

# Zündung zerfallsfähiger Gase wie Acetylen und Tetrafluorethen durch adiabate Kompression

Ronald Meyer<sup>1</sup>, Martin Kluge<sup>1</sup>, Fabio Ferrero<sup>1</sup>, Dennis Grasse<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Fachbereich „Gase, Gasanlagen“, Berlin

*Die adiabate Kompression stellt insbesondere für zerfallsfähige Gase eine potentielle Zündquelle sowohl bei Herstellungsprozessen als auch beim Umgang in weiterverarbeitenden Betrieben oder beim Endnutzer dar. Unter bestimmten Bedingungen kann hier eine explosionsartige Zerfallsreaktion auch in Abwesenheit eines Oxidators initiiert werden. Zur systematischen Untersuchung des Zündverhaltens von Zerfallsreaktionen wurde eine Rohrapparatur mit einem schnell öffnenden Kugelhahn aufgebaut, um praxisnahe Vorgänge darstellen zu können. Am Beispiel Tetrafluorethen (TFE) wurden umfangreiche Untersuchungen mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern und –längen durchgeführt. Neben der Kompression von homogenen Gasphasen wurden außerdem Kompressionsvorgänge von heterogenen Gasen durchgeführt. Dabei war das Gas im Niederdruckteil unterschiedlich zum Gas im Hochdruckteil. Für den Hochdruckteil wurde Stickstoff, Acetylen und TFE verwendet. Im Niederdruckteil kamen TFE, Stickstoff und Luft zum Einsatz. Zudem wurden das Kompressionsverhältnis sowie die Absolutdrücke im Hochdruck- und Kompressionsteil variiert. Für TFE wurde ein Druckbereich bis 30 bar absolut untersucht. Versuche mit Acetylen wurden zur apparativen Validierung durchgeführt. Es zeigte sich, dass in der verwendeten Apparatur reproduzierbare Zündvorgänge nur im Bereich sehr enger Anfangsparameter möglich sind. Die Kompression von Luft durch ein zerfallsfähiges Gas stellt dabei den sicherheitstechnisch kritischsten Fall dar.*

## 1 Einleitung

Immer wieder kommt es in Chemieanlagen zu unerwarteten und unerwünschten Unfällen, die sich auf die Entzündung von zerfallsfähigen Gasen zurückführen lassen [1]. Unter dem Begriff „zerfallsfähige Gase“ oder auch „chemisch-instabile Gase“ versteht man Gase, bei denen auch in Anwesenheit eines Oxidators nach einer Zündung eine explosionsartige Reaktion auftreten kann. Tetrafluorethen (TFE) und Acetylen sind zwei der bekanntesten Vertreter dieser Gruppe.

Die Zerfallsreaktionen von Tetrafluorethen und Acetylen sind in den Gleichungen (1) bzw. (2) dargestellt. Sobald eine Zündquelle eine von diesen Zerfallsreaktionen initiiert, kann diese explosionsartig verlaufen. Die schnelle Reaktionsrate zusammen mit der hohen Exothermie der Reaktionen kann zur Bildung von heftigen Explosionen führen.

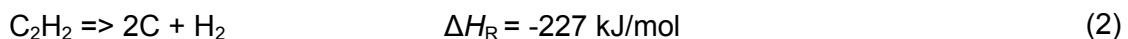
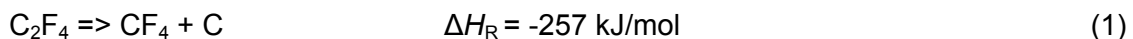


Abbildung 1 zeigt ein typisches Szenario, in dem die Zündung eines zerfallsfähigen Gases durch adiabate Kompression auftreten kann. Hier sind zwei, durch ein geschlossenes Schnellöffnungsventil (HSV), getrennte Rohrleitungsabschnitte zu sehen. Der erste Abschnitt beinhaltet ein zerfallsfähiges Gas bei hohem Druck, während sich im zweiten ein Gas bei niedrigem Druck befindet (Abbildung 1). Das Gas im Niederdruckbereich könnte beispielsweise dasselbe Prozessgas (innere Leckagen in der Instrumentierung) oder Stickstoff (Reste bzw. Spülgas nach Reparatur oder Wartung) oder auch Luft bis zu Umgebungsdruck (äußere Leckagen) sein. Sobald das Schnellöffnungsventil aktiviert wird,

kommt es aufgrund der Diskontinuität im Druck zur Ausbildung einer Druckwelle, die sich in den Niederdruckbereich fortpflanzt. Durch die Kompression des Gases kommt es zu einer ersten Temperaturerhöhung (Abbildung 1). Einen weiteren Druck- und Temperaturanstieg erfolgt in dem Moment, wenn die Druckwelle reflektiert wird (z.B. ein geschlossenes Ventil oder eine Armatur). Überschreitet die Temperatur nach der Reflektion einen vom Druck abhängigen kritischen Wert, kann es zu einer Zündung des zerfallsfähigen Gases kommen (Abbildung 1). Dabei kam es in der Vergangenheit zu erheblichen wirtschaftlichen Schäden und sogar zu Todesfällen [1]. [2],[3].

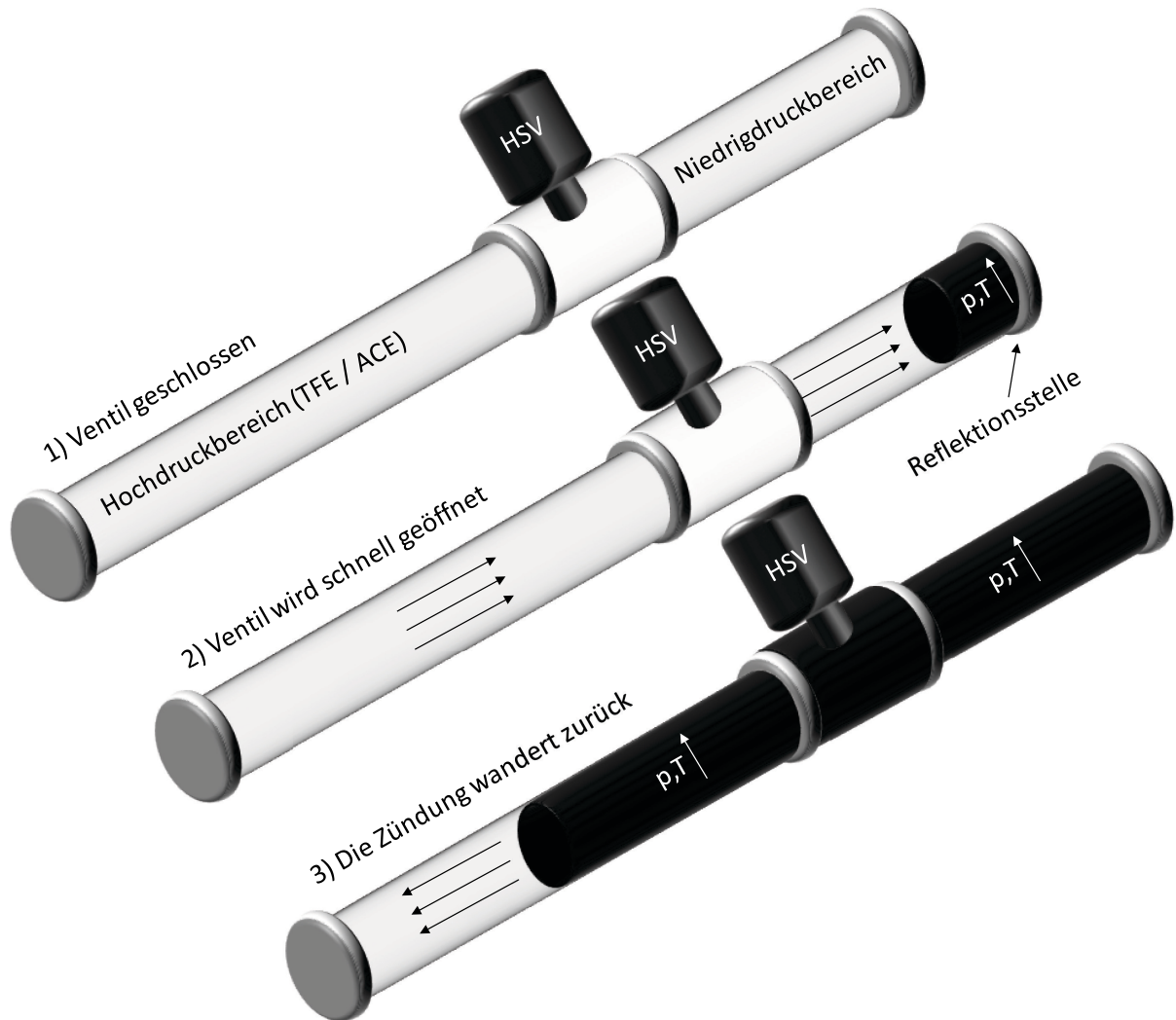


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines typischen Szenarios, das zu einer durch adiabate Kompression verursachte Zündung führen könnte.

Das in Abbildung 1 dargestellte Szenario könnte beispielsweise durch Fehlbedienung bei der Füllung von Zuleitungen oder beim Ablassen von Reaktoren bei der industriellen Herstellung von Polytetrafluorethen (PTFE) vorkommen

Während die adiabate Kompression von Acetylen punktuell schon experimentell untersucht wurde ([4],[5]), sind bisher keine Arbeiten mit dem Fokus auf der adiabaten Kompression von Tetrafluorethen in der wissenschaftlichen Literatur zu finden. Im Rahmen eines von der „Association of Plastic Manufacturers in Europe“ (PlasticEurope) geförderten Forschungsprojekts wurden systematische Untersuchungen des Zündverhaltens von TFE durch adiabate Kompression mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern und –längen durchgeführt. Zudem wurden das Kompressionsverhältnis sowie die Absolutdrücke im Hochdruck- und Kompressionsteil variiert. Aus praktischem Interesse wurden Drücke von 15

bar bis 30 bar<sup>1</sup> im Hochdruckbereich und von 0,05 bar bis 1 bar im Niederdruckbereich gewählt.

## 2 Versuchsapparatur

Die Versuche wurden auf dem Testgelände Technische Sicherheit (BAM TTS) durchgeführt. Die Anlage war nach dem Schutzraumprinzip aufgebaut, so dass sich die Rohrstrecke in einem teilweise überdachten Versuchsstand außerhalb des Gebäudes befand. Der Betriebsstand war in einem explosionsgeschützten Raum untergebracht. Die komplette Anlage konnte ferngesteuert werden.

Die Grundkonfiguration ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Hier war der Hochdruckbereich ein 3-dm<sup>3</sup>-Autoklav (#2), der eine lange Rohrleitung simulierte. Der Autoklav (#2) war durch ein Rohrstück (#3, Ø = 15 mm, L = 750 mm) mit einem Kugelhahn (#6) verbunden. Diese kurze Rohrleitung sollte die Ausbildung einer laminaren Strömung während der Versuchsdurchführung begünstigen.

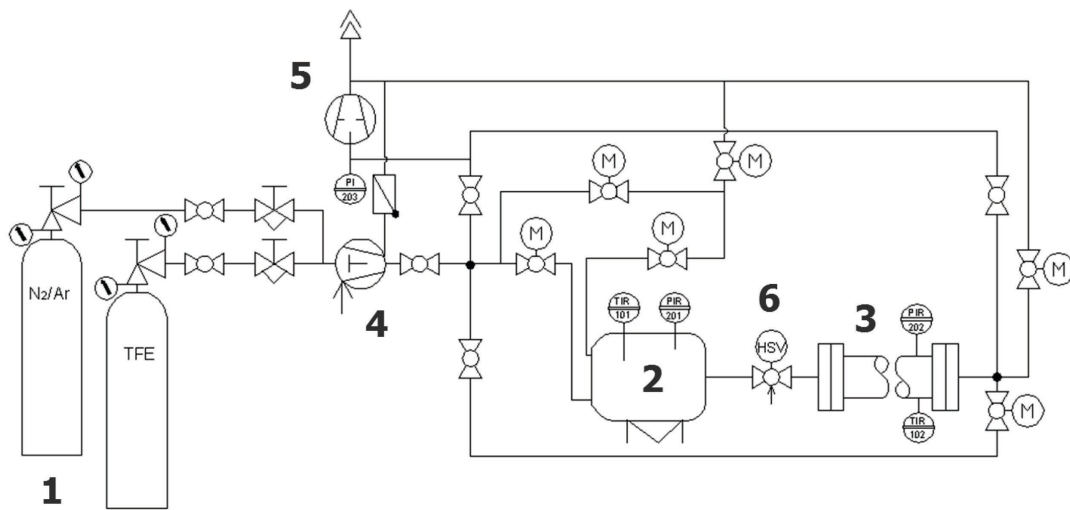


Abbildung 2: Schematische Darstellung des ersten Versuchsaufbaus. 1 - Druckgasbehälter für TFE/N<sub>2</sub>/Luft; 2 - 3-dm<sup>3</sup>-Autoklav; 3 - Kompressionsrohr; 4 - Luftbetrieblener Kompressor; 5 - Vakuumpumpe; 6 - Kugelhahn.

Die in den Versuchen mit dem ersten Aufbau untersuchten Geometrien der Kompressionszone sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Geometrien der in dem ersten Aufbau getesteten Kompressionsrohre.

Länge des Kompressionsrohres in mm (Ø = 15 mm)	1145
Länge des Kompressionsrohres in mm (Ø = 20 mm)	1040

Am Ende des Kompressionsrohres war ein Thermoelement (Typ: K) eingebaut, um die Temperaturerhöhung bei der adiabaten Kompression zu erfassen. Zur Reduzierung der thermischen Trägheit wurden Mantelthermoelemente mit Ø = 1 mm an der Spitze entmantelt. Dadurch lagen die Drähte des Thermopaars frei. Mit einem Durchmesser von 0,15 mm führte dies zu deutlich kürzeren Ansprechzeiten. In den meisten Versuchen wurde ein zweites Thermoelement 15 mm vom Ende des Kompressionsrohres eingesetzt, um die Ausbreitung der heißen Gaszone zu untersuchen.

<sup>1</sup> Es wird in diesem Beitrag immer von Absolutdrücken gesprochen.

Zur statischen Druckmessung wurden piezoresistive Druckaufnehmer eingesetzt. Am Ende des Kompressionsrohres konnte zusätzlich ein piezoelektrischer 400-bar-Druckaufnehmer installiert werden. Dieser ermöglichte aufgrund der hohen Eigenfrequenz eine schnellere Druckmessung als die piezoresistiven Druckaufnehmer.

Das plötzliche Öffnen des Kugelhahns wurde über einen pneumatisch betriebenen Stellantrieb realisiert. Dieser wurde durch ein Magnetventil gesteuert, welches mit max. 8 bar Druckluft versorgt wurde. Es wurden Öffnungszeiten von 20 ms bis 50 ms erreicht. Dies wurde mit Hilfe von zwei Kontaktschaltern gemessen. Das Ende des Kompressionsrohres konnte zusätzlich mit einer PVC- bzw. PTFE-Scheibe versehen werden. Dadurch wurden eventuelle Wärmeverluste über den Endstopfen verringert. Ähnliche Zustände können in TFE-führenden Rohrleitungen nach längerem Betrieb durch die Bildung von Polymerschichten auftreten.

Der komplette Versuchsaufbau war beheizbar, wobei die zwei Druckbereiche sich getrennt regeln ließen. Die Temperaturen wurden dabei mit Platinwiderstandsthermometern Pt-100 kontrolliert und über PID- Regler gesteuert.

In einer zweiten Konfiguration der Versuchsanordnung wurde der 3-dm<sup>3</sup>-Autoklav durch ein 5-m-Rohr ersetzt. So sollten mögliche Einströmeffekte und dadurch entstehende Turbulenzen aus dem 3-dm<sup>3</sup>-Autoklav in die Verbindungsleitung zum Kugelhahn verhindert und ein höherer Impuls des Gases während der Kompression erreicht werden. Eine schematische Darstellung des zweiten Versuchsaufbaus ist in Abbildung 3 gezeigt.

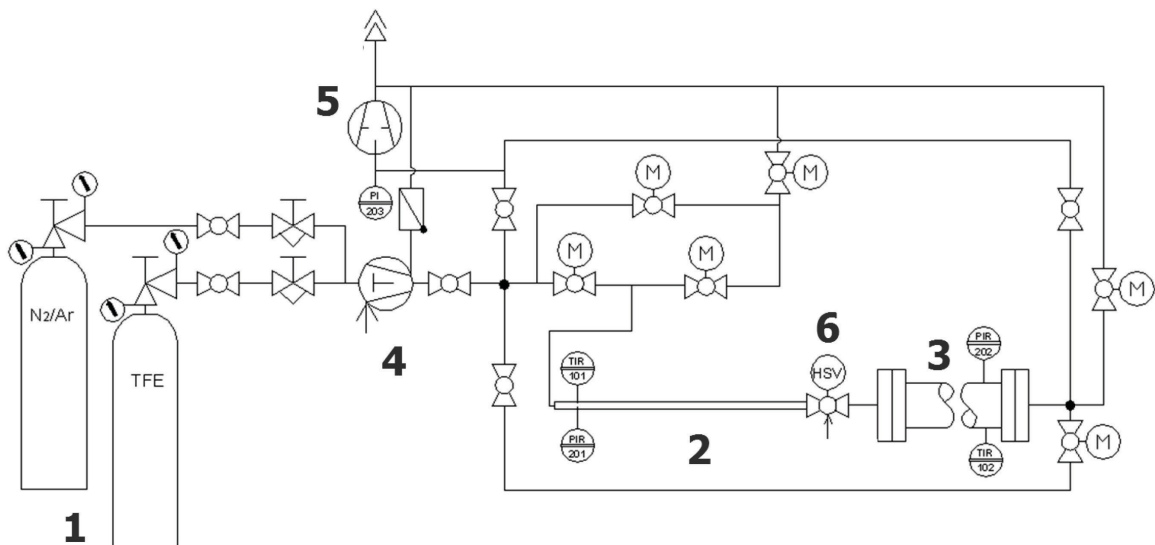


Abbildung 3: Schematische Darstellung des zweiten Versuchsaufbaus:  
 1 - Druckgasbehälter für TFE/N<sub>2</sub>/Luft; 2 - 5-m-Rohr; 3 - Kompressionsrohr;  
 4 - Luft-betriebener Kompressor; 5 - Vakuumpumpe; 6 - Kugelhahn.

Die untersuchten Geometrien im zweiten Versuchsaufbau sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Geometrien der in dem zweiten Aufbau getesteten Kompressionsrohre.

Länge des Kompressionsrohres in mm (Ø = 15mm)	180; 540; 1020
Länge des Kompressionsrohres in mm (Ø = 20mm)	1040

Um die Öffnungszeit des Kugelhahnes zu verkürzen, wurde der Stellantrieb modifiziert, um höhere Steuerdrücke bis 15 bar zu ermöglichen. Somit konnten die Öffnungszeiten von 20 ms bis 50 ms im ersten Aufbau auf nunmehr 8 ms bis 12 ms verringert werden.

## 3 Versuchsablauf und Versuchsumfang

### 3.1 Versuchsablauf

Aufgrund der Arbeit mit zerfallsfähigen Gasen und den hohen Anfangsbedingungen des Drucks musste die Versuchsanlage vollständig dicht sein. Dies wurde vor jedem Versuch durch eine Dichtheitsprüfung sichergestellt. Anschließend wurden die Anlagenteile auf die entsprechende Temperatur geheizt und die Anlage wurde vollständig evakuiert

Hierbei wurde ein technisches Vakuum von etwa 1 mbar in der Anlage als ausreichend angenommen. Jetzt wurden Niederdruck- und Hochdruckbereich auf die gewünschten Anfangsdrücke befüllt. Das Befüllen auf der Hochdruckseite wurde ferngesteuert über den Füllstand geregelt. Hierbei kamen drei Gase, Stickstoff, Acetylen und TFE, zum Einsatz.

### 3.2 Versuchsumfang

Folgende Versuchsreihen wurden im Rahmen der Untersuchung durchgeführt:

- **N<sub>2</sub>- Versuche (beide Aufbauten)**
  - Vergleich von thermodynamisch berechneten Kompressionstemperaturen und experimentell bestimmten Temperaturen in der Kompressionszone bei Anfangsdrücken bis 30 bar
- **Adiabate Kompression von TFE (beide Aufbauten)**
  - Drücke bis 30 bar im Hochdruckbereich
  - Stabilisiertes TFE ( $\alpha$ -Pinene), kein Unterschied zu nicht stabilisiertem TFE (aus früheren Ergebnissen [7])
  - Füllung über druckluftbetriebenen Kompressor
  - Gase in Kompressionszone: Luft, Stickstoff, TFE (0,05 bar, 0,1 bar)
  - Hochdruckbereich im ersten Aufbau wurde geheizt aufgrund hoher Wärmekapazität von TFE → höhere Kompressionstemperaturen
  - Versuche im zweiten Aufbau anfänglich ohne Heizung des Hochdruckbereichs → bei späteren Versuchen beheizt
  - Worst-Case-Szenarien: Vorheizen der Kompressionszone auf bis zu 120 °C
  - 15-mm-Kompressionsrohre; L = 180 mm, 540 mm und 1020 mm
- **Acetylen- Versuche zur apparativen Validierung**
  - Reproduzierbarkeit von TFE-Zündungen war unzureichend → Überprüfung der Anlage mit bekannten Zündbedingungen für Acetylen
  - Vergleich mit Werten aus Arbeit von Lietze [4]
  - Zündung bereits bei 15 bar Acetylen und 1 bar Luft

Rohre mit unterschiedlichen Temperaturen können in TFE-verarbeitenden Anlagen etwa nach Wartungs- oder Reparaturarbeiten vorkommen.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Versuche im ersten Aufbau (3-dm<sup>3</sup>-Autoklav als Puffer für Hochdruckgas)

In Tabelle 3 sind ausgewählte Ergebnisse der im ersten Aufbau durchgeführten Versuche zusammengefasst.

Tabelle 3: Ausgewählte Ergebnisse der ersten Versuchsreihe

Versuche mit Kompressionsrohr mit $\varnothing = 15$ mm, L = 1145 mm						
$p_{0,hi}$ in bar	$p_{0,lo}$ in bar	Gase	$T_0$ in °C	$T_{0, vessel}$ in °C	$T_{comp}$ in °C	Dämmung
21	0,1	TFE / N <sub>2</sub>	19		76	keine
25	0,1	TFE / N <sub>2</sub>	19		78	keine
Versuche mit Kompressionsrohr mit $\varnothing = 20$ mm, L = 1040 mm						
$p_{0,hi}$ in bar	$p_{0,lo}$ in bar	Gase	$T_0$ in °C	$T_{0, vessel}$ in °C	$T_{comp}$ in °C	Dämmung
22	0,05	TFE / N <sub>2</sub>	23	23	69	Scheibe
22	0,1	TFE / Luft	24	23	76	Scheibe
20	0,05	TFE / N <sub>2</sub>	24	83	81	Scheibe
21	0,1	TFE / N <sub>2</sub>	27	89	90	Scheibe
25	0,05	TFE / N <sub>2</sub>	24	56	45	PTFE-Wolle
23	1	TFE / Luft	25	61	44	PTFE-Wolle

Hier kam es zu keiner Zündung. Die maximale Temperatur der Kompressionszone überschritt nie 90 °C. Für den untersuchten Aufbau konnten weder eindeutigen Abhängigkeiten der maximalen Temperatur vom Versuchsgas in der Kompressionszone, von der Art der Wärmedämmung noch von der Geometrie der Kompressionsrohre (CP1:  $\varnothing = 15$  mm, L = 1145; CP2:  $\varnothing = 20$  mm, L = 1040) beobachtet werden. Auch das Heizen des Gases im Hochdruckbereich bis auf 90 °C führte nicht zu deutlichen Erhöhungen der Kompressionstemperatur.

### 4.2 Versuche im zweiten Aufbau (5-m-Rohr als Puffer für den Hochdruckgas)

Das Gas im Hochdruckbereich im zweiten Versuchsaufbau befand sich bei den ersten Versuchsreihen auf Raumtemperatur. Es wurde nun die Anfangstemperatur im Niederdruckbereich zwischen 25 und 120 °C variiert.

Zuerst wurden Versuche mit Acetylen bei 21 bis 26 bar auf der Hochdruckseite und Luft bei 1 bar im Niederdruckbereich durchgeführt. In der Rohrstrecke mit einem Innendurchmesser von 20 mm konnte mit der 1040 mm langen Kompressionstrecke keine Zündung eingeleitet werden. Im Gegensatz dazu kam es im 15-mm-Rohr (L = 540 mm) in jedem Fall zu einer Zündung.

Dieselbe Versuchskonfiguration wurde nun mit TFE bei Drücken bis 26 bar untersucht. Der Druck in der Kompressionszone (Luft) betrug 0,1 bar und 1 bar. Hier kam es in einem Versuch mit TFE bei 25 bar und 17 °C im Hochdruckbereich und Luft bei 1 bar und 28 °C im Niederdruckbereich zu einer Zündung, wie in Abbildung 4 dargestellt ist.

Bei dieser Zündung wurde keine Temperaturerhöhung im Hochdruckbereich beobachtet. Weitere Versuche unter identischen Anfangsbedingungen führten zu keiner weiteren Zündung. Daher kann hier von Grenzbedingungen ausgegangen werden.

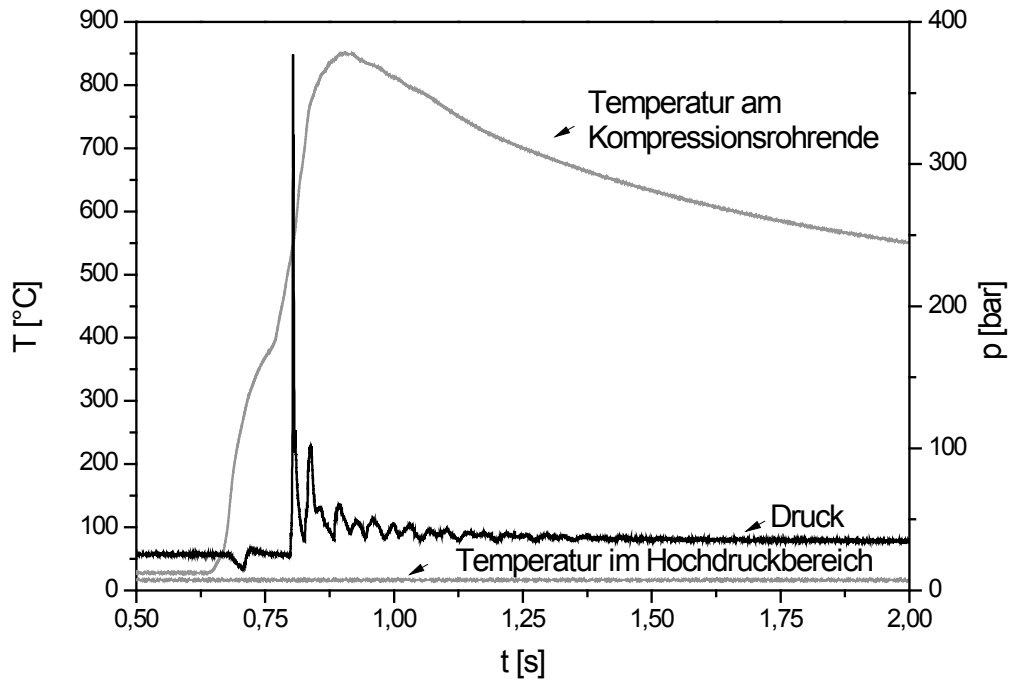
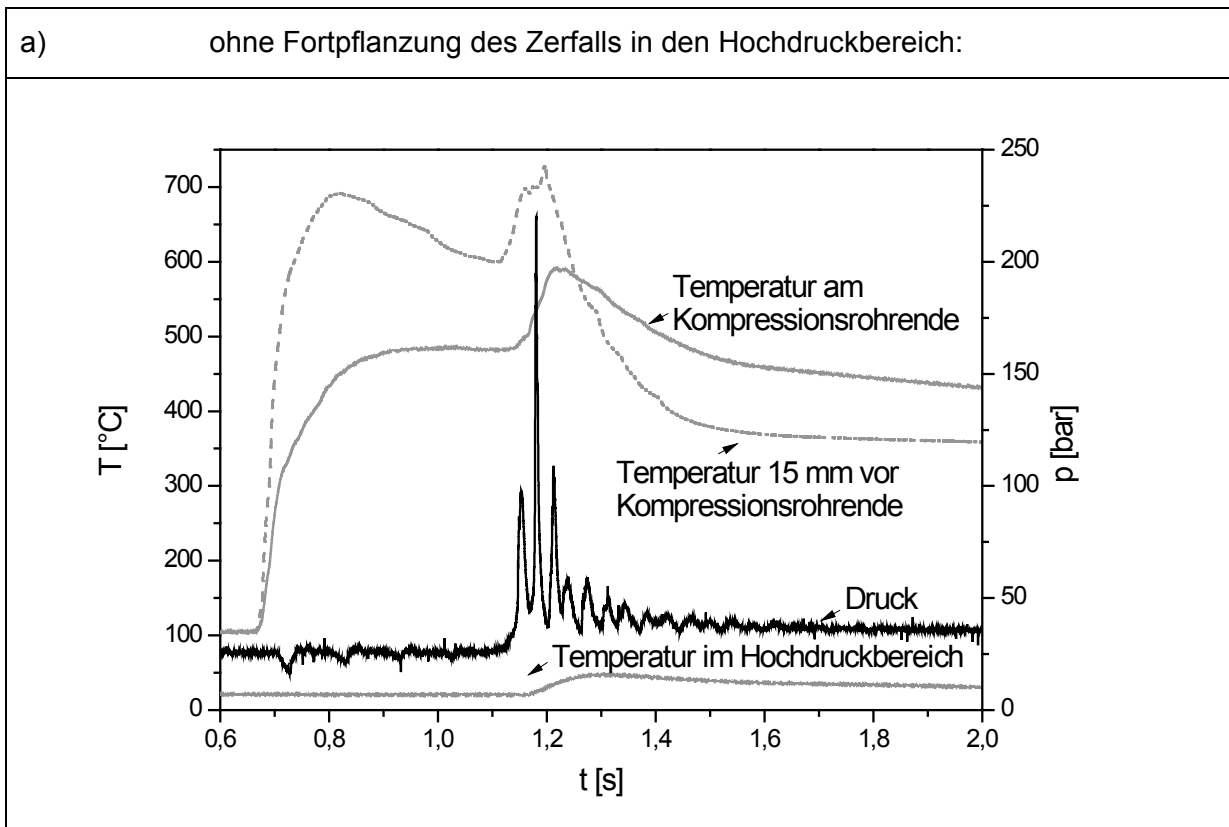


Abbildung 4: Temperatur- und Druckprofile in dem ersten Versuch mit Zündung von TFE. Anfangsbedingungen: TFE bei 25 bar und 17 °C; Luft bei 1 bar und 28 °C. Kompressionsrohr mit  $\varnothing = 15$  mm und  $L = 540$  mm.

Reproduzierbare Zündungen ließen sich erst bei einer Erhöhung der Anfangstemperatur des Kompressionsrohrs auf  $> 105$  °C beobachten. Ab einer Rohrtemperatur von 120 °C pflanzte sich der Zerfall zudem selbständig bis in den Hochdruckbereich fort. Die entsprechenden Druck- und Temperaturkurven sind in Abbildung 5 dargestellt.



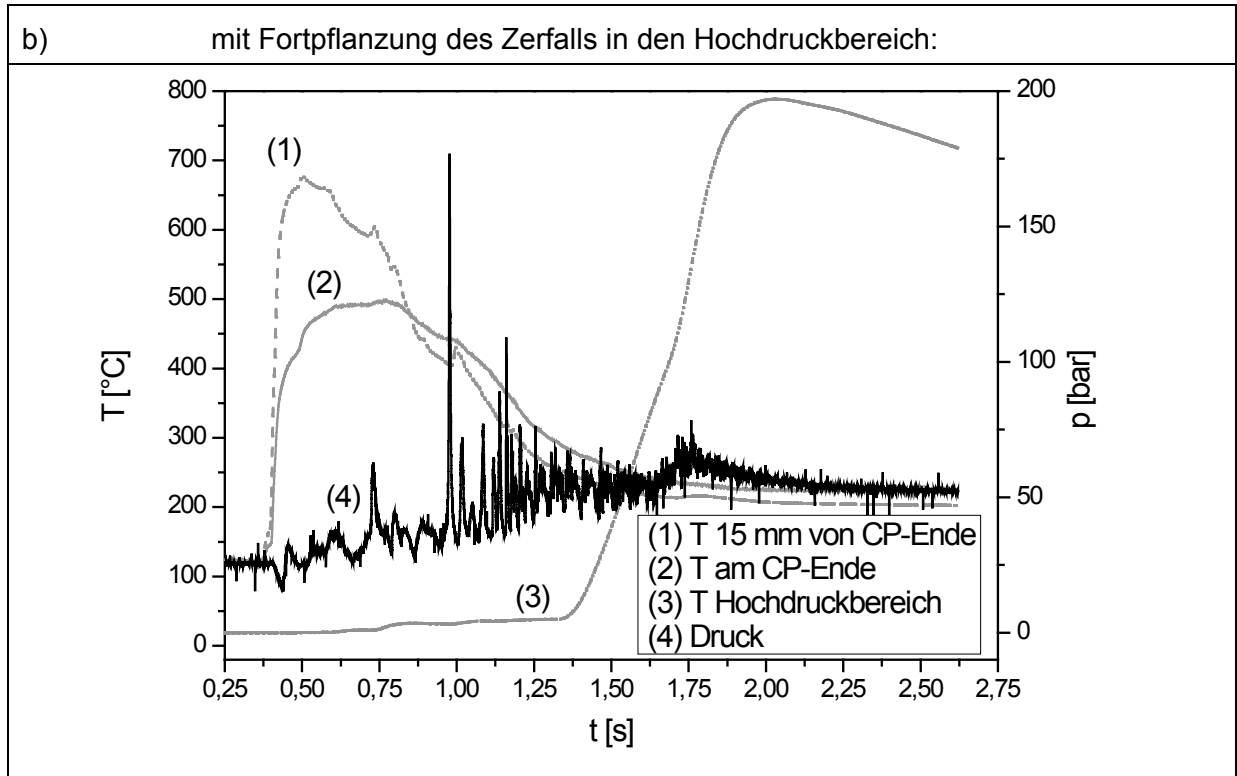


Abbildung 5: Temperatur und Druckprofile bei Versuchen mit Zündungen von TFE bei 25 bar im 5-m-Rohr und vorgeheizte Luft im Kompressionsrohr ( $\varnothing = 15 \text{ mm}$ ;  $L = 1020 \text{ mm}$ ).

In Tabelle 4 sind ausgewählte Ergebnisse mit Luft bzw. Stickstoff in der Kompressionszone zusammengefasst.

Tabelle 4: Auswahl der in der ersten Versuchsreihe erzielten Ergebnisse mit Luft in der Kompressionszone. Grau markierte Felder kennzeichnen Zündungen.

Versuche mit Kompressionsrohr mit $\varnothing = 20 \text{ mm}$ , $L = 1040 \text{ mm}$										
$p_{0,hi}$ in bar	$p_{0,lo}$ in bar	Gase	$T_0$ in °C	$T_{0, 5m}$ in °C	$T_{comp}$ in °C	$T_{comp, 15mm}$ in °C	$p_{tot, end}$ in bar	$p_{ex}$ in bar	$T_{ex, 5m}$ in °C	
21	1	ACE / Luft	15	18	138		18			
25	1	ACE / Luft	19	19	140		22			
Versuche mit Kompressionsrohr mit $\varnothing = 15 \text{ mm}$ , $L = 540 \text{ mm}$										
$p_{0,hi}$ in bar	$p_{0,lo}$ in bar	Gase	$T_0$ in °C	$T_{0, 5m-pipe}$ in °C	$T_{comp}$ in °C	$T_{comp, 15mm}$ in °C	$p_{tot, end}$ in bar	$p_{ex}$ in bar	$T_{ex, 5m}$ in °C	
21	1	ACE / Luft	22	18	>1000		28	361		
26	1	ACE / Luft		16				>500	787	
25	1	TFE / Luft	28	17	850		27	377	18	
25	1	TFE / Luft	90	13	>1000	>1000	27	364	23	
25	1	TFE / Luft	97	15	132		24			
26	1	TFE / Luft	114	15	146	162	24			
Versuche mit Kompressionsrohr mit $\varnothing = 15 \text{ mm}$ , $L = 180 \text{ mm}$										
$p_{0,hi}$ in bar	$p_{0,lo}$ in bar	Gase	$T_0$ in °C	$T_{0, 5m}$ in °C	$T_{comp}$ in °C	$T_{comp, 15mm}$ in °C	$p_{tot, end}$ in bar	$p_{ex}$ in bar	$T_{ex, 5m}$ in °C	
25	0,1	TFE / Luft	99	25	103	103	25			
25	1	TFE / Luft	103	25	111		25			
						109				



Versuche mit Kompressionsrohr mit  $\varnothing = 15 \text{ mm}$ ,  $L = 1020 \text{ mm}$ 

$p_{0,hi}$ in bar	$p_{0,lo}$ in bar	Gase	$T_0$ in °C	$T_{0,5m}$ in °C	$T_{comp}$ in °C	$T_{comp,15mm}$ in °C	$p_{tot,end}$ in bar	$p_{ex}$ in bar	$T_{ex,5m}$ in °C
25	1	TFE / Luft	51	25	126	163	23		
25	1	TFE / Luft	78	25	587	916	27	215	49
25	1	TFE / Luft	78	20	156	182	24		
25	0,1	TFE / Luft	105	22	165	183	24		
26	1	TFE / Luft	105	22	594	764	27	178	43
25	1	TFE / Luft	100	22	169	205	24		
26	1	TFE / Luft	105	21	591	724	29	221	47
25	1	TFE / Luft	111	21	679	904	27	302	47
25	1	TFE / Luft	120	19	498	676	34	176	789

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung der Zündvorgänge von TFE durch adiabate Kompression in kleinen Rohrleitungen zeigen, dass nur für sehr eng begrenzte Anfangsbedingungen reproduzierbare Zündungen möglich sind. Es wurde eine Vielzahl von Versuchen mit verschiedenen Gasen in der Kompressionszone durchgeführt. Die Anfangsbedingungen orientierten sich an praxisrelevanten Prozessbedingungen. Die getesteten Kompressionsrohre hatten einen Innendurchmesser von 15 und 20 mm und Länge zwischen 180 und 1145 mm. Dabei kam es nur zu Zündungen, wenn das Kompressionsrohr mindestens 540-mm-lang war und TFE bei mindestens 25 bar im Hochdruckbereich und Luft bei 1 bar im Niederdruckbereich vorlagen. Reproduzierbare Zündungen wurden nur im längeren Kompressionsrohr (Innendurchmesser von 15 und Länge von 1020 mm) beobachtet, wenn die Anfangstemperatur mindesten 105 °C betrug. Ab einer Anfangstemperatur des Niederdruckteils von 120°C pflanzte sich der initiierte Zerfall zudem vollständig in den Hochdruckbereich fort.

Bei denselben, oder sogar strengeren, Anfangsbedingungen kam es zu keiner Zündung, wenn TFE oder Stickstoff statt Luft in der Kompressionszone vorhanden waren. Hieraus folgt, dass die Komprimierung von Luft durch TFE die sicherheitstechnisch brisanteste Kombination für die Initiierung der Zerfallsreaktion des TFE darstellt.

Dabei läuft die Zündung der Zerfallsreaktion vermutlich über eine anfängliche TFE/Luft-Explosion. Die Mindestzündtemperatur für TFE/Luft Gemische liegt deutlich unter der Mindestzündtemperatur für den Zerfall von TFE bei gleichen Drücken. Parallel zu den experimentellen Untersuchungen durchgeführte CFD-Simulationen haben zudem neue Aspekte über das komplexe Zusammenspiel von Mischungszone, heißer Kompressionszone und Induktionszeiten aufgezeigt [9]. Die sich daraus ergebenden neuen Ansätze im Zusammenspiel mit einem hohen industriellen Interesse an der Ermittlung von sicherheitstechnisch kritischen Bedingungen bei adiabatischer Kompression führten zu einem weiterführenden Forschungsvorhaben.

In dessen Rahmen wurde eine Versuchsanlage zur Untersuchung adiabatischer Kompression im Industriemaßstab aufgebaut, die derzeit auf dem BAM-TTS in Betrieb genommen wird.

## Symbole und Abkürzungen

ACE	Acetylen
CP	Kompressionsrohr
FS	Messbereichsendwert
L	Rohrlänge, mm
p	Druck, bar

$p_{0,hi}$	Anfangsdruck im Hochdruckbereich, bar
$p_{0,lo}$	Anfangsdruck im Niederdruckbereich, bar
$p_{ex}$	Maximaler Druck bei einer Zündung, bar
$p_{tot,end}$	Druck nach dem Versuch, bar
$t$	Zeit, s
$T$	Temperatur, K
$T_0$	Anfangstemperatur im Niederdruckbereich, °C
$T_{0, 5m-pipe}$	Anfangstemperatur im 5-m-Rohr, °C
$T_{0, vessel}$	Anfangstemperatur im 3-dm <sup>3</sup> -Autoklav, °C
$T_{comp}$	Maximale Temperatur am Kompressionsrohrende, °C
$T_{comp,15mm}$	Maximale Temperatur 15 mm vor Kompressionsrohrende, °C
$T_{ex, 5m-pipe}$	Maximale Temperatur im 5-m-Rohr bei einer Zündung, °C
TFE	Tetrafluorethen
Ø	Innendurchmesser, mm
$\Delta H_R$	Reaktionsenthalpie, kJ/mol

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der „Association of Plastic Manufacturers in Europe“ (PlasticEurope) für die Förderung des Projektes VH 2509 „Preventing of Tetrafluoroethylene (TFE) Explosions by Numerical Prediction of Hazardous Conditions“. Ein besonderer Dank geht an die Dyneon GmbH für die Bereitstellung von Tetrafluorethen.

## Literatur

- [1] Reza, A., & Christiansen, E. (2007). A case study of a TFE explosion in a PTFE manufacturing facility. *Process Safety Progress*, 26, 77-82.
- [2] Lamnaouer, M. (2004). Numerical modeling of the shock tube flow fields before and during ignition delay time experiments at practical conditions. PhD Thesis. University of Central Florida.
- [3] McMillan, R. J. (2004). *Shock tube investigation of pressure and ion sensors used in pulse detonation engine research*. Thesis. Air Force Institute of Technology. Wright-Patterson Air Force Base. Ohio.
- [4] Lietze, D. (2002). Zündung von Hochdruck-Acetylen durch adiabatische Verdichtung von Luft. *Chemie Ingenieur Technik*, 74, 126-128 (in German).
- [5] Schröder, V., & Holtappels, K. (2009). Zündung von Acetylen durch Druckstoß in Rohrleitungen. *Chemie Ingenieur Technik*, 81, 177-181 (in German).
- [6] Meyer, R. (2009). *Untersuchung des Zündverhaltens des Tetrafluorethens (TFE) durch adiabatische Kompression*. Thesis. BAM Federal Institute for Materials Research and Testing. Berlin. Germany (in German).
- [7] BAM Federal Institute for Materials Research and Testing (2005). *Surface ignition of TFE and TFE-air mixtures*. Research report.
- [8] Ferrero, F., Meyer, R., Kluge, M., Schröder, V., & Spoormaker, T. (2013). Study of the spontaneous ignition of stoichiometric tetrafluoroethylene–air mixtures at elevated pressures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, In Press.
- [9] Kluge, M.; „Experimentelle Bestimmung und Modellierung von sicherheitstechnischen Eigenschaften der Zerfallsreaktion von Tetrafluorethen“, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2012

## **Terms of Use**

Any party may pass on this Work by electronic means and make it available for download under the terms and conditions of the Digital Peer Publishing License (DPPL) Version 3.0. The text of the license may be accessed and retrieved via Internet at <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-dppl-v3-en8>.

Beyond the conditions of the DPPL, the data which is contained in this catalog May only be used by any party for signal processing if the data is inserted into the source code of the program together with a reference to the catalog and if the program documentation (if available) also contains a reference to this catalog.

## **Exclusion of Liability**

Deviating from paragraphs 12 and 13 of the DPPL Version 3.0, a comprehensive exclusion of liability applies. This states: This catalog is made available without any special or implied guarantee, which – among others – includes the implicit guarantee of the use of the catalog for a certain purpose. Under no circumstances is PTB responsible for any direct or indirect damage, independent of how it arose, through the use of the catalog. This also applies to damage due to errors of the catalog, which were already known at the occurrence of the damage.