

Abschlussbericht zum PTB-Forschungsvorhaben 37055
**Druckabhängigkeit des unteren
Explosionspunktes (UEP) von
brennbaren Flüssigkeiten**

BGRCI Projekt Nr.: 2018-20-F-KCGubA

Laufzeit 03/2019-07/2020

Autor: Arnas Lucassen

PTB Braunschweig

Fachbereich 3.7: Grundlagen des Explosionsschutzes

Oktober 2020

Version 1



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**
Nationales Metrologieinstitut

Der Autor dankt der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie (BG RCI) in Heidelberg für die finanzielle Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation.....	1
2. Einleitung:.....	1
3. Material und Methoden.....	3
3.1. Versuchsaapparatur.....	3
3.2. Experimentelle Prozedur.....	3
3.3. Berechnung des UEP.....	5
3.4. Untersuchte Substanzen und Drücke.....	5
4. Ergebnisse.....	6
5. Diskussion.....	12
6. Literaturverzeichnis.....	13

1. Motivation

In einer Literaturrecherche im Auftrag der BG RCI aus dem Jahr 2014 wurde der Forschungsbedarf hinsichtlich des Einflusses des Drucks auf den unteren Explosionspunkt erläutert [1]. Das Ziel dieses Projektes ist es, diese Lücke zu schließen.

Der untere Explosionspunkt (UEP) ist eine sicherheitstechnische Kenngröße, welche die Explosionsfähigkeit der Atmosphäre über einer brennbaren Flüssigkeit beschreibt. Das Verfahren für atmosphärische Bedingungen ist in der Europäischen Norm EN-15794 [2] geregelt.

In modernen Prozessen werden jedoch in zunehmendem Maße nicht-atmosphärische Bedingungen unter anderem veränderte Drücke zur Prozessoptimierung eingesetzt. Die Beurteilung des Vorkommens explosionsfähiger Atmosphäre darf dann nicht mehr anhand des Norm-UEP erfolgen. Eine Abschätzung erfolgt derzeit über die Berechnung aus der Dampfdruckkurve und der Temperaturabhängigkeit der Explosionsgrenze. Eine Apparatur zur experimentellen Bestimmung des UEP existierte soweit bekannt nicht. Nun soll experimentell überprüft werden, ob solche Berechnungen eine valide Abschätzung des Gefahrenpotentials erlauben.

2. Einleitung:

Eine wichtige sicherheitstechnische Information ist, ab welcher Temperatur über einer brennbaren Flüssigkeit eine explosionsfähige Atmosphäre entstehen kann. Traditionell wird hierfür der Flammpunkt als Sicherheitstechnische Kenngröße herangezogen. Jedoch ist dieser, da es sich hierbei um ein Nichtgleichgewichtsverfahren handelt, nur mit einem Sicherheitsaufschlag von bis zu 15 K für eine wirklich sichere Auslegung von Anlagen und Verfahren zu gebrauchen [3]. In [4] und [5] wurde beschrieben das der untere Explosionspunkt als Gleichgewichtsgröße für solche Auslegungen die bessere Kenngröße ist. Unter anderem auch deshalb, da manche Stoffe keine Flammpunkt zeigen aber Explosionsgrenzen besitzen. Der UEP ist definiert als die Temperatur, bei welcher die Konzentration des gesättigten Dampfes in Luft oberhalb einer brennbaren Flüssigkeit im Gleichgewicht der unteren Explosionsgrenze(UEG) entspricht (Abbildung 1). Zugrunde liegt dieser Definition das der Brennstoffgehalt in der Atmosphäre über einer Flüssigkeit durch deren Dampfdruck bei der herrschenden Temperatur bestimmt wird. Jede weitere Erhöhung der Temperatur der Flüssigkeit über den UEP hinaus führt zum Überschreiten der Explosionsgrenze in der Atmosphäre über der Flüssigkeit. Das Verfahren für die Bestimmung des UEP unter atmosphärischen Bedingungen ist in der Europäischen Norm [2] geregelt. Auf Basis dieser Norm wurden für atmosphärische Bedingungen umfangreiche Datensätze generiert und in der Datenbank Chemsafe [6] hinterlegt.

Unter atmosphärischen Bedingungen werden im Sinne der ATEX Direktive sowohl Temperaturen zwischen -20 °C bis 60 °C als auch Drücke zwischen 800 mbar bis 1100 mbar verstanden. Bedingungen außerhalb dieser Intervalle und andere Oxidationsmittel als Luft gelten demnach als nicht-atmosphärische Bedingungen.

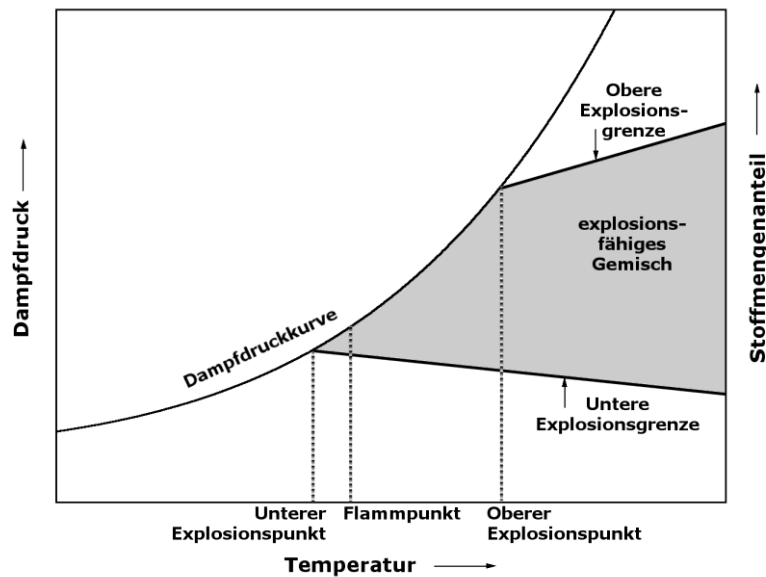


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Explosionsgrenzen, Dampfdruck, Explosionspunkten und Flammpunkt (adaptiert aus [4])

Wir nun der Druck durch einpressen von Luft erhöht, erhöht sich der Partialdruck der Luft, der thermodynamisch bedingte Partialdruck des brennbaren Stoffes über der Flüssigkeit verändert sich bei gleichbleibender Temperatur jedoch nicht. Daraus folgt das die Explosionsgrenze nun unterschritten ist. Der UEP wird somit erst bei einer höheren Temperatur erreicht. Bei gleichbleibender Temperatur des Prozesses würde sich somit die Sicherheitsmarge erhöhen oder bei gleichbleibendem Sicherheitslevel kann die Temperatur erhöht werden. Eine Verringerung des Druckes würde sich entsprechend gegenteilig auswirken.

Die Abschätzung wie stark diese Verschiebung ist erfolgt bei nicht-atmosphärischen Prozessen in der Industrie bisher aufgrund von Berechnungen anhand der Dampfdruckkurve und der Temperaturabhängigkeit der UEG wie in Abschnitt 3.3 beschrieben.

Da für nicht-atmosphärische Bedingungen keine adäquate Datenbasis und kein genormtes Verfahren zur Bestimmung des UEP existiert, ist eine rechnerische Abschätzung im Anwendungsfall kritisch zu sehen und auch nur dann überhaupt möglich, wenn die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Stoffes ausreichend genau bekannt sind. Di Benedetto et. al. konnten in ihren Berechnungen zeigen [7] das die Kurven der Form nach sehr ähnlich sind und sich somit mit einer allgemeinen Formel berechnen lassen. Dies reduziert jedoch nicht die durch die durch abgeschätzte Thermodynamische Daten eingetragene Unsicherheit.

Daher ist es notwendig erste experimentelle Untersuchungen des UEP bei veränderten Drücken für verschieden Stoffklassen durchzuführen um eine Vergleichsbasis zu erhalten und den Einfluss der Stoffklasse zu erkunden.

3. Material und Methoden

3.1. Versuchsapparatur

Die in der atmosphärischen Norm beschriebene Versuchsapparatur kann nicht direkt verwendet werden um Versuche bei höheren Drücken durchzuführen. Um eine Apparatur zu erhalten die den Anschluss an die Norm ermöglicht wurde ein Stahlgefäß mit den in der Norm beschriebenen Innenabmessungen verwendet. Das Gefäß wurde in einem Wärme/Kälteschrank temperiert wie in Abbildung 2 zu sehen. Der Wärmeschrank kann einen Temperaturbereich von -40°C bis $+180^{\circ}\text{C}$ abdecken. Das Gefäß ist mit einem Drucksensor sowie 4 Thermoelementen an verschiedenen Positionen bestückt wie im mittleren Schema dargestellt. Die ein und Ausgänge sind mit Pneumatischen Ventilen versehen um eine Automatische Steuerung zu ermöglichen. Auf diese Art wird eine reproduzierbare Versuchsdurchführung erreicht.

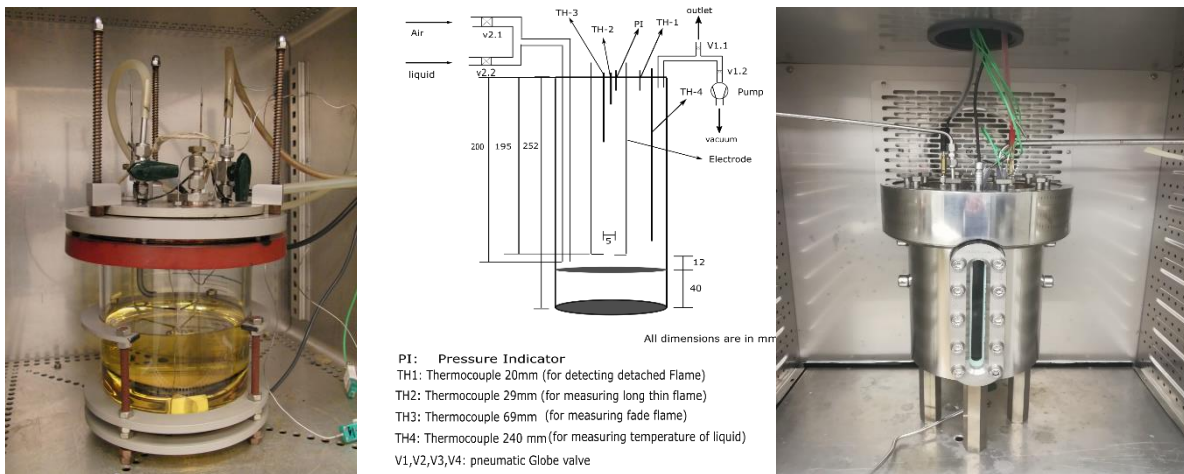


Abbildung 2: Atmosphärische UEP Apparatur, druckfähige Apparatur Schematisch mit Sensorpositionen, druckfähige Apparatur im Temperierschrank

3.2. Experimentelle Prozedur

Die genormte Prozedur für atmosphärischen Bedingungen starte an einem Punkt etwa 5 K unterhalb des abgeschätzten UEP und nähert sich diesem durch Erhöhung der Temperatur von unten an. Da jedoch Temperierung deutlich zeitaufwendiger ist als Druckveränderung wurde für die nicht-atmosphärischen UEPs ein anderer Ansatz gewählt. Hierbei wird bei einer eingestellten Temperatur der Ausgangsdruck schrittweise verringert bis eine Zündung beobachtet werden kann. Eine Druckstufe wird dabei wie folgt untersucht. Zunächst wird die Atmosphäre ausgetauscht. Um ein Sieden der Flüssigkeit und damit eine eventuelle Benetzung der Elektroden zu vermeiden wird das Gefäß nur bis maximal 200 mbar oberhalb des Dampfdruckes evakuiert. Um einen nahezu vollständigen Austausch zu gewährleisten wird diese Evakuierung fünf mal durchgeführt. Danach wird der Startdruck eingestellt und 90 Minuten die Equilibrierung zwischen Gasphase und Flüssigkeit abgewartet. Anschließend wird ein Zündversuch durchgeführt und die Temperatur- und Druckwerte sowie Kamerabilder aufgenommen.

Die Entscheidung über Zündung oder nicht Zündung wurde basierend auf einem kombinierten Druck und Temperaturanstiegs-kriterium gefällt. Dieses Vorgehen erlaubt eine vom Durchführenden unabhängige Erfassung der Zündung. In Abbildung 3 sind die Druckprofile und in Abbildung 4 die

Peakdrücke und Peaktemperaturen beispielhaft für die Messserie Ethanol bei 32 °C mit den gewählten Kriterien dargestellt.[8]

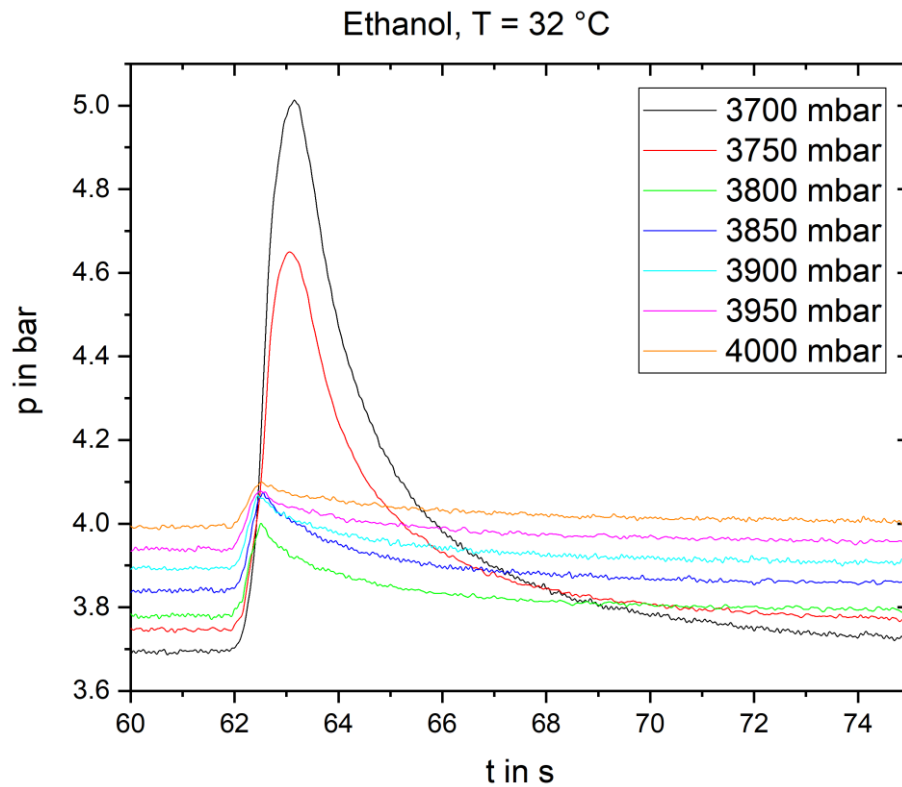


Abbildung 3: Entwicklung des Peakdrucks bei Veränderung des Initialdrucks

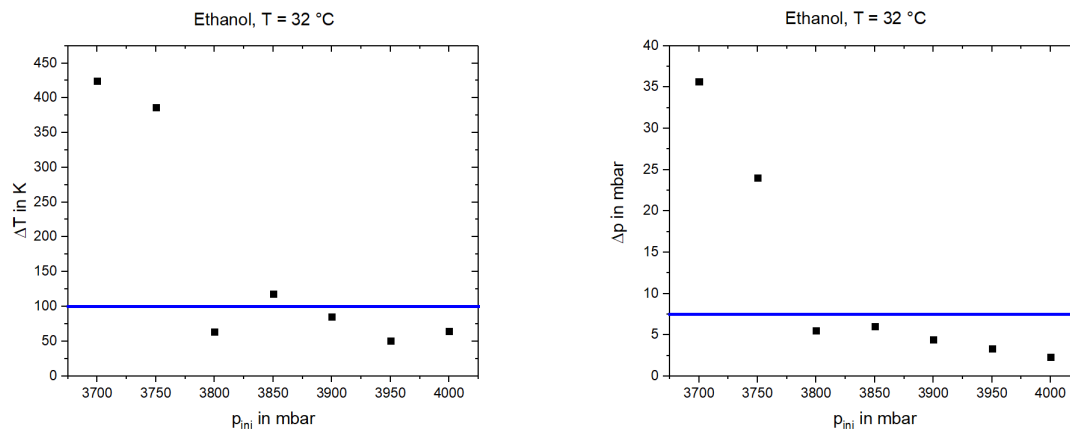


Abbildung 4: Druck und Temperaturkriterien am Beispiel des Ethanols

3.3. Berechnung des UEP

Wie in der Einleitung und [4] beschrieben kann der untere Explosionspunkt durch den Schnittpunkt von Dampfdruckkurve und Explosionsgrenze beschrieben und daher berechnet werden. Für eine Einzelsubstanz genügt hierfür die Antoinegleichung (Gleichung 1) [9] und die Gleichung für die Temperaturabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze (Gleichung 2) [1]. Die Druckabhängigkeit der Unteren Explosionsgrenze ist in dem betrachteten Bereich vernachlässigbar.

$$p(T) = 10^{A - \frac{B}{C+T}} \quad (1)$$

Hierbei sind A, B, and C die tabellierten empirischen stoffspezifischen Konstanten und T die Temperatur in °C.

$$UEG_T = UEG_0 + k\Delta T \quad (2)$$

Für Substanzmischungen müssen zusätzlich die Aktivitätskoeffizienten bekannt sein (Gleichungen 3 und 4).

$$p_{mix}(T) = \sum_i^n x_i \gamma_i(x_i, T) p_i(T) \quad (3)$$

Hierbei ist $p_{mix}(T)$ der Dampfdruck der Mischung in kPa; x_i der Molenbruch der Komponente i in der Flüssigkeit; $p_i(T)$ der Dampfdruck der Komponente i in kPa; und $\gamma_i(x_i, T)$ der Aktivitätskoeffizient der Komponente i .

Die Temperaturabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze ergibt sich dann als:

$$1/UEG_{mix}(T) = \sum_{i=1}^n x_i p_i(T) \gamma_i(x_i, T) / LEL_i(T) p_0 \quad (4)$$

Hierbei ist $LEL_{mix}(T)$ die untere Explosionsgrenze der Mischung bei der Temperatur T in kPa; $UEG_i(T)$ die untere Explosionsgrenze der Komponente i in kPa und p_0 der Referenzdruck von 1 kPa.

Es wurde festgestellt das für gebräuchliche Substanzen die Unterschiede der Antoinekonstanten aus unterschiedlichen Quellen keinen signifikanten Unterschied im Kurvenverlauf erzeugen [6], [10], [11]. Weiterhin ist zu bemerken, das experimentelle untere Explosionspunkte die Kurve nicht erreichen können sollten, da die Norm den UEP als die Temperatur definiert an dem noch keine Zündung beobachtet wird. Analog wurde auch hier der Startdruck als UEP definiert bei dem noch keine Zündung beobachtet werden konnte. Eine echte Abweichung von der Kurve kann daher erst beobachtet werden wenn sich auch Punkte die einer Zündung entsprechen unterhalb der Kurve, also hin zu höheren Drücken und niedrigeren Temperaturen befinden bzw. Punkte ohne Zündung oberhalb der Kurve. Daher werden in den Ergebnissen jeweils für eine Druckserie nicht nur der UEP sondern auch der im Raster nächstniedrigere Druck aufgetragen (Bei welchem die Zündung beobachtet wurde).

Für die Berechnung der Aktivitätskoeffizienten wurde das AIOMFAC Model herangezogen und die Berechnungen mittels des Online Rechners ausgeführt.[12]

3.4. Untersuchte Substanzen und Drücke

Um verschiedene Einflüsse auf die Druckabhängigkeit des UEP zu erfassen wurden verschiedene Substanzklassen untersucht. Zunächst wurde Ethanol als kurzkettiger Alkohol mit sehr hoher

Verbreitung untersucht und die grundlegende Methode validiert. Um einen Anschluss an die Norm herstellen zu können wurden die dort zur Charakterisierung der Apparatur tabellierten Substanzen 1-Octanol, m-Xylen und Aceton untersucht. Hiermit wurden längerkettige Alkohole, aromatische Verbindungen und Ketone abgedeckt. Weiterhin ausgewählt wurden Cyclohexan und n-Heptan als cyclische und offenkettige Kohlenwasserstoffe, sowie Ethylacetat und Tetrahydrofuran als Ester und Ether und Essigsäure als Carbonsäure. Um einen Eindruck zu gewinnen wie sich das Verfahren auf Mischungen übertragen lässt wurde anschließend eine Mischung, die zu gleichen Stoffmengenanteilen aus Ethanol und Essigsäure bestand untersucht. Insgesamt decken diese auch einen weiten Temperaturbereich von -26 bis 100 °C ab. Der untersuchte Druckbereich lag jeweils zwischen 500 und 4500 mbar. Dabei wurden die Temperaturabstände jeweils an der Steigung der Kurve angepasst.

Substanz	UEP Atmosphärisch [°C]	k	A	B	C	Quelle
Ethanol	9	-0,0019	7,27664 bar	1615,127 K	-45,012 K	[13]
1-Octanol	77,5	-0,0012	7,084510 Torr	1457,760°C	151,580°C	[6]
m-Xylen	23,0	-0,0017	5,09199 bar	1996,545 K	-14,772 K	[13]
Aceton	-23,0	-0,0010	6,24204 bar	1210,600 K	-43,490 K	[13]
Cyclohexan	-20	-0,0017	6,45271 Torr	999,403°C	199,096°C	[6]
n-Heptan	-8	-0,0017	6,893860 Torr	1264,370°C	216,640°C	[6]
Ethylacetat	-6	-0,0009	4,22809 bar	1245,702 K	-55,189 K	[13]
Tetrahydrofuran	-23	-0,0025	4,12118 bar	1202,942 K	-46,818 K	[13]
Essigsäure	35	-0,0015	7,559600 Torr	1644,048 °C	233,524 °C	[6]
50% Essigs./ 50% Ethanol	-	-	-	-	-	

Tabelle 1: Untere Explosionspunkte bei Atmosphärendruck (aus [6]) und Antoine Parameter für die untersuchten Substanzen.

4. Ergebnisse

In den folgenden Graphen sind jeweils der UEP, also der letzte Wert bei dem es zu keiner Zündung kam, aufgeführt, sowie der erste Messpunkt bei dem es zu einer Zündung kam. Als Vergleich sind jeweils die anhand der thermodynamischen Daten vorausgerechneten Kurven aufgetragen.

Die Ergebnisse für Ethanol sind in Abbildung 5 dargestellt. Der bei Umgebungsdruck gemessene Wert von $(10,5 \pm 1,5)$ °C entspricht unter Berücksichtigung der Messunsicherheit dem in der Normapparatur gemessenen Wert von (9 ± 2) °C [2]. Alle Werte für den UEP liegen auf oder rechts von der Kurve.

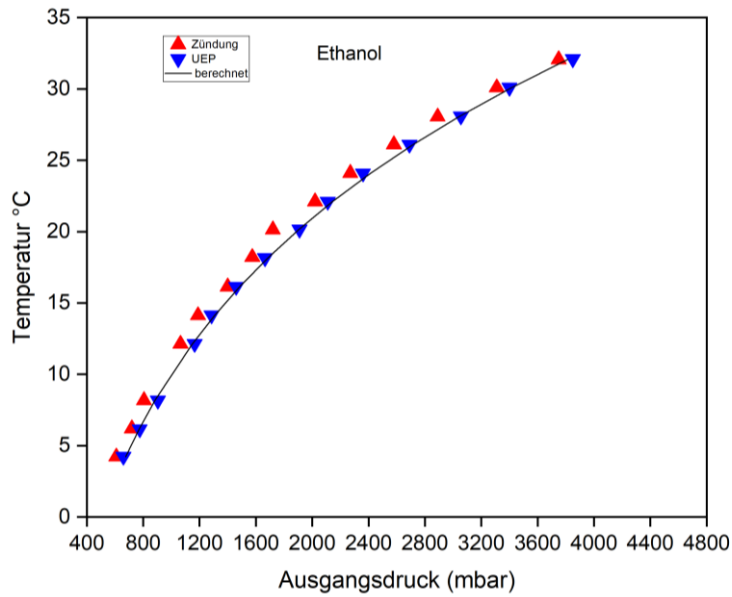


Abbildung 5: Explosionspunktkurve für Ethanol: Linie: Berechnungen anhand der Dampfdruckkurve und UEG. Punkte: experimentelle Werte.

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die Experimentellen Werte für 1-Octanol und m-Xylen und deren Vergleich zu den berechneten Werten.

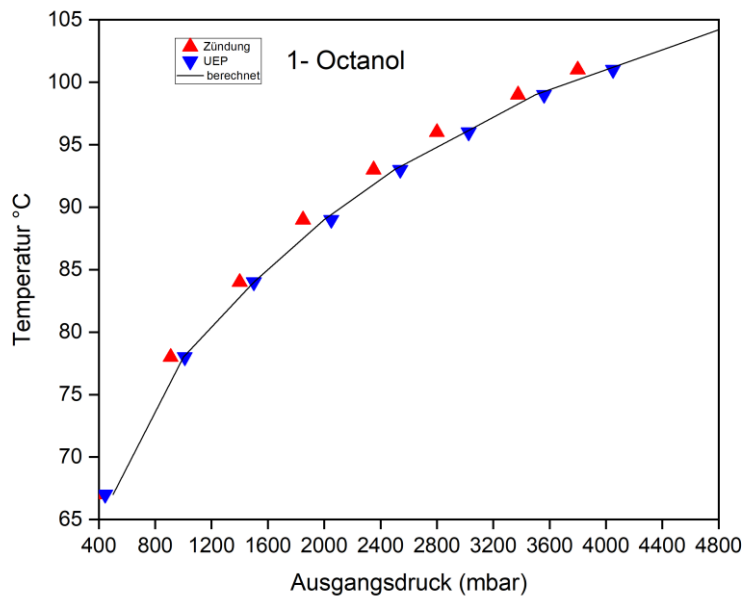


Abbildung 6: Explosionspunktkurve für 1-Octanol. Linie: Berechnungen anhand der Dampfdruckkurve und UEG. Punkte: experimentelle Werte.

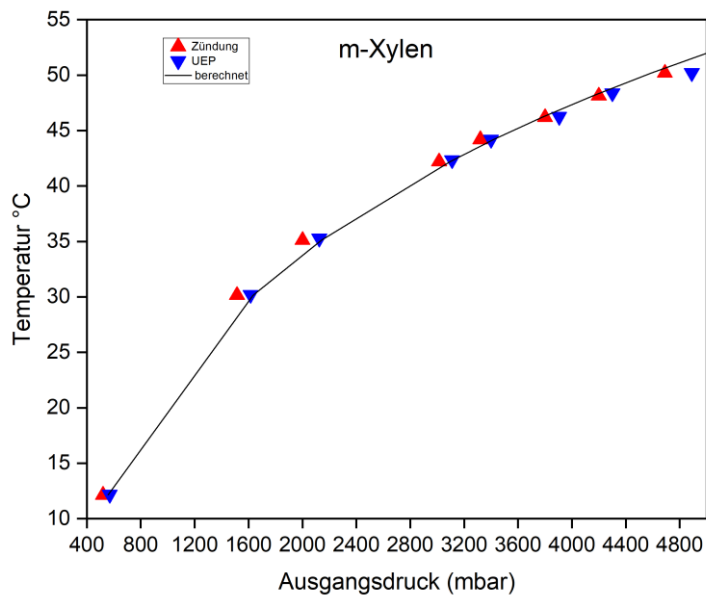


Abbildung 7: Explosionspunktkurve für m-Xylene. Linie: Berechnungen anhand der Dampfdruckkurve und UEG. Punkte: experimentelle Werte.

Wie in Abbildung 8 zu sehen sind die UEPs für die geringeren Drücke deutlich links von der berechneten Kurve angesiedelt und kommen dieser erst ab etwa 3,5 bar nahe.

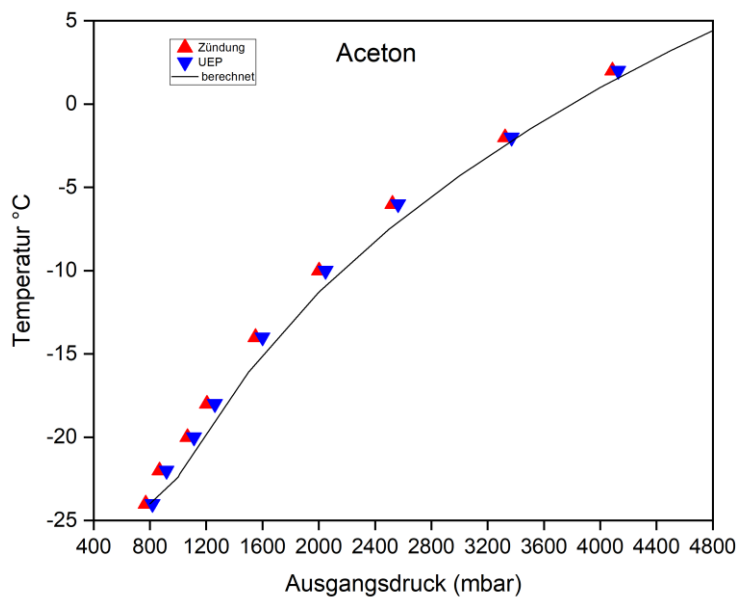


Abbildung 8: Explosionspunktkurve für Aceton. Berechnungen anhand der Dampfdruckkurve und UEG. Punkte: experimentelle Werte.

In Abbildung 9 ist zu sehen das die Druckerhöhungen für die Acetonzündversuche sich stark von den in Abbildung 3 dargestellten unterscheiden. Bei den geringeren Drücken schlägt die Reaktion sofort von

recht gering nach sehr heftig um, während bei höheren Drücken eine optisch als Zündung qualifizierte Reaktion bei nur geringer Veränderung des Peakdrucks beobachtet werden kann.

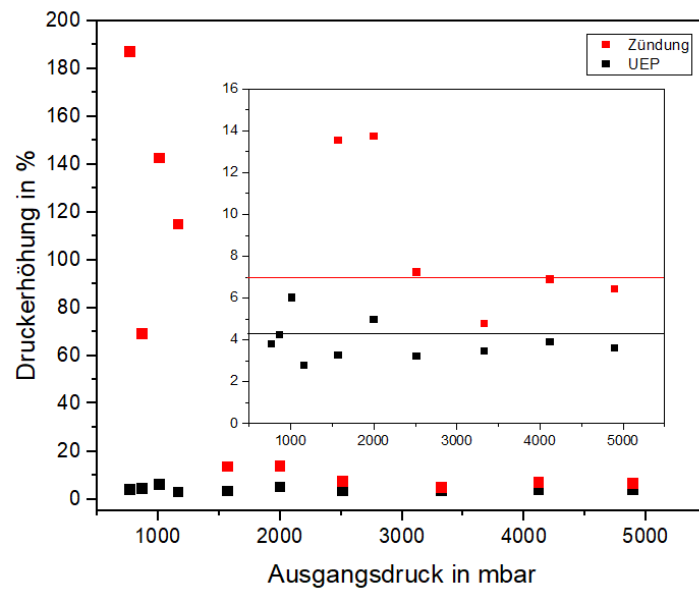


Abbildung 9: Druckanstieg bei den Zündversuchen für Aceton bei verschiedenen Ausgangsdrücken.

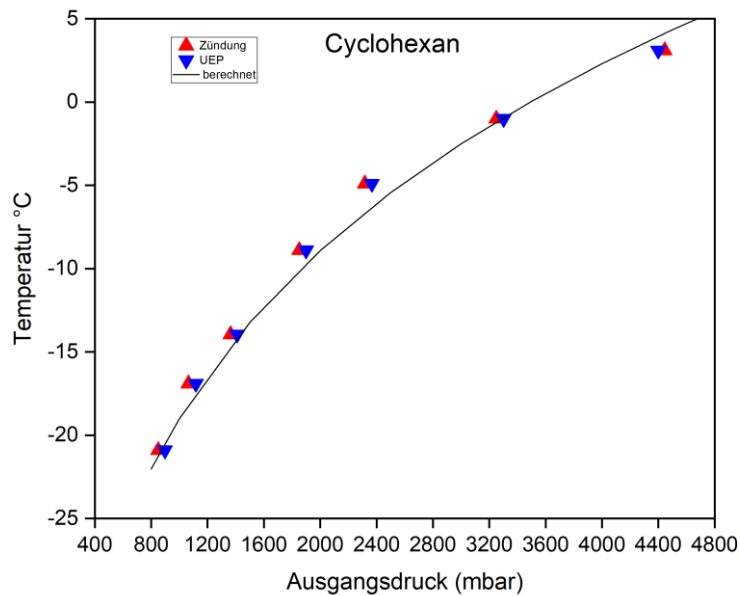


Abbildung 10: Explosionspunktkurve für Cyclohexan Linie: Berechnungen anhand der Dampfdruckkurve und UEG. Punkte: experimentelle Werte.

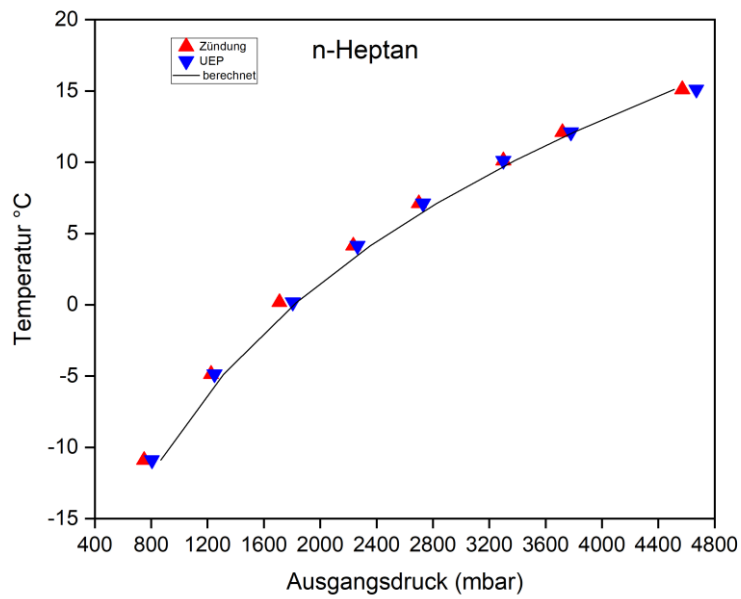


Abbildung 11: Explosionspunktkurve für n-Heptan. Linie: Berechnungen anhand der Dampfdruckkurve und UEG. Punkte: experimentelle Werte.

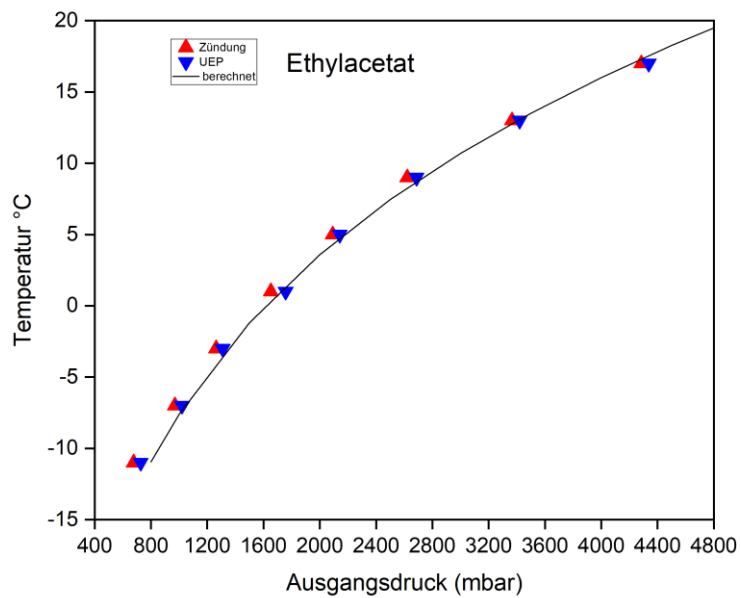


Abbildung 12: Explosionspunktkurve für Ethylacetat. Linie: Berechnungen anhand der Dampfdruckkurve und UEG. Punkte: experimentelle Werte.

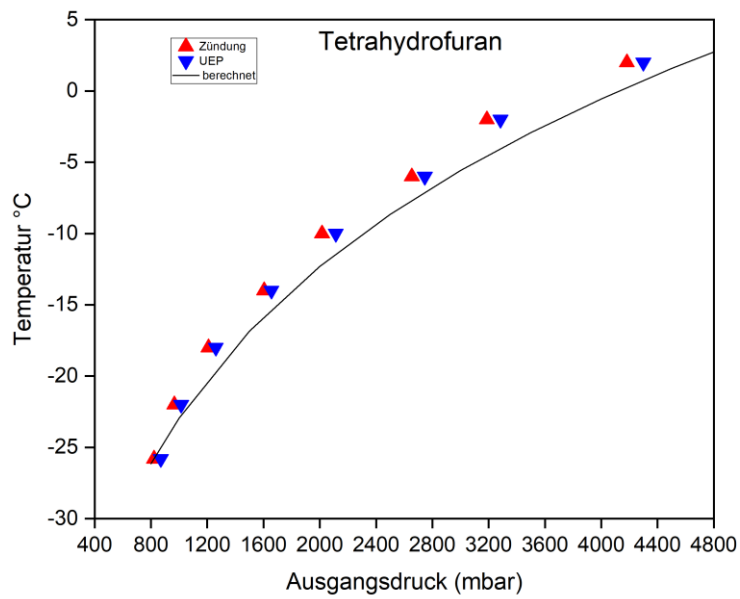


Abbildung 13: Explosionspunktkurve für Tetrahydrofuran. Berechnungen anhand der Dampfdruckkurve und UEG. Punkte: experimentelle Werte.

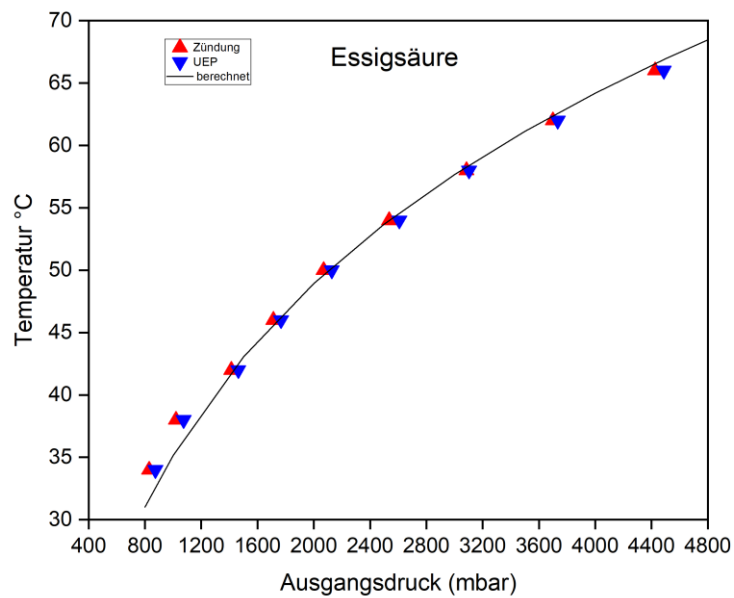


Abbildung 14: Explosionspunktkurve für Essigsäure. Berechnungen anhand der Dampfdruckkurve und UEG. Punkte: experimentelle Werte.

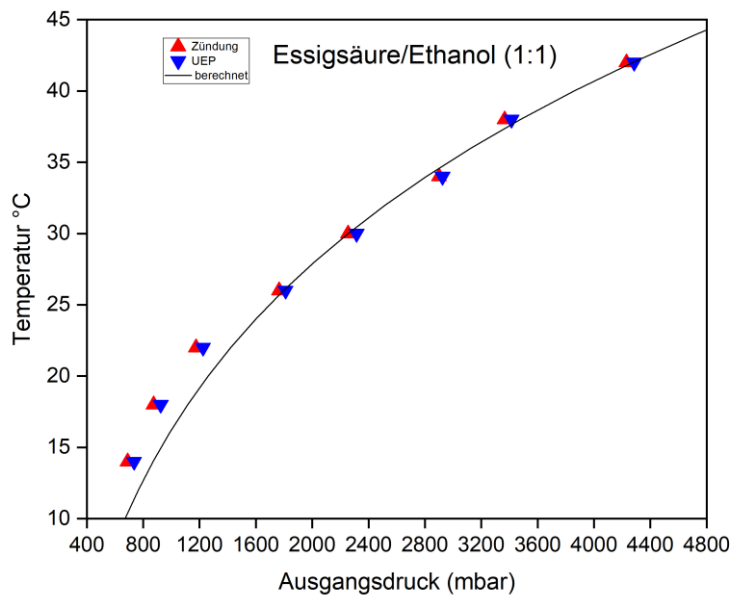


Abbildung 15: Mischung aus Ethanol und Essigsäure zu gleichen Stoffmengenanteilen

Während bei den Reinsubstanzen die Flüssigkeit nur nach einigen Temperaturstufen ausgetauscht werden musste, wurde hier insbesondere im oberen Temperaturbereich ein deutlicher Verlust an Flüssigkeit nach wenigen Zündversuchen und damit einhergehende Verschiebung der Flüssigkeitszusammensetzung festgestellt. Dem wurde mit Bestätigung von sowohl UEP als auch der ersten Zündung mit frischer Mischung entsprochen.

5. Diskussion

Allgemein kann erkannt werden das im Bereich zwischen 800mbar und 4,5 bar eine Vorräusberechnung für die hier betrachtenden Reinsubstanzen, als Vertreter verschiedener Substanzklassen, eine sehr gute Abschätzungen liefern. In diesem Bereich wurden Abweichungen auch tendenziell hin zur sicheren Seite beobachtet. Das heißt die Zündung erfolgte erst bei höherer Temperatur beziehungsweise niedrigerem Druck als vorhergesagt. Für Drücke unterhalb des Atmosphärendrucks werden größere Abweichungen beobachtet aber stets zur sicheren Seite.

Eine Besonderheit konnte beim Aceton beobachtet werden. Hier traten schon weit unterhalb des UEP recht hohe Peak drücke auf auch wenn zunächst keine Zündung beobachtet wurde. Vermutlich sind die Beobachtungen auf recht hohe Energiefreisetzung bei der Umsetzung von Aceton im Funkenbereich unterhalb des UEP zurückzuführen. Im unteren Druckbereich kam es dem entsprechend oberhalb des UEP direkt zu sehr hohen Peakdrücken. Im oberen Druckbereich dagegen konnte noch eine Zwischenstufe beobachtet werden, bei der sich optisch klar eine Zündung erkennen ließ, jedoch die Peakdrücke nur moderat stiegen. Vermutlich ist dieser Zwischenbereich bei geringen Drücken nicht mit dem hier verwendeten Druckraster erfassbar.

Oberhalb von 4 bar konnte bei einigen der Substanzen eine Abweichung zur unsicheren Seite beobachtet werden. Mögliche Ursachen könnten neben echten chemischen Effekten auch im Bestimmungsverfahren zu finden sein. Die Abflachung der Kurve in diesem Bereich bedeute das Abweichungen und Unsicherheiten in den Dampfdruckparametern oder der Temperaturabhängigkeit

der UEG einen größeren Einfluss haben. Ebenfalls ist es möglich das ab einem bestimmten Druck bereits die geringe Druckabhängigkeit der Unteren Explosionsgrenze zum Tragen kommt.

Es konnte auch beobachtet werden das ab einem Druck von etwa 5 bar kein Überschlag des Funkens mehr erfolgte. Dies wird auf die hohe Gasdichte und deren erhöhte isolierende Wirkung zurückgeführt. Dem müsste für eine weitere Erweiterung des Bereiches mit höherer Spannung oder verringertem Elektrodenabstand begegnet werden

Für die Flüssigkeitsmischung konnte eine recht hoher Flüssigkeitsverlust und, bedingt durch die Siedepunktunterschiede, somit eine deutliche Verschiebung des Explosionspunktes während einer Temperaturstufe beobachtet werden. Da dem nur durch häufigen Austausch der Flüssigkeit begegnet werden kann ist die Aufnahme von ganzen Temperatur/Druck-Kurven für Mischungen als sehr Materialintensiv anzusehen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Projekt wurden für 10 Flüssigkeiten, welche in großem Maßstab als Lösemittel eingesetzt werden die Explosionspunkte im Druckbereich von 0,8 bis 4 bar bestimmt. Dafür wurden einige hundert Einzelmessungen durchgeführt. Der Vergleich der Ergebnisse mit Berechnungen auf Grund der Dampfdruckkurve und der Unteren Explosionsgrenze zeigen das die Berechnungen die Explosionspunkte für Reinstoffe sehr gut vorhersagen können. Außerhalb des Bereiches ergeben sich stärkere Abweichungen. Wobei die Abweichungen bei geringeren Drücken hin zur sicheren Seite jedoch bei höheren Drücken zur unsicheren Seite ausfallen. Für Mischungen von Flüssigkeiten sind sowohl die Berechnung als auch die experimentelle Bestimmung mit höheren Unsicherheiten behaftet. Insgesamt ist es somit anzustreben ein experimentelles Bestimmungsverfahren für erhöhte Drücke zu etablieren und die Sicherheitstechnischen Auslegungen nicht rein auf Berechnungen zu basieren.

In Fortsetzung dieser Arbeit sollte genauer untersucht werden woher die Abweichungen von den berechneten Werten bei niedrigen und höheren Drücken als auch rühren. Ebenso wäre zu untersuchen wie sich die Bestimmung des unteren Explosionspunktes für Mischungen von Flüssigkeiten insbesondere mit stärkeren Konzentrations- oder Siedepunktunterschieden realisieren lässt. Weiterhin sollte untersucht werden woher die starken Unterschiede in den Druck- sowie Temperaturanstiegen im Zündungsfall kommen. Dies würde ermöglich ein Verfahren zu entwickeln welches die Bestimmung der Explosionspunkte effizient ohne bedienerabhängige optische Bestätigung ermöglicht. Die gesammelten Erkenntnisse sollten dann in die Normung einfließen.

7. Literaturverzeichnis

- [1] W. Hirsch and E. Brandes, "Sicherheitstechnische Kenngrößen bei nichtatmosphärischen Bedingungen (Gas und Dämpfe)," 2014.
- [2] EN-15794, *Determination of explosion points of combustible liquids*. (European standard), 2009.
- [3] TRGS 721, *Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre - Beurteilung der Explosionsgefährdung*. 2006.
- [4] E. Brandes, M. Mitu, D. Pawel, and N. N, "The lower explosion point-A good measure for

- explosion prevention: Experiment and calculation for pure compounds and some mixtures," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 20, no. 4–6, pp. 536–540, 2007.
- [5] E. Brandes, M. Mitu, and D. Pawel, "Flash-point or lower explosion point which one to choose for explosion prevention," *Proc. Eur. Combust. Meet.*, 2005.
- [6] PTB and BAM, "CHEMSAFE Database for Rate Safety Characteristics," www.chemsafe.ptb.de, 2017. .
- [7] A. Di Benedetto, R. Sanchirico, and V. Di Sarli, "Effect of pressure on the flash point of various fuels and their binary mixtures," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 116, pp. 615–620, May 2018.
- [8] A. Lucassen, M. Beyer, and S. Zakel, "Initial assessment of the determination procedure for the lower explosion point under elevated pressures," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 62, no. July, p. 103923, 2019.
- [9] G. W. Thomson, "The Antoine Equation for Vapor-pressure Data.," *Chem. Rev.*, vol. 38, no. 1, pp. 1–39, Feb. 1946.
- [10] SaECaNet, "Calculation of Antoine equation tool," www.saecanet.com, 2017. .
- [11] Dortmund Data Bank, "Database for Thermophysical Properties," www.ddbst.com, 2017. .
- [12] A. Zuend, "<https://aiomfac.lab.mcgill.ca/index.html>." .
- [13] Eds. P.J. Linstrom and W. G. Mallard, *NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69*. .