 | 5.5 |
| 15 | 0.45 | 0.273 | 1132 | 20.7 |
| 20 | 0.45 | 0.151 | 1319 | 44.8 |
| 25 | 0.45 | 0.107 | 1474 | 73.9 |
| 40 | 0.45 | 0.068 | 1818 | 166.1 |
| 60 | 0.45 | 0.057 | 2110 | 274.0 |
| 75 | 0.45 | 0.059 | 2285 | 354.4 |
| 100 | 0.45 | 0.054 | 2451 | 483.5 |

7.2 Chapman-Jouguet-Detonation verschiedener Ozon/Trägergas-Gemische

Tab.7.6 Ozon/Sauerstoff-Detonation

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 1 | 406 | 1.81 | 507 | 26 | 1781 | 11.49 | 1320 |
| 2 | 485 | 2.33 | 590 | 27 | 1825 | 11.83 | 1337 |
| 3 | 558 | 2.79 | 654 | 28 | 1867 | 12.18 | 1355 |
| 4 | 627 | 3.24 | 711 | 29 | 1910 | 12.53 | 1371 |
| 5 | 694 | 3.67 | 759 | 30 | 1951 | 12.88 | 1387 |
| 6 | 757 | 4.09 | 804 | 31 | 1992 | 13.21 | 1403 |
| 7 | 819 | 4.49 | 843 | 32 | 2032 | 13.55 | 1418 |
| 8 | 879 | 4.89 | 880 | 33 | 2071 | 13.89 | 1433 |
| 9 | 937 | 5.28 | 915 | 34 | 2110 | 14.22 | 1447 |
| 10 | 994 | 5.67 | 949 | 35 | 2148 | 14.55 | 1461 |
| 11 | 1049 | 6.06 | 980 | 36 | 2186 | 14.89 | 1475 |
| 12 | 1103 | 6.43 | 1009 | 37 | 2222 | 15.21 | 1487 |
| 13 | 1157 | 6.81 | 1037 | 38 | 2258 | 15.53 | 1500 |
| 14 | 1210 | 7.18 | 1064 | 39 | 2293 | 15.85 | 1512 |
| 15 | 1261 | 7.55 | 1090 | 40 | 2327 | 16.16 | 1524 |
| 16 | 1312 | 7.91 | 1114 | 41 | 2360 | 16.48 | 1536 |
| 17 | 1362 | 8.27 | 1138 | 42 | 2392 | 16.78 | 1547 |
| 18 | 1412 | 8.64 | 1161 | 43 | 2424 | 17.09 | 1558 |
| 19 | 1460 | 9.00 | 1183 | 44 | 2455 | 17.38 | 1569 |
| 20 | 1508 | 9.36 | 1204 | 45 | 2485 | 17.68 | 1579 |
| 21 | 1555 | 9.71 | 1225 | 46 | 2513 | 17.98 | 1589 |
| 22 | 1602 | 10.07 | 1245 | 47 | 2541 | 18.26 | 1598 |
| 23 | 1647 | 10.43 | 1265 | 48 | 2569 | 18.53 | 1607 |
| 24 | 1693 | 10.77 | 1283 | 49 | 2595 | 18.80 | 1615 |
| 25 | 1737 | 11.14 | 1303 | 50 | 2621 | 19.08 | 1624 |

Tab.7.6 Ozon/Sauerstoff-Detonation (Forts.)

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 51 | 2646 | 19.36 | 1633 | 76 | 3087 | 25.03 | 1772 |
| 52 | 2670 | 19.62 | 1640 | 77 | 3103 | 25.25 | 1776 |
| 53 | 2694 | 19.88 | 1648 | 78 | 3114 | 25.46 | 1780 |
| 54 | 2717 | 20.13 | 1655 | 79 | 3127 | 25.66 | 1784 |
| 55 | 2739 | 20.38 | 1662 | 80 | 3139 | 25.85 | 1787 |
| 56 | 2759 | 20.64 | 1670 | 81 | 3151 | 26.04 | 1791 |
| 57 | 2780 | 20.88 | 1676 | 82 | 3162 | 26.24 | 1794 |
| 58 | 2800 | 21.12 | 1682 | 83 | 3175 | 26.42 | 1798 |
| 59 | 2820 | 21.36 | 1689 | 84 | 3185 | 26.62 | 1801 |
| 60 | 2840 | 21.58 | 1694 | 85 | 3197 | 26.80 | 1804 |
| 61 | 2857 | 21.83 | 1701 | 86 | 3205 | 27.00 | 1808 |
| 62 | 2876 | 22.06 | 1706 | 87 | 3216 | 27.18 | 1811 |
| 63 | 2894 | 22.27 | 1712 | 88 | 3226 | 27.36 | 1814 |
| 64 | 2911 | 22.50 | 1717 | 89 | 3236 | 27.54 | 1817 |
| 65 | 2927 | 22.71 | 1722 | 90 | 3248 | 27.71 | 1819 |
| 66 | 2943 | 22.93 | 1727 | 91 | 3256 | 27.89 | 1822 |
| 67 | 2958 | 23.15 | 1732 | 92 | 3264 | 28.08 | 1825 |
| 68 | 2974 | 23.35 | 1737 | 93 | 3275 | 28.25 | 1828 |
| 69 | 2987 | 23.57 | 1742 | 94 | 3282 | 28.43 | 1831 |
| 70 | 3002 | 23.77 | 1746 | 95 | 3292 | 28.60 | 1833 |
| 71 | 3018 | 23.98 | 1750 | 96 | 3301 | 28.77 | 1835 |
| 72 | 3032 | 24.20 | 1755 | 97 | 3307 | 28.96 | 1838 |
| 73 | 3047 | 24.41 | 1759 | 98 | 3316 | 29.13 | 1841 |
| 74 | 3061 | 24.62 | 1764 | 99 | 3324 | 29.30 | 1843 |
| 75 | 3075 | 24.82 | 1768 | 100 | 3331 | 29.48 | 1845 |

Tab.7.7 Ozon/Helium-Detonation

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_0^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_0^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 1 | 490 | 2.19 | 1646 | 26 | 2531 | 15.36 | 2474 |
| 2 | 632 | 2.99 | 1885 | 27 | 2569 | 15.70 | 2464 |
| 3 | 765 | 3.75 | 2049 | 28 | 2606 | 16.02 | 2453 |
| 4 | 890 | 4.46 | 2163 | 29 | 2640 | 16.33 | 2442 |
| 5 | 1009 | 5.14 | 2250 | 30 | 2673 | 16.63 | 2431 |
| 6 | 1121 | 5.81 | 2319 | 31 | 2703 | 16.91 | 2419 |
| 7 | 1228 | 6.44 | 2370 | 32 | 2731 | 17.20 | 2408 |
| 8 | 1330 | 7.06 | 2411 | 33 | 2758 | 17.47 | 2396 |
| 9 | 1427 | 7.66 | 2443 | 34 | 2784 | 17.72 | 2383 |
| 10 | 1520 | 8.23 | 2467 | 35 | 2807 | 17.98 | 2371 |
| 11 | 1608 | 8.78 | 2486 | 36 | 2829 | 18.24 | 2360 |
| 12 | 1693 | 9.32 | 2500 | 37 | 2851 | 18.47 | 2347 |
| 13 | 1773 | 9.85 | 2512 | 38 | 2872 | 18.71 | 2335 |
| 14 | 1850 | 10.35 | 2519 | 39 | 2890 | 18.94 | 2323 |
| 15 | 1924 | 10.85 | 2524 | 40 | 2908 | 19.17 | 2311 |
| 16 | 1994 | 11.33 | 2526 | 41 | 2926 | 19.38 | 2299 |
| 17 | 2061 | 11.79 | 2526 | 42 | 2942 | 19.59 | 2287 |
| 18 | 2125 | 12.24 | 2525 | 43 | 2957 | 19.81 | 2276 |
| 19 | 2185 | 12.68 | 2523 | 44 | 2972 | 20.01 | 2264 |
| 20 | 2243 | 13.11 | 2519 | 45 | 2985 | 20.22 | 2253 |
| 21 | 2298 | 13.51 | 2514 | 46 | 2997 | 20.42 | 2242 |
| 22 | 2350 | 13.91 | 2507 | 47 | 3012 | 20.61 | 2230 |
| 23 | 2399 | 14.29 | 2500 | 48 | 3024 | 20.82 | 2220 |
| 24 | 2445 | 15.67 | 2492 | 49 | 3037 | 21.02 | 2209 |
| 25 | 2489 | 15.03 | 2484 | 50 | 3049 | 21.21 | 2199 |

Tab.7.7 Ozon/Helium-Detonation (Forts.)

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 51 | 3060 | 21.41 | 2189 | 76 | 3244 | 25.71 | 1981 |
| 52 | 3071 | 21.59 | 2179 | 77 | 3247 | 25.88 | 1974 |
| 53 | 3082 | 21.78 | 2169 | 78 | 3253 | 26.04 | 1968 |
| 54 | 3092 | 21.96 | 2159 | 79 | 3258 | 26.19 | 1961 |
| 55 | 3102 | 22.16 | 2149 | 80 | 3263 | 26.35 | 1954 |
| 56 | 3111 | 22.35 | 2140 | 81 | 3268 | 26.50 | 1948 |
| 57 | 3121 | 22.52 | 2131 | 82 | 3271 | 26.67 | 1942 |
| 58 | 3128 | 22.71 | 2122 | 83 | 3274 | 26.83 | 1936 |
| 59 | 3137 | 22.88 | 2113 | 84 | 3278 | 26.99 | 1930 |
| 60 | 3145 | 23.06 | 2104 | 85 | 3281 | 27.15 | 1924 |
| 61 | 3152 | 23.23 | 2096 | 86 | 3285 | 27.30 | 1919 |
| 62 | 3159 | 23.41 | 2087 | 87 | 3291 | 27.45 | 1912 |
| 63 | 3168 | 23.57 | 2078 | 88 | 3295 | 27.60 | 1907 |
| 64 | 3174 | 23.75 | 2070 | 89 | 3298 | 27.76 | 1901 |
| 65 | 3181 | 23.91 | 2062 | 90 | 3300 | 27.92 | 1896 |
| 66 | 3189 | 24.08 | 2054 | 91 | 3306 | 28.07 | 1890 |
| 67 | 3193 | 24.25 | 2047 | 92 | 3309 | 28.23 | 1885 |
| 68 | 3199 | 24.42 | 2039 | 93 | 3311 | 28.39 | 1880 |
| 69 | 3205 | 24.59 | 2031 | 94 | 3316 | 28.53 | 1874 |
| 70 | 3213 | 24.74 | 2023 | 95 | 3318 | 28.69 | 1870 |
| 71 | 3218 | 24.90 | 2016 | 96 | 3320 | 28.86 | 1865 |
| 72 | 3223 | 25.07 | 2009 | 97 | 3324 | 29.00 | 1860 |
| 73 | 3228 | 25.24 | 2002 | 98 | 3326 | 29.17 | 1855 |
| 74 | 3234 | 25.39 | 1994 | 99 | 3330 | 29.31 | 1850 |
| 75 | 3238 | 25.56 | 1988 | 100 | 3331 | 29.48 | 1845 |

Tab.7.8 Ozon/Argon-Detonation

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 1 | 490 | 2.19 | 548 | 26 | 2531 | 15.36 | 1499 |
| 2 | 632 | 2.99 | 657 | 27 | 2569 | 15.70 | 1513 |
| 3 | 765 | 3.75 | 745 | 28 | 2606 | 16.02 | 1526 |
| 4 | 890 | 4.46 | 818 | 29 | 2640 | 16.33 | 1538 |
| 5 | 1009 | 5.14 | 882 | 30 | 2673 | 16.63 | 1549 |
| 6 | 1121 | 5.81 | 940 | 31 | 2703 | 16.91 | 1560 |
| 7 | 1228 | 6.44 | 991 | 32 | 2731 | 17.20 | 1570 |
| 8 | 1330 | 7.06 | 1038 | 33 | 2758 | 17.47 | 1579 |
| 9 | 1427 | 7.66 | 1081 | 34 | 2784 | 17.72 | 1588 |
| 10 | 1520 | 8.23 | 1120 | 35 | 2807 | 17.98 | 1597 |
| 11 | 1608 | 8.78 | 1157 | 36 | 2829 | 18.24 | 1606 |
| 12 | 1693 | 9.32 | 1191 | 37 | 2851 | 18.47 | 1613 |
| 13 | 1773 | 9.85 | 1223 | 38 | 2872 | 18.71 | 1621 |
| 14 | 1850 | 10.35 | 1253 | 39 | 2890 | 18.94 | 1628 |
| 15 | 1924 | 10.85 | 1281 | 40 | 2908 | 19.17 | 1635 |
| 16 | 1994 | 11.33 | 1307 | 41 | 2926 | 19.38 | 1641 |
| 17 | 2061 | 11.79 | 1331 | 42 | 2942 | 19.59 | 1647 |
| 18 | 2125 | 12.24 | 1355 | 43 | 2957 | 19.81 | 1654 |
| 19 | 2185 | 12.68 | 1377 | 44 | 2972 | 20.01 | 1659 |
| 20 | 2243 | 13.11 | 1398 | 45 | 2985 | 20.22 | 1665 |
| 21 | 2298 | 13.51 | 1417 | 46 | 2997 | 20.42 | 1670 |
| 22 | 2350 | 13.91 | 1436 | 47 | 3012 | 20.61 | 1675 |
| 23 | 2399 | 14.29 | 1453 | 48 | 3024 | 20.82 | 1681 |
| 24 | 2445 | 15.67 | 1470 | 49 | 3037 | 21.02 | 1686 |
| 25 | 2489 | 15.03 | 1485 | 50 | 3049 | 21.21 | 1691 |

Tab.7.8 Ozon/Argon-Detonation (Forts.)

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 51 | 3060 | 21.41 | 1696 | 76 | 3244 | 25.71 | 1786 |
| 52 | 3071 | 21.59 | 1700 | 77 | 3247 | 25.88 | 1789 |
| 53 | 3082 | 21.78 | 1705 | 78 | 3253 | 26.04 | 1791 |
| 54 | 3092 | 21.96 | 1709 | 79 | 3258 | 26.19 | 1794 |
| 55 | 3102 | 22.16 | 1713 | 80 | 3263 | 26.35 | 1797 |
| 56 | 3111 | 22.35 | 1718 | 81 | 3268 | 26.50 | 1799 |
| 57 | 3121 | 22.52 | 1722 | 82 | 3271 | 26.67 | 1802 |
| 58 | 3128 | 22.71 | 1726 | 83 | 3274 | 26.83 | 1805 |
| 59 | 3137 | 22.88 | 1730 | 84 | 3278 | 26.99 | 1807 |
| 60 | 3145 | 23.06 | 1734 | 85 | 3281 | 27.15 | 1810 |
| 61 | 3152 | 23.23 | 1738 | 86 | 3285 | 27.30 | 1813 |
| 62 | 3159 | 23.41 | 1741 | 87 | 3291 | 27.45 | 1815 |
| 63 | 3168 | 23.57 | 1745 | 88 | 3295 | 27.60 | 1817 |
| 64 | 3174 | 23.75 | 1748 | 89 | 3298 | 27.76 | 1820 |
| 65 | 3181 | 23.91 | 1752 | 90 | 3300 | 27.92 | 1822 |
| 66 | 3189 | 24.08 | 1755 | 91 | 3306 | 28.07 | 1824 |
| 67 | 3193 | 24.25 | 1759 | 92 | 3309 | 28.23 | 1827 |
| 68 | 3199 | 24.42 | 1762 | 93 | 3311 | 28.39 | 1829 |
| 69 | 3205 | 24.59 | 1765 | 94 | 3316 | 28.53 | 1831 |
| 70 | 3213 | 24.74 | 1768 | 95 | 3318 | 28.69 | 1834 |
| 71 | 3218 | 24.90 | 1771 | 96 | 3320 | 28.86 | 1837 |
| 72 | 3223 | 25.07 | 1774 | 97 | 3324 | 29.00 | 1838 |
| 73 | 3228 | 25.24 | 1777 | 98 | 3326 | 29.17 | 1841 |
| 74 | 3234 | 25.39 | 1780 | 99 | 3330 | 29.31 | 1843 |
| 75 | 3238 | 25.56 | 1783 | 100 | 3331 | 29.48 | 1845 |

Tab.7.9 Ozon/Krypton-Detonation

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 1 | 490 | 2.19 | 380 | 26 | 2531 | 15.36 | 1126 |
| 2 | 632 | 2.99 | 457 | 27 | 2569 | 15.70 | 1140 |
| 3 | 765 | 3.75 | 519 | 28 | 2606 | 16.02 | 1154 |
| 4 | 890 | 4.46 | 572 | 29 | 2640 | 16.33 | 1167 |
| 5 | 1009 | 5.14 | 619 | 30 | 2673 | 16.63 | 1179 |
| 6 | 1121 | 5.81 | 661 | 31 | 2703 | 16.91 | 1192 |
| 7 | 1228 | 6.44 | 699 | 32 | 2731 | 17.20 | 1204 |
| 8 | 1330 | 7.06 | 735 | 33 | 2758 | 17.47 | 1215 |
| 9 | 1427 | 7.66 | 768 | 34 | 2784 | 17.72 | 1226 |
| 10 | 1520 | 8.23 | 798 | 35 | 2807 | 17.98 | 1237 |
| 11 | 1608 | 8.78 | 827 | 36 | 2829 | 18.24 | 1248 |
| 12 | 1693 | 9.32 | 854 | 37 | 2851 | 18.47 | 1258 |
| 13 | 1773 | 9.85 | 880 | 38 | 2872 | 18.71 | 1268 |
| 14 | 1850 | 10.35 | 904 | 39 | 2890 | 18.94 | 1279 |
| 15 | 1924 | 10.85 | 928 | 40 | 2908 | 19.17 | 1289 |
| 16 | 1994 | 11.33 | 950 | 41 | 2926 | 19.38 | 1298 |
| 17 | 2061 | 11.79 | 971 | 42 | 2942 | 19.59 | 1308 |
| 18 | 2125 | 12.24 | 991 | 43 | 2957 | 19.81 | 1317 |
| 19 | 2185 | 12.68 | 1011 | 44 | 2972 | 20.01 | 1326 |
| 20 | 2243 | 13.11 | 1030 | 45 | 2985 | 20.22 | 1336 |
| 21 | 2298 | 13.51 | 1047 | 46 | 2997 | 20.42 | 1345 |
| 22 | 2350 | 13.91 | 1064 | 47 | 3012 | 20.61 | 1354 |
| 23 | 2399 | 14.29 | 1080 | 48 | 3024 | 20.82 | 1363 |
| 24 | 2445 | 15.67 | 1097 | 49 | 3037 | 21.02 | 1372 |
| 25 | 2489 | 15.03 | 1112 | 50 | 3049 | 21.21 | 1381 |

Tab.7.9 Ozon/Krypton-Detonation (Forts.)

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 51 | 3060 | 21.41 | 1391 | 76 | 3244 | 25.71 | 1611 |
| 52 | 3071 | 21.59 | 1399 | 77 | 3247 | 25.88 | 1620 |
| 53 | 3082 | 21.78 | 1408 | 78 | 3253 | 26.04 | 1629 |
| 54 | 3092 | 21.96 | 1417 | 79 | 3258 | 26.19 | 1638 |
| 55 | 3102 | 22.16 | 1426 | 80 | 3263 | 26.35 | 1648 |
| 56 | 3111 | 22.35 | 1435 | 81 | 3268 | 26.50 | 1657 |
| 57 | 3121 | 22.52 | 1443 | 82 | 3271 | 26.67 | 1667 |
| 58 | 3128 | 22.71 | 1452 | 83 | 3274 | 26.83 | 1676 |
| 59 | 3137 | 22.88 | 1461 | 84 | 3278 | 26.99 | 1685 |
| 60 | 3145 | 23.06 | 1470 | 85 | 3281 | 27.15 | 1695 |
| 61 | 3152 | 23.23 | 1478 | 86 | 3285 | 27.30 | 1704 |
| 62 | 3159 | 23.41 | 1487 | 87 | 3291 | 27.45 | 1714 |
| 63 | 3168 | 23.57 | 1496 | 88 | 3295 | 27.60 | 1723 |
| 64 | 3174 | 23.75 | 1505 | 89 | 3298 | 27.76 | 1733 |
| 65 | 3181 | 23.91 | 1513 | 90 | 3300 | 27.92 | 1743 |
| 66 | 3189 | 24.08 | 1522 | 91 | 3306 | 28.07 | 1753 |
| 67 | 3193 | 24.25 | 1531 | 92 | 3309 | 28.23 | 1763 |
| 68 | 3199 | 24.42 | 1540 | 93 | 3311 | 28.39 | 1773 |
| 69 | 3205 | 24.59 | 1549 | 94 | 3316 | 28.53 | 1783 |
| 70 | 3213 | 24.74 | 1557 | 95 | 3318 | 28.69 | 1793 |
| 71 | 3218 | 24.90 | 1566 | 96 | 3320 | 28.86 | 1804 |
| 72 | 3223 | 25.07 | 1575 | 97 | 3324 | 29.00 | 1814 |
| 73 | 3228 | 25.24 | 1584 | 98 | 3326 | 29.17 | 1824 |
| 74 | 3234 | 25.39 | 1593 | 99 | 3330 | 29.31 | 1835 |
| 75 | 3238 | 25.56 | 1602 | 100 | 3331 | 29.48 | 1845 |

Tab.7.10 Ozon/Xenon-Detonation

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 1 | 490 | 2.19 | 304 | 26 | 2531 | 15.36 | 929 |
| 2 | 632 | 2.99 | 357 | 27 | 2569 | 15.70 | 942 |
| 3 | 765 | 3.75 | 417 | 28 | 2606 | 16.02 | 954 |
| 4 | 890 | 4.46 | 459 | 29 | 2640 | 16.33 | 967 |
| 5 | 1009 | 5.14 | 497 | 30 | 2673 | 16.63 | 978 |
| 6 | 1121 | 5.81 | 532 | 31 | 2703 | 16.91 | 990 |
| 7 | 1228 | 6.44 | 563 | 32 | 2731 | 17.20 | 1002 |
| 8 | 1330 | 7.06 | 593 | 33 | 2758 | 17.47 | 1013 |
| 9 | 1427 | 7.66 | 620 | 34 | 2784 | 17.72 | 1023 |
| 10 | 1520 | 8.23 | 645 | 35 | 2807 | 17.98 | 1034 |
| 11 | 1608 | 8.78 | 669 | 36 | 2829 | 18.24 | 1045 |
| 12 | 1693 | 9.32 | 692 | 37 | 2851 | 18.47 | 1055 |
| 13 | 1773 | 9.85 | 714 | 38 | 2872 | 18.71 | 1065 |
| 14 | 1850 | 10.35 | 734 | 39 | 2890 | 18.94 | 1076 |
| 15 | 1924 | 10.85 | 754 | 40 | 2908 | 19.17 | 1086 |
| 16 | 1994 | 11.33 | 773 | 41 | 2926 | 19.38 | 1096 |
| 17 | 2061 | 11.79 | 791 | 42 | 2942 | 19.59 | 1106 |
| 18 | 2125 | 12.24 | 809 | 43 | 2957 | 19.81 | 1116 |
| 19 | 2185 | 12.68 | 826 | 44 | 2972 | 20.01 | 1125 |
| 20 | 2243 | 13.11 | 842 | 45 | 2985 | 20.22 | 1135 |
| 21 | 2298 | 13.51 | 858 | 46 | 2997 | 20.42 | 1145 |
| 22 | 2350 | 13.91 | 873 | 47 | 3012 | 20.61 | 1155 |
| 23 | 2399 | 14.29 | 888 | 48 | 3024 | 20.82 | 1165 |
| 24 | 2445 | 15.67 | 902 | 49 | 3037 | 21.02 | 1175 |
| 25 | 2489 | 15.03 | 916 | 50 | 3049 | 21.21 | 1185 |

Tab.7.10 Ozon/Xenon-Detonation (Forts.)

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 51 | 3060 | 21.41 | 1195 | 76 | 3244 | 25.71 | 1470 |
| 52 | 3071 | 21.59 | 1205 | 77 | 3247 | 25.88 | 1483 |
| 53 | 3082 | 21.78 | 1215 | 78 | 3253 | 26.04 | 1496 |
| 54 | 3092 | 21.96 | 1225 | 79 | 3258 | 26.19 | 1509 |
| 55 | 3102 | 22.16 | 1235 | 80 | 3263 | 26.35 | 1522 |
| 56 | 3111 | 22.35 | 1246 | 81 | 3268 | 26.50 | 1536 |
| 57 | 3121 | 22.52 | 1256 | 82 | 3271 | 26.67 | 1550 |
| 58 | 3128 | 22.71 | 1266 | 83 | 3274 | 26.83 | 1564 |
| 59 | 3137 | 22.88 | 1277 | 84 | 3278 | 26.99 | 1578 |
| 60 | 3145 | 23.06 | 1287 | 85 | 3281 | 27.15 | 1592 |
| 61 | 3152 | 23.23 | 1298 | 86 | 3285 | 27.30 | 1607 |
| 62 | 3159 | 23.41 | 1309 | 87 | 3291 | 27.45 | 1622 |
| 63 | 3168 | 23.57 | 1319 | 88 | 3295 | 27.60 | 1637 |
| 64 | 3174 | 23.75 | 1330 | 89 | 3298 | 27.76 | 1652 |
| 65 | 3181 | 23.91 | 1341 | 90 | 3300 | 27.92 | 1668 |
| 66 | 3189 | 24.08 | 1352 | 91 | 3306 | 28.07 | 1784 |
| 67 | 3193 | 24.25 | 1364 | 92 | 3309 | 28.23 | 1701 |
| 68 | 3199 | 24.42 | 1375 | 93 | 3311 | 28.39 | 1718 |
| 69 | 3205 | 24.59 | 1386 | 94 | 3316 | 28.53 | 1734 |
| 70 | 3213 | 24.74 | 1897 | 95 | 3318 | 28.69 | 1752 |
| 71 | 3218 | 24.90 | 1409 | 96 | 3320 | 28.86 | 1770 |
| 72 | 3223 | 25.07 | 1421 | 97 | 3324 | 29.00 | 1788 |
| 73 | 3228 | 25.24 | 1433 | 98 | 3326 | 29.17 | 1807 |
| 74 | 3234 | 25.39 | 1445 | 99 | 3330 | 29.31 | 1826 |
| 75 | 3238 | 25.56 | 1458 | 100 | 3331 | 29.48 | 1845 |

Tab.7.11 Ozon/Kohlenmonoxid/Xenon-Detonation
 berechnet für eine CO-Konzentration von 5 Mol-%
 bezogen auf das Trägergas

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 1 | 757 | 3.63 | 413 | 26 | 2833 | 17.02 | 993 |
| 2 | 1131 | 5.66 | 527 | 27 | 2853 | 17.25 | 1002 |
| 3 | 1477 | 7.53 | 614 | 28 | 2872 | 17.46 | 1012 |
| 4 | 1797 | 9.27 | 686 | 29 | 2889 | 17.68 | 1021 |
| 5 | 2027 | 10.54 | 738 | 30 | 2905 | 17.90 | 1030 |
| 6 | 2090 | 10.96 | 754 | 31 | 2921 | 18.11 | 1039 |
| 7 | 2150 | 11.36 | 770 | 32 | 2937 | 18.30 | 1048 |
| 8 | 2207 | 11.75 | 785 | 33 | 2951 | 18.50 | 1057 |
| 9 | 2261 | 12.12 | 800 | 34 | 2964 | 18.70 | 1066 |
| 10 | 2311 | 12.49 | 814 | 35 | 2978 | 18.89 | 1075 |
| 11 | 2359 | 12.84 | 828 | 36 | 2990 | 19.07 | 1084 |
| 12 | 2405 | 13.18 | 840 | 37 | 3002 | 19.26 | 1092 |
| 13 | 2448 | 13.51 | 853 | 38 | 3013 | 19.45 | 1101 |
| 14 | 2489 | 13.83 | 866 | 39 | 3024 | 19.64 | 1110 |
| 15 | 2527 | 14.15 | 880 | 40 | 3035 | 19.82 | 1119 |
| 16 | 2564 | 14.45 | 890 | 41 | 3046 | 20.00 | 1128 |
| 17 | 2598 | 14.74 | 901 | 42 | 3055 | 20.18 | 1137 |
| 18 | 2631 | 15.02 | 912 | 43 | 3064 | 20.36 | 1146 |
| 19 | 2661 | 15.30 | 923 | 44 | 3074 | 20.53 | 1155 |
| 20 | 2690 | 15.56 | 933 | 45 | 3082 | 20.71 | 1164 |
| 21 | 2717 | 15.83 | 944 | 46 | 3090 | 20.89 | 1173 |
| 22 | 2744 | 16.07 | 954 | 47 | 3098 | 21.06 | 1182 |
| 23 | 2768 | 16.31 | 964 | 48 | 3106 | 21.24 | 1191 |
| 24 | 2790 | 16.56 | 974 | 49 | 3113 | 21.41 | 1200 |
| 25 | 2812 | 16.80 | 983 | 50 | 3122 | 21.57 | 1209 |

Tab.7.11 Ozon/Kohlenmonoxid/Xenon-Detonation
 berechnet für eine CO-Konzentration von 5 Mol-%
 bezogen auf das Trägergas (Forts.)

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 51 | 3127 | 21.74 | 1219 | 76 | 3250 | 25.70 | 1482 |
| 52 | 3135 | 21.90 | 1228 | 77 | 3253 | 25.86 | 1494 |
| 53 | 3142 | 22.06 | 1237 | 78 | 3259 | 26.00 | 1506 |
| 54 | 3148 | 22.26 | 1247 | 79 | 3262 | 26.16 | 1519 |
| 55 | 3154 | 22.39 | 1256 | 80 | 3264 | 26.31 | 1532 |
| 56 | 3160 | 22.55 | 1266 | 81 | 3269 | 26.46 | 1545 |
| 57 | 3165 | 22.71 | 1276 | 82 | 3271 | 26.62 | 1558 |
| 58 | 3170 | 22.88 | 1285 | 83 | 3274 | 26.78 | 1572 |
| 59 | 3177 | 23.02 | 1295 | 84 | 3278 | 26.92 | 1585 |
| 60 | 3181 | 23.19 | 1305 | 85 | 3281 | 27.08 | 1599 |
| 61 | 3187 | 23.34 | 1315 | 86 | 3284 | 27.23 | 1613 |
| 62 | 3191 | 23.51 | 1325 | 87 | 3286 | 27.39 | 1628 |
| 63 | 3196 | 23.66 | 1335 | 88 | 3290 | 27.53 | 1642 |
| 64 | 3199 | 23.83 | 1346 | 89 | 3294 | 27.68 | 1657 |
| 65 | 3205 | 23.98 | 1357 | 90 | 3295 | 27.84 | 1673 |
| 66 | 3210 | 24.13 | 1367 | 91 | 3299 | 27.99 | 1788 |
| 67 | 3213 | 24.30 | 1378 | 92 | 3300 | 28.15 | 1704 |
| 68 | 3218 | 24.45 | 1389 | 93 | 3303 | 28.30 | 1720 |
| 69 | 3223 | 24.61 | 1400 | 94 | 3307 | 28.44 | 1736 |
| 70 | 3228 | 24.76 | 1411 | 95 | 3309 | 28.61 | 1753 |
| 71 | 3232 | 24.92 | 1422 | 96 | 3311 | 28.75 | 1770 |
| 72 | 3236 | 25.07 | 1434 | 97 | 3314 | 28.90 | 1787 |
| 73 | 3240 | 25.23 | 1446 | 98 | 3317 | 29.05 | 1805 |
| 74 | 3243 | 25.38 | 1457 | 99 | 3319 | 29.20 | 1823 |
| 75 | 3247 | 25.54 | 1469 | 100 | 3321 | 29.37 | 1842 |

Tab.7.12 Ozon/Kohlenmonoxid/Xenon-Detonation
 berechnet für eine CO-Konzentration von 1.5 Mol-%
 bezogen auf das Trägergas

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 1 | 736 | 3.53 | 404 | 26 | 2636 | 15.96 | 951 |
| 2 | 1022 | 5.09 | 493 | 27 | 2668 | 16.25 | 962 |
| 3 | 1135 | 5.73 | 527 | 28 | 2698 | 16.54 | 974 |
| 4 | 1242 | 6.36 | 558 | 29 | 2726 | 16.81 | 985 |
| 5 | 1344 | 6.96 | 587 | 30 | 2752 | 17.07 | 995 |
| 6 | 1442 | 7.54 | 613 | 31 | 2777 | 17.33 | 1006 |
| 7 | 1534 | 8.10 | 638 | 32 | 2800 | 17.58 | 1016 |
| 8 | 1622 | 8.65 | 662 | 33 | 2823 | 17.82 | 1026 |
| 9 | 1706 | 9.17 | 684 | 34 | 2844 | 18.07 | 1037 |
| 10 | 1786 | 9.68 | 705 | 35 | 2864 | 18.30 | 1047 |
| 11 | 1862 | 10.18 | 726 | 36 | 2883 | 18.52 | 1057 |
| 12 | 1935 | 10.65 | 745 | 37 | 2901 | 18.75 | 1067 |
| 13 | 2004 | 11.12 | 763 | 38 | 2918 | 18.96 | 1076 |
| 14 | 2079 | 11.57 | 781 | 39 | 2934 | 19.17 | 1086 |
| 15 | 2132 | 12.01 | 798 | 40 | 2949 | 19.38 | 1096 |
| 16 | 2192 | 12.43 | 814 | 41 | 2963 | 19.58 | 1105 |
| 17 | 2248 | 12.84 | 830 | 42 | 2976 | 19.78 | 1115 |
| 18 | 2302 | 13.24 | 845 | 43 | 2990 | 19.97 | 1124 |
| 19 | 2353 | 13.62 | 860 | 44 | 3001 | 20.18 | 1134 |
| 20 | 2400 | 13.99 | 874 | 45 | 3014 | 20.37 | 1144 |
| 21 | 2446 | 14.35 | 888 | 46 | 3026 | 20.56 | 1153 |
| 22 | 2489 | 14.69 | 901 | 47 | 3038 | 20.75 | 1162 |
| 23 | 2529 | 15.02 | 914 | 48 | 3048 | 20.94 | 1172 |
| 24 | 2567 | 15.34 | 926 | 49 | 3058 | 21.12 | 1182 |
| 25 | 2603 | 15.66 | 939 | 50 | 3068 | 21.31 | 1191 |

Tab.7.12 Ozon/Kohlenmonoxid/Xenon-Detonation

berechnet für eine CO-Konzentration von 1.5 Mol-%

bezogen auf das Trägergas (Forts.)

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_0^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_0^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 51 | 3077 | 21.49 | 1201 | 76 | 3237 | 25.62 | 1471 |
| 52 | 3088 | 21.66 | 1211 | 77 | 3240 | 25.80 | 1484 |
| 53 | 3095 | 21.84 | 1221 | 78 | 3245 | 25.95 | 1496 |
| 54 | 3105 | 22.03 | 1230 | 79 | 3249 | 26.11 | 1509 |
| 55 | 3113 | 22.20 | 1240 | 80 | 3254 | 26.26 | 1523 |
| 56 | 3121 | 22.38 | 1250 | 81 | 3258 | 26.42 | 1536 |
| 57 | 3128 | 22.55 | 1260 | 82 | 3262 | 26.57 | 1549 |
| 58 | 3136 | 22.71 | 1270 | 83 | 3265 | 26.73 | 1563 |
| 59 | 3142 | 22.89 | 1281 | 84 | 3269 | 26.89 | 1577 |
| 60 | 3150 | 23.05 | 1291 | 85 | 3272 | 27.05 | 1592 |
| 61 | 3157 | 23.21 | 1301 | 86 | 3275 | 27.21 | 1606 |
| 62 | 3161 | 23.39 | 1312 | 87 | 3281 | 27.35 | 1621 |
| 63 | 3167 | 23.55 | 1322 | 88 | 3284 | 27.51 | 1636 |
| 64 | 3173 | 23.71 | 1333 | 89 | 3286 | 27.67 | 1651 |
| 65 | 3181 | 23.86 | 1343 | 90 | 3292 | 27.81 | 1667 |
| 66 | 3186 | 24.03 | 1354 | 91 | 3294 | 27.97 | 1683 |
| 67 | 3191 | 24.19 | 1365 | 92 | 3296 | 28.13 | 1699 |
| 68 | 3198 | 24.34 | 1376 | 93 | 3301 | 28.28 | 1716 |
| 69 | 3202 | 24.51 | 1388 | 94 | 3303 | 28.44 | 1733 |
| 70 | 3206 | 24.67 | 1399 | 95 | 3307 | 28.58 | 1750 |
| 71 | 3213 | 24.83 | 1410 | 96 | 3309 | 28.75 | 1768 |
| 72 | 3217 | 24.99 | 1422 | 97 | 3313 | 28.89 | 1785 |
| 73 | 3223 | 25.15 | 1434 | 98 | 3314 | 29.06 | 1803 |
| 74 | 3226 | 25.32 | 1446 | 99 | 3319 | 29.20 | 1823 |
| 75 | 3232 | 25.47 | 1459 | 100 | 3321 | 29.37 | 1842 |

Tab.7.13 Ozon/Methan/Xenon-Detonation

berechnet für eine CH₄-Konzentration von 1 Mol-%

bezogen auf das Trägergas

und für die Reaktion CH₄ + O₃ → CO + 2H₂O

| X _{O₃} [%] | T _{CJ} [K] | p _{CJ} /p ₀ | D ₀ ^{CJ} [m/s] | X _{O₃} [%] | T _{CJ} [K] | p _{CJ} /p ₀ | D ₀ ^{CJ} [m/s] |
|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 1073 | 5.39 | 507 | 26 | 2702 | 16.52 | 966 |
| 2 | 1185 | 6.04 | 540 | 27 | 2731 | 16.79 | 977 |
| 3 | 1291 | 6.67 | 570 | 28 | 2757 | 17.06 | 988 |
| 4 | 1393 | 7.27 | 599 | 29 | 2783 | 17.31 | 998 |
| 5 | 1489 | 7.85 | 624 | 30 | 2806 | 17.56 | 1008 |
| 6 | 1580 | 8.41 | 648 | 31 | 2830 | 17.80 | 1018 |
| 7 | 1667 | 8.96 | 671 | 32 | 2851 | 18.05 | 1028 |
| 8 | 1750 | 9.49 | 693 | 33 | 2871 | 18.28 | 1038 |
| 9 | 1829 | 9.99 | 714 | 34 | 2890 | 18.51 | 1048 |
| 10 | 1905 | 10.47 | 733 | 35 | 2907 | 18.73 | 1058 |
| 11 | 1977 | 10.95 | 752 | 36 | 2925 | 18.94 | 1067 |
| 12 | 2046 | 11.43 | 771 | 37 | 2941 | 19.15 | 1077 |
| 13 | 2111 | 11.87 | 788 | 38 | 2956 | 19.34 | 1086 |
| 14 | 2173 | 12.31 | 805 | 39 | 2969 | 19.56 | 1095 |
| 15 | 2232 | 12.73 | 821 | 40 | 2984 | 19.74 | 1104 |
| 16 | 2288 | 13.14 | 836 | 41 | 2995 | 19.94 | 1114 |
| 17 | 2341 | 13.54 | 851 | 42 | 3008 | 20.13 | 1123 |
| 18 | 2392 | 13.92 | 866 | 43 | 3021 | 20.32 | 1132 |
| 19 | 2439 | 14.29 | 880 | 44 | 3032 | 20.51 | 1142 |
| 20 | 2484 | 14.64 | 893 | 45 | 3044 | 20.68 | 1151 |
| 21 | 2526 | 14.98 | 906 | 46 | 3053 | 20.88 | 1161 |
| 22 | 2566 | 15.31 | 919 | 47 | 3064 | 21.06 | 1170 |
| 23 | 2603 | 15.62 | 931 | 48 | 3075 | 21.23 | 1179 |
| 24 | 2638 | 15.94 | 943 | 49 | 3083 | 21.41 | 1188 |
| 25 | 2671 | 16.23 | 954 | 50 | 3091 | 21.58 | 1198 |

Tab.7.13 Ozon/Methan/Xenon-Detonation

berechnet für eine CH₄-Konzentration von 1 Mol-%

bezogen auf das Trägergas

und für die Reaktion CH₄ + O₃ → CO + 2H₂O (Forts.)

| X _{O₃} [%] | T _{CJ} [K] | p _{CJ} /p _o | D _o ^{CJ} [m/s] | X _{O₃} [%] | T _{CJ} [K] | p _{CJ} /p _o | D _o ^{CJ} [m/s] |
|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 51 | 3101 | 21.77 | 1207 | 76 | 3244 | 25.75 | 1473 |
| 52 | 3109 | 21.94 | 1217 | 77 | 3248 | 25.90 | 1486 |
| 53 | 3117 | 22.11 | 1226 | 78 | 3252 | 26.05 | 1498 |
| 54 | 3124 | 22.28 | 1236 | 79 | 3256 | 26.21 | 1511 |
| 55 | 3132 | 22.44 | 1245 | 80 | 3259 | 26.36 | 1524 |
| 56 | 3138 | 22.61 | 1255 | 81 | 3262 | 26.51 | 1538 |
| 57 | 3146 | 22.77 | 1265 | 82 | 3265 | 26.67 | 1551 |
| 58 | 3153 | 22.93 | 1275 | 83 | 3271 | 26.81 | 1565 |
| 59 | 3157 | 23.10 | 1285 | 84 | 3274 | 26.96 | 1579 |
| 60 | 3163 | 23.26 | 1294 | 85 | 3276 | 27.12 | 1593 |
| 61 | 3169 | 23.42 | 1305 | 86 | 3282 | 27.26 | 1607 |
| 62 | 3177 | 23.57 | 1315 | 87 | 3284 | 27.41 | 1622 |
| 63 | 3182 | 23.73 | 1326 | 88 | 3286 | 27.57 | 1637 |
| 64 | 3186 | 23.89 | 1336 | 89 | 3290 | 27.71 | 1652 |
| 65 | 3193 | 24.04 | 1347 | 90 | 3292 | 27.87 | 1668 |
| 66 | 3197 | 24.20 | 1358 | 91 | 3297 | 28.01 | 1683 |
| 67 | 3203 | 24.35 | 1368 | 92 | 3299 | 28.17 | 1700 |
| 68 | 3207 | 24.51 | 1380 | 93 | 3302 | 28.31 | 1716 |
| 69 | 3213 | 24.66 | 1391 | 94 | 3304 | 28.47 | 1733 |
| 70 | 3217 | 24.82 | 1402 | 95 | 3307 | 28.61 | 1750 |
| 71 | 3222 | 24.97 | 1414 | 96 | 3311 | 28.76 | 1768 |
| 72 | 3225 | 25.14 | 1425 | 97 | 3313 | 28.92 | 1786 |
| 73 | 3230 | 25.29 | 1437 | 98 | 3316 | 29.06 | 1804 |
| 74 | 3235 | 25.44 | 1449 | 99 | 3319 | 29.20 | 1823 |
| 75 | 3240 | 25.59 | 1461 | 100 | 3320 | 29.37 | 1842 |

Tab.7.14 Ozon/Methan/Xenon-Detonation

berechnet für eine CH₄-Konzentration von 1 Mol-%

bezogen auf das Trägergas

und für die Reaktion $\text{CH}_4 + 2\text{O}_3 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_0^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_0^{CJ} [m/s] |
|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 1 | 1073 | 5.39 | 507 | 26 | 2771 | 16.89 | 977 |
| 2 | 1432 | 7.36 | 599 | 27 | 2795 | 17.14 | 987 |
| 3 | 1528 | 7.93 | 624 | 28 | 2818 | 17.39 | 997 |
| 4 | 1620 | 8.48 | 648 | 29 | 2840 | 17.62 | 1007 |
| 5 | 1706 | 9.01 | 671 | 30 | 2861 | 17.86 | 1017 |
| 6 | 1789 | 9.53 | 692 | 31 | 2880 | 18.07 | 1026 |
| 7 | 1867 | 10.03 | 712 | 32 | 2899 | 18.30 | 1036 |
| 8 | 1942 | 10.51 | 731 | 33 | 2916 | 18.52 | 1045 |
| 9 | 2013 | 10.98 | 749 | 34 | 2932 | 18.73 | 1054 |
| 10 | 2080 | 11.43 | 767 | 35 | 2947 | 18.94 | 1063 |
| 11 | 2144 | 11.87 | 784 | 36 | 2962 | 19.14 | 1073 |
| 12 | 2205 | 12.29 | 800 | 37 | 2975 | 19.33 | 1082 |
| 13 | 2263 | 12.70 | 816 | 38 | 2989 | 19.52 | 1091 |
| 14 | 2317 | 13.10 | 831 | 39 | 3002 | 19.71 | 1100 |
| 15 | 2369 | 13.48 | 845 | 40 | 3014 | 19.90 | 1109 |
| 16 | 2417 | 13.85 | 859 | 41 | 3026 | 20.09 | 1118 |
| 17 | 2464 | 14.21 | 873 | 42 | 3037 | 20.28 | 1127 |
| 18 | 2507 | 14.54 | 885 | 43 | 3048 | 20.45 | 1136 |
| 19 | 2548 | 14.88 | 898 | 44 | 3058 | 20.63 | 1145 |
| 20 | 2586 | 15.20 | 910 | 45 | 3068 | 20.81 | 1154 |
| 21 | 2622 | 15.51 | 922 | 46 | 3077 | 20.99 | 1163 |
| 22 | 2655 | 15.81 | 934 | 47 | 3087 | 21.16 | 1172 |
| 23 | 2687 | 16.10 | 945 | 48 | 3094 | 21.34 | 1182 |
| 24 | 2717 | 16.36 | 956 | 49 | 3103 | 21.52 | 1191 |
| 25 | 2745 | 16.63 | 966 | 50 | 3111 | 21.69 | 1200 |

Tab.7.14 Ozon/Methan/Xenon-Detonation

berechnet für eine CH₄-Konzentration von 1 Mol-%

bezogen auf das Trägergas

und für die Reaktion CH₄ + 2O₃ → CO₂ + O₂ + 2H₂O (Forts.)

| X _{O₃} [%] | T _{CJ} [K] | p _{CJ} /p ₀ | D ₀ ^{CJ} [m/s] | X _{O₃} [%] | T _{CJ} [K] | p _{CJ} /p ₀ | D ₀ ^{CJ} [m/s] |
|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 51 | 3118 | 21.86 | 1210 | 76 | 3248 | 25.77 | 1474 |
| 52 | 3126 | 22.01 | 1219 | 77 | 3251 | 25.93 | 1486 |
| 53 | 3132 | 22.19 | 1228 | 78 | 3257 | 26.07 | 1499 |
| 54 | 3140 | 22.34 | 1238 | 79 | 3260 | 26.22 | 1512 |
| 55 | 3147 | 22.50 | 1247 | 80 | 3263 | 26.37 | 1525 |
| 56 | 3152 | 22.67 | 1257 | 81 | 3266 | 26.53 | 1538 |
| 57 | 3158 | 22.83 | 1267 | 82 | 3271 | 26.67 | 1551 |
| 58 | 3164 | 22.99 | 1277 | 83 | 3273 | 26.82 | 1565 |
| 59 | 3171 | 23.14 | 1286 | 84 | 3275 | 26.98 | 1579 |
| 60 | 3176 | 23.30 | 1296 | 85 | 3280 | 27.12 | 1593 |
| 61 | 3181 | 23.46 | 1306 | 86 | 3282 | 27.28 | 1608 |
| 62 | 3187 | 23.61 | 1317 | 87 | 3287 | 27.42 | 1622 |
| 63 | 3191 | 23.77 | 1327 | 88 | 3289 | 27.58 | 1637 |
| 64 | 3197 | 23.92 | 1337 | 89 | 3292 | 27.72 | 1652 |
| 65 | 3200 | 24.08 | 1348 | 90 | 3294 | 27.88 | 1668 |
| 66 | 3206 | 24.23 | 1359 | 91 | 3298 | 28.02 | 1684 |
| 67 | 3210 | 24.40 | 1370 | 92 | 3301 | 28.16 | 1700 |
| 68 | 3215 | 24.54 | 1381 | 93 | 3303 | 28.32 | 1716 |
| 69 | 3221 | 24.69 | 1392 | 94 | 3306 | 28.47 | 1733 |
| 70 | 3223 | 24.86 | 1403 | 95 | 3309 | 28.61 | 1750 |
| 71 | 3228 | 25.01 | 1415 | 96 | 3311 | 28.77 | 1768 |
| 72 | 3232 | 25.16 | 1426 | 97 | 3313 | 28.91 | 1786 |
| 73 | 3237 | 25.32 | 1438 | 98 | 3316 | 29.06 | 1804 |
| 74 | 3241 | 25.47 | 1450 | 99 | 3320 | 29.20 | 1822 |
| 75 | 3244 | 25.62 | 1462 | 100 | 3322 | 29.37 | 1842 |

Tab.7.15 Ozon/Distickstoffpentoxid/Xenon-Detonation

berechnet für eine N_2O_5 -Konzentration von 0.5 Mol-%

bezogen auf das Trägergas

und für die Reaktion $N_2O_5 + O_3 \rightarrow 2NO_2 + 2O_2$

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_o | D_o^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 1 | 490 | 2.19 | 304 | 26 | 2531 | 15.36 | 929 |
| 2 | 632 | 2.99 | 357 | 27 | 2569 | 15.70 | 942 |
| 3 | 765 | 3.75 | 417 | 28 | 2606 | 16.02 | 954 |
| 4 | 890 | 4.46 | 459 | 29 | 2640 | 16.33 | 967 |
| 5 | 1009 | 5.14 | 497 | 30 | 2673 | 16.63 | 978 |
| 6 | 1121 | 5.81 | 532 | 31 | 2703 | 16.91 | 990 |
| 7 | 1228 | 6.44 | 563 | 32 | 2731 | 17.20 | 1002 |
| 8 | 1330 | 7.06 | 593 | 33 | 2758 | 17.47 | 1013 |
| 9 | 1427 | 7.66 | 620 | 34 | 2784 | 17.72 | 1023 |
| 10 | 1520 | 8.23 | 645 | 35 | 2807 | 17.98 | 1034 |
| 11 | 1608 | 8.78 | 669 | 36 | 2829 | 18.24 | 1045 |
| 12 | 1693 | 9.32 | 692 | 37 | 2851 | 18.47 | 1055 |
| 13 | 1773 | 9.85 | 714 | 38 | 2872 | 18.71 | 1065 |
| 14 | 1850 | 10.35 | 734 | 39 | 2890 | 18.94 | 1076 |
| 15 | 1924 | 10.85 | 754 | 40 | 2908 | 19.17 | 1086 |
| 16 | 1994 | 11.33 | 773 | 41 | 2926 | 19.38 | 1096 |
| 17 | 2061 | 11.79 | 791 | 42 | 2942 | 19.59 | 1106 |
| 18 | 2125 | 12.24 | 809 | 43 | 2957 | 19.81 | 1116 |
| 19 | 2185 | 12.68 | 826 | 44 | 2972 | 20.01 | 1125 |
| 20 | 2243 | 13.11 | 842 | 45 | 2985 | 20.22 | 1135 |
| 21 | 2298 | 13.51 | 858 | 46 | 2997 | 20.42 | 1145 |
| 22 | 2350 | 13.91 | 873 | 47 | 3012 | 20.61 | 1155 |
| 23 | 2399 | 14.29 | 888 | 48 | 3024 | 20.82 | 1165 |
| 24 | 2445 | 15.67 | 902 | 49 | 3037 | 21.02 | 1175 |
| 25 | 2489 | 15.03 | 916 | 50 | 3049 | 21.21 | 1185 |

Tab.7.15 Ozon/Distickstoffpentoxid/Xenon-Detonation

berechnet für eine N_2O_5 -Konzentration von 0.5 Mol-%

bezogen auf das Trägergas

und für die Reaktion $N_2O_5 + O_3 \rightarrow 2NO_2 + 2O_2$ (Forts.)

| X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_0^{CJ} [m/s] | X_{O_3} [%] | T_{CJ} [K] | p_{CJ}/p_0 | D_0^{CJ} [m/s] |
|---------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 51 | 3060 | 21.41 | 1195 | 76 | 3244 | 25.71 | 1470 |
| 52 | 3071 | 21.59 | 1205 | 77 | 3247 | 25.88 | 1483 |
| 53 | 3082 | 21.78 | 1215 | 78 | 3253 | 26.04 | 1496 |
| 54 | 3092 | 21.96 | 1225 | 79 | 3258 | 26.19 | 1509 |
| 55 | 3102 | 22.16 | 1235 | 80 | 3263 | 26.35 | 1522 |
| 56 | 3111 | 22.35 | 1246 | 81 | 3268 | 26.50 | 1536 |
| 57 | 3121 | 22.52 | 1256 | 82 | 3271 | 26.67 | 1550 |
| 58 | 3128 | 22.71 | 1266 | 83 | 3274 | 26.83 | 1564 |
| 59 | 3137 | 22.88 | 1277 | 84 | 3278 | 26.99 | 1578 |
| 60 | 3145 | 23.06 | 1287 | 85 | 3281 | 27.15 | 1592 |
| 61 | 3152 | 23.23 | 1298 | 86 | 3285 | 27.30 | 1607 |
| 62 | 3159 | 23.41 | 1309 | 87 | 3291 | 27.45 | 1622 |
| 63 | 3168 | 23.57 | 1319 | 88 | 3295 | 27.60 | 1637 |
| 64 | 3174 | 23.75 | 1330 | 89 | 3298 | 27.76 | 1652 |
| 65 | 3181 | 23.91 | 1341 | 90 | 3300 | 27.92 | 1668 |
| 66 | 3189 | 24.08 | 1352 | 91 | 3306 | 28.07 | 1784 |
| 67 | 3193 | 24.25 | 1364 | 92 | 3309 | 28.23 | 1701 |
| 68 | 3199 | 24.42 | 1375 | 93 | 3311 | 28.39 | 1718 |
| 69 | 3205 | 24.59 | 1386 | 94 | 3316 | 28.53 | 1734 |
| 70 | 3213 | 24.74 | 1397 | 95 | 3318 | 28.69 | 1752 |
| 71 | 3218 | 24.90 | 1409 | 96 | 3320 | 28.86 | 1770 |
| 72 | 3223 | 25.07 | 1421 | 97 | 3324 | 29.00 | 1788 |
| 73 | 3228 | 25.24 | 1433 | 98 | 3326 | 29.17 | 1807 |
| 74 | 3234 | 25.39 | 1445 | 99 | 3330 | 29.31 | 1826 |
| 75 | 3238 | 25.56 | 1458 | 100 | 3331 | 29.48 | 1845 |

7.3 Adiabatische Explosion verschiedener Ozon/Trägergas-Gemische

Tab.7.16 Adiabatische Explosion verschiedener Ozon/Trägergas-Gemische
berechnet nach dem Modell von Flamm und Mache

| Träger- gas | Sauerstoff | | Stickstoff | | Edelgase | | |
|----------------|---------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | X_{O_3} [%] | p_e/p_o | T_e [K] | p_e/p_o | T_e [K] | p_e/p_o | T_e [K] |
| 1 | | 1.20 | 358 | 1.22 | 363 | 1.36 | 401 |
| 2 | | 1.40 | 413 | 1.44 | 422 | 1.72 | 497 |
| 3 | | 1.60 | 465 | 1.66 | 481 | 2.09 | 590 |
| 4 | | 1.80 | 516 | 1.87 | 535 | 2.46 | 680 |
| 5 | | 2.00 | 567 | 2.09 | 589 | 2.84 | 768 |
| 6 | | 2.18 | 612 | 2.28 | 636 | 3.18 | 845 |
| 7 | | 2.37 | 657 | 2.48 | 683 | 3.52 | 921 |
| 8 | | 2.56 | 702 | 2.67 | 729 | 3.87 | 996 |
| 9 | | 2.75 | 747 | 2.87 | 775 | 4.23 | 1071 |
| 10 | | 2.94 | 791 | 3.07 | 821 | 4.58 | 1146 |
| 11 | | 3.12 | 833 | 3.26 | 863 | 4.89 | 1206 |
| 12 | | 3.31 | 875 | 3.44 | 904 | 5.19 | 1267 |
| 13 | | 3.49 | 915 | 3.63 | 946 | 5.50 | 1328 |
| 14 | | 3.68 | 957 | 3.82 | 988 | 5.81 | 1388 |
| 15 | | 3.87 | 998 | 4.02 | 1029 | 6.12 | 1448 |
| 16 | | 4.04 | 1035 | 4.19 | 1066 | 6.38 | 1496 |
| 17 | | 4.21 | 1070 | 4.37 | 1102 | 6.64 | 1545 |
| 18 | | 4.39 | 1106 | 4.54 | 1138 | 6.91 | 1593 |
| 19 | | 4.56 | 1142 | 4.72 | 1173 | 7.17 | 1641 |
| 20 | | 4.74 | 1178 | 4.89 | 1209 | 7.44 | 1689 |
| 21 | | 4.90 | 1209 | 5.05 | 1240 | 7.66 | 1728 |
| 22 | | 5.06 | 1240 | 5.21 | 1271 | 7.89 | 1768 |
| 23 | | 5.21 | 1270 | 5.37 | 1302 | 8.12 | 1807 |
| 24 | | 5.37 | 1301 | 5.54 | 1332 | 8.35 | 1845 |
| 25 | | 5.54 | 1332 | 5.70 | 1363 | 8.58 | 1884 |

Tab.7.16 Adiabatische Explosion verschiedener Ozon/Trägergas-Gemische
berechnet nach dem Modell von Flamm und Mache (Forts.)

| Träger- gas | Sauerstoff | | Stickstoff | | Edelgase | |
|----------------|---------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| | X_{O_3} [%] | p_e/p_o | T_e [K] | p_e/p_o | T_e [K] | p_e/p_o |
| 26 | 5.68 | 1359 | 5.86 | 1392 | 8.77 | 1916 |
| 27 | 5.83 | 1386 | 6.02 | 1422 | 8.97 | 1948 |
| 28 | 5.98 | 1412 | 6.18 | 1451 | 9.17 | 1980 |
| 29 | 6.13 | 1439 | 6.34 | 1481 | 9.37 | 2012 |
| 30 | 6.28 | 1465 | 6.51 | 1510 | 9.57 | 2043 |
| 31 | 6.42 | 1490 | 6.66 | 1536 | 9.73 | 2068 |
| 32 | 6.56 | 1514 | 6.80 | 1561 | 9.90 | 2093 |
| 33 | 6.71 | 1539 | 6.95 | 1586 | 10.06 | 2117 |
| 34 | 6.86 | 1564 | 7.10 | 1611 | 10.22 | 2142 |
| 35 | 7.00 | 1589 | 7.25 | 1636 | 10.39 | 2166 |
| 36 | 7.14 | 1611 | 7.38 | 1658 | 10.56 | 2191 |
| 37 | 7.28 | 1634 | 7.52 | 1679 | 10.73 | 2216 |
| 38 | 7.42 | 1656 | 7.66 | 1701 | 10.90 | 2241 |
| 39 | 7.56 | 1678 | 7.80 | 1724 | 11.07 | 2265 |
| 40 | 7.70 | 1700 | 7.94 | 1746 | 11.23 | 2290 |
| 41 | 7.84 | 1722 | 8.07 | 1765 | 11.38 | 2309 |
| 42 | 7.98 | 1743 | 8.20 | 1784 | 11.52 | 2329 |
| 43 | 8.12 | 1765 | 8.33 | 1803 | 11.66 | 2348 |
| 44 | 8.26 | 1787 | 8.45 | 1821 | 11.80 | 2367 |
| 45 | 8.40 | 1808 | 8.58 | 1839 | 11.94 | 2386 |
| 46 | 8.53 | 1828 | 8.70 | 1857 | 12.09 | 2405 |
| 47 | 8.66 | 1847 | 8.82 | 1874 | 12.23 | 2424 |
| 48 | 8.80 | 1866 | 8.95 | 1891 | 12.37 | 2443 |
| 49 | 8.93 | 1885 | 9.07 | 1909 | 12.51 | 2461 |
| 50 | 9.07 | 1905 | 9.20 | 1926 | 12.65 | 2480 |

7.4 Ergebnisse der Versuche zur Ozonexplosion

Tab.7.17 Explosion von Ozon/Sauerstoff-Gemischen in einer Kugel
von 124 mm Durchmesser

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|----------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 14.6 ± 0.2 | 228 | 245 | 718 ± 51 | 3.15 ± 0.22 | 98.1 |
| 7.0 ± 0.1 | 444 | 450 | 479 ± 5 | 1.08 ± 0.04 | 39.7 |
| 9.1 ± 0.1 | 452 | 459 | 523 ± 51 | 1.16 ± 0.11 | 32.2 |
| 9.6 ± 0.1 | 456.5 | 468 | 578 ± 51 | 1.27 ± 0.11 | 47.2 |
| 9.9 ± 0.1 | 444 | 456 | 600 ± 51 | 1.35 ± 0.12 | 50.4 |
| 10.0 ± 0.1 | 452 | 476 | 1085 ± 51 | 2.30 ± 0.12 | 95.4 |
| 11.1 ± 0.1 | 455.5 | 481 | 1075 ± 52 | 2.36 ± 0.12 | 97.8 |
| 13.1 ± 0.1 | 445 | 475 | 1304 ± 53 | 2.93 ± 0.12 | 97.3 |
| 15.1 ± 0.1 | 441 | 475 | 1442 ± 54 | 3.27 ± 0.12 | 98.6 |
| 17.5 ± 0.2 | 450 | 490 | 1741 ± 56 | 3.87 ± 0.13 | 99.3 |
| 18.1 ± 0.2 | 451 | 492 | 1665 ± 55 | 3.69 ± 0.12 | 99.3 |
| 20.8 ± 0.2 | 443 | 491 | 1879 ± 56 | 4.24 ± 0.13 | 99.3 |

Tab.7.18 Explosion von Ozon/Sauerstoff-Gemischen in einem
500 × 75 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|----------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 12.0 ± 0.2 | 200 | 212 | 362 ± 50 | 1.81 ± 0.25 | 97.7 |
| 13.5 ± 0.2 | 202 | 217 | 445 ± 50 | 2.20 ± 0.25 | 98.3 |
| 13.6 ± 0.2 | 200 | 215 | 443 ± 50 | 2.21 ± 0.25 | 98.3 |
| 18.3 ± 0.2 | 210 | 221.5 | 605 ± 50 | 3.01 ± 0.25 | 99.4 |
| 23.7 ± 0.2 | 199.5 | 224 | 756 ± 51 | 3.79 ± 0.25 | 99.4 |
| 12.8 ± 0.1 | 299 | 319 | 643 ± 51 | 2.15 ± 0.17 | 98.6 |
| 14.9 ± 0.1 | 301 | 324.5 | 776 ± 51 | 2.58 ± 0.17 | 99.5 |
| 20.0 ± 0.2 | 300.5 | 332 | 1018 ± 52 | 3.39 ± 0.17 | 99.6 |
| 23.4 ± 0.2 | 301 | 337 | 1206 ± 53 | 4.01 ± 0.18 | 99.5 |
| 13.5 ± 0.1 | 427 | 456 | 1039 ± 52 | 2.43 ± 0.12 | 99.3 |
| 18.9 ± 0.1 | 428 | 470 | 1469 ± 54 | 3.34 ± 0.13 | 99.4 |

In Versuchen, die mit einem * gekennzeichnet sind,
wurden Leuchterscheinung und Geräusentwicklung beobachtet.

Tab.7.19 Explosion von Ozon/Sauerstoff-Gemischen in einem
500×50 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 18.0 ± 0.7 | 35 | 36 | 35 ± 14 | 1.00 ± 0.00 | 36.5 |
| 18.7 ± 0.7 | 35 | 38 | 35 ± 14 | 1.00 ± 0.00 | 88.2 |
| 19.0 ± 0.9 | 30 | 31.5 | 30 ± 14 | 1.00 ± 0.00 | 41.2 |
| 19.2 ± 0.7 | 35 | 38 | 40 ± 14 | 1.15 ± 0.41 | 90.8 |
| 19.9 ± 0.7 | 35 | 38.5 | 45 ± 14 | 1.29 ± 0.41 | 92.3 |
| 20.3 ± 0.7 | 35 | 38.5 | 45 ± 14 | 1.29 ± 0.41 | 96.8 |
| 21.6 ± 0.7 | 40 | 44.5 | 60 ± 14 | 1.51 ± 0.36 | 97.4 |
| 22.6 ± 0.7 | 40 | 45 | 71 ± 14 | 1.76 ± 0.36 | 97.5 |
| 24.1 ± 0.5 | 51 | 57 | 102 ± 14 | 2.00 ± 0.28 | 98.8 |
| 26.5 ± 0.6 | 49 | 56 | 110 ± 14 | 2.24 ± 0.29 | 98.9 |
| 16.8 ± 0.4 | 63 | 68 | 94 ± 23 | 1.49 ± 0.36 | 96.3 |
| 17.4 ± 0.5 | 55 | 60 | 81 ± 24 | 1.47 ± 0.41 | 95.2 |
| 17.6 ± 0.4 | 61 | 66 | 92 ± 23 | 1.51 ± 0.37 | 96.4 |
| 18.1 ± 0.5 | 56 | 61.5 | 87 ± 23 | 1.55 ± 0.41 | 97.0 |
| 18.3 ± 0.5 | 55 | 61 | 96 ± 23 | 1.75 ± 0.41 | 96.2 |
| 15.4 ± 0.4 | 75 | 81 | 96 ± 23 | 1.27 ± 0.30 | 93.2 |
| 14.3 ± 0.3 | 105 | 110 | 146 ± 23 | 1.39 ± 0.22 | 95.2 |
| 18.5 ± 0.3 | 121 | 132 | 255 ± 23 | 2.11 ± 0.19 | 98.3 |
| 19.0 ± 0.3 | 111 | 122 | 235 ± 23 | 2.11 ± 0.21 | 97.8 |
| 15.9 ± 0.2 | 150 | 161 | 284 ± 23 | 1.89 ± 0.16 | 97.7 |
| 17.1 ± 0.2 | 180 | 195 | 417 ± 24 | 2.32 ± 0.13 | 97.5 |
| 11.0 ± 0.1 | 225 | 228 | 240 ± 15 | 1.07 ± 0.07 | 10.0 |
| 11.9 ± 0.2 | 222 | 226 | 258 ± 15 | 1.16 ± 0.07 | 38.0 |
| 12.8 ± 0.2 | 219.5 | 233 | 343 ± 16 | 1.56 ± 0.07 | 96.4 |
| 13.5 ± 0.2 | 221 | 235 | 375 ± 16 | 1.70 ± 0.07 | 96.8 |
| 14.4 ± 0.2 | 220 | 236 | 415 ± 16 | 1.89 ± 0.07 | 97.8 |
| 14.9 ± 0.2 | 218 | 234 | 428 ± 16 | 1.96 ± 0.07 | 96.6 |
| 15.2 ± 0.2 | 220 | 237 | 435 ± 16 | 1.98 ± 0.07 | 97.7 |
| 15.6 ± 0.2 | 219 | 236 | 475 ± 16 | 2.17 ± 0.08 | 97.1 |
| 17.4 ± 0.2 | 220 | 239 | 538 ± 16 | 2.45 ± 0.08 | 97.4 |
| 18.4 ± 0.2 | 259 | 284 | 671 ± 25 | 2.59 ± 0.10 | 98.1 |
| 19.6 ± 0.2 | 223 | 245 | 594 ± 25 | 2.66 ± 0.11 | 97.9 |
| 19.9 ± 0.2 | 241 | 264 | 653 ± 25 | 2.71 ± 0.10 | 98.5 |
| 22.6 ± 0.2 | 221 | 246 | 734 ± 18 | 3.32 ± 0.08 | 99.3 |
| 26.2 ± 0.2 | 222 | 251 | 878 ± 19 | 3.96 ± 0.09 | 99.2 |
| 38.3 ± 0.5 * | 218 | 261 | 1346 ± 24 | 6.18 ± 0.11 | 99.9 * |
| 45.8 ± 0.5 * | 219 | 270 | 1778 ± 29 | 8.12 ± 0.14 | 99.9 * |
| 48.5 ± 0.5 * | 220 | 274 | 1840 ± 29 | 8.37 ± 0.14 | 99.9 * |

Tab.7.19 Explosion von Ozon/Sauerstoff-Gemischen in einem
500 × 50 mm Rohr (Forts.)

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 9.3 ± 0.1 | 436 | 439 | 446 ± 25 | 1.02 ± 0.06 | 11.7 |
| 9.7 ± 0.1 | 449 | 453 | 459 ± 25 | 1.02 ± 0.06 | 19.3 |
| 10.4 ± 0.1 | 427 | 432 | 437 ± 25 | 1.02 ± 0.06 | 23.3 |
| 11.3 ± 0.1 | 422 | 430 | 474 ± 25 | 1.12 ± 0.06 | 27.2 |
| 11.9 ± 0.1 | 456 | 483 | 796 ± 26 | 1.75 ± 0.06 | 97.1 |
| 12.3 ± 0.1 | 451 | 478 | 812 ± 27 | 1.80 ± 0.06 | 97.8 |
| 12.9 ± 0.1 | 435 | 463 | 837 ± 27 | 1.92 ± 0.06 | 97.9 |
| 14.4 ± 0.1 | 403 | 432 | 872 ± 27 | 2.16 ± 0.07 | 98.2 |
| 15.5 ± 0.1 | 419 | 452 | 996 ± 27 | 2.38 ± 0.07 | 98.9 |
| 19.8 ± 0.2 | 426 | 469 | 1313 ± 30 | 3.08 ± 0.07 | 99.2 |
| 21.6 ± 0.3 | 427 | 474 | 1530 ± 32 | 3.58 ± 0.08 | 99.4 |
| 22.7 ± 0.3 | 435 | 485 | 1569 ± 33 | 3.61 ± 0.08 | 98.8 |
| 24.9 ± 0.3 | 452 | 507 | 1990 ± 32 | 4.40 ± 0.07 | 99.2 |
| 29.3 ± 0.3 * | 422 | 483 | 1989 ± 37 | 4.71 ± 0.09 | 99.5 * |
| 42.5 ± 0.7 * | 443 | 539 | 3192 ± 47 | 7.25 ± 0.11 | 100.0 * |
| 18.5 ± 0.2 | 499 | 546 | 1509 ± 32 | 3.02 ± 0.07 | 98.6 |
| 18.8 ± 0.2 | 482 | 527 | 1482 ± 32 | 3.07 ± 0.07 | 98.6 |
| 19.4 ± 0.2 | 501 | 550 | 1604 ± 33 | 3.20 ± 0.07 | 98.9 |
| 9.9 ± 0.1 | 1002 | 1015 | 1135 ± 26 | 1.13 ± 0.03 | 17.9 |
| 10.2 ± 0.1 | 1000 | 1045 | 1728 ± 32 | 1.73 ± 0.03 | 84.2 |
| 11.3 ± 0.1 | 999 | 1055 | 2107 ± 42 | 2.11 ± 0.04 | 98.3 |
| 12.7 ± 0.1 | 1001 | 1064 | 2324 ± 38 | 2.32 ± 0.04 | 98.0 |
| 13.7 ± 0.1 | 1002 | 1071 | 2540 ± 41 | 2.54 ± 0.04 | 98.8 |
| 15.2 ± 0.1 | 1001 | 1077 | 2878 ± 45 | 2.87 ± 0.05 | 98.6 |
| 16.4 ± 0.3 | 1005 | 1088 | 3159 ± 48 | 3.14 ± 0.05 | 99.3 |
| 19.0 ± 0.3 | 1005 | 1101 | 3620 ± 54 | 3.60 ± 0.06 | 99.1 |
| 19.4 ± 0.3 | 999 | 1097 | 3696 ± 55 | 3.69 ± 0.06 | 99.1 |
| 20.4 ± 0.3 | 997 | 1100 | 3817 ± 56 | 3.83 ± 0.06 | 99.3 |
| 23.2 ± 0.3 | 1004 | 1123 | 4419 ± 64 | 4.40 ± 0.07 | 99.6 |

Tab.7.20 Explosion von Ozon/Sauerstoff-Gemischen in einem
500 × 35 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 12.7 ± 0.4 | 66 | 67 | 66 ± 50 | 1.00 ± 0.00 | 6.4 |
| 15.3 ± 0.4 | 68.5 | 69.5 | 74 ± 50 | 1.07 ± 0.72 | 11.7 |
| 16.3 ± 0.4 | 68.5 | 69.5 | 69 ± 50 | 1.00 ± 0.00 | 11.1 |
| 18.6 ± 0.4 | 68 | 74 | 89 ± 50 | 1.32 ± 0.73 | 95.7 |

Tab.7.20 Explosion von Ozon/Sauerstoff-Gemischen in einem
500 × 35 mm Rohr (Forts.)

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 12.9 ± 0.3 | 101 | 102 | 111 ± 50 | 1.10 ± 0.49 | 13.8 |
| 15.6 ± 0.3 | 102 | 109 | 122 ± 50 | 1.20 ± 0.49 | 94.1 |
| 15.7 ± 0.3 | 102 | 110 | 132 ± 50 | 1.30 ± 0.49 | 93.7 |
| 16.7 ± 0.3 | 103 | 111 | 123 ± 50 | 1.20 ± 0.48 | 95.9 |
| 19.3 ± 0.3 | 103 | 113 | 174 ± 50 | 1.69 ± 0.48 | 96.9 |
| 13.0 ± 0.2 | 155 | 156 | 170 ± 50 | 1.10 ± 0.32 | 16.7 |
| 16.0 ± 0.2 | 153 | 165 | 214 ± 50 | 1.40 ± 0.32 | 96.8 |
| 17.0 ± 0.2 | 154 | 167.5 | 245 ± 50 | 1.60 ± 0.32 | 97.1 |
| 20.0 ± 0.2 | 155 | 171 | 320 ± 50 | 2.06 ± 0.32 | 97.5 |
| 13.3 ± 0.1 | 236 | 251 | 317 ± 50 | 1.34 ± 0.21 | 96.0 |
| 16.1 ± 0.2 | 240 | 259.5 | 422 ± 50 | 1.76 ± 0.21 | 97.2 |
| 17.3 ± 0.2 | 241 | 261 | 474 ± 50 | 1.96 ± 0.21 | 96.5 |
| 20.3 ± 0.2 | 236 | 260 | 564 ± 50 | 2.39 ± 0.21 | 97.4 |
| 13.5 ± 0.1 | 360.5 | 385 | 532 ± 50 | 1.48 ± 0.14 | 97.4 |
| 16.4 ± 0.1 | 360.5 | 390.5 | 719 ± 51 | 2.00 ± 0.14 | 97.0 |
| 17.6 ± 0.1 | 360 | 392 | 805 ± 51 | 2.24 ± 0.14 | 96.7 |
| 20.5 ± 0.2 | 358 | 395 | 985 ± 52 | 2.75 ± 0.15 | 97.1 |
| 9.0 ± 0.1 | 446 | 451.5 | 471 ± 17 | 1.06 ± 0.04 | 14.4 |
| 10.9 ± 0.1 | 450 | 464 | 470 ± 17 | 1.05 ± 0.04 | 47.1 |
| 12.2 ± 0.1 | 450 | 477 | 633 ± 18 | 1.41 ± 0.04 | 96.4 |
| 12.7 ± 0.1 | 450 | 477.5 | 643 ± 18 | 1.43 ± 0.04 | 97.4 |
| 13.0 ± 0.1 | 443.5 | 472.5 | 667 ± 19 | 1.50 ± 0.04 | 97.8 |
| 15.2 ± 0.1 | 448 | 482 | 885 ± 20 | 1.98 ± 0.05 | 97.7 |
| 15.6 ± 0.1 | 438 | 472 | 860 ± 20 | 1.96 ± 0.05 | 97.7 |
| 21.7 ± 0.3 | 446 | 495 | 1401 ± 25 | 3.14 ± 0.06 | 97.7 |
| 25.3 ± 0.3 * | 435 | 491 | 1660 ± 28 | 3.82 ± 0.07 | 98.5 * |
| 12.9 ± 0.1 | 551 | 587 | 864 ± 52 | 1.57 ± 0.10 | 97.1 |
| 13.4 ± 0.1 | 548 | 585 | 912 ± 52 | 1.66 ± 0.10 | 97.1 |
| 16.5 ± 0.2 | 550 | 595 | 1238 ± 53 | 2.25 ± 0.10 | 96.5 |
| 17.7 ± 0.2 | 548.5 | 597 | 1368 ± 54 | 2.49 ± 0.10 | 95.6 |
| 20.7 ± 0.2 | 546 | 602 | 1678 ± 55 | 3.07 ± 0.10 | 97.5 |
| 11.5 ± 0.1 | 840 | 888 | 1295 ± 54 | 1.55 ± 0.07 | 97.1 |
| 12.6 ± 0.1 | 832 | 887 | 1429 ± 55 | 1.74 ± 0.07 | 97.0 |
| 16.3 ± 0.2 | 837 | 906 | 2066 ± 58 | 2.47 ± 0.07 | 96.8 |
| 17.6 ± 0.2 | 841 | 914 | 2226 ± 60 | 2.65 ± 0.07 | 97.1 |
| 19.8 ± 0.2 | 833 | 913 | 2572 ± 62 | 3.09 ± 0.08 | 97.4 |

Tab.7.21 Explosion von Ozon/Sauerstoff-Gemischen in einem
500 × 20 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_0 [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_0 | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 12.2 ± 0.2 | 201.5 | 203.5 | 202 ± 5 | 1.00 ± 0.01 | 0.7 |
| 14.4 ± 0.2 | 201 | 204 | 226 ± 50 | 1.13 ± 0.25 | 14.9 |
| 18.7 ± 0.2 | 203 | 222 | 304 ± 50 | 1.50 ± 0.25 | 96.8 |
| 20.6 ± 0.2 | 203 | 223 | 329 ± 50 | 1.62 ± 0.25 | 96.7 |
| 24.4 ± 0.2 | 199 | 223.5 | 421 ± 50 | 2.12 ± 0.25 | 95.1 |
| 12.2 ± 0.1 | 302 | 305 | 312 ± 50 | 1.03 ± 0.17 | 1.4 |
| 14.6 ± 0.1 | 300 | 321 | 371 ± 50 | 1.24 ± 0.17 | 93.4 |
| 18.9 ± 0.2 | 301 | 329 | 493 ± 50 | 1.64 ± 0.17 | 95.2 |
| 20.8 ± 0.2 | 300.5 | 331 | 563 ± 50 | 1.87 ± 0.17 | 95.1 |
| 24.4 ± 0.2 * | 303 | 339 | 743 ± 51 | 2.45 ± 0.17 | 93.7 * |
| 11.5 ± 0.1 | 451 | 455 | 476 ± 17 | 1.06 ± 0.04 | 8.1 |
| 13.8 ± 0.1 | 451.5 | 483 | 574 ± 18 | 1.27 ± 0.04 | 96.3 |
| 15.2 ± 0.1 | 448 | 483.5 | 672 ± 19 | 1.50 ± 0.04 | 97.1 |
| 16.6 ± 0.1 | 450 | 486 | 663 ± 18 | 1.47 ± 0.04 | 96.1 |
| 17.2 ± 0.1 | 450 | 490 | 765 ± 19 | 1.70 ± 0.04 | 95.4 |
| 18.3 ± 0.2 | 451 | 491 | 786 ± 19 | 1.74 ± 0.04 | 95.8 |
| 21.3 ± 0.2 | 451 | 497 | 1010 ± 21 | 2.24 ± 0.05 | 96.0 |
| 25.5 ± 0.3 | 450 | 505 | 1243 ± 24 | 2.76 ± 0.06 | 95.0 |
| 29.6 ± 0.3 * | 452 | 515 | 1255 ± 23 | 2.78 ± 0.05 | 95.6 * |
| 35.2 ± 0.6 * | 453 | 531 | 2176 ± 34 | 4.80 ± 0.08 | 99.6 * |
| 36.4 ± 0.6 * | 452 | 534 | 2017 ± 32 | 4.46 ± 0.08 | 99.6 * |
| 12.4 ± 0.1 | 602 | 635 | 728 ± 51 | 1.21 ± 0.09 | 93.4 |
| 14.7 ± 0.2 | 602 | 646 | 905 ± 52 | 1.50 ± 0.09 | 94.7 |
| 19.0 ± 0.2 | 597 | 653 | 1244 ± 53 | 2.08 ± 0.09 | 93.3 |
| 20.8 ± 0.2 | 600 | 663 | 1419 ± 54 | 2.36 ± 0.09 | 93.3 |
| 21.6 ± 0.2 | 599 | 663 | 1534 ± 55 | 2.56 ± 0.09 | 93.5 |
| 24.6 ± 0.2 * | 600 | 673 | 1414 ± 54 | 2.36 ± 0.09 | 95.0 * |
| 12.4 ± 0.2 | 746 | 791 | 974 ± 52 | 1.30 ± 0.07 | 94.0 |
| 14.9 ± 0.2 | 748 | 803 | 1168 ± 53 | 1.56 ± 0.07 | 94.9 |
| 18.9 ± 0.2 | 753 | 823 | 1693 ± 56 | 2.25 ± 0.08 | 93.2 |
| 19.7 ± 0.2 | 750.5 | 821 | 1726 ± 56 | 2.30 ± 0.08 | 93.5 |
| 21.0 ± 0.2 | 751 | 829 | 1959 ± 57 | 2.61 ± 0.08 | 91.8 |
| 23.5 ± 0.2 * | 750 | 836 | 2267 ± 50 | 3.02 ± 0.08 | 92.6 * |

Tab.7.22 Explosion von Ozon/Stickstoff-Gemischen in einem
500 × 50 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 13.3 ± 0.6 | 47 | 48 | 47 ± 23 | 1.00 ± 0.00 | 20.6 |
| 15.0 ± 0.5 | 49 | 51.5 | 49 ± 23 | 1.00 ± 0.00 | 60.6 |
| 11.7 ± 0.5 | 56 | 58 | 56 ± 23 | 1.00 ± 0.00 | 31.9 |
| 13.1 ± 0.4 | 72 | 73 | 82 ± 23 | 1.14 ± 0.32 | 20.7 |
| 14.2 ± 0.4 | 64 | 68 | 85 ± 23 | 1.32 ± 0.36 | 90.4 |
| 14.3 ± 0.4 | 72 | 77 | 93 ± 23 | 1.29 ± 0.32 | 93.1 |
| 15.8 ± 0.3 | 80 | 86.5 | 121 ± 23 | 1.52 ± 0.29 | 96.9 |
| 13.8 ± 0.3 | 94 | 100 | 125 ± 23 | 1.33 ± 0.24 | 95.1 |
| 13.4 ± 0.3 | 111 | 118 | 163 ± 23 | 1.46 ± 0.21 | 95.2 |
| 15.3 ± 0.3 | 115 | 123 | 187 ± 23 | 1.63 ± 0.20 | 97.8 |
| 15.1 ± 0.2 | 126 | 136 | 229 ± 23 | 1.82 ± 0.18 | 97.5 |
| 12.7 ± 0.1 | 237 | 252 | 397 ± 24 | 1.67 ± 0.10 | 97.6 |
| 13.5 ± 0.1 | 273 | 291 | 520 ± 24 | 1.91 ± 0.09 | 97.9 |
| 13.8 ± 0.2 | 220 | 237 | 395 ± 24 | 1.80 ± 0.11 | 97.4 |
| 14.3 ± 0.2 | 189 | 202 | 354 ± 24 | 1.87 ± 0.13 | 98.0 |
| 15.5 ± 0.5 | 253 | 273 | 573 ± 25 | 2.26 ± 0.10 | 97.0 |
| 15.9 ± 0.2 | 229 | 248 | 523 ± 24 | 2.28 ± 0.11 | 97.9 |
| 12.0 ± 0.1 | 327 | 346 | 554 ± 25 | 1.69 ± 0.08 | 97.6 |
| 16.5 ± 0.1 | 350 | 379 | 907 ± 27 | 2.59 ± 0.08 | 98.1 |
| 7.4 ± 0.1 | 448 | 452 | 448 ± 25 | 1.00 ± 0.00 | 8.6 |
| 7.8 ± 0.1 | 448 | 452 | 448 ± 25 | 1.00 ± 0.00 | 7.1 |
| 9.5 ± 0.1 | 458 | 467 | 468 ± 25 | 1.02 ± 0.06 | 28.3 |
| 10.5 ± 0.1 | 448 | 455 | 479 ± 25 | 1.07 ± 0.06 | 21.0 |
| 10.7 ± 0.1 | 452 | 463 | 535 ± 25 | 1.18 ± 0.06 | 39.0 |
| 10.9 ± 0.1 | 448 | 471 | 778 ± 26 | 1.74 ± 0.06 | 94.6 |
| 10.9 ± 0.1 | 452 | 475 | 772 ± 26 | 1.71 ± 0.06 | 94.5 |
| 11.6 ± 0.1 | 447 | 473 | 808 ± 26 | 1.81 ± 0.06 | 97.2 |
| 12.8 ± 0.1 | 447 | 476 | 911 ± 27 | 2.04 ± 0.06 | 97.5 |
| 13.1 ± 0.1 | 455 | 474 | 919 ± 27 | 2.07 ± 0.06 | 97.7 |
| 13.2 ± 0.1 | 447 | 477 | 921 ± 27 | 2.06 ± 0.06 | 98.1 |
| 14.2 ± 0.1 | 456 | 488 | 1075 ± 28 | 2.36 ± 0.06 | 98.3 |
| 16.0 ± 0.1 | 458 | 494 | 1200 ± 29 | 2.62 ± 0.07 | 98.4 |
| 16.6 ± 0.1 | 447 | 484 | 1251 ± 30 | 2.80 ± 0.07 | 98.6 |
| 17.2 ± 0.1 | 448 | 487 | 1324 ± 30 | 2.96 ± 0.07 | 99.2 |
| 19.9 ± 0.2 | 453 | 500 | 1556 ± 32 | 3.44 ± 0.07 | 99.5 |
| 22.8 ± 0.3 | 448 | 498 | 1768 ± 34 | 3.95 ± 0.08 | 98.7 |
| 38.5 ± 0.6 * | 450 | 519 | 3168 ± 46 | 7.04 ± 0.11 | 99.2 * |

Tab.7.23 Explosion von Ozon/Dichlordifluormethan-Gemischen in einem
500 × 50 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 14.3 ± 0.1 | 452 | 469 | 473 ± 25 | 1.05 ± 0.06 | 69.7 |
| 15.8 ± 0.1 | 439 | 458 | 449 ± 25 | 1.02 ± 0.06 | 43.7 |
| 20.1 ± 0.2 | 448 | 463 | 520 ± 25 | 1.16 ± 0.06 | 31.8 |
| 21.2 ± 0.3 | 443 | 464 | 536 ± 25 | 1.21 ± 0.06 | 49.4 |
| 22.0 ± 0.3 | 451 | 481 | 585 ± 25 | 1.30 ± 0.06 | 58.8 |
| 22.4 ± 0.3 | 442 | 474 | 612 ± 25 | 1.38 ± 0.06 | 64.2 |
| 22.7 ± 0.3 | 452 | 483 | 672 ± 25 | 1.39 ± 0.06 | 59.9 |
| 22.7 ± 0.3 | 430 | 460 | 585 ± 25 | 1.36 ± 0.06 | 60.8 |
| 22.8 ± 0.3 | 446 | 478 | 611 ± 25 | 1.37 ± 0.06 | 63.6 |
| 23.8 ± 0.3 | 431 | 465 | 642 ± 26 | 1.49 ± 0.06 | 69.5 |
| 24.0 ± 0.3 | 429 | 475 | 733 ± 26 | 1.71 ± 0.06 | 87.0 |
| 24.5 ± 0.3 | 432 | 482 | 783 ± 26 | 1.81 ± 0.06 | 94.8 |
| 25.0 ± 0.3 | 446 | 504 | 910 ± 27 | 2.04 ± 0.06 | 98.0 |
| 25.9 ± 0.3 | 429 | 485 | 893 ± 27 | 2.08 ± 0.06 | 99.0 |
| 26.0 ± 0.3 | 451 | 512 | 936 ± 27 | 2.07 ± 0.06 | 98.0 |
| 26.4 ± 0.3 | 434 | 493 | 908 ± 27 | 2.09 ± 0.06 | 99.0 |
| 29.8 ± 0.3 | 438 | 506 | 1098 ± 28 | 2.51 ± 0.07 | 98.9 |
| 31.1 ± 0.3 | 443 | 514 | 1154 ± 29 | 2.61 ± 0.07 | 98.5 |
| 32.2 ± 0.3 | 441 | 516 | 1225 ± 30 | 2.78 ± 0.07 | 99.3 |

Tab.7.24 Explosion von Ozon/Helium-Gemischen in einem
500 × 50 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 6.8 ± 0.1 | 450 | 454 | 460 ± 17 | 1.02 ± 0.04 | 12.8 |
| 7.9 ± 0.1 | 449 | 451 | 459 ± 17 | 1.02 ± 0.04 | 6.8 |
| 8.8 ± 0.1 | 450 | 456 | 486 ± 18 | 1.08 ± 0.04 | 25.3 |
| 9.0 ± 0.1 | 451 | 471 | 754 ± 20 | 1.67 ± 0.04 | 92.9 |
| 10.1 ± 0.1 | 448 | 471 | 935 ± 21 | 2.09 ± 0.05 | 96.2 |
| 10.4 ± 0.1 | 450 | 473 | 963 ± 21 | 2.14 ± 0.05 | 96.3 |
| 11.1 ± 0.1 | 450 | 475 | 1014 ± 22 | 2.25 ± 0.05 | 96.2 |
| 11.4 ± 0.1 | 451 | 477 | 1118 ± 22 | 2.48 ± 0.05 | 97.9 |
| 13.2 ± 0.2 | 450 | 480 | 1342 ± 25 | 2.98 ± 0.06 | 98.2 |
| 14.6 ± 0.2 | 451 | 485 | 1466 ± 26 | 3.25 ± 0.06 | 98.6 |
| 15.2 ± 0.2 | 449 | 485 | 1505 ± 27 | 3.35 ± 0.06 | 98.0 |
| 20.2 ± 0.4 * | 452 | 499 | 2072 ± 33 | 4.59 ± 0.08 | 99.1 * |
| 22.3 ± 0.4 * | 450 | 503 | 2440 ± 39 | 5.42 ± 0.09 | 99.9 * |
| 24.3 ± 0.6 * | 450 | 505 | 2553 ± 39 | 5.67 ± 0.09 | 99.7 * |

Tab.7.25 Explosion von Ozon/Argon-Gemischen in einer Kugel
von 124 mm Durchmesser

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|------------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 10.6 ± 0.2 | 221 | 233 | 807 ± 51 | 3.65 ± 0.23 | 98.3 |
| 13.9 ± 0.2 * | 272 | 291 | 1245 ± 52 | 4.58 ± 0.20 | 98.6 * |
| 4.6 ± 0.1 | 444 | 446 | 475 ± 5 | 1.07 ± 0.04 | 19.1 |
| 5.3 ± 0.1 | 444 | 447 | 495 ± 10 | 1.11 ± 0.08 | 28.4 |
| 5.6 ± 0.1 | 435 | 442.5 | 490 ± 10 | 1.13 ± 0.08 | 56.1 |
| 7.4 ± 0.1 | 448 | 458 | 665 ± 51 | 1.48 ± 0.11 | 63.4 |
| 7.5 ± 0.1 | 445 | 455 | 685 ± 51 | 1.54 ± 0.12 | 60.9 |
| 7.6 ± 0.1 | 451 | 467 | 1088 ± 52 | 2.41 ± 0.12 | 96.2 |
| 8.7 ± 0.1 | 445 | 464 | 1284 ± 53 | 2.89 ± 0.12 | 98.4 |
| 9.5 ± 0.1 | 456 | 476 | 1437 ± 54 | 3.15 ± 0.12 | 97.2 |
| 11.0 ± 0.1 | 448 | 472 | 1730 ± 55 | 3.86 ± 0.13 | 99.2 |
| 13.8 ± 0.1 * | 448.5 | 479 | 2016 ± 55 | 4.49 ± 0.15 | 97.8 * |
| 16.1 ± 0.1 * | 440 | 475 | 2223 ± 59 | 5.05 ± 0.14 | 99.6 * |

Tab.7.26 Explosion von Ozon/Argon-Gemischen in einem
500 × 50 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_0 [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_0 | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 11.8 ± 0.7 | 35 | 35 | 35 ± 23 | 1.00 ± 0.00 | 16.3 |
| 12.6 ± 0.5 | 56.5 | 56.5 | 57 ± 23 | 1.00 ± 0.00 | 2.4 |
| 12.7 ± 0.4 | 69 | 73.5 | 100 ± 23 | 1.45 ± 0.33 | 96.4 |
| 11.7 ± 0.3 | 95 | 100 | 157 ± 23 | 1.65 ± 0.24 | 97.1 |
| 13.1 ± 0.3 | 90 | 96.5 | 162 ± 23 | 1.80 ± 0.25 | 97.3 |
| 12.1 ± 0.3 | 100 | 106 | 172 ± 23 | 1.72 ± 0.23 | 97.4 |
| 13.0 ± 0.3 | 113 | 120 | 247 ± 23 | 2.19 ± 0.21 | 97.3 |
| 8.4 ± 0.2 | 134 | 135 | 134 ± 23 | 1.00 ± 0.00 | 15.6 |
| 12.9 ± 0.2 | 137 | 145 | 312 ± 23 | 2.28 ± 0.17 | 97.7 |
| 12.1 ± 0.2 | 150 | 159 | 310 ± 23 | 2.07 ± 0.16 | 98.2 |
| 13.1 ± 0.2 | 200 | 213 | 499 ± 24 | 2.49 ± 0.12 | 98.2 |
| 9.9 ± 0.1 | 224 | 235 | 399 ± 24 | 1.78 ± 0.11 | 97.5 |
| 10.6 ± 0.1 | 225 | 237 | 447 ± 24 | 1.99 ± 0.11 | 97.6 |
| 11.4 ± 0.1 | 225 | 238 | 514 ± 24 | 2.28 ± 0.11 | 97.2 |
| 12.5 ± 0.1 | 224 | 239 | 564 ± 24 | 2.52 ± 0.11 | 97.5 |
| 13.4 ± 0.2 | 224 | 239 | 616 ± 25 | 2.75 ± 0.11 | 97.6 |
| 8.9 ± 0.1 | 300 | 313 | 511 ± 24 | 1.70 ± 0.08 | 97.6 |
| 12.5 ± 0.1 | 313 | 333 | 870 ± 26 | 2.78 ± 0.09 | 98.0 |
| 13.7 ± 0.1 | 308 | 329 | 932 ± 27 | 3.03 ± 0.09 | 98.3 |
| 6.6 ± 0.1 | 449 | 451 | 459 ± 25 | 1.02 ± 0.06 | 2.4 |
| 7.7 ± 0.1 | 447 | 451 | 478 ± 25 | 1.07 ± 0.06 | 14.9 |
| 7.8 ± 0.1 | 448 | 453 | 489 ± 25 | 1.09 ± 0.06 | 20.6 |
| 8.0 ± 0.1 | 448 | 466 | 809 ± 27 | 1.81 ± 0.06 | 93.4 |
| 8.1 ± 0.1 | 447 | 465 | 804 ± 26 | 1.79 ± 0.06 | 94.2 |
| 9.0 ± 0.1 | 449 | 469 | 923 ± 27 | 2.06 ± 0.06 | 96.4 |
| 10.0 ± 0.1 | 449 | 472 | 1006 ± 28 | 2.24 ± 0.06 | 97.5 |
| 10.6 ± 0.1 | 449 | 473 | 1130 ± 29 | 2.52 ± 0.07 | 97.6 |
| 11.7 ± 0.1 | 451 | 479 | 1255 ± 30 | 2.78 ± 0.07 | 98.5 |
| 12.1 ± 0.1 | 448 | 476 | 1293 ± 30 | 2.89 ± 0.07 | 98.5 |
| 13.1 ± 0.1 | 450 | 480 | 1430 ± 31 | 3.18 ± 0.07 | 98.5 |
| 13.5 ± 0.1 | 447 | 479 | 1530 ± 32 | 3.42 ± 0.07 | 99.5 |
| 13.9 ± 0.1 | 450 | 483 | 1605 ± 33 | 3.57 ± 0.08 | 99.5 |
| 14.5 ± 0.1 | 449 | 483 | 1676 ± 33 | 3.73 ± 0.08 | 99.5 |
| 15.5 ± 0.2 | 441 | 476 | 1668 ± 33 | 3.78 ± 0.08 | 98.9 |
| 16.1 ± 0.1 * | 449 | 486 | 1872 ± 35 | 4.17 ± 0.08 | 99.2 * |
| 16.4 ± 0.2 | 450 | 487 | 1754 ± 34 | 3.90 ± 0.08 | 99.9 |
| 18.8 ± 0.6 * | 440 | 480 | 2383 ± 41 | 5.42 ± 0.10 | 99.6 * |
| 19.4 ± 0.6 * | 447 | 492 | 2777 ± 46 | 6.21 ± 0.11 | 99.9 * |
| 19.7 ± 0.6 * | 454 | 503 | 2712 ± 44 | 5.97 ± 0.10 | 99.8 * |

Tab.7.27 Explosion von Ozon/Argon-Gemischen in einem
500 × 35 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 7.0 ± 0.1 | 200.5 | 204 | 216 ± 50 | 1.08 ± 0.25 | 12.2 |
| 9.6 ± 0.1 | 200 | 206 | 240 ± 50 | 1.20 ± 0.25 | 40.6 |
| 11.0 ± 0.1 | 201 | 212 | 272 ± 50 | 1.35 ± 0.25 | 96.4 |
| 12.5 ± 0.2 | 200 | 213 | 342 ± 50 | 1.71 ± 0.25 | 97.2 |
| 13.6 ± 0.2 | 200 | 214 | 362 ± 50 | 1.81 ± 0.25 | 97.4 |
| 14.1 ± 0.2 | 201 | 215 | 423 ± 50 | 2.11 ± 0.25 | 97.5 |
| 16.8 ± 0.2 | 201 | 218 | 519 ± 50 | 2.58 ± 0.25 | 96.8 |
| 7.2 ± 0.1 | 300 | 304 | 310 ± 50 | 1.03 ± 0.17 | 20.7 |
| 9.6 ± 0.1 | 300 | 314 | 401 ± 50 | 1.34 ± 0.17 | 97.0 |
| 9.6 ± 0.1 | 301.5 | 316 | 418 ± 50 | 1.39 ± 0.17 | 95.9 |
| 11.1 ± 0.1 | 301 | 318 | 503 ± 50 | 1.67 ± 0.17 | 97.6 |
| 12.9 ± 0.1 | 300 | 319 | 613 ± 50 | 2.04 ± 0.17 | 96.7 |
| 13.9 ± 0.1 | 300 | 321 | 644 ± 51 | 2.15 ± 0.17 | 96.3 |
| 14.1 ± 0.1 | 302 | 324 | 747 ± 51 | 2.47 ± 0.17 | 97.6 |
| 17.1 ± 0.1 | 300 | 326 | 907 ± 51 | 3.02 ± 0.17 | 96.4 |
| 9.8 ± 0.1 | 451 | 473 | 734 ± 51 | 1.63 ± 0.11 | 96.0 |
| 11.2 ± 0.1 | 450 | 475 | 895 ± 52 | 1.99 ± 0.11 | 96.9 |
| 12.6 ± 0.1 | 450 | 479 | 1072 ± 52 | 2.38 ± 0.12 | 96.8 |
| 13.9 ± 0.1 | 450.5 | 482 | 1128 ± 52 | 2.50 ± 0.12 | 96.8 |
| 14.5 ± 0.1 | 450 | 483 | 1279 ± 53 | 2.84 ± 0.12 | 96.2 |
| 17.4 ± 0.1 | 450 | 490 | 1552 ± 54 | 3.45 ± 0.12 | 97.0 |
| 8.6 ± 0.1 | 600 | 621 | 853 ± 52 | 1.42 ± 0.09 | 62.3 |
| 9.3 ± 0.1 | 597 | 625 | 931 ± 52 | 1.56 ± 0.09 | 96.7 |
| 13.3 ± 0.1 | 598 | 638 | 1609 ± 55 | 2.69 ± 0.09 | 95.7 |
| 13.9 ± 0.2 | 601 | 643 | 1733 ± 55 | 2.88 ± 0.09 | 96.3 |
| 17.8 ± 0.2 * | 600 | 654 | 2273 ± 59 | 3.79 ± 0.10 | 97.2 * |
| 20.0 ± 0.2 * | 600 | 661 | 2329 ± 60 | 3.88 ± 0.10 | 97.3 * |
| 9.9 ± 0.1 | 750 | 788 | 1468 ± 54 | 1.96 ± 0.07 | 96.4 |
| 11.3 ± 0.1 | 751 | 794 | 1818 ± 57 | 2.42 ± 0.08 | 97.1 |
| 12.9 ± 0.1 | 750 | 798 | 2145 ± 58 | 2.86 ± 0.08 | 96.6 |
| 13.8 ± 0.1 * | 756 | 807 | 2151 ± 58 | 2.85 ± 0.08 | 96.9 * |
| 14.8 ± 0.2 | 751 | 808 | 2530 ± 61 | 3.37 ± 0.08 | 97.2 |
| 17.4 ± 0.2 * | 750 | 816 | 2994 ± 65 | 3.99 ± 0.08 | 97.0 * |

Tab.7.28 Explosion von Ozon/Argon-Gemischen in einem
500 × 20 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 8.3 ± 0.1 | 200 | 202 | 205 ± 50 | 1.03 ± 0.25 | 12.9 |
| 10.9 ± 0.1 | 200 | 209.5 | 225 ± 50 | 1.13 ± 0.25 | 92.7 |
| 12.3 ± 0.2 | 200 | 212.5 | 251 ± 50 | 1.25 ± 0.25 | 94.3 |
| 14.9 ± 0.2 | 201 | 216 | 317 ± 50 | 1.58 ± 0.25 | 92.2 |
| 16.8 ± 0.2 | 201 | 218 | 373 ± 50 | 1.86 ± 0.25 | 92.2 |
| 17.6 ± 0.2 | 201 | 219 | 413 ± 50 | 2.06 ± 0.25 | 92.9 |
| 21.8 ± 0.2 | 197.5 | 219 | 536 ± 50 | 2.71 ± 0.25 | 92.8 |
| 24.4 ± 0.2 | 201.5 | 225 | 586 ± 50 | 2.91 ± 0.25 | 92.9 |
| 8.3 ± 0.1 | 300 | 302 | 320 ± 50 | 1.07 ± 0.17 | 11.3 |
| 11.2 ± 0.1 | 301 | 318 | 412 ± 50 | 1.37 ± 0.17 | 95.3 |
| 12.6 ± 0.1 | 298 | 317 | 450 ± 50 | 1.51 ± 0.17 | 93.3 |
| 15.1 ± 0.1 | 298 | 321 | 556 ± 50 | 1.87 ± 0.17 | 98.3 |
| 17.0 ± 0.1 | 300 | 325.5 | 669 ± 51 | 2.23 ± 0.17 | 92.4 |
| 17.8 ± 0.2 | 301 | 328 | 729 ± 51 | 2.41 ± 0.17 | 93.7 |
| 22.4 ± 0.2 | 301 | 334.5 | 761 ± 51 | 2.53 ± 0.17 | 93.6 |
| 24.3 ± 0.2 | 300 | 336.6 | 947 ± 51 | 3.16 ± 0.17 | 95.5 |
| 8.5 ± 0.1 | 450 | 458 | 490 ± 50 | 1.09 ± 0.11 | 12.4 |
| 11.3 ± 0.1 | 451 | 478 | 704 ± 51 | 1.56 ± 0.11 | 96.1 |
| 12.6 ± 0.1 | 450 | 478 | 763 ± 51 | 1.70 ± 0.11 | 93.3 |
| 16.1 ± 0.1 | 451 | 487 | 1078 ± 52 | 2.39 ± 0.12 | 92.0 |
| 18.3 ± 0.1 | 451 | 491 | 1300 ± 53 | 2.88 ± 0.12 | 91.7 |
| 22.4 ± 0.2 | 451 | 502 | 1462 ± 54 | 3.24 ± 0.12 | 93.8 |
| 6.9 ± 0.1 | 601 | 608 | 657 ± 51 | 1.09 ± 0.09 | 7.9 |
| 8.1 ± 0.1 | 598 | 604 | 638 ± 51 | 1.07 ± 0.09 | 3.5 |
| 11.0 ± 0.1 | 602 | 636 | 986 ± 52 | 1.64 ± 0.09 | 94.2 |
| 12.8 ± 0.1 | 599 | 637 | 1135 ± 53 | 1.89 ± 0.09 | 93.1 |
| 16.2 ± 0.2 | 596 | 644 | 1617 ± 55 | 2.71 ± 0.09 | 92.0 |
| 22.8 ± 0.2 * | 598 | 668 | 2286 ± 59 | 3.82 ± 0.10 | 99.1 * |
| 6.5 ± 0.1 | 746 | 755 | 797 ± 52 | 1.07 ± 0.07 | 6.8 |
| 8.1 ± 0.1 | 749 | 757.5 | 850 ± 52 | 1.14 ± 0.07 | 11.3 |
| 12.6 ± 0.1 | 751 | 799 | 1535 ± 55 | 2.04 ± 0.07 | 94.2 |
| 15.9 ± 0.2 | 751 | 812 | 2247 ± 59 | 2.00 ± 0.08 | 96.9 |
| 22.3 ± 0.2 * | 751.5 | 840 | 3138 ± 67 | 4.23 ± 0.09 | 99.2 * |

Tab.7.29 Explosion von Ozon/Krypton-Gemischen in einem
500 × 50 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 6.6 ± 0.1 | 450 | 453 | 450 ± 25 | 1.00 ± 0.00 | 16.1 |
| 7.2 ± 0.1 | 449 | 452 | 454 ± 25 | 1.01 ± 0.06 | 15.2 |
| 7.3 ± 0.1 | 450 | 455 | 512 ± 25 | 1.14 ± 0.06 | 29.3 |
| 7.7 ± 0.1 | 448 | 461 | 721 ± 26 | 1.61 ± 0.06 | 68.6 |
| 8.0 ± 0.1 | 450 | 468 | 904 ± 27 | 2.01 ± 0.06 | 96.2 |
| 8.3 ± 0.1 | 449 | 468 | 913 ± 27 | 2.03 ± 0.06 | 96.8 |
| 8.9 ± 0.1 | 448 | 469 | 974 ± 27 | 2.17 ± 0.06 | 97.4 |
| 9.1 ± 0.1 | 448 | 469 | 984 ± 28 | 2.20 ± 0.06 | 97.8 |
| 10.3 ± 0.1 | 448 | 472 | 1149 ± 29 | 2.56 ± 0.07 | 98.5 |
| 11.8 ± 0.1 | 450 | 478 | 1388 ± 31 | 3.08 ± 0.07 | 98.4 |
| 13.4 ± 0.1 | 448 | 479 | 1572 ± 32 | 3.51 ± 0.08 | 99.1 |
| 14.4 ± 0.1 | 447 | 480 | 1695 ± 33 | 3.79 ± 0.08 | 99.0 |
| 15.4 ± 0.2 * | 448 | 483 | 1871 ± 35 | 4.18 ± 0.08 | 99.1 * |
| 15.6 ± 0.2 * | 449 | 485 | 1851 ± 35 | 4.12 ± 0.08 | 99.0 * |
| 15.6 ± 0.2 * | 447 | 484 | 2045 ± 37 | 4.58 ± 0.09 | 99.7 * |
| 15.9 ± 0.2 * | 448 | 485 | 2247 ± 39 | 5.02 ± 0.09 | 99.9 * |
| 16.1 ± 0.2 * | 449 | 486 | 2181 ± 38 | 4.86 ± 0.09 | 99.7 * |
| 17.2 ± 0.2 * | 449 | 489 | 2563 ± 43 | 5.71 ± 0.10 | 99.9 * |

Tab.7.30 Explosion von Ozon/Xenon-Gemischen in einem
500 × 50 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_0 [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_0 | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-------------------------|---------------|---------------|
| 14.9 ± 0.3 * | 114 | 122 | 351 ± 23 | 3.08 ± 0.21 | 97.7 * |
| 11.1 ± 0.1 | 226 | 238 | 566 ± 24 | 2.51 ± 0.11 | 99.1 |
| 12.8 ± 0.2 | 231 | 247 | 674 ± 25 | 2.92 ± 0.11 | 97.9 |
| 15.5 ± 0.2 * | 226 | 244 | 834 ± 26 | 3.69 ± 0.12 | 99.3 * |
| 16.0 ± 0.2 * | 226 | 245 | 870 ± 26 | 3.85 ± 0.12 | 99.4 * |
| 6.3 ± 0.1 | 446 | 452 | 451 ± 25 | 1.01 ± 0.06 | 23.2 |
| 6.9 ± 0.1 | 450 | 453 | 481 ± 25 | 1.07 ± 0.06 | 19.7 |
| 7.1 ± 0.1 | 449 | 454 | 511 ± 25 | 1.14 ± 0.06 | 29.4 |
| 7.2 ± 0.1 | 450 | 454 | 502 ± 25 | 1.11 ± 0.06 | 27.7 |
| 7.6 ± 0.1 | 450 | 458 | 600 ± 25 | 1.33 ± 0.06 | 47.4 |
| 7.8 ± 0.1 | 450 | 461 | 687 ± 26 | 1.53 ± 0.06 | 63.3 |
| 8.2 ± 0.1 | 450 | 467 | 929 ± 27 | 2.07 ± 0.06 | 92.8 |
| 8.4 ± 0.1 | 450 | 469 | 1007 ± 28 | 2.24 ± 0.06 | 98.5 |
| 8.6 ± 0.1 | 450 | 469 | 1017 ± 28 | 2.26 ± 0.06 | 97.3 |
| 9.0 ± 0.1 | 450 | 470 | 1063 ± 28 | 2.36 ± 0.06 | 98.4 |
| 9.1 ± 0.1 | 450 | 471 | 1063 ± 28 | 2.36 ± 0.06 | 98.8 |
| 9.3 ± 0.1 | 448 | 469 | 1056 ± 28 | 2.36 ± 0.06 | 98.1 |
| 9.6 ± 0.1 | 449 | 471 | 1135 ± 29 | 2.53 ± 0.07 | 98.7 |
| 10.6 ± 0.1 | 449 | 472 | 1222 ± 29 | 2.72 ± 0.07 | 99.3 |
| 11.4 ± 0.1 | 450 | 476 | 1378 ± 30 | 3.06 ± 0.07 | 98.8 |
| 11.5 ± 0.1 | 449 | 480 | 1398 ± 31 | 3.11 ± 0.07 | 98.9 |
| 12.7 ± 0.1 | 452 | 482 | 1540 ± 32 | 3.41 ± 0.07 | 99.0 |
| 12.8 ± 0.1 | 450 | 479 | 1574 ± 32 | 3.50 ± 0.07 | 99.5 |
| 13.7 ± 0.1 | 451 | 483 | 1771 ± 34 | 3.93 ± 0.08 | 99.2 |
| 14.3 ± 0.1 * | 450 | 483 | 1842 ± 35 | 4.09 ± 0.08 | 99.3 * |
| 14.9 ± 0.2 * | 449 | 484 | 2222 ± 39 | 4.95 ± 0.09 | 99.8 * |
| 15.3 ± 0.2 * | 450 | 485 | 2316 ± 40 | 5.15 ± 0.09 | 99.8 * |
| 16.1 ± 0.1 * | 449 | 486 | 2573 ± 43 | 5.73 ± 0.10 | 99.9 * |
| 16.3 ± 0.2 * | 448 | 486 | 2613 ± 43 | 5.83 ± 0.10 | 99.9 * |
| 17.0 ± 0.2 * | 450 | 490 | 2837 ± 46 | 6.30 ± 0.11 | 99.9 * |
| 17.0 ± 0.2 * | 450 | 489 | 2832 ± 46 ¹⁾ | 6.29 ± 0.11 | 99.8 * |
| | | | 3537 ± 46 ²⁾ | 7.86 ± 0.11 | 99.8 * |
| 18.2 ± 0.2 * | 449.5 | 490 | 3044 ± 51 ¹⁾ | 6.77 ± 0.12 | 100.0 * |
| | | | 4212 ± 51 ³⁾ | 9.37 ± 0.12 | 100.0 * |

¹⁾ gemessen mit Spitzenwertspeicher
²⁾ gemessen mit Oszilloskop
³⁾ gemessen mit Transientenrekorder

Tab.7.31 Explosion von Ozon/Xenon-Gemischen in einem
500 × 35 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 9.3 ± 0.2 | 184 | 192 | 255 ± 50 | 1.38 ± 0.27 | 94.4 |
| 9.4 ± 0.2 | 199 | 208.5 | 290 ± 50 | 1.46 ± 0.25 | 95.7 |
| 11.0 ± 0.2 | 202 | 213 | 354 ± 50 | 1.75 ± 0.25 | 98.6 |
| 11.4 ± 0.2 | 202.5 | 214 | 374 ± 50 | 1.85 ± 0.25 | 96.9 |
| 15.4 ± 0.2 | 203 | 219 | 584 ± 10 | 2.88 ± 0.05 | 97.0 |
| 15.5 ± 0.2 | 198 | 213.5 | 564 ± 11 | 2.85 ± 0.05 | 97.7 |
| 18.0 ± 0.2 | 199 | 217 | 668 ± 11 | 3.36 ± 0.06 | 97.4 |
| 5.5 ± 0.1 | 301.5 | 304 | 322 ± 50 | 1.07 ± 0.17 | 8.0 |
| 9.6 ± 0.1 | 300 | 314 | 502 ± 50 | 1.67 ± 0.17 | 96.4 |
| 11.4 ± 0.1 | 302 | 320 | 626 ± 51 | 2.07 ± 0.17 | 96.1 |
| 11.4 ± 0.1 | 301 | 319 | 614 ± 51 | 2.04 ± 0.17 | 96.1 |
| 11.7 ± 0.1 | 302 | 320 | 658 ± 12 | 2.18 ± 0.04 | 97.1 |
| 11.9 ± 0.1 | 305 | 323 | 686 ± 12 | 2.25 ± 0.04 | 96.7 |
| 15.7 ± 0.1 | 299 | 323 | 990 ± 16 | 3.31 ± 0.05 | 97.2 |
| 15.9 ± 0.2 * | 300 | 324 | 993 ± 17 | 3.31 ± 0.06 | 97.1 * |
| 16.6 ± 0.2 | 302 | 327 | 1043 ± 18 | 3.45 ± 0.06 | 97.8 |
| 22.4 ± 0.2 * | 302 | 335.5 | 1323 ± 53 | 4.38 ± 0.18 | 98.6 * |
| 9.1 ± 0.1 | 450 | 470 | 775 ± 19 | 1.72 ± 0.04 | 98.6 |
| 9.3 ± 0.1 | 449 | 469 | 805 ± 19 | 1.79 ± 0.05 | 97.9 |
| 12.7 ± 0.1 | 450.5 | 478 | 1182 ± 23 | 2.62 ± 0.05 | 97.5 |
| 14.3 ± 0.1 | 450 | 482 | 1446 ± 25 | 3.21 ± 0.06 | 98.7 |
| 18.3 ± 0.4 * | 452.5 | 493 | 1957 ± 31 | 4.32 ± 0.07 | 98.1 * |
| 21.0 ± 0.2 * | 450 | 497 | 2696 ± 40 | 5.99 ± 0.10 | 99.8 * |
| 27.8 ± 0.4 * | 454 | 536 | 3757 ± 54 | 8.28 ± 0.13 | 99.9 * |
| 5.7 ± 0.1 | 599 | 604 | 650 ± 51 | 1.08 ± 0.09 | 19.2 |
| 9.9 ± 0.1 | 599 | 629 | 1220 ± 53 | 2.04 ± 0.09 | 97.3 |
| 11.8 ± 0.1 | 604 | 640 | 1676 ± 55 | 2.77 ± 0.09 | 97.8 |
| 12.3 ± 0.2 | 600 | 637 | 1672 ± 55 | 2.79 ± 0.09 | 97.2 |
| 17.0 ± 0.2 * | 598 | 651 | 3500 ± 69 | 5.85 ± 0.12 | 99.6 * |
| 18.0 ± 0.2 | 598 | 651 | 2521 ± 120 | 4.32 ± 0.20 | 99.6 |

Tab.7.32 Explosion von Ozon/Xenon-Gemischen in einem
500 × 20 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 11.3 ± 0.2 | 197 | 209 | 258 ± 50 | 1.31 ± 0.25 | 95.0 |
| 11.5 ± 0.2 | 201 | 213 | 299 ± 10 | 1.49 ± 0.05 | 95.6 |
| 11.6 ± 0.2 | 202 | 214 | 294 ± 9 | 1.46 ± 0.05 | 95.6 |
| 15.4 ± 0.2 | 200 | 216 | 391 ± 10 | 1.95 ± 0.05 | 95.5 |
| 18.7 ± 0.2 | 202 | 219.5 | 495 ± 14 | 2.45 ± 0.25 | 93.5 |
| 8.5 ± 0.1 | 297.5 | 301 | 348 ± 50 | 1.17 ± 0.17 | 16.0 |
| 11.7 ± 0.1 | 301 | 317 | 453 ± 50 | 1.50 ± 0.17 | 95.5 |
| 11.7 ± 0.1 | 302 | 320 | 464 ± 50 | 1.54 ± 0.17 | 94.8 |
| 15.5 ± 0.2 | 300 | 323 | 676 ± 14 | 2.25 ± 0.05 | 98.7 |
| 19.2 ± 0.2 | 305 | 334 | 691 ± 36 | 2.27 ± 0.05 | 94.8 |
| 8.1 ± 0.1 | 452 | 461 | 493 ± 17 | 1.09 ± 0.04 | 53.1 |
| 8.4 ± 0.1 | 449 | 461 | 530 ± 18 | 1.18 ± 0.04 | 56.1 |
| 13.3 ± 0.1 | 451.5 | 481 | 833 ± 20 | 1.84 ± 0.05 | 96.0 |
| 15.8 ± 0.1 | 454 | 488 | 1074 ± 22 | 2.37 ± 0.05 | 94.6 |
| 19.7 ± 0.2 | 450 | 493 | 1100 ± 22 | 2.45 ± 0.05 | 95.6 |
| 21.6 ± 0.2 * | 451 | 496 | 1305 ± 24 | 2.89 ± 0.06 | 95.3 * |
| 7.3 ± 0.1 | 601 | 611 | 692 ± 51 | 1.15 ± 0.09 | 30.7 |
| 12.1 ± 0.1 | 602.5 | 638 | 1117 ± 30 | 1.85 ± 0.04 | 94.6 |
| 15.9 ± 0.2 * | 599 | 646 | 1755 ± 30 | 2.93 ± 0.05 | 91.5 * |
| 19.3 ± 0.2 * | 599 | 656 | 2217 ± 38 | 3.70 ± 0.06 | 91.0 * |
| 8.7 ± 0.1 | 747 | 782 | 1162 ± 22 | 1.56 ± 0.07 | 90.2 |
| 10.4 ± 0.1 | 748 | 784 | 1230 ± 22 | 1.64 ± 0.07 | 94.1 |
| 12.9 ± 0.2 | 747 | 794 | 1575 ± 28 | 2.11 ± 0.07 | 95.1 |
| 15.3 ± 0.2 | 749 | 806 | 2194 ± 37 | 2.93 ± 0.08 | 91.8 |
| 16.0 ± 0.2 | 751 | 808.5 | 2247 ± 60 | 3.01 ± 0.08 | 91.7 |
| 18.7 ± 0.2 | 746 | 816 | 2303 ± 60 | 3.09 ± 0.09 | 93.7 |

Tab.7.33 Explosion von Ozon/Xenon-Gemischen in einem
1000 × 50 mm Rohr

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 13.5 ± 0.1 | 416.5 | 443 | 1152 ± 22 | 2.77 ± 0.06 | 99.7 |
| 14.1 ± 0.1 | 416 | 443 | 1172 ± 22 | 2.82 ± 0.06 | 99.6 |
| 15.8 ± 0.1 | 366 | 394 | 1192 ± 23 | 3.26 ± 0.06 | 97.7 |
| 16.9 ± 0.1 | 380 | 411 | 1451 ± 25 | 3.82 ± 0.07 | 95.4 |
| 18.2 ± 0.2 | 380 | 414 | 1293 ± 23 | 3.40 ± 0.26 | 95.2 |

Tab.7.34 Explosion von Ozon/Argon/Kohlenmonoxid-Gemischen
in einer Kugel von 124 mm Durchmesser

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 6.4 ± 0.1 | 447 | 454 | 630 ± 21 | 1.41 ± 0.05 | 68.2 |
| 7.0 ± 0.1 | 449 | 454 | 645 ± 21 | 1.44 ± 0.05 | 64.8 |
| 7.1 ± 0.1 | 449 | 457 | 1255 ± 42 | 2.80 ± 0.10 | 98.2 |
| 8.4 ± 0.2 | 251 | 256.5 | 1061 ± 32 | 4.23 ± 0.13 | 98.0 |
| 9.1 ± 0.1 | 302 | 310 | 1478 ± 53 | 4.89 ± 0.18 | 98.5 |
| 10.0 ± 0.2 | 288 | 298 | 1517 ± 46 * | 5.27 ± 0.16 | 97.4 * |
| 11.4 ± 0.1 | 300 | 310 | 1544 ± 55 * | 5.15 ± 0.19 | 94.6 * |
| 12.1 ± 0.1 | 280 | 291 | 1524 ± 55 * | 5.44 ± 0.20 | 97.8 * |

Tab.7.35 Explosion von Ozon/Argon/Methan-Gemischen
in einer Kugel von 124 mm Durchmesser

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 2.7 ± 0.1 | 422 | 425 | 458 ± 5 | 1.09 ± 0.04 | 50.4 |
| 4.7 ± 0.1 | 437 | 444 | 525 ± 10 | 1.20 ± 0.05 | 70.4 |
| 5.1 ± 0.1 | 437 | 446 | 760 ± 34 | 1.74 ± 0.08 | 80.1 |
| 5.3 ± 0.1 | 442 | 453 | 925 ± 33 | 2.09 ± 0.07 | 92.2 |
| 5.6 ± 0.1 | 448 | 461.5 | 1094 ± 33 | 2.44 ± 0.07 | 98.0 |
| 5.6 ± 0.1 | 410 | 422 | 1050 ± 18 | 2.56 ± 0.05 | 98.2 |
| 7.2 ± 0.1 | 226 | 234.5 | 775 ± 14 | 3.43 ± 0.06 | 98.0 |
| 7.5 ± 0.1 | 451 | 468 | 1790 ± 29 | 3.97 ± 0.07 | 98.3 |
| 9.6 ± 0.1 | 444 | 465 | 2126 ± 38 * | 4.79 ± 0.09 | 98.7 * |

Tab.7.36 Explosion von Ozon/Argon/Stickstoffdioxid-Gemischen
in einer Kugel von 124 mm Durchmesser

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | p_{end} [hPa] | p_{max} [hPa] | p_{max}/p_o | $Y(-O_3)$ [%] |
|---------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 2.4 ± 0.1 | 446 | 450 | 486 ± 5 | 1.09 ± 0.01 | 68.5 |
| 3.8 ± 0.1 | 450.5 | 454 | 506 ± 10 | 1.12 ± 0.02 | 72.0 |
| 4.0 ± 0.1 | 449 | 456 | 530 ± 20 | 1.18 ± 0.05 | 76.8 |
| 5.5 ± 0.1 | 428 | 440 | 710 ± 20 | 1.66 ± 0.05 | 99.5 |
| 6.4 ± 0.1 | 442 | 457 | 920 ± 20 | 2.08 ± 0.05 | 100.0 |
| 7.0 ± 0.1 | 417.5 | 435 | 1005 ± 20 | 2.41 ± 0.05 | 99.3 |
| 8.1 ± 0.1 | 446 | 468 | 1342 ± 28 | 3.01 ± 0.06 | 100.0 |
| 8.4 ± 0.1 | 438 | 459 | 1345 ± 26 | 3.07 ± 0.06 | 99.8 |
| 10.7 ± 0.1 | 452 | 480 | 1773 ± 29 * | 3.92 ± 0.07 | 100.8 * |
| 11.6 ± 0.1 | 454 | 485 | 1881 ± 35 * | 4.14 ± 0.08 | 100.0 * |

7.5 Ergebnisse der Versuche zur Ozondetonation

Tab.7.37 Detonation von Ozon/Sauerstoff-Gemischen
gezündet mit ca.400 hPa Knallgas

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | $Y(-O_3)$ [%] | D_1 [m/s] | D_2 [m/s] |
|---------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| 7.3 ± 0.1 | 400.6 | 4.9 | 465 ± 31 | 408 ± 24 |
| 14.9 ± 1.2 | 403.8 | 99.7 | 1000 ± 283 | 1000 ± 283 |
| 16.6 ± 1.2 | 403.4 | 99.6 | 1111 ± 175 | 1111 ± 175 |
| 19.8 ± 1.2 | 402.8 | 99.7 | 1177 ± 196 | 1177 ± 196 |
| 20.8 ± 1.3 | 402.0 | 99.3 | 1177 ± 196 | 1250 ± 221 |
| 21.1 ± 1.3 | 404.2 | 99.3 | 1250 ± 221 | 1250 ± 221 |

Tab.7.38 Detonation von Ozon/Argon-Gemischen
gezündet mit ca.400 hPa Knallgas

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | $Y(-O_3)$ [%] | D_1 [m/s] | D_2 [m/s] |
|---------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| 6.1 ± 0.1 | 399.6 | 99.3 | 909 ± 58 | 909 ± 58 |
| 7.2 ± 0.1 | 399.2 | 2.1 | 449 ± 14 | 400 ± 11 |
| 9.9 ± 0.1 | 400.6 | 99.6 | 1053 ± 78 | 1053 ± 78 |
| 12.4 ± 0.1 | 400.2 | 99.6 | 1143 ± 92 | 1177 ± 98 |
| 13.2 ± 0.1 | 400.9 | 99.5 | 1177 ± 98 | 1177 ± 98 |
| 17.3 ± 0.1 | 399.9 | 99.6 | 1212 ± 104 | 1212 ± 104 |
| 21.3 ± 0.2 | 402.0 | 99.6 | 1333 ± 126 | 1333 ± 126 |
| 22.3 ± 0.2 | 402.5 | 99.6 | 1333 ± 126 | 1333 ± 126 |

Tab.7.39 Detonation von Ozon/Krypton-Gemischen
gezündet mit ca.400 hPa Knallgas

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | $Y(-O_3)$ [%] | D_1 [m/s] | D_2 [m/s] |
|---------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| 5.5 ± 0.1 | 399.9 | 99.2 | 625 ± 28 | 615 ± 27 |
| 5.7 ± 0.1 | 400.2 | 99.2 | 625 ± 55 | 351 ± 17 |
| 6.8 ± 0.1 | 399.3 | 99.3 | 667 ± 31 | 667 ± 31 |
| 12.6 ± 0.1 | 399.7 | 99.5 | 755 ± 40 | 784 ± 44 |
| 12.9 ± 0.1 | 400.1 | 99.8 | 833 ± 98 | 800 ± 91 |
| 13.6 ± 0.1 | 400.2 | 99.5 | 816 ± 47 | 851 ± 51 |
| 15.1 ± 0.1 | 401.3 | 99.6 | 889 ± 56 | 870 ± 54 |
| 16.3 ± 1.2 | 401.6 | 99.5 | 930 ± 61 | 930 ± 61 |
| 21.9 ± 1.2 | 403.3 | 99.8 | 1026 ± 74 | 1026 ± 74 |

Tab.7.40 Detonation von Ozon/Xenon-Gemischen
bei unterschiedlichem Knallgasdruck p_k

| X_{O_3} [%] | p_0 [hPa] | p_k [hPa] | $Y(-O_3)$ [%] | D_1 [m/s] | D_2 [m/s] |
|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------------|-------------|
| 4.5 ± 0.1 | 389.1 | 400 | 99.5 | 455 ± 6 | 263 ± 2 |
| 6.2 ± 0.1 | 396.7 | 400 | 5.0 | 278 ± 2 | 230 ± 2 |
| 7.2 ± 0.1 | 399.3 | 400 | 99.5 | 548 ± 21 | 556 ± 22 |
| 7.2 ± 0.1 | 391.8 | 400 | 99.8 | 546 ± 8 | 562 ± 9 |
| 8.3 ± 0.1 | 400.3 | 400 | 99.5 | 571 ± 46 | 588 ± 49 |
| 8.5 ± 0.1 | 400.6 | 400 | 99.5 | 588 ± 25 | 580 ± 24 |
| 8.5 ± 0.1 | 387.0 | 400 | 99.8 | 588 ± 25 | 588 ± 25 |
| 8.7 ± 0.1 | 392.5 | 400 | 99.8 | 575 ± 9 | 588 ± 10 |
| 9.0 ± 0.1 | 400.2 | 400 | 99.5 | 606 ± 52 | 606 ± 52 |
| 9.3 ± 0.1 | 400.1 | 400 | 99.3 | 602 ± 10 | 571 ± 9 |
| 9.6 ± 0.1 | 399.7 | 400 | 99.8 | 625 ± 11 | 602 ± 10 |
| 10.6 ± 0.1 | 400.3 | 400 | 99.6 | 645 ± 59 | 667 ± 63 |
| 10.6 ± 0.1 | 254.3 | 400 | 99.4 | 635 ± 29 | 635 ± 29 |
| 10.7 ± 0.1 | 401.5 | 400 | 99.8 | 645 ± 59 | 645 ± 59 |
| 11.1 ± 0.1 | 306.1 | 300 | 1.7 | 270 ± 5 | 224 ± 4 |
| 11.3 ± 0.1 | 400.3 | 400 | 99.8 | 645 ± 59 | 667 ± 63 |
| 11.3 ± 0.1 | 398.5 | 400 | 99.6 | 656 ± 30 | 645 ± 29 |
| 12.8 ± 0.1 | 398.9 | 400 | 99.6 | 678 ± 33 | 667 ± 31 |
| 12.8 ± 0.1 | 399.5 | 400 | 99.7 | 685 ± 13 | 662 ± 12 |
| 13.4 ± 0.1 | 388.0 | 400 | 99.8 | 702 ± 35 | 702 ± 35 |
| 14.4 ± 0.1 | 220.3 | 250 | 3.0 | nicht registriert | |
| 14.5 ± 0.1 | 401.3 | 400 | 99.7 | 727 ± 37 | 727 ± 37 |
| 14.6 ± 0.1 | 389.3 | 400 | 99.9 | 709 ± 14 | 704 ± 14 |
| 15.6 ± 0.1 | 393.1 | 400 | 99.6 | 735 ± 15 | 758 ± 16 |
| 16.6 ± 0.1 | 400.8 | 400 | 99.6 | 702 ± 35 | 678 ± 33 |
| 17.1 ± 0.1 | 397.1 | 400 | 99.5 | 727 ± 37 | 784 ± 44 |
| 17.2 ± 0.2 | 203.0 | 250 | 99.3 | 276 ± 5 | 191 ± 3 |
| 18.4 ± 0.1 | 400.8 | 400 | 99.9 | 769 ± 84 | 769 ± 84 |
| 18.5 ± 0.1 | 402.2 | 400 | 99.7 | 784 ± 44 | 784 ± 44 |
| 19.8 ± 0.1 | 245.7 | 400 | 99.7 | 816 ± 47 | 784 ± 44 |
| 20.2 ± 0.2 | 255.4 | 400 | 99.9 | 784 ± 44 | 784 ± 44 |
| 20.9 ± 0.2 | 394.5 | 400 | 99.8 | 787 ± 18 | 794 ± 18 |
| 21.5 ± 0.2 | 401.1 | 400 | 99.7 | 851 ± 51 | 851 ± 51 |
| 24.0 ± 0.2 | 247.6 | 400 | 99.4 | 853 ± 49 | 851 ± 51 |
| 28.5 ± 0.2 | 175.4 | 250 | 99.5 | 909 ± 58 | 889 ± 56 |
| 29.3 ± 0.2 | 191.1 | 250 | 99.6 | 909 ± 58 | 889 ± 56 |
| 40.4 ± 0.5 | 197.6 | 300 | 99.5 | 1053 ± 78 | 1026 ± 74 |
| 42.2 ± 0.5 | 198.1 | 300 | 99.6 | 1081 ± 83 | 1053 ± 78 |
| 51.0 ± 0.6 | 154.8 | 250 | 99.6 | 1177 ± 98 | 1177 ± 98 |

Tab.7.41 Detonation von Ozon/Xenon/Kohlenmonoxid-Gemischen
gezündet mit ca.400 hPa Knallgas

| X_{O_3} [%] | p_0 [hPa] | $Y(-O_3)$ [%] | D_1 [m/s] | D_2 [m/s] |
|----------------|-------------|---------------|--------------|--------------|
| 5.8 ± 0.1 | 381.2 | 99.6 | 541 ± 21 | 526 ± 20 |
| 10.7 ± 0.1 | 387.8 | 99.6 | 687 ± 33 | 702 ± 35 |
| 13.6 ± 0.1 | 396.4 | 99.7 | 741 ± 39 | 769 ± 42 |
| 16.8 ± 0.1 | 391.6 | 99.9 | 769 ± 42 | 784 ± 44 |

Tab.7.42 Detonation von Ozon/Xenon/Methan-Gemischen
gezündet mit ca.400 hPa Knallgas

| X_{O_3} [%] | p_0 [hPa] | $Y(-O_3)$ [%] | D_1 [m/s] | D_2 [m/s] |
|----------------|-------------|---------------|--------------|--------------|
| 2.8 ± 0.1 | 398.0 | 45.9 | 370 ± 10 | 244 ± 4 |
| 5.7 ± 0.1 | 396.6 | 99.6 | 656 ± 30 | 645 ± 29 |
| 6.9 ± 0.1 | 399.3 | 99.7 | 678 ± 33 | 678 ± 33 |
| 8.8 ± 0.1 | 397.8 | 99.8 | 702 ± 35 | 690 ± 34 |
| 9.8 ± 0.1 | 397.1 | 99.8 | 727 ± 37 | 714 ± 36 |
| 10.7 ± 0.1 | 198.6 | 99.2 | 714 ± 36 | 702 ± 35 |
| 13.3 ± 0.1 | 338.2 | 99.6 | 800 ± 45 | 784 ± 44 |

Tab.7.43 Detonation von Ozon/Xenon/Stickstoffdioxid-Gemischen
gezündet mit ca.400 hPa Knallgas

| X_{O_3} [%] | p_0 [hPa] | $Y(-O_3)$ [%] | D_1 [m/s] | D_2 [m/s] |
|----------------|-------------|---------------|--------------|--------------|
| 4.3 ± 0.1 | 334.0 | 26.1 | 325 ± 8 | 242 ± 4 |
| 6.8 ± 0.1 | 402.0 | 99.7 | 533 ± 20 | 290 ± 6 |
| 8.8 ± 0.1 | 391.7 | 99.8 | 597 ± 25 | 606 ± 26 |
| 9.1 ± 0.1 | 402.2 | 99.8 | 606 ± 26 | 615 ± 27 |
| 13.6 ± 0.1 | 399.0 | 100.0 | 678 ± 33 | 690 ± 34 |

Tab.7.44 Detonation von Ozon/Xenon-Gemischen
in einem Rohr mit einer 10 cm langen Füllkörperpackung
gezündet mit ca.400 hPa Knallgas

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | $Y(-O_3)$ [%] | D_1 [m/s] | D_2 [m/s] | D_3 [m/s] |
|---------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| 14.8 ± 0.1 | 361.6 | 75.4 | 727 ± 26 | 0 | 0 |
| 15.9 ± 0.1 | 398.2 | 98.0 | 721 ± 26 | 190 ± 51 | 192 ± 4 |
| 17.5 ± 0.1 | 390.4 | 72.4 | 769 ± 30 | 308 ± 134 | 189 ± 4 |
| 19.3 ± 0.1 | 386.4 | 98.8 | 792 ± 31 | 444 ± 279 | 205 ± 4 |
| 21.3 ± 0.2 | 393.1 | 99.7 | 800 ± 32 | 571 ± 461 | 206 ± 4 |
| 23.5 ± 0.3 | 400.0 | 99.3 | 879 ± 39 | 500 ± 354 | 879 ± 55 |
| 28.0 ± 0.3 | 402.0 | 99.4 | 899 ± 40 | 571 ± 461 | 909 ± 58 |

Tab.7.45 Detonation von Ozon/Xenon-Gemischen
in einem Rohr mit einer 50 cm langen Füllkörperpackung
gezündet mit ca.400 hPa Knallgas

| X_{O_3} [%] | p_o [hPa] | $Y(-O_3)$ [%] | D_1 [m/s] | D_2 [m/s] | D_3 [m/s] |
|---------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| 12.7 ± 0.1 | 395.8 | 58.6 | 702 ± 25 | 0 | 0 |
| 15.6 ± 0.1 | 395.8 | 99.6 | 755 ± 29 | 392 ± 43 | 199 ± 4 |
| 16.2 ± 0.1 | 343.0 | 99.5 | 734 ± 27 | 323 ± 30 | 199 ± 4 |
| 16.6 ± 0.1 | 395.4 | 99.6 | 748 ± 28 | 0 | 0 |
| 18.5 ± 0.1 | 400.7 | 99.5 | 762 ± 29 | 345 ± 34 | 204 ± 4 |
| 18.9 ± 0.1 | 378.8 | 99.5 | 762 ± 29 | 476 ± 64 | 199 ± 4 |
| 19.9 ± 1.5 | 375.0 | 99.6 | 755 ± 29 | 392 ± 53 | 755 ± 40 |
| 20.7 ± 0.2 | 402.7 | 99.6 | 808 ± 33 | 606 ± 103 | 205 ± 4 |
| 21.1 ± 0.2 | 401.5 | 99.6 | 825 ± 34 | 606 ± 103 | 207 ± 4 |
| 22.5 ± 0.3 | 376.9 | 99.6 | 833 ± 35 | 588 ± 120 | 829 ± 59 |

7.6 Berechnung der nicht-adiabatischen Explosion
verschiedener Ozon/Trägergas-Systeme

Tab.7.46 Adiabatische Explosion eines Ozon/Argon-Gemisches

$X_{O_3} = 15$ Mol-%, $T_0 = 300$ K, $p_0 = 0.45$ bar

| ξ | p/p_0 | T_u [K] | T_{af} [K] | v_0 [cm/s] | d [cm] |
|-------------|---------|-----------|--------------|--------------|----------|
| ≈ 0 | 1.00 | 300 | 1129 | 33.7 | 0.278 |
| 0.1 | 1.51 | 351 | 1173 | 51.2 | 0.158 |
| 0.2 | 2.02 | 392 | 1208 | 68.9 | 0.106 |
| 0.3 | 2.54 | 427 | 1237 | 87.6 | 0.078 |
| 0.4 | 3.05 | 458 | 1264 | 107.2 | 0.061 |
| 0.5 | 3.56 | 486 | 1287 | 127.4 | 0.049 |
| 0.6 | 4.07 | 511 | 1307 | 148.2 | 0.042 |
| 0.7 | 4.58 | 535 | 1327 | 170.9 | 0.036 |
| 0.8 | 5.10 | 557 | 1345 | 193.9 | 0.031 |
| 0.9 | 5.61 | 577 | 1361 | 217.6 | 0.029 |
| 1.0 | 6.12 | 597 | 1378 | 244.5 | 0.027 |

Tab.7.47 Adiabatische Explosion eines Ozon/Krypton-Gemisches

$X_{O_3} = 15$ Mol-%, $T_0 = 300$ K, $p_0 = 0.45$ bar

| ξ | p/p_0 | T_u [K] | T_{af} [K] | v_0 [cm/s] | d [cm] |
|-------------|---------|-----------|--------------|--------------|----------|
| ≈ 0 | 1.00 | 300 | 1131 | 25.4 | 0.278 |
| 0.1 | 1.51 | 351 | 1177 | 38.9 | 0.156 |
| 0.2 | 2.02 | 392 | 1212 | 52.6 | 0.104 |
| 0.3 | 2.54 | 427 | 1241 | 67.1 | 0.076 |
| 0.4 | 3.05 | 458 | 1267 | 82.2 | 0.059 |
| 0.5 | 3.56 | 486 | 1290 | 98.2 | 0.047 |
| 0.6 | 4.07 | 511 | 1310 | 114.4 | 0.040 |
| 0.7 | 4.58 | 535 | 1330 | 132.2 | 0.034 |
| 0.8 | 5.10 | 557 | 1348 | 150.6 | 0.030 |
| 0.9 | 5.61 | 577 | 1365 | 169.4 | 0.028 |
| 1.0 | 6.12 | 597 | -- | -- | -- |

Tab.7.48 Adiabatische Explosion eines Ozon/Xenon-Gemisches

$X_{O_3} = 15 \text{ Mol-}\%$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $p_0 = 0.45 \text{ bar}$

| ξ | p/p_0 | $T_u[\text{K}]$ | $T_{af}[\text{K}]$ | $v_0[\text{cm/s}]$ | $d[\text{cm}]$ |
|-------|---------|-----------------|--------------------|--------------------|----------------|
| ≈ 0 | 1.00 | 300 | 1132 | 20.7 | 0.273 |
| 0.1 | 1.51 | 351 | 1176 | 33.6 | 0.145 |
| 0.2 | 2.02 | 392 | 1211 | 45.7 | 0.096 |
| 0.3 | 2.54 | 427 | 1241 | 58.4 | 0.070 |
| 0.4 | 3.05 | 458 | 1266 | 71.7 | 0.054 |
| 0.5 | 3.56 | 486 | 1289 | 85.8 | 0.044 |
| 0.6 | 4.07 | 511 | 1309 | 100.2 | 0.036 |
| 0.7 | 4.58 | 535 | 1329 | 115.9 | 0.031 |
| 0.8 | 5.10 | 557 | 1346 | 132.2 | 0.028 |
| 0.9 | 5.61 | 577 | 1363 | 149.0 | 0.025 |
| 1.0 | 6.12 | 597 | -- | -- | -- |

Tab.7.49 Nicht-adiabatische Explosion eines Ozon/Argon-Gemisches

$X_{O_3} = 15 \text{ Mol-}\%$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $p_0 = 0.45 \text{ bar}$, $d = 50 \text{ mm}$, $l = 500 \text{ mm}$

| ξ | $\Delta\tau[\%]$ | $T_f[\text{K}]$ | $T_u[\text{K}]$ | p/p_0 | $v[\text{cm/s}]$ |
|-------|------------------|-----------------|-----------------|---------|------------------|
| 0 | - | 1129 | 300 | 1.00 | 33.7 |
| 0.1 | - | 1173 | 351 | 1.51 | 51.2 |
| 0.2 | 3.6 | 1175 | 354 | 1.55 | 52.2 |
| 0.3 | 3.2 | 1181 | 361 | 1.63 | 55.0 |
| 0.4 | 2.6 | 1192 | 372 | 1.76 | 59.8 |
| 0.5 | 1.9 | 1206 | 391 | 2.01 | 68.5 |
| 0.6 | 1.3 | 1224 | 411 | 2.29 | 78.6 |
| 0.7 | 0.8 | 1244 | 434 | 2.64 | 91.7 |
| 0.8 | 0.5 | 1264 | 458 | 3.05 | 107.2 |
| 0.9 | 0.34 | 1284 | 482 | 3.49 | 124.5 |
| 1.0 | 0.44 | 1301 | 503 | 3.90 | 141.0 |

Tab.7.50 Nicht-adiabatische Explosion eines Ozon/Krypton-Gemisches

$X_{O_3} = 15$ Mol-%, $T_0 = 300$ K, $p_0 = 0.45$ bar, $d = 50$ mm, $l = 500$ mm

| ξ | $\Delta\tau$ [%] | T_f [K] | T_u [K] | p/p_0 | v [cm/s] |
|-------|------------------|-----------|-----------|---------|------------|
| 0 | - | 1131 | 300 | 1.00 | 25.4 |
| 0.1 | - | 1176 | 351 | 1.51 | 38.9 |
| 0.2 | 3.4 | 1182 | 357 | 1.58 | 40.7 |
| 0.3 | 2.8 | 1191 | 367 | 1.70 | 43.8 |
| 0.4 | 2.1 | 1204 | 381 | 1.88 | 48.5 |
| 0.5 | 1.5 | 1219 | 400 | 2.13 | 55.6 |
| 0.6 | 1.0 | 1237 | 422 | 2.46 | 64.7 |
| 0.7 | 0.6 | 1257 | 446 | 2.84 | 76.5 |
| 0.8 | 0.4 | 1277 | 470 | 3.26 | 89.0 |
| 0.9 | 0.3 | 1295 | 492 | 3.68 | 102.0 |
| 1.0 | 0.4 | 1311 | 512 | 4.09 | 115.1 |

Tab.7.51 Nicht-adiabatische Explosion eines Ozon/Xenon-Gemisches

$X_{O_3} = 15$ Mol-%, $T_0 = 300$ K, $p_0 = 0.45$ bar, $d = 50$ mm, $l = 500$ mm

| ξ | $\Delta\tau$ [%] | T_f [K] | T_u [K] | p/p_0 | v [cm/s] |
|-------|------------------|-----------|-----------|---------|------------|
| 0 | - | 1132 | 300 | 1.00 | 20.7 |
| 0.1 | - | 1176 | 351 | 1.51 | 33.6 |
| 0.2 | 3.1 | 1183 | 360 | 1.62 | 35.8 |
| 0.3 | 2.4 | 1195 | 372 | 1.76 | 39.3 |
| 0.4 | 1.7 | 1209 | 390 | 2.00 | 45.1 |
| 0.5 | 1.2 | 1227 | 412 | 2.31 | 52.8 |
| 0.6 | 0.7 | 1247 | 436 | 2.68 | 61.8 |
| 0.7 | 0.5 | 1267 | 460 | 3.08 | 72.4 |
| 0.8 | 0.3 | 1287 | 484 | 3.52 | 85.0 |
| 0.9 | 0.2 | 1306 | 507 | 3.98 | 97.9 |
| 1.0 | 0.3 | 1322 | 527 | 4.41 | 110.2 |

Tab.7.52 Nicht-adiabatische Explosion eines Ozon/Xenon-Gemisches

$X_{O_3} = 15$ Mol-%, $T_0 = 300$ K, $p_0 = 0.23$ bar, $d = 50$ mm, $\ell = 500$ mm

| ξ | $\Delta\tau$ [%] | T_f [K] | T_u [K] | p/p_0 | v [cm/s] |
|-------|------------------|-----------|-----------|---------|------------|
| 0 | - | 1132 | 300 | 1.00 | 20.7 |
| 0.1 | - | 1176 | 351 | 1.51 | 33.6 |
| 0.2 | 6.0 | 1156 | 362 | 1.64 | 27.2 |
| 0.3 | 5.0 | 1172 | 373 | 1.78 | 32.2 |
| 0.4 | 3.7 | 1193 | 384 | 1.91 | 39.0 |
| 0.5 | 2.6 | 1209 | 393 | 2.04 | 46.0 |
| 0.6 | 1.9 | 1223 | 406 | 2.22 | 50.6 |
| 0.7 | 1.5 | 1236 | 422 | 2.46 | 56.5 |
| 0.8 | 1.0 | 1252 | 441 | 2.76 | 64.0 |
| 0.9 | 0.7 | 1269 | 461 | 3.10 | 73.0 |
| 1.0 | 1.0 | 1281 | 477 | 3.39 | 81.0 |

Tab.7.53 Nicht-adiabatische Explosion eines Ozon/Xenon-Gemisches

$X_{O_3} = 15$ Mol-%, $T_0 = 300$ K, $p_0 = 0.45$ bar, $d = 35$ mm, $\ell = 500$ mm

| ξ | $\Delta\tau$ [%] | T_f [K] | T_u [K] | p/p_0 | v [cm/s] |
|-------|------------------|-----------|-----------|---------|------------|
| 0 | - | 1132 | 300 | 1.00 | 20.7 |
| 0.1 | - | 1176 | 351 | 1.51 | 33.6 |
| 0.2 | 6.3 | 1154 | 362 | 1.64 | 26.6 |
| 0.3 | 5.2 | 1170 | 373 | 1.78 | 31.6 |
| 0.4 | 3.9 | 1191 | 383 | 1.91 | 38.5 |
| 0.5 | 2.8 | 1208 | 393 | 2.04 | 44.8 |
| 0.6 | 2.1 | 1222 | 405 | 2.20 | 50.1 |
| 0.7 | 1.6 | 1234 | 420 | 2.43 | 55.7 |
| 0.8 | 1.1 | 1251 | 439 | 2.73 | 63.2 |
| 0.9 | 0.8 | 1267 | 459 | 3.07 | 72.0 |
| 1.0 | 1.0 | 1279 | 475 | 3.35 | 80.0 |

Tab.7.54 Nicht-adiabatische Explosion eines Ozon/Xenon-Gemisches

$X_{O_3} = 15$ Mol-%, $T_0 = 300$ K, $p_0 = 0.45$ bar, $d = 20$ mm, $l = 500$ mm

| ξ | $\Delta\tau$ [%] | T_f [K] | T_u [K] | p/p_0 | v [cm/s] |
|-------|------------------|-----------|-----------|---------|------------|
| 0 | - | 1131 | 300 | 1.00 | 20.7 |
| 0.1 | - | 1176 | 351 | 1.51 | 33.6 |
| 0.2 | 19.2 | 1036 | 360 | 1.61 | 14.4 |
| 0.3 | 20.2 | 1032 | 368 | 1.71 | 14.1 |
| 0.4 | 16.4 | 1072 | 376 | 1.82 | 16.8 |
| 0.5 | 12.8 | 1109 | 385 | 1.93 | 19.2 |
| 0.6 | 9.8 | 1143 | 393 | 2.04 | 23.6 |
| 0.7 | 7.6 | 1169 | 402 | 2.16 | 31.2 |
| 0.8 | 5.5 | 1195 | 411 | 2.29 | 39.6 |
| 0.9 | 4.1 | 1214 | 419 | 2.41 | 47.1 |
| 1.0 | 6.1 | 1201 | 427 | 2.53 | 42.0 |

Tab.7.55 Nicht-adiabatische Explosion eines Ozon/Xenon-Gemisches

$X_{O_3} = 15$ Mol-%, $T_0 = 300$ K, $p_0 = 0.4$ bar, $d = 50$ mm, $l = 1000$ mm

| ξ | $\Delta\tau$ [%] | T_f [K] | T_u [K] | p/p_0 | v [cm/s] |
|-------|------------------|-----------|-----------|---------|------------|
| 0 | - | 1132 | 300 | 1.00 | 20.7 |
| 0.1 | - | 1176 | 351 | 1.51 | 33.6 |
| 0.2 | 7.0 | 1147 | 362 | 1.62 | 24.8 |
| 0.3 | 6.0 | 1163 | 373 | 1.77 | 29.2 |
| 0.4 | 4.4 | 1184 | 383 | 1.90 | 36.0 |
| 0.5 | 3.2 | 1203 | 393 | 2.03 | 42.8 |
| 0.6 | 2.4 | 1218 | 401 | 2.15 | 48.8 |
| 0.7 | 1.9 | 1229 | 414 | 2.34 | 53.5 |
| 0.8 | 1.4 | 1243 | 431 | 2.60 | 60.0 |
| 0.9 | 0.9 | 1260 | 451 | 2.93 | 68.0 |
| 1.0 | 1.3 | 1270 | 464 | 3.15 | 74.4 |