



# AUFBAU UND INBETRIEBNAHME EINER 20-L-EXPLOSIONSAPPARATUR

Master-Thesis  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Engineering (B. Eng.)  
an der Hochschule Merseburg

Eingereicht von  
Alexander Hennig  
geb. am 01.04.1989 in Lutherstadt Wittenberg

Betreuer: Prof. Dr. nat. techn. Ulf Schubert  
Dipl.-Ing. (FH) Jörg Vahldieck

Merseburg, 04.10.2013

## **Danksagung**

Danken möchte ich an dieser Stelle meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. Schubert für die Themenstellung und die inhaltliche Unterstützung bei der Erarbeitung der Thematik und der Versuche. Insbesondere in der Zusammenarbeit mit dem Industriepartner InfraLeuna konnte ich unter seiner Anleitung eine Vielzahl von Erfahrungen sammeln, sowohl in der Thematik der Zusammenarbeit von Industrie und Hochschule als auch der interdisziplinären Zusammenarbeit.

Ebenfalls möchte ich Herrn Dipl.-Ing Jörg Vahldieck für die vielfältigen Hilfestellungen bei der Reaktivierung der Anlage meinen Dank aussprechen.

Desweiteren möchte ich Herrn Dipl.-Ing Frank Ramhold für die zahlreichen Hinweise bei der experimentellen Erarbeitung der Daten und für die vielen fruchtbringenden Diskussionen meinen Dank aussprechen.

Danken möchte ich ebenfalls meinen Eltern, Frau Dipl.-Ing. oec. Petra Hennig und Herrn Dr. rer. nat. Rüdiger Hennig, die diese Arbeit unterstützt, eine Reihe von fachlichen und redaktionellen Hinweisen eingebracht und diese Arbeit vor ihrer Fertigstellung gegengelesen haben.

## **Vorwort**

Diese Bachelorarbeit entstand an der Hochschule Merseburg im Zeitraum vom 25. März bis 01. Oktober 2013 am Fachbereich Ingenieurwissenschaften in der Arbeitsgruppe Sicherheitstechnik von Prof. Dr. U. Schubert und im Auftrag und in Zusammenarbeit mit der Firma InfraLeuna GmbH. Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem Industrieprojekt, in welchem die mit dieser Explosionsapparatur gewonnenen Ergebnisse für die Rekonstruktion eines Teilbereiches der Abwasseranlage bzw. für die Neuprojektierung und daraus folgenden Umbau dieser zum Einsatz kommen werden.

## **Kurzfassung**

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Reaktivierung und Inbetriebnahme einer 20-L-Explosionskugel. Mit dieser wurden explosionstechnische Kenndaten für Toluol experimentell ermittelt. Es fanden dabei Untersuchungen zur Verdunstungszeit von Toluol und zu den Einflüssen von Druck und Temperatur statt.

## **Schlüsselwörter**

|s| Abwasserreinigung; |s| Sicherheitstechnik; |s| Explosionsschutz; |s| Explosionskugel;  
|s| Toluol

## **Summary**

In this work was described the reactivation and activation of a 20-L-explosion chamber. With this chamber we define the technical dates of the explosion of toluol in the air. It was defined the time of evaporation from toluol in dependence of pressure, temperature.

## **Keywords**

|k| wastewater treatment; |k| safety engineering; |k| explosion protection; |k| explosion chamber; |k| toluol

## **резюме**

В этой работе будет описан реконструкция и запуск в эксплуатацию 20-л взрывового шара. С этим шаром быди определены взрыво-технических данных толуола. Кроме того исследовали время испарении толуола и зависимости от давлении и температурой.

## **заглавное слово**

|3| очистка сточных вод; |3| техника безопасности; |3| защита от взрыва; |3| взрывовый шар; |3| толуол

# Inhaltsverzeichnis

AUFBAU UND INBETRIEBNAHME EINER	1
20-L-EXPLOSIONSAPPARATUR	1
<b>1 Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>2 Zielsetzung und Abgrenzung der Fragestellung</b>	<b>6</b>
<b>3 Allgemeine Grundlagen zum Explosionsschutz</b>	<b>7</b>
3.1 Explosion	7
3.2 Explosionsschutz	7
3.2.1 Untere und obere Explosionsgrenze	8
3.2.2 Flammpunkt	9
3.2.3 Sauerstoffgrenzkonzentration	9
3.2.4 Mindestzündenergie	9
3.2.5 Maximaler Explosionsdruck	10
3.2.6 Flammendurchschlagsichere Spaltweite (Grenzspaltweite)	10
3.2.7 Zündtemperatur	10
3.3 Stoffdaten und explosionstechnische Kenndaten von Toluol	10
<b>4 Material und Methoden</b>	<b>11</b>
4.1 Allgemeine Darstellung einer Explosionskugel	11
4.2 20-L-Explosionkugel	12
4.2.1 Ausgangszustand der Kugel auf Paletten	12
4.2.2 Beschreibung des Sollzustands inkl. R&I in Hinblick auf Messung Toluol.	13
4.2.3 Reaktivierung Explosionskugel	14
4.2.4 Versuchsaufbau Toluol-Messungen	20
<b>5 Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>23</b>
5.1 Ergebnis und Diskussion reaktivierte Explosionskugel	23
5.1.1 Ergebnis der Reaktivierung und Inbetriebnahme	23
5.1.2 Verifizierung der Methode	24
5.2 Ergebnisse und Diskussion Toluol-Messungen	25
5.2.1 Einfluss der Verweilzeit des Toluols	28
5.2.2 Einfluss der Temperatur	29
5.2.3 Einfluss des Druckes	29
5.2.4 Einfluss von Temperatur und Druck auf die untere Explosionsgrenze	30
5.3 Ausblick	32
<b>6 Literaturverzeichnis</b>	<b>33</b>
<b>7 Tabellenverzeichnis</b>	<b>34</b>
<b>8 Abbildungsverzeichnis</b>	<b>35</b>

# 1 Einleitung

In der Sicherheitstechnik für verfahrenstechnische Anlagen ist es häufig erforderlich, explosionstechnische Daten (Kenngrößen) von den zu verarbeitenden Stoffen zu ermitteln. Für Stäube, Dämpfe und Gase kommt hierfür unter anderem auch die 20 L – Explosionsapparatur zum Einsatz. Dazu soll an der Hochschule Merseburg, im Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften eine solche Apparatur aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Die Inbetriebnahme soll mit der Messung realer explosionstechnischer Kenngrößen enden. Diese Daten werden für den industriellen Kooperationspartner InfraLeuna erarbeitet.

## 2 Zielsetzung und Abgrenzung der Fragestellung

Wie bereits oben beschrieben, sollen Messungen für den industriellen Kooperationspartner InfraLeuna durchgeführt werden. Diese Firma plant und verwaltet die Infrastruktur des Industriestandorts Leuna in Mitteldeutschland. Ihnen obliegen dabei die Felder der Abwasserbereinigung, der Müllentsorgung, der Logistik und der Wartung des Standorts. Im Bereich der zentralen Abwasserbereinigung werden die ankommenden Abwässer über offene Kanäle in die verschiedenen Becken und Anlagen geleitet. Die Becken selbst sind dabei nur im Bereich der Ölabscheider bedeckt, was dazu führen kann, dass Schadstoffe aus den offenen Bereichen ungehindert an die Luft abgegeben werden können. Um dem entgegenzuwirken, plant die InfraLeuna das komplette System abzudecken und die anfallende Abluft aufzufangen und anschließend in Bioreaktoren zu reinigen. Um die 15 m Wassersäule in den Reaktoren zu überwinden, werden dabei die erwarteten 8000 m<sup>3</sup>/h Abluft auf 1,5 bar Überdruck komprimiert. Bei vorhergehenden Messungen der zu erwartenden Abluft sind Gefahrenstoffe wie Toluol und Schwefelwasserstoff enthalten gewesen, welche in gewissen Konzentrationen zu einem explosionsfähigen Gemisch werden können. Um erste Untersuchungen zur Abschätzung des Gefahrenpotentials von Toluol durchführen zu können, entstand eine Zusammenarbeit zwischen der Hochschule Merseburg im Fachbereich Sicherheitstechnik und der InfraLeuna, um sich dieser Thematik wissenschaftlich anzunehmen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen im Bereich Explosionsschutz, der experimentellen Bearbeitung der Problemstellung und geht im Besonderen auf die explosionstechnischen Kenngrößen von Gasen ein.

Die Hochschule Merseburg verfügt für Untersuchungen in diesem Bereich über eine 20 L – Explosionskugel aus dem Jahre 1994, welche für Untersuchungen von Explosionen von Stäuben, Dämpfen und Gasen ausgelegt ist. Da sich das Sicherheitstechnische Labor im Neuaufbau befindet und die Anlage 5 Jahre lang nicht betrieben wurde, musste diese neu aufgebaut und reaktiviert werden.

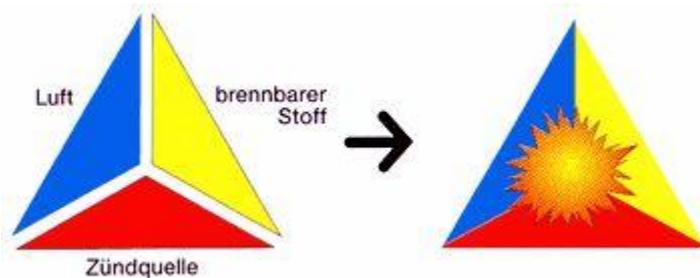
Die Zielsetzung der Arbeit besteht damit in der Inbetriebnahme der Anlage zur Messung und Auswertung der explosionstechnischen Kenndaten von Toluol, damit eine vorläufige Betrachtung des Sicherheitsrisikos von Toluol auf die zentrale Abwasserbereinigungsanlage von InfraLeuna vorgenommen werden kann.

## 3 Allgemeine Grundlagen zum Explosionsschutz

### 3.1 Explosion

„Eine Explosion ist eine Oxidations- oder Zerfallsreaktion mit plötzlichem Anstieg der Temperatur, des Druckes oder beider gleichzeitig“ /1/

**Abbildung 1: Explosionsdreieck [Inburex Consulting, „Sicherheitstechnische Kennzahlen für den Explosionsschutz“ /2/]**



Damit eine Explosion stattfindet benötigt man die drei in Abbildung 1 dargestellten Komponenten. Man braucht also ein Gemisch aus Sauerstoff, in fast allen Fällen ist dies der in der Luft vorhandene Luftsauerstoff, und einen brennbaren Stoff. Dieses Gemisch wird über eine Zündquelle entzündet, was zur Explosion führt. Es kommt dabei zur Ausdehnung eines Gases oder große Mengen an Energie werden auf kleinem Raum freigesetzt. Es entsteht eine Druckwelle, eventuell sogar eine Schockwelle, deren Beschaffenheit und Wirkung von den Grundbedingungen der Explosion sowie der Zusammensetzung des Explosionsgemisches abhängen.

### 3.2 Explosionsschutz

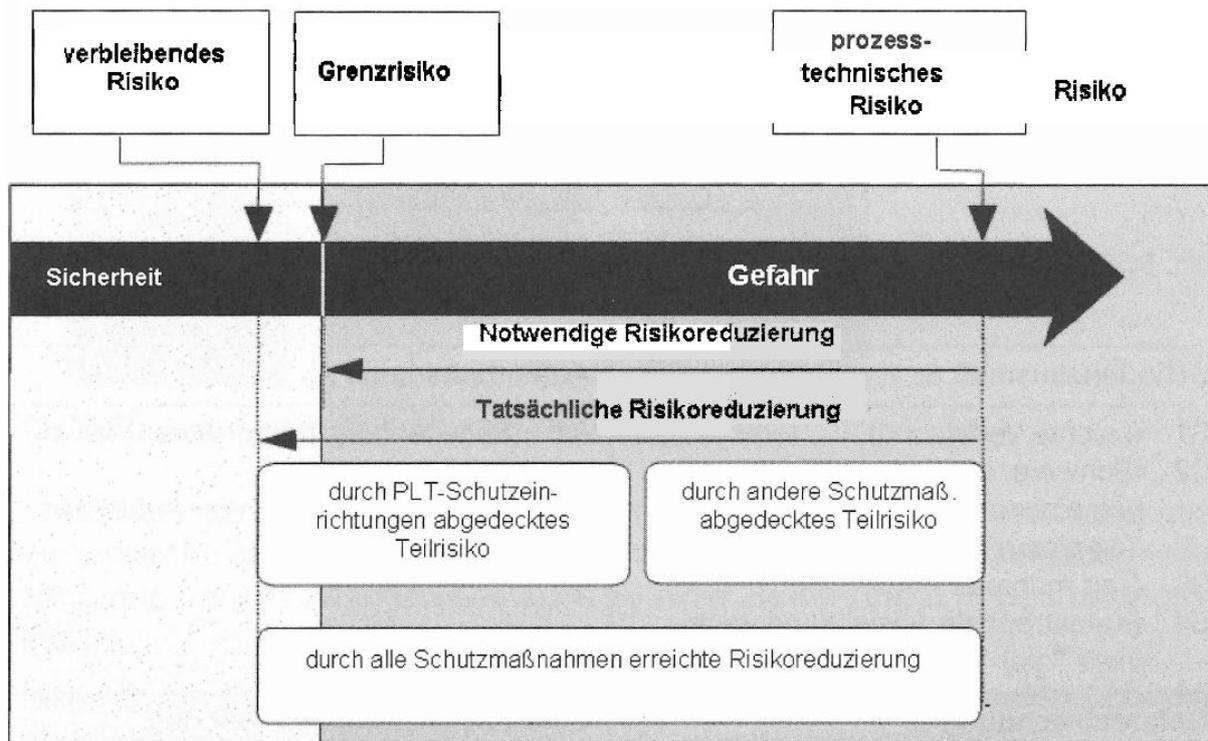
Die Sicherheitstechnik beschäftigt sich mit der Vermeidung von Unfällen. Dies dient dem Schutz der Bevölkerung in den umliegenden Gemeinden, dem Schutz des Bedienungspersonals und der Umwelt sowie der Vermeidung von Sachschäden an den Anlagen. Um dies gewährleisten zu können, benötigt man sicherheitstechnische Kenndaten der Stoffe. Es werden Sicherheitskonzepte und Methoden zur Gefahrenfeldanalyse entwickelt, zur Einschätzung des Gefährdungspotentials und Verminderung der Risiken und des Eintritts eines Störfalles bzw. dessen Verhinderung.

Der Explosionsschutz ist eines der wichtigsten Teilgebiete der Sicherheitstechnik in der heutigen Industrie. Er beschäftigt sich mit dem Ermitteln von explosionstechnischen Kenndaten der zu handhabenden Stoffe, wie zum Beispiel die untere Explosionsgrenze oder die Mindestzündenergie. Diese Untersuchungen unterliegen strengen Normen und benötigen die dafür vorgesehenen Apparaturen, wie zum Beispiel das Hartmannrohr (grundlegende Beschreibung in /3/) zur Betrachtung des Explosionsschutzes von Staubexplosionen.

Mit diesen Stoffdaten kann man die Risiken der Ver- und Bearbeitung von Stoffen ermitteln. So kann man die Anlagenrisiken einschätzen und für die Apparaturen und Anlageräume die notwendigen Schutzmaßnahmen ergreifen. So werden die Bereiche je nach Gefährdung in Schutzzonen eingeteilt und die Geräte erhalten ihre zugehörige Schutzklasse.

Die Ermittlung der sicherheitstechnischen Kenndaten und der Anlagenrisiken nennt man zusammen eine Risikoanalyse. Als Risiko versteht man dabei die „Kombination des gewichteten Gefahrenpotentials mit der zu erwartenden Häufigkeit oder Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses. Dabei bestimmt die Qualität des Schutzkonzeptes die Eintrittswahrscheinlichkeit.“ /3/ Das Risiko zum Eintritt eines Störfalles muss kleiner sein, als das Grenzkrisiko.

Abbildung 2: Risikofeile [Vorlesung Sicherheitstechnik, Schubert /3/]



Die Abbildung 2 zeigt einen Risikofeile, der in die Bereiche Sicherheit und Gefahr durch das Grenzrisiko unterteilt wird. Der Bereich der Gefahr befindet sich über dem Grenzrisiko und in diesem darf eine Anlage nicht betrieben werden. Durch Schutzmaßnahmen muss eine Risikoreduzierung erreicht werden, durch welche das verbleibende Risiko unter dem Grenzrisiko im Bereich der Sicherheit liegt.

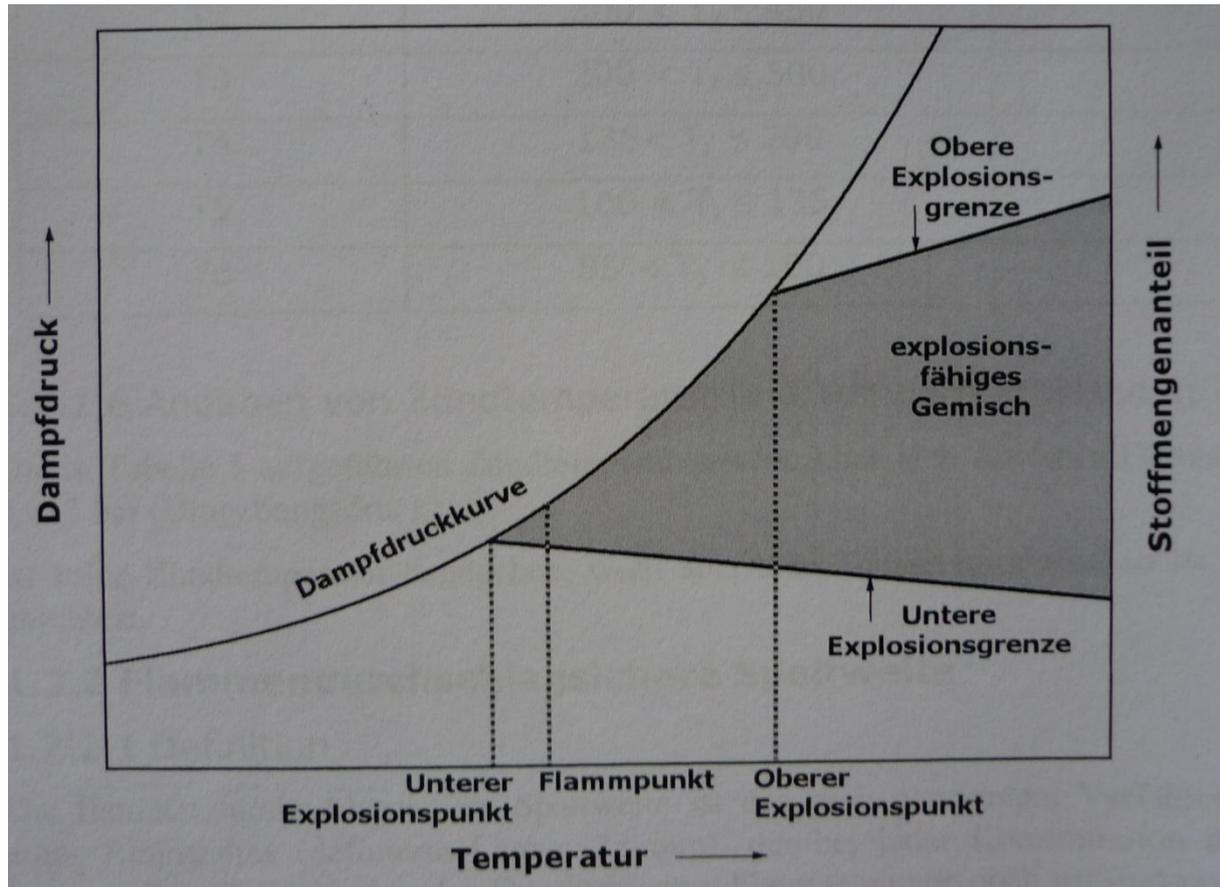
Um dies zu erreichen, gibt es verschiedene Maßnahmen. Man kann technische Veränderungen vornehmen, wie zum Beispiel bei einem explosionsgefährdeten Stoff die Apparaturen, die der Stoff durchläuft, explosionsgeschützt bauen. Man kann auch organisatorische Maßnahmen ergreifen, indem man eine Explosionszone einrichtet, in der jegliche Zündquellen, wie zum Beispiel Funkenbildung, verhindert werden.

Die in dieser Arbeit behandelte 20-L-Explosionskugel dient dabei der Ermittlung zahlreicher Kenndaten der Explosion von Stoffgemischen von Stäuben, Gasen und Dämpfen. Diese sind als Voruntersuchung anzusehen, da die eigentlichen Verfahren nach Norm mit einer 1-m<sup>3</sup>-Explosionskugel durchzuführen sind. Im Folgenden werden die verschiedenen Kenndaten vorgestellt, die mit einer solchen Apparatur untersucht werden können.

### 3.2.1 Untere und obere Explosionsgrenze

„Die untere und die obere Explosionsgrenze begrenzen den Bereich explosionsfähiger Gemische aus brennbarem Stoff und Luft. Die Explosionsgrenzen selbst sind nicht mehr Teil dieses Explosionsbereiches.“ /4/

Abbildung 3: Untere und obere Explosionsgrenze [E. Brandes & B.Möller, „Sicherheitstechnische Kenngrößen - Band 1: Brennbare Flüssigkeiten und Gase“. /4/]



### 3.2.2 Flammpunkt

„Der Flammpunkt ist die niedrigste Temperatur einer brennbaren Flüssigkeit, korrigiert auf einen Luftdruck von 1,013 bar, bei der unter definierten Prüfbedingungen die Dampfphase der Probe durch die Prüf Flamme entzündet wird und sich die Flamme über die Oberfläche der Probe ausbreitet.“ /4/

### 3.2.3 Sauerstoffgrenzkonzentration

„Die Sauerstoffgrenzkonzentration ist der nach festgelegtem Verfahren experimentell ermittelte Sauerstoffanteil, bei dem bei beliebigem Brennstoffanteil gerade keine explosionsfähigen Gemische mehr gebildet werden können.“ /4/

### 3.2.4 Mindestzündenergie

„Die Mindestzündenergie ist der Mindestwert der im Entladekreis gespeicherten Energie, die bei Entladung über eine Funkenstrecke mit möglichst geringen Verlusten in den Zuleitungen das Brennstoff/Luft-Gemisch bei jeder Zusammensetzung des Brennstoff/Luft-Gemisches gerade noch entzündet.“ /4/

### 3.2.5 Maximaler Explosionsdruck

„Der maximale Explosionsdruck ist der unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen ermittelte höchste Druck, der in einem geschlossenen Behälter bei der Explosion eines explosionsfähigen Gemisches auftritt.“ /4/

### 3.2.6 Flammendurchschlagsichere Spaltweite (Grenzspaltweite)

„Die flammendurchschlagsichere Spaltweite ist der nach genormtem Verfahren bestimmte Abstand eines Ringspaltes (definierte Länge: 25 mm), der bei jeder Konzentration des explosionsfähigen Brennstoff/Luft-Gemisches den Durchtritt einer Flamme gerade noch verhindert.“ /4/

### 3.2.7 Zündtemperatur

„Die Zündtemperatur ist die niedrigste Temperatur (einer heißen Oberfläche), bestimmt nach vorgeschriebenem Verfahren, bei der sich ein brennbares Gas/Luft- oder Dampf/Luft-Gemisch gerade noch entzündet.“ /4/

## 3.3 Stoffdaten und explosionstechnische Kenndaten von Toluol

Die folgenden Daten wurden der Literatur E. Brandes & B. Möller, „Sicherheitstechnische Kenngrößen - Band 1: Brennbare Flüssigkeiten und Gase“ /4/ entnommen und die explosionstechnischen Kenndaten beziehen sich auf Normbedingungen:

Relative Molmasse:	92,1 kg/mol
Dichte:	0,87 g/cm <sup>3</sup>
Schmelzpunkt:	-95 °C
Siedepunkt:	111 °C
Flammpunkt:	6 °C
Untere Explosionsgrenze:	1,1 Vol% (42 g/m <sup>3</sup> )
Obere Explosionsgrenze:	7,8 Vol% (300 g/m <sup>3</sup> )
Sauerstoffgrenzkonzentration:	~9,6 Vol%
Maximaler Explosionsdruck:	7,7 bar
Grenzspaltweite:	1,06 mm
Zündtemperatur:	535 °C
Temperaturklasse:	T1
Explosionsgruppe:	IIA

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Allgemeine Darstellung einer Explosionskugel

Eine Explosionsapparatur, im Weiteren auch Explosionskugel genannt, besteht aus einer Hohlkugel, welche von einem Wassermantel umschlossen ist. Dieser wird verwendet, um die Temperatur zum Zündzeitpunkt in der Kugel einstellen und die während der Explosion entstandene Reaktionswärme abführen zu können.

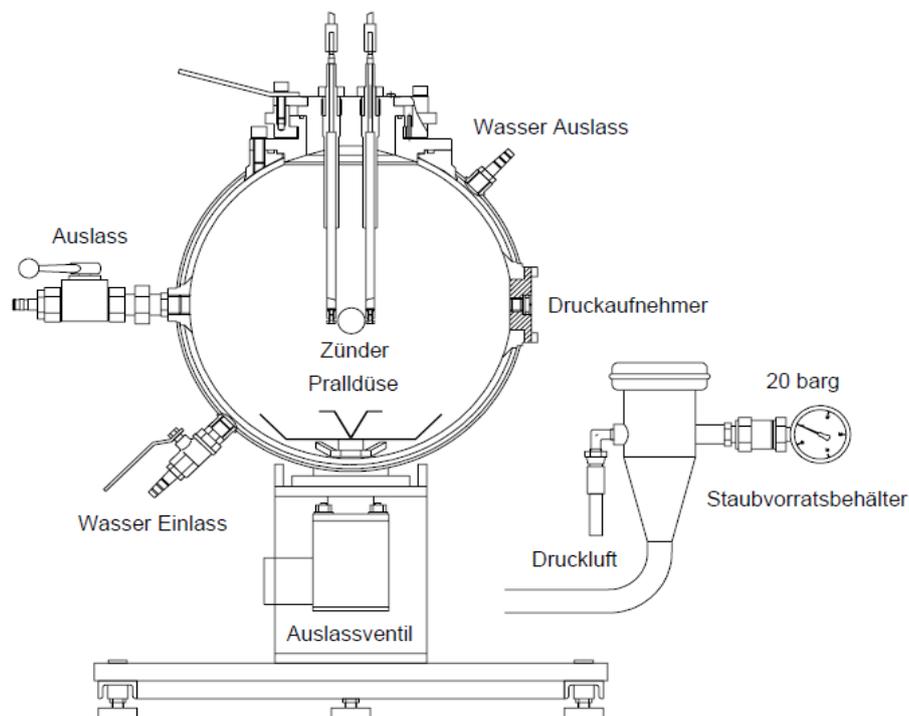
Um in der Explosionskugel Stäube untersuchen zu können, werden diese in einen 20 bar Staubvorratsbehälter geführt und über ein Auslassventil mit Hilfe einer Pralldüse in den Explosionsraum geblasen. Dort wird das Gemisch mit einem chemischen Zünder zur Explosion gebracht.

Bei der Untersuchung von Gasen, wird in der Kugel ein definierter Unterdruck erzeugt. Der Stoff kann nun als Gas eingeleitet werden, um über den Druckunterschied das genau definierte Volumen im Kammerinneren vorzulegen und das Restvakuum mit Frischluft auszugleichen. Liegt der Stoff als Flüssigkeit vor, wird dieser in das Vakuum eingespritzt. Nach einer zu untersuchenden Verweilzeit, die zum Verdampfen des Stoffes nötig ist, wird die Prüfkammer mit Frischluft auf Normaldruck entspannt. Die Zündung des Gemisches kann in diesem Fall mit einem chemischen Zünder oder einer Funkenstrecke erfolgen.

An der Innenwand der Hohlkugel befinden sich meist Piezodruckaufnehmer, welche die Druckdifferenz bei der Zündung aufnehmen. Über die Sensoren wird das Explosionsdiagramm aufgenommen sowie die meisten Kenndaten ermittelt.

Nach der Zündung wird die Kugel mit Druckluft über den Auslass ausgeblasen. Dabei ist meist bei der Untersuchung von Stäuben ein Zyklon nachgeschaltet, um den Großteil des Rußes aufzufangen.

Abbildung 4: Explosionskugel [Handbuch Kühner AG, 20-I-Apparatur /5/]



## 4.2 20-L-Explosionkugel

### 4.2.1 Ausgangszustand der Kugel auf Paletten

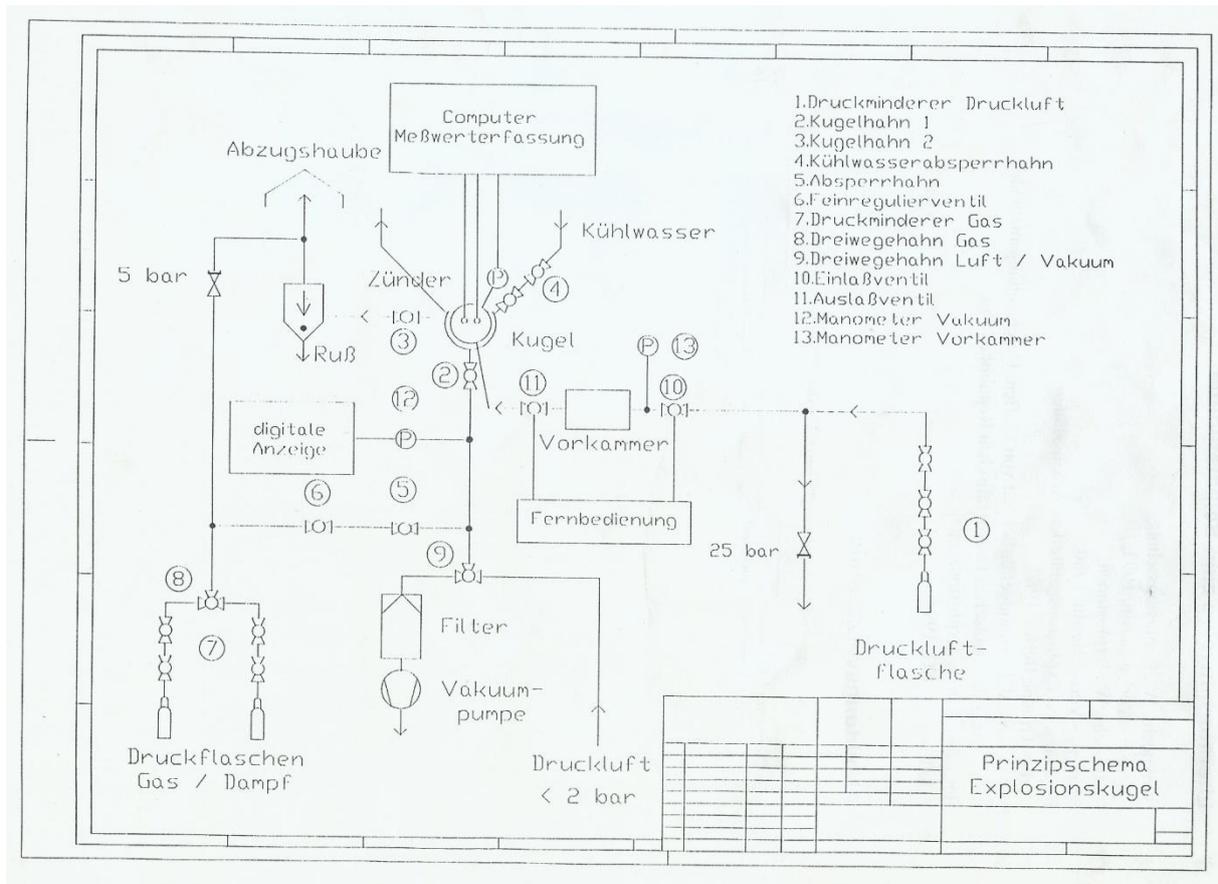
Die aufzubauende Anlage wurde 1994 an der Hochschule Merseburg im Institut Umwelttechnik von der, in der Schweiz ansässigen, Firma Kühner AG erworben und installiert. Sie fand Verwendung im sicherheitstechnischen Praktikum bis zum Jahre 2008 und wurde in dieser Zeit zu gewissen Teilen von Mitarbeitern der Hochschule modifiziert. Die zuständige Lehrkraft für den Fachbereich Sicherheitstechnik, Herr Prof. Dr. B. Reimer, wurde 2008 emeritiert. 2010 wurde Herr Prof. Dr. U. Schubert auf diese Professur berufen und mit dem Neuaufbau des sicherheitstechnischen Bereiches betraut. Nach einer kompletten Neuinstallation eines sicherheitstechnischen Labors werden nun die Anlagen neu aufgebaut. Somit wurde die 20-L-Explosionkugel 5 Jahre lang nicht betrieben.

Um die Laborfläche renovieren zu können, wurde die Anlage demontiert und auf einer Holzpalette transportfähig gemacht. Die zugehörigen Teile und Schläuche wurden in Kisten gepackt. In diesem Zustand war die Anlage für 5 Jahre eingelagert. Ob die Anlage, die Elektronik oder die Einzelteile in diesem Zeitraum durch Stöße, Zeit oder andere Faktoren belastet bzw. beschädigt worden ist, war ungewiss. Auch die Vollständigkeit der Kleinteile und Schläuche war nicht gegeben.

**Abbildung 5: Ausgangszustand der Kugel**



**Abbildung 6: R&I Betrieb der Kugel bis 2008**



#### 4.2.2 Beschreibung des Sollzustands inkl. R&I in Hinblick auf Messung Toluol.

Die Zielstellung im Rahmen dieser Arbeit war die Reaktivierung und Inbetriebnahme der 20-L-Explosionskugel zur Messung der sicherheitstechnischen Kenndaten von Toluol. Um diese Messungen durchführen zu können, musste die Anlage unter diesem Gesichtspunkt neu aufgebaut werden. Dazu war es nötig, die Anlage komplett auseinander zu nehmen, um die Einzelteile zu reinigen, die Dichtungen zu tauschen und alles auf Stabilität und Unversehrtheit zu überprüfen, damit gegebenenfalls beschädigte Teile repariert oder ersetzt werden konnten.

Für die allgemeine Inbetriebnahme der Apparatur muss die Anlage sowohl im Druck- als auch im Unterdruckbereich dicht sein, um reproduzierbare Messungen durchführen zu können. Eine stabile, temperierbare Wasserzufuhr muss gewährleistet werden, um die Anlage bei verschiedenen Temperaturen betreiben zu können und die Explosionswärme abführen zu können.

Bei den Messungen von Toluol muss es möglich sein, das Toluol in die Anlage einspritzen zu können. Um die Anlage bei verschiedenen Reaktionsbedingungen betreiben zu können, muss es ebenfalls möglich sein, Gas aus der Hohlkammer mittels einer Vakuumpumpe evakuieren, den Unterdruck mittels Frischluft entspannen sowie in die Anlage Druckluft pumpen zu können. Dabei hilft der Unterdruck in der Kugel auch zum Verdampfen des Toluols und die Druckluft zum Spülen der Anlage nach der Zündung eines Gemisches bzw. der erfolgten Explosion.

Zum Bestimmen der explosionstechnischen Kenndaten werden seitlich zwei Piezodruckaufnehmer installiert, welche die Messdaten an die Software elektrisch übermitteln.

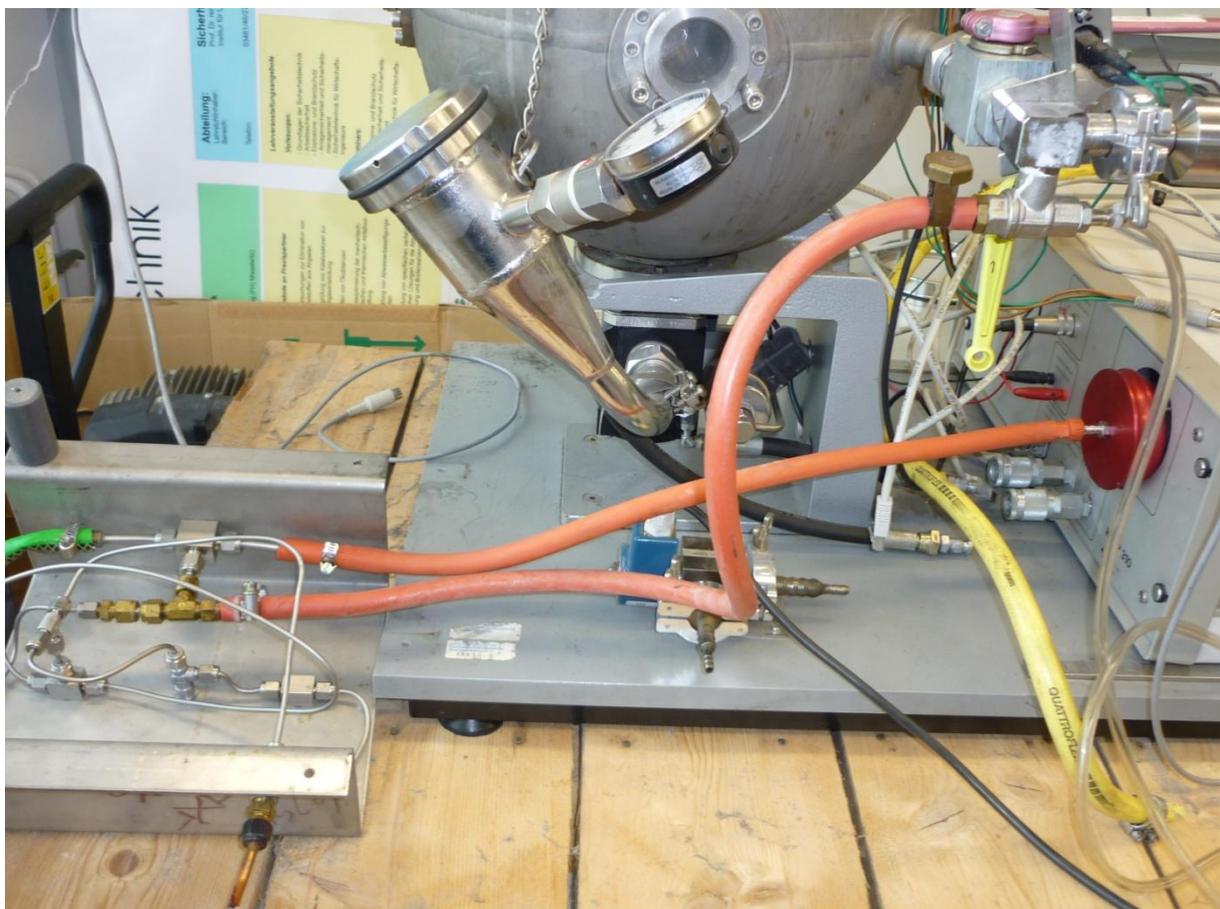
Die Zündung des Gemisches erfolgt über zwei Elektroden, zwischen denen eine Funkenstrecke gebildet wird, mit einer vorher festgelegten Zündenergie.

### 4.2.3 Reaktivierung Explosionskugel

Zur Reaktivierung der Explosionskugel musste die Apparatur auseinandergebaut werden. Dabei wurden die Einzelteile gereinigt und die verwendeten Dichtungen durch neue ersetzt. Dies dient dazu, mögliche Fehlerquellen zu vermeiden und die Hohlkugel vakuum- und druckdicht zu bekommen.

Im ersten Schritt wurden dabei die Kabel- und Schlauchanschlüsse dokumentiert und beschriftet.

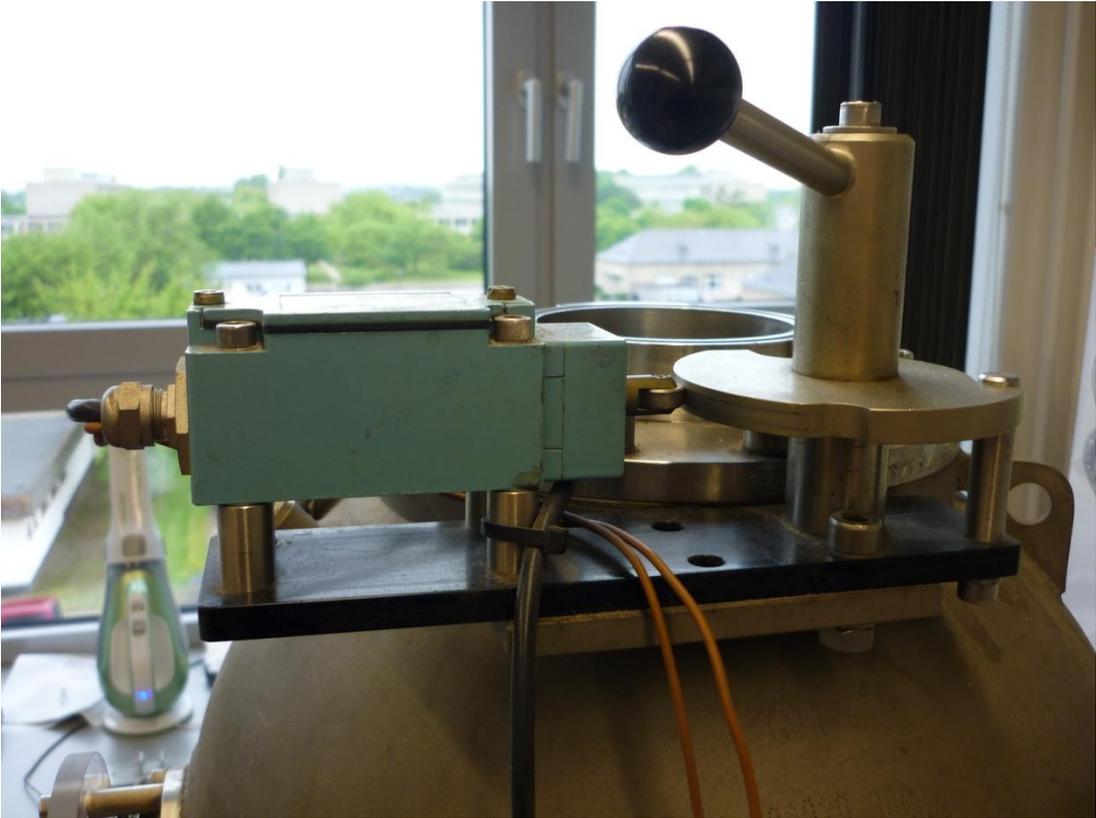
**Abbildung 7: Dokumentation Kabel- und Schlauchanschlüsse**



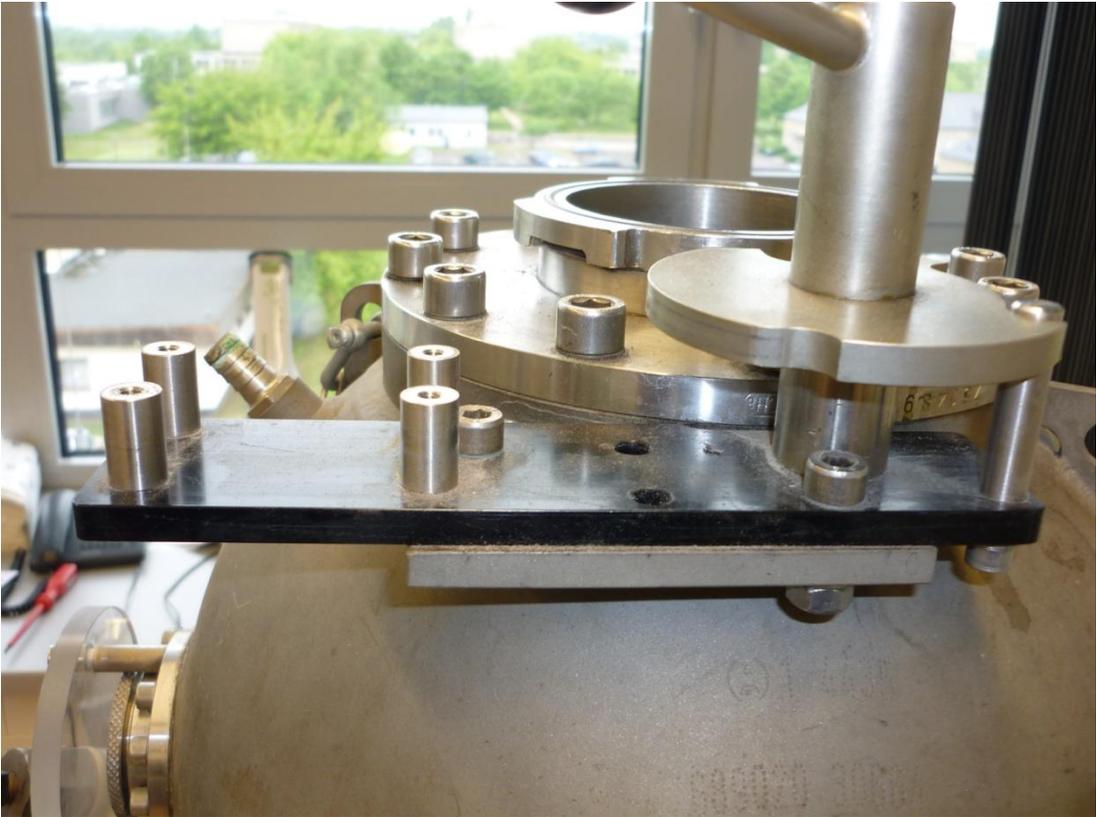
Die Kabel wurden anschließend beschriftet, in Kisten verlagert und die Schläuche durch äquivalente neue ersetzt und bereitgelegt.

Die Anschlüsse der Kugel konnten nun nacheinander entfernt und gereinigt werden. Im Deckelbereich wurde der Sicherheitshebel abgeschraubt, um anschließend den Deckelflansch entfernen zu können

**Abbildung 8 Sicherheitshebels am Deckel der Kugel**



**Abbildung 9: Demontage des Sicherheitshebels am Deckel der Kugel**



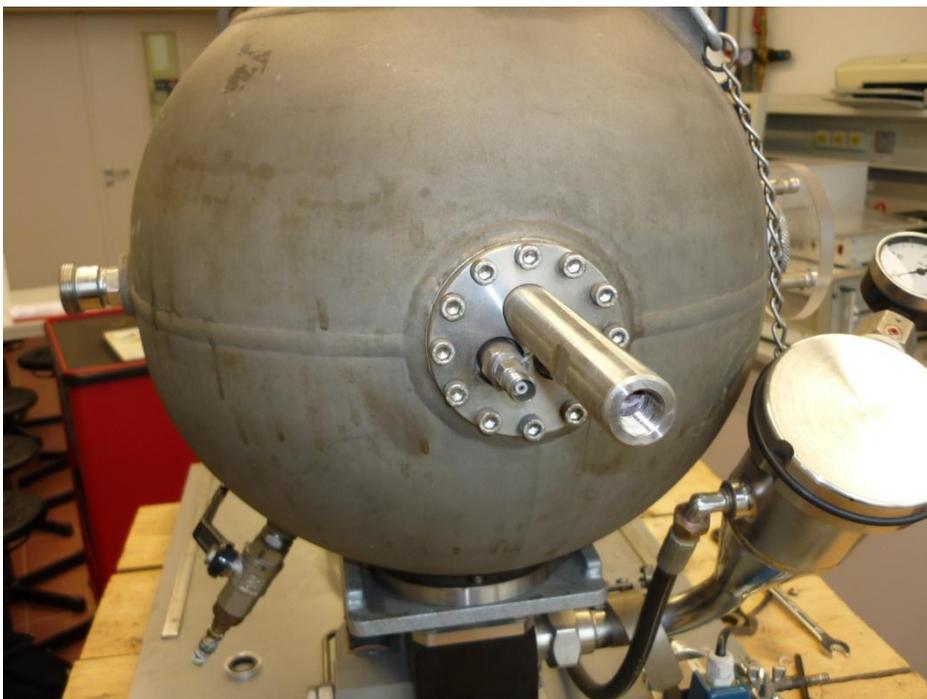
**Abbildung 10: Demontage Deckelanschluss**



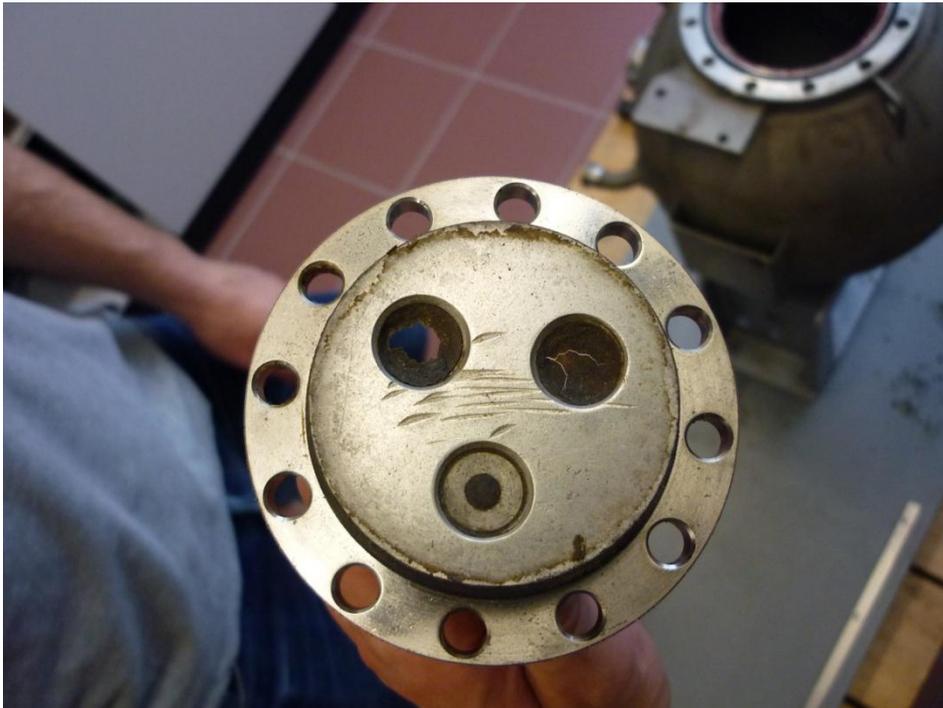
An der Abbildung erkennt man deutlich die Rußeinlagerungen der Staubexplosionen in den Zwischenräumen bei den Anschlüssen der Kugel. Diese Verunreinigungen wurden gesäubert und die Dichtung durch eine neue ersetzt.

Die Piezodrucksensoren wurden entfernt, um den Messflansch und dessen Anschlüsse reinigen zu können.

**Abbildung 11: Messflansch**



**Abbildung 12: Demontage Messflansch**



An der Abbildung erkennt man deutlich die Rußablagerungen auf den Drucksensoren, welche das Messungsergebnis verfälschen würden.

Die Kugel wird später Verwendung im sicherheitstechnischen Praktikum der Hochschule Merseburg finden, daher wurde der Schauglasflansch geöffnet und das Schauglas gereinigt.

**Abbildung 13: Demontage Schauglas**



Der Staubvorlagebehälter wurde mit angeschlossenem Magnetventil entfernt und die Rohkugel konnte von der Befestigung am Untergrund gelöst werden.

**Abbildung 14: Rohkugel**



Die Kugel wurde mit Aceton und destilliertem Wasser von innen und außen gereinigt.

**Abbildung 15: Gereinigte Rohkugel**



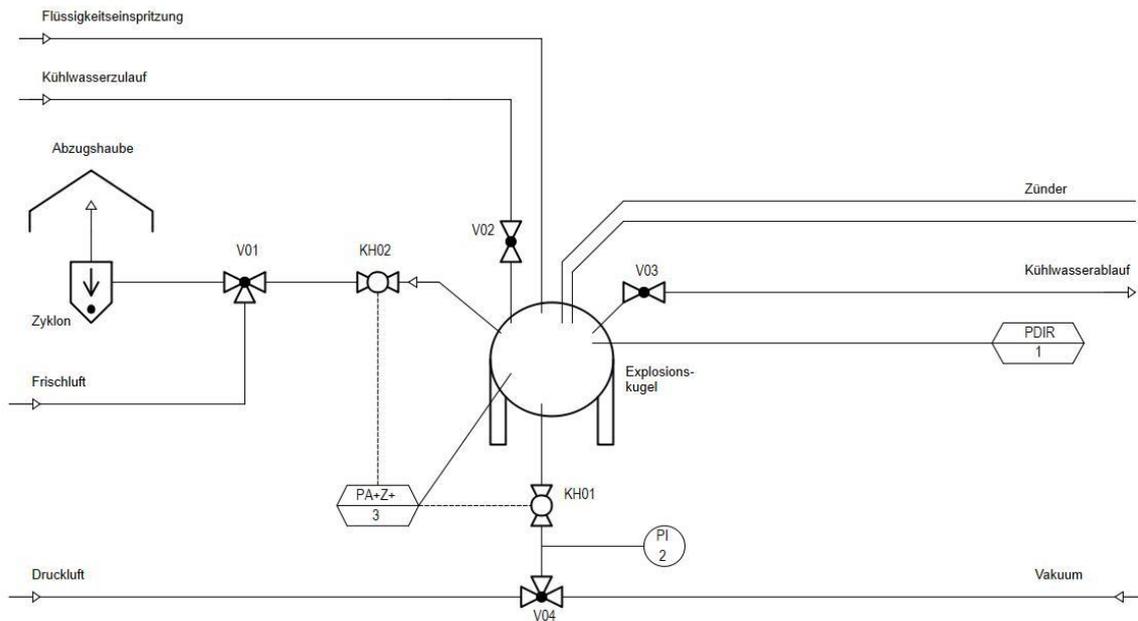
Nach der kompletten Demontage und Reinigung der Apparatur wurde die Anlage wieder Schritt für Schritt zusammengebaut und nach der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Zielstellung installiert.

#### 4.2.4 Versuchsaufbau Toluol-Messungen

Für die Messungen der von Toluol zu findenden explosionstechnischen Kenndaten benötigt die Anlage, wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, verschieden Anschlüsse. Die installierte Apparatur ist schematisch in Abbildung 16 dargestellt.

Abbildung 16: R&I Explosionskugel

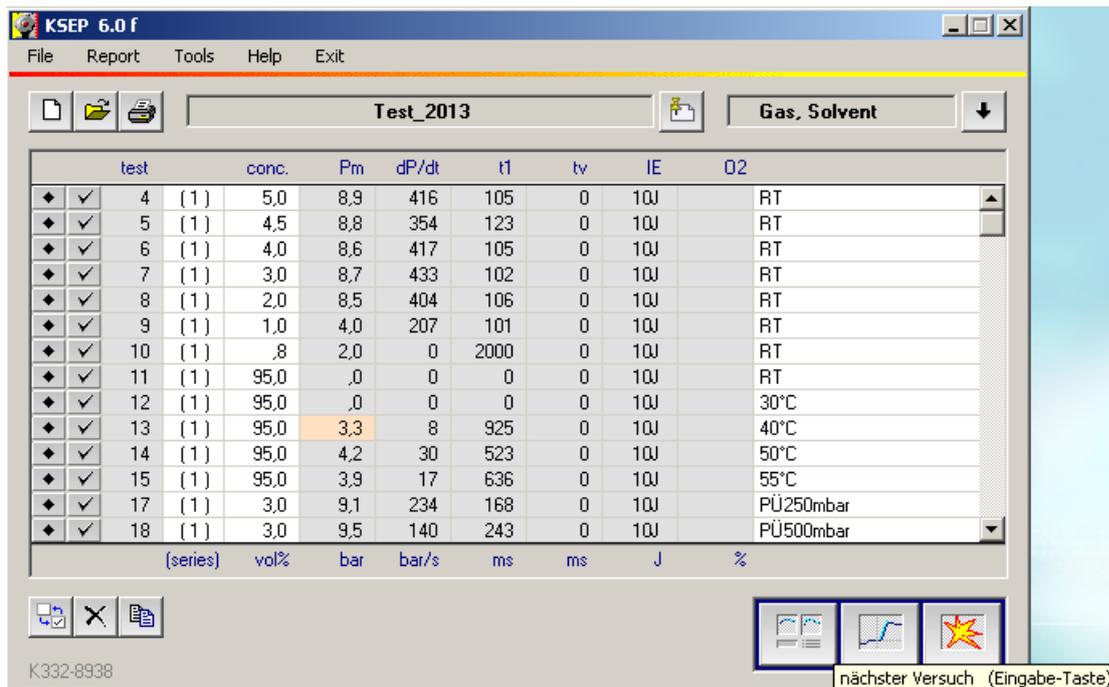
Apparatur Explosionskugel



Um eine Messung durchzuführen, wird zunächst der Kugelhahn 2 geschlossen und der Kugelhahn 1 sowie das L - Ventil zum Vakuumschluss geöffnet. Die Hohlkugel wird auf 400 mbar Absolutdruck evakuiert, dafür wird die Anzeige vom Druckmesser 2 genutzt. Ist das Vakuum eingestellt, wird der Kugelhahn 1 geschlossen und die gewünschte Menge Toluol wird über das Septum am Deckel der Kugel eingespritzt. Das eingespritzte Volumen Toluol verweilt nun in der Kugel bis zur völligen Verdunstung, diese ist temperaturabhängig. Bei 20 °C benötigt das Toluol bis zu 60 Minuten, um vollständig zu verdunsten. Die Zeit reduziert sich mit steigender Temperatur, sodass das Toluol bei 40 °C nur 30 Minuten und bei 60 °C nur 15 Minuten benötigt. Nach der Wartezeit wird das Vakuum in der Hohlkugel entspannt, indem über den Kugelhahn 2 Frischluft gezogen wird. Anschließend wird der Kugelhahn wieder geschlossen, um ein Entweichen des Toluols zu vermeiden. Je nach Messung kann nun dem System über den Kugelhahn 1 noch Druckluft zugeführt werden.

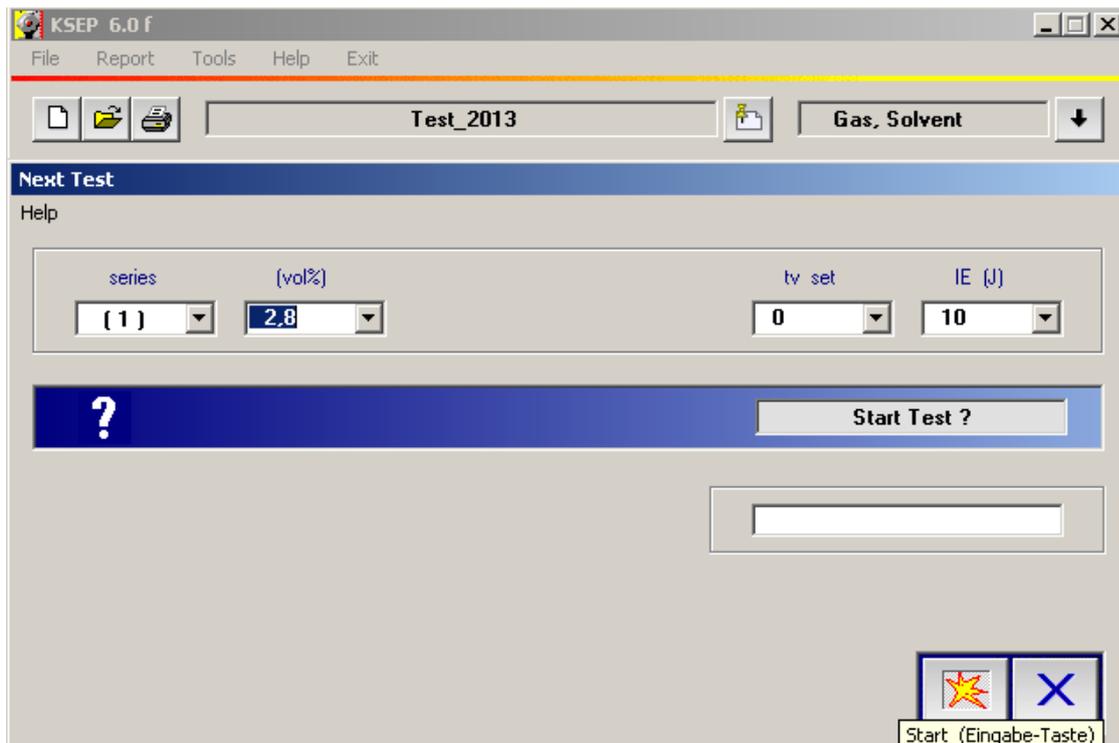
Sind alle Kugelhähne geschlossen, kann die Messung über die Software KSEP 6.0 gestartet werden. Dazu wird, wie in Abbildung 17 gezeigt, das Explosionssymbol unten rechts betätigt.

Abbildung 17: Benutzung der KSEP 6.0 Software 1



Im sich nun öffnenden Fenster, Abbildung 18, wird beim Feld "(vol%)" die Menge an eingespritztem Toluol eingestellt und im Fenster "IE (J)" kann die gewünschte Zündenergie gewählt werden. Wenn alle Kugelhähne geschlossen sind, kann die Messung über das Explosionssymbol unten rechts gestartet werden. Die Anlage zündet das Explosionsgemisch nun automatisch nach einer kurzen Wartezeit und die Messdaten werden anschließend direkt im Programm angezeigt.

Abbildung 18: Benutzung der KSEP 6.0 Software 2



Die Explosionskugel muss nun gereinigt werden, dazu wird der Kugelhahn 2 geöffnet. Der Überdruck kann nun aus der Kugel entweichen. Zum Spülen wird der Kugelhahn 1 auch geöffnet und die Hohlkugel wird 5 Minuten mit Druckluft gespült.

Die Anlage befindet sich nun wieder im Ausgangszustand und kann nach demselben Schema wieder gefüllt und eine neue Messung gestartet werden.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Ergebnis und Diskussion reaktivierte Explosionskugel

#### 5.1.1 Ergebnis der Reaktivierung und Inbetriebnahme

Um mögliche Fehlerquellen zu vermeiden, wurde die Anlage komplett demontiert. So war es möglich, die Einzelteile vollständig zu reinigen und den gesamten Dichtungssatz zu ersetzen. Bei der Montage der Anlage traten verschiedenen Fehlerquellen und defekte Teile auf, die aber behoben bzw. ausgetauscht werden konnten. Die rekonstruierte Apparatur wurde in dem dafür vorgesehenen Abzug installiert und angeschlossen.

Die Explosionskugel ist als annähernd druck- und unterdruckdicht zu betrachten und über den Thermostat in einem Bereich von 4 °C bis 60 °C frei temperierbar. Über den Frischluftanschluss ist es möglich, das zu untersuchende Gas in die Hohlkammer einzuleiten oder über den Kugelhahn am Deckel der Kugel kann eine zu verdunstende Flüssigkeit eingespritzt werden. Das Magnetventil am Boden der Kugel wurde vor dem Hohlraum blind gemacht, um Schäden durch den Explosionsdruck zu vermeiden.

Die Ausgänge der Hohlkugel sind mit zwei Kugelhähnen an den Gas- und Druckzuleitungen besetzt, sowie einem Sicherheitsverschluss am Deckel der Kugel, welche als zusätzliche Sicherheit dienen. Sie sind mit Sicherheitsschaltern verbunden, durch diese kann nur im geschlossenen Zustand aller drei Systeme die Zündung im Inneren erfolgen. Am Messflansch für die Piezodrucksensoren ist zusätzlich ein Sicherheitsdrucksensor angebracht, welcher eine Zündung verhindert, wenn im Inneren der Kugel ein Überdruck von größer 2 bar herrscht.

Die Piezodrucksensoren sind installiert und die Messdaten werden über die KSEP 332 Anlage an den zugehörigen Computer gesandt. Auf diesem ist die Software KSEP 6.0 installiert, mit der die Anlage gezündet wird. Die Messdaten werden von der Software erfasst und sowohl in tabellarischer als auch in graphischer Form wiedergegeben.

Die Anlage wurde auf Funktionalität für die Zündung getestet, dabei wurden die einzelnen Sicherheitsschalter und der Sicherheitsdrucksensor mit Erfolg getestet. Das System wurde im geschlossenen Zustand mit Raumluft gezündet, um die Zündelectroden zu überprüfen. Bei 10 J Zündenergie bildete sich eine konstante Funkenstrecke aus.

Für den ersten Explosionstest wurde die Kugel auf 400 mbar evakuiert und in das Milieu wurden 4 ml Toluol eingespritzt. Nach 20 Minuten Verdunstungszeit wurde die Hohlkammer mit Frischluft auf Luftdruck gebracht, das System geschlossen und die erste Zündung gestartet. Das Gemisch entzündete sich wie erwartet und zeigte die erfolgreiche Reaktivierung und Inbetriebnahme der 20-L-Explosionskugel.

Abbildung 19: Installierte Explosionsapparatur



### 5.1.2 Verifizierung der Methode

Aus der Literatur /4/ sind die allgemeinen Stoffdaten von Toluol bekannt. Über die untere und obere Explosionsgrenze kann die Menge an Toluol berechnet werden, die bezogen auf das 20-L-Volumen ein explosionsfähiges Gemisch mit Luft ergeben. Aus der Literatur /1/ ist bekannt, dass die Explosionsgrenzen von Toluol bei Normbedingungen von  $42 \text{ g/m}^3$  (1,1 Vol%) bis  $300 \text{ g/m}^3$  (7,8 Vol%) liegen. Somit kann über die Dichte ( $0,87 \text{ g/ml}$ ) von Toluol die eingespritzte Menge berechnet werden, bei der nach der Verdunstung ein explosionsfähiges Gemisch entsteht.

Berechnung des Toluolvolumens der unteren Explosionsgrenze:

$$m(UEG) = \frac{42 \text{ g}}{1000 \text{ l}} \cdot 20 \text{ l} = 0,84 \text{ g} \quad (1)$$

$$V(UEG) = \frac{0,84 \text{ g}}{0,87 \frac{\text{g}}{\text{ml}}} = 0,96 \text{ ml} \quad (2)$$

Berechnung des Toluolvolumens der oberen Explosionsgrenze:

$$m(OEG) = \frac{300 \text{ g}}{1000 \text{ l}} \cdot 20 \text{ l} = 6 \text{ g} \quad (3)$$

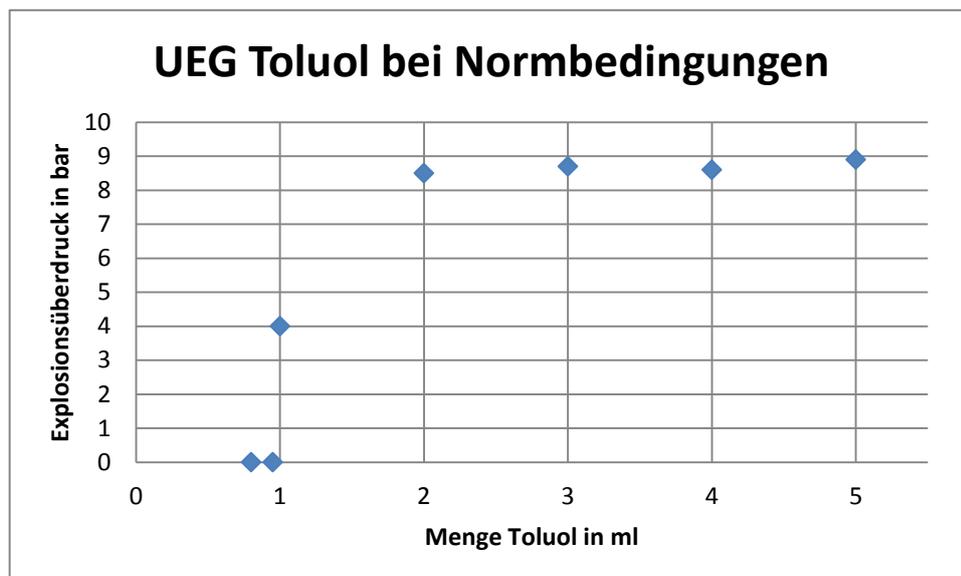
$$V(OEG) = \frac{6 \text{ g}}{0,87 \frac{\text{g}}{\text{ml}}} = 6,9 \text{ ml} \quad (4)$$

Bei Normbedingungen entsteht in der 20-L-Explosionskugel bei einem verdunsteten Volumen von Toluol im Bereich 0,96 ml bis 6,9 ml ein explosionsfähiges Gemisch. Um dies zu testen und damit die Anlage und die Methode zu überprüfen, wird eine Messreihe durchgeführt, bei der das Gemisch schrittweise der unteren Explosionsgrenze angenähert wird.

**Tabelle 1: Messdaten Verifizierung der Methode**

	Menge in ml	Zündung	P <sub>m</sub> in bar	dP/dt in bar/s	t in ms
1	5	+	8,9	416	105
2	4	+	8,6	417	105
3	3	+	8,7	433	102
4	2	+	8,5	404	106
5	1	+	4	207	101
6	0,95	-	0	0	0
7	0,8	-	0	0	0

**Abbildung 20: Diagramm Explosionsbereich zur UEG von Toluol**



Nach der Literatur /4/ war die untere Explosionsgrenze bei einer Menge von 0,96 ml Toluol zu erwarten. Die Messreihe zeigt sehr deutlich die Annäherung an diese Grenze und dass bei kleineren Volumina das Explosionsgemisch nicht mehr gezündet wird. Damit ist die Funktionalität der Anlage nachgewiesen.

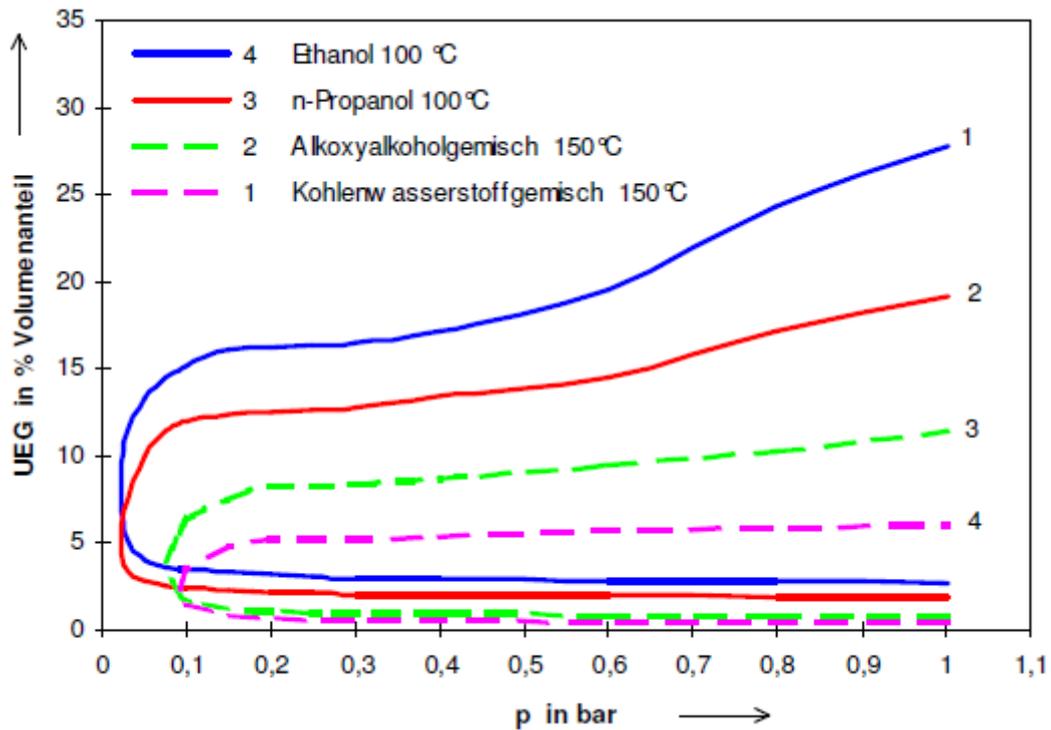
## 5.2 Ergebnisse und Diskussion Toluol-Messungen

Mit einer 20-L-Explosionsapparatur sind verschiedene sicherheitstechnische Kenndaten ermittelbar, wie zum Beispiel der maximale Explosionsüberdruck (P<sub>m</sub>) oder die untere Explosionsgrenze. Diese Stoffdaten sind von den Ausgangsparametern des Milieus abhängig. Auf diese Messungen mit Toluol bezogen, sind die im Gasgemisch enthaltenen Konzentrationen von Toluol und Sauerstoffs entscheidende Parameter. So ist es wichtig, das genaue Volumen des eingespritzten Toluols zu kennen, wie auch dessen Verweilzeit in der

Hohlkugel vor der Zündung. Die Verweilzeit ist deshalb entscheidend, da das Toluol erst nach einem gewissen Zeitabstand völlig verdunstet ist.

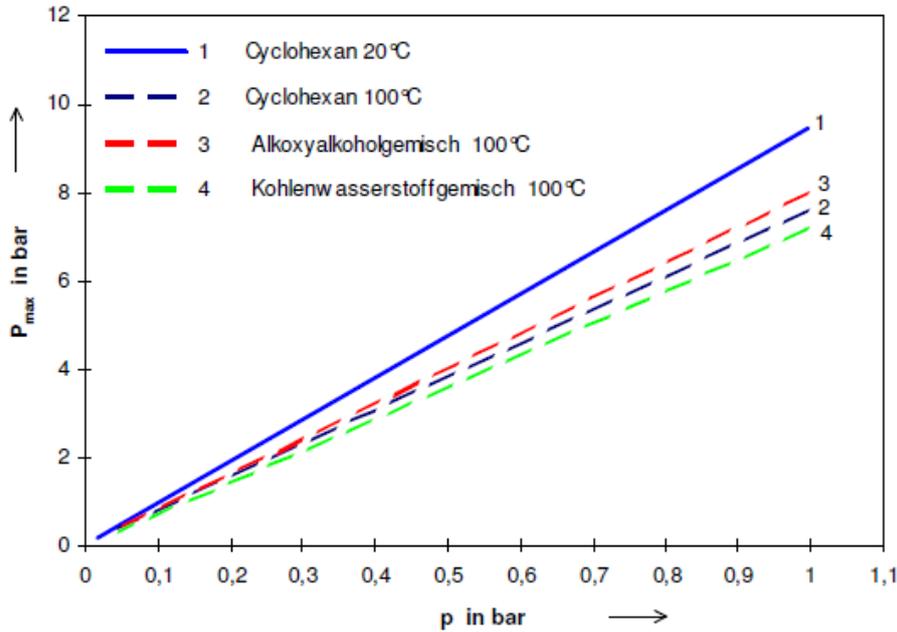
Durch eine Druckerhöhung in der Kugel vor der Zündung mit Druckluft, gelangt mehr Sauerstoff in die Kugel, wodurch eine äquivalent höhere Menge an Toluol im Gemisch benötigt wird. Bei einer Druckerhöhung wird der Explosionsüberdruck wie auch der Bereich des explosionsfähigen Gemisches vergrößert, wie in Abbildung 21 dargestellt.

**Abbildung 21: Explosionsgrenzen in Druckabhängigkeit [Abschlussbericht Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig-Berlin, Abhängigkeit sicherheitstechnischer Kenngrößen vom Druck unterhalb des atmosphärischen Druckes /6/]**



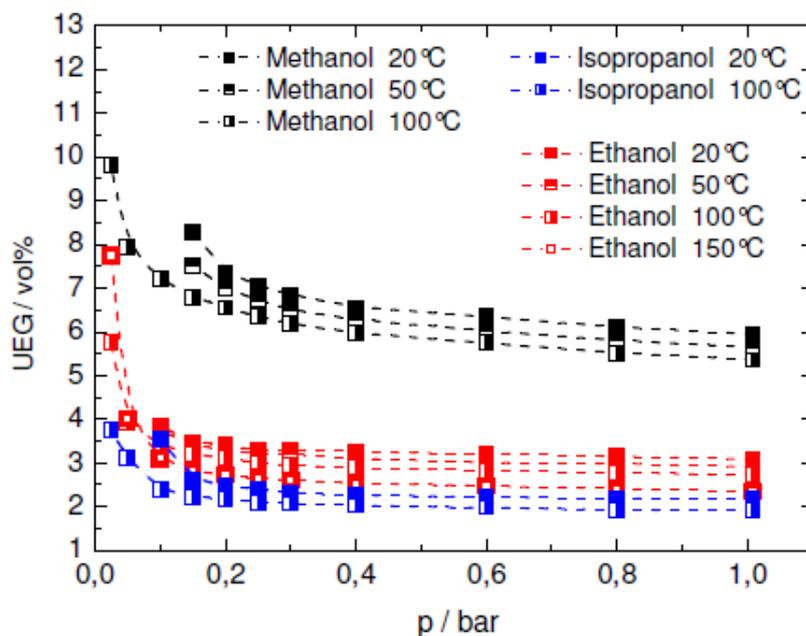
Ändert man den Parameter der Temperatur, so dehnt sich das Gas bei einer Erhöhung aus, wodurch weniger Sauerstoff im Gemisch enthalten ist und der Explosionsüberdruck sinkt, wie in Abbildung 22 beim Cyclohexan gezeigt ist.

**Abbildung 22: Explosionsgrenzen in Druckabhängigkeit [Abschlussbericht Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig-Berlin, Abhängigkeit sicherheitstechnischer Kenngrößen vom Druck unterhalb des atmosphärischen Druckes /6/]**



Die untere Explosionsgrenze fällt bei steigender Temperatur ab, da die Gasteilchen sich bei höheren Temperatur stärker bewegen und dadurch sich Sauerstoff- und Toluolmoleküle öfter treffen und damit die notwendige Konzentration des Toluols geringfügig sinkt, wie in Abbildung 23 dargestellt.

**Abbildung 23: Untere Explosionsgrenze in Temperaturabhängigkeit [Abschlussbericht Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig-Berlin, Abhängigkeit sicherheitstechnischer Kenngrößen vom Druck unterhalb des atmosphärischen Druckes /6/]**



Die aus der Literaturquelle /2/ gezeigten Tendenzen für die Abhängigkeit der Kenndaten durch die Parameter Druck und Temperatur sind auf den Unterdruckbereich bezogen. Die Abhängigkeiten sollten aber im Überdruckbereich bestehend bleiben.

### 5.2.1 Einfluss der Verweilzeit des Toluols

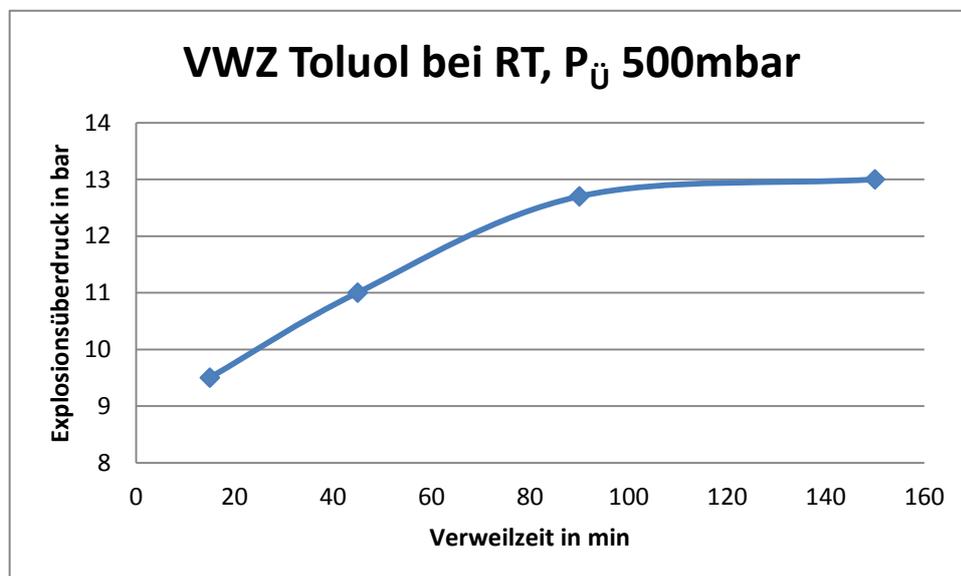
Um die Verdunstung des Toluols zu begünstigen, wird die Kugel vor dem Einspritzen auf 400 mbar Absolutdruck evakuiert. Das Toluol benötigt eine gewisse Zeit zum Verdunsten, wobei diese Zeit temperaturabhängig ist. Um den Zusammenhang zu untersuchen, wurden zwei Versuche durchgeführt.

Beim ersten Versuch wurde die Verweilzeit in Abhängigkeit vom Explosionsüberdruck bei Raumtemperatur und 500 mbar Überdruck mit 3 ml eingespritztem Toluol untersucht.

**Tabelle 2: Messdaten Verdunstungszeit Toluol**

	VWZ in min	Pm in bar	dP/dt in bar/s	t in ms
1	15	9,5	140	243
2	45	11	462	107
3	90	12,7	569	105
4	150	13	412	132

**Abbildung 24: Diagramm Verdunstungszeit von Toluol**



Wie zu erwarten war, nähert sich der Explosionsüberdruck einem maximalen Wert an, welcher angibt, dass an dieser Stelle das Toluol komplett verdunstet ist. Dieser Wert liegt bei Raumtemperatur für Toluol bei etwa 110 Minuten.

Um die Temperaturabhängigkeit der Verweilzeit zu untersuchen, wurde die gleiche Menge Toluol in einem zweiten Versuch bei 60°C eingespritzt und der Hohlraum nach 15 min geöffnet. Sowohl bei optischer Prüfung als auch beim Test durch Auswischen stellte sich heraus, dass das Toluol bereits komplett verdunstet war. Dies erklärt sich über die 3fache Temperatur und damit deutlich erhöhte Energie des Systems.

## 5.2.2 Einfluss der Temperatur

Nach der Literatur /6/ sollte die Temperatur einen Einfluss auf die untere Explosionsgrenze haben. Dieser sollte aber sehr gering ausfallen und im für die Anlage messbaren Bereich von 4 °C bis 60 °C kaum bemerkbar sein. Daher wurde eine Messung bei Normdruck durchgeführt, bei der die Temperatur schrittweise, von Raumtemperatur ausgehend, erhöht wurde. Als Toluolmenge wurden dabei konstant 0,95 ml verwendet, welche knapp unter der unteren Explosionsgrenze bei Raumtemperatur liegt.

**Tabelle 3: Messdaten Temperatureinfluss auf UEG von Toluol**

	Menge in ml	T in °C	Zündung	Pm in bar	dP/dt in bar/s	t in ms
1	0,95	30	-	0	0	0
2	0,95	40	+	3,3	8	925
3	0,95	50	+	4,2	30	523
4	0,95	55	+	3,9	17	636

Man erkennt, dass die untere Explosionsgrenze verschoben wird, da ab 40 °C das Gemisch entzündet werden kann. An der Zeit der Explosionsdauer erkennt man, dass das Gemisch aber eher abbrennt, anstatt zu explodieren. Dies bedeutet, dass die untere Explosionsgrenze zwar erreicht ist, aber es noch nicht ausreichend für eine Explosion ist.

Der Explosionsüberdruck sinkt bei steigender Temperatur, da sich bei höheren Temperaturen das Gas in der Kugel ausdehnt und dem Gemisch weniger Sauerstoff zur Verfügung steht.

**Tabelle 4: Messdaten Temperatureinfluss auf Explosionsüberdruck von Toluol ( $P_{ü}=500\text{mbar}$ )**

	Menge in ml	T in °C	Pm in bar	dP/dt in bar/s	t in ms
1	3	20	12,7	569	185
2	3	60	11,8	633	93

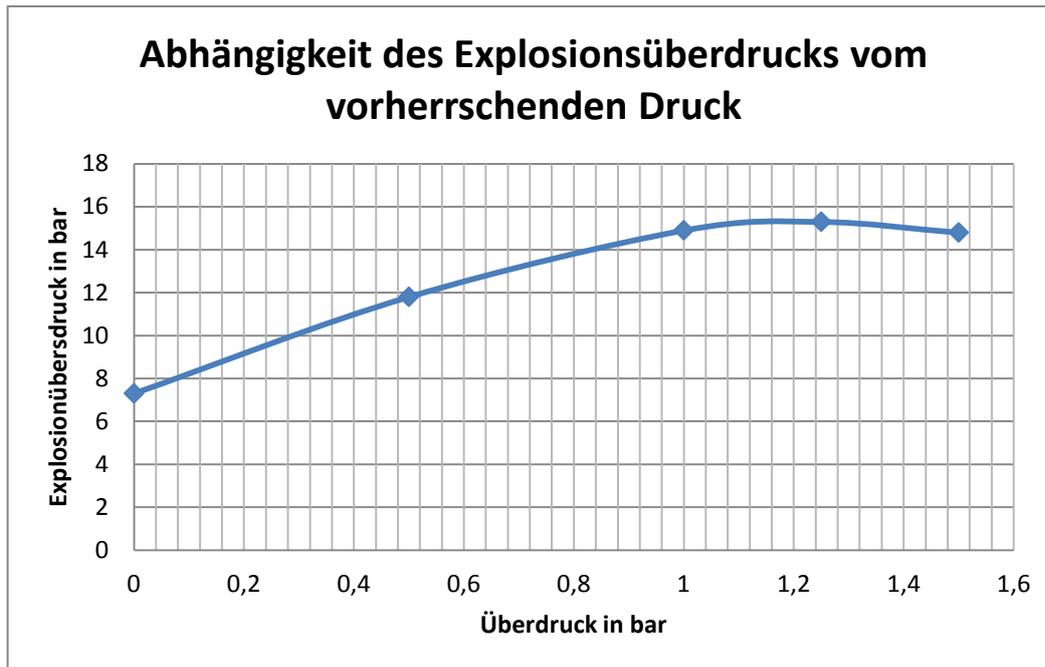
## 5.2.3 Einfluss des Druckes

Erhöhung des Druckes in der Kugel führt zu einer Erhöhung des Explosionsüberdrucks. Um dies nachzuweisen, wurde eine Messreihe durchgeführt. 3 ml Toluol wurden bei 60 °C mit schrittweise steigendem Druck gezündet.

**Tabelle 5: Messdaten Druckeinfluss auf UEG von Toluol**

	P <sub>ü</sub> in bar	Pm in bar	dP/dt in bar/s	t in ms
1	0	7,3	304	135
2	0,5	11,8	633	93
3	1	14,9	498	123
4	1,25	15,3	363	162
5	1,5	14,8	195	262

Abbildung 25: Diagramm Verdunstungszeit von Toluol in Druckabhängigkeit



Im explosiven Bereich eines Gemisches gibt es eine Konzentration zwischen Sauerstoff und Brennstoff, bei der die Explosion am heftigsten ist. Verschiebt sich das Gemisch im explosiven Bereich von diesem Punkt weg, so fällt auch in geringem Maß der Explosionsüberdruck. Bei der Messreihe wurde dieser Punkt zufällig überschritten, was man im Diagramm gut erkennt.

#### 5.2.4 Einfluss von Temperatur und Druck auf die untere Explosionsgrenze

Die Problemstellung der InfraLeuna sieht vor, einen Kompressor zu verwenden, der die Abluft auf 1,5 bar Überdruck verdichtet und bis zu 200 °C Oberflächentemperatur im Kompressor besitzt. In der Abluft kann Toluol enthalten sein, weswegen die Einflüsse von Temperatur und Druck auf die untere Explosionsgrenze getestet werden müssen. Diese Tendenzen sind in der Literaturquelle /4/ beschrieben.

„Die untere Explosionsgrenze ist über den Bereich von etwa 0,05 bar bis etwa 2,5 bar in der Regel unabhängig vom Druck. Für Drücke größer 2,5 bar können keine eindeutigen Aussagen getroffen werden.“ /4/

„Die untere Explosionsgrenze sinkt mit steigender Gemischtemperatur. Für den Temperaturbereich bis ca. 250 °C (bei Aromaten auch höher) kann die untere Explosionsgrenze um bis zu 25 % pro 100 K Temperaturanstieg sinken.“ /4/

Um den Einfluss von Temperatur und Druck auf Toluol zu überprüfen, wurde ein Messungsdatennetz im Rahmen der experimentellen Möglichkeiten der 20-L-Explosionskugel angelegt. Für die Temperaturen 20 °C, 40 °C und 60 °C wurden bei den Absolutdrücken von 1 bar, 1,5 bar, 2 bar und 2,5 bar jeweils die untere Explosionsgrenze bestimmt. Die Bestimmung erfolgte über eine schrittweise Erniedrigung der eingespritzten Menge Toluol, bis das Explosivgemisch nicht mehr gezündet werden konnte.

Da die Kugel ein festes Volumen von 20 l besitzt, führt eine Druckerhöhung bei den Startbedingungen dazu, dass mehr Sauerstoff in der Kugel vorhanden ist und es somit auch mehr Toluol benötigt, um ein zündfähiges explosives Gemisch zu erhalten.

Die folgende Rechnung legt dar, wie die eingespritzte Menge Toluol auf die untere Explosionsgrenze in Vol% zurückgerechnet wird. Dabei wird die allgemeine Gasgleichung (5) sowie die Formeln zu Berechnung der Stoffmenge  $n$  (6) und der Dichte  $\rho$  (7) verwendet, um eine allgemeine Berechnungsformel (8) mit den Variablen Druck, Temperatur und Volumen zu erhalten:

$$n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \quad (5)$$

$$n = \frac{m}{M} \quad (6)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7)$$

$$V_{Tol,20^{\circ}C,fl}[ml] = \frac{p[Pa] \cdot V_{Tol,gas}[m^3] \cdot M[\frac{g}{mol}]}{R[\frac{J}{mol \cdot K}] \cdot T[K] \cdot \rho[\frac{g}{ml}]} \quad (8)$$

Über die Formel (9) wird die untere Explosionsgrenze eingebracht und die Berechnung auf die 20-L-Explosionskugelvolumen bezogen, damit ergibt sich die Berechnungsformel der unteren Explosionsgrenze (10):

$$V_{Tol,gas}[m^3] = \frac{UEG[Vol\%] \cdot V_{Kugel}[m^3]}{100[Vol\%]} \quad (9)$$

$$UEG[Vol\%] = \frac{V_{Tol,20^{\circ}C,fl}[ml] \cdot R[\frac{J}{mol \cdot K}] \cdot 100[Vol\%] \cdot T[K] \cdot \rho[\frac{g}{ml}]}{p[Pa] \cdot V_{Kugel}[m^3] \cdot M[\frac{g}{mol}]} \quad (10)$$

Über diese Berechnungsformel konnten die unteren Explosionsgrenzen bei den verschiedenen Drücken und Temperaturen berechnet werden. Sie sind graphisch in den Abbildungen 26 und 27 dargestellt.

**Abbildung 26: Diagramm Temperatureinfluss auf die untere Explosionsgrenze**

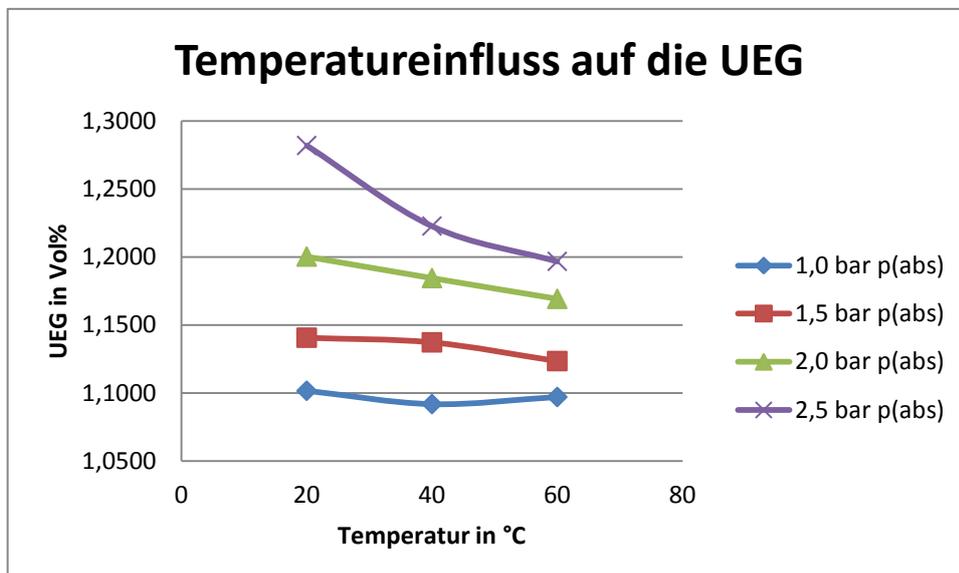
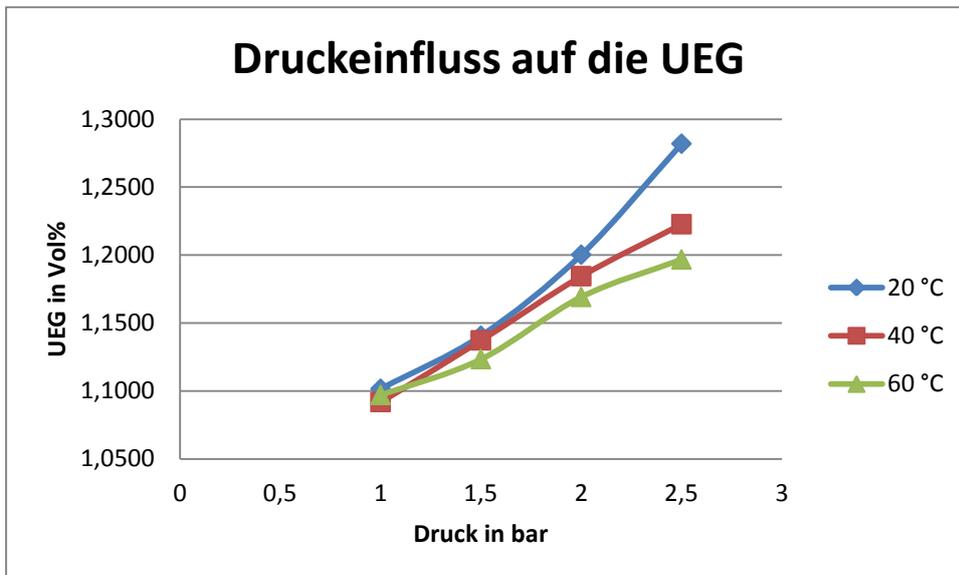


Abbildung 27: Diagramm Druckeinfluss auf die untere Explosionsgrenze



Die Messungsergebnisse zeigen, dass bei steigender Temperatur die untere Explosionsgrenze abfällt. Auch scheint sich der Druck auf den Temperatureinfluss auszuwirken. Um so höher der Druck ist, desto stärker fällt die untere Explosionsgrenze bei steigender Temperatur.

Im Gegensatz zur Literatur /4/ angegeben, steigt die untere Explosionsgrenze mit steigendem Druck. Da diese Steigung aber relativ konstant ist, kann sie nicht als Fehlerquelle betrachtet werden. Ein möglicher Erklärungsansatz wäre der Einfluss der Volumendimension. In der Industrie werden, im Gegensatz zu der verwendeten 20-L-Explosionskugel, Apparaturen mit einem Volumen von 1 m<sup>3</sup> verwendet. Dies könnte dazu führen, dass das kleinere und konstante Volumen den explosionstechnischen Kenndaten entgegenläuft, die auf größere und möglicherweise freie Volumina bezogen sind. Dieses Phänomen muss in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

### 5.3 Ausblick

Die in Abbildung 24 dargestellten Messdaten sind als Vorprüfung von Toluol zu betrachten, um eine grobe Abschätzung der Einflüsse von Druck und Temperatur auf die untere Explosionsgrenze darzustellen. Im Folgenden müssen nun Untersuchungen mit Apparaturen durchgeführt werden, die einem Überdruck von 2,5 bar standhalten, ein Volumen von 1 m<sup>3</sup> besitzen und eine Temperatur bis 200 °C erreichen, damit die eigentlichen Betriebspunkte der geplanten Anlage von InfraLeuna untersucht werden können.

Die 20-L-Explosionskugel ist für Gase und eingespritzte Flüssigkeiten soweit betriebsbereit. Damit mit der Apparatur Stäube untersucht werden können, muss der 20 bar Druckanschluss an die Anlage angebunden und der Zyklon mit dem Auslass verbunden werden. Desweiteren ist ein technisches System zu entwerfen, über das die Explosionskugel mit Wasserstoff und Brenngas gefüllt werden kann.

## 6 Literaturverzeichnis

- /1/ DIN EN 1127-1:1997
- /2/ Inburex Consulting, „Sicherheitstechnische Kennzahlen für den Explosionsschutz“, <http://www.inburex.com/ibu/de/Bereiche/Labor/Weiteres.php>, 26.09.2013
- /3/ Prof. Dr. Ulf Schubert, Hochschule Merseburg, „Vorlesung Sicherheitstechnik“, Modul BCUT 29, SS2012
- /4/ E. Brandes & B.Möller, „Sicherheitstechnische Kenngrößen - Band 1: Brennbare Flüssigkeiten und Gase“. Wirtschaftsverlag NW 2003, ISBN: 3-89701-745-8, S.1ff, 284f.
- /5/ C. Ceasana & R. Siwek, „Handbuch 20-L-Apparatur“, Kühner AG, 2009
- /6/ D. Pawel & E. Brandes, PTB, Abschlussbericht Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig-Berlin, „Abhängigkeit sicherheitstechnischer Kenngrößen vom Druck unterhalb des atmosphärischen Druckes“, 1998

## 7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messdaten Verifizierung der Methode.....	25
Tabelle 2: Messdaten Verdunstungszeit Toluol .....	28
Tabelle 3: Messdaten Temperatureinfluss auf UEG von Toluol .....	29
Tabelle 4: Messdaten Temperatureinfluss auf Explosionsüberdruck von Toluol ( $P_{\ddot{u}}=500\text{mbar}$ ) .....	29
Tabelle 5: Messdaten Druckeinfluss auf UEG von Toluol .....	29

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Explosionsdreieck [Inburex Consulting, „Sicherheitstechnische Kennzahlen für den Explosionsschutz“ /2/]	7
Abbildung 2: Risikopfeil [Vorlesung Sicherheitstechnik, Schubert /3/]	8
Abbildung 3: Untere und obere Explosionsgrenze [E. Brandes & B.Möller, „Sicherheitstechnische Kenngrößen - Band 1: Brennbare Flüssigkeiten und Gase“. /4/]	9
Abbildung 4: Explosionskugel [Handbuch Kühner AG, 20-I-Apparatur /5/]	11
Abbildung 5: Ausgangszustand der Kugel	12
Abbildung 6: R&I Betrieb der Kugel bis 2008	13
Abbildung 7: Dokumentation Kabel- und Schlauchanschlüsse	14
Abbildung 8 Sicherheitshebels am Deckel der Kugel	15
Abbildung 9: Demontage des Sicherheitshebels am Deckel der Kugel	15
Abbildung 10: Demontage Deckelanschluss	16
Abbildung 11: Messflansch	16
Abbildung 12: Demontage Messflansch	17
Abbildung 13: Demontage Schauglas	17
Abbildung 14: Rohkugel	18
Abbildung 15: Gereinigte Rohkugel	19
Abbildung 16: R&I Explosionskugel	20
Abbildung 17: Benutzung der KSEP 6.0 Software 1	21
Abbildung 18: Benutzung der KSEP 6.0 Software 2	21
Abbildung 19: Installierte Explosionsapparatur	24
Abbildung 20: Diagramm Explosionsbereich zur UEG von Toluol	25
Abbildung 21: Explosionsgrenzen in Druckabhängigkeit [Abschlussbericht Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig-Berlin, Abhängigkeit sicherheitstechnischer Kenngrößen vom Druck unterhalb des atmosphärischen Druckes /6/]	26
Abbildung 22: Explosionsgrenzen in Druckabhängigkeit [Abschlussbericht Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig-Berlin, Abhängigkeit sicherheitstechnischer Kenngrößen vom Druck unterhalb des atmosphärischen Druckes /6/]	27
Abbildung 23: Untere Explosionsgrenze in Temperaturabhängigkeit [Abschlussbericht Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig-Berlin, Abhängigkeit sicherheitstechnischer Kenngrößen vom Druck unterhalb des atmosphärischen Druckes /6/]	27
Abbildung 24: Diagramm Verdunstungszeit von Toluol	28
Abbildung 25: Diagramm Verdunstungszeit von Toluol in Druckabhängigkeit	30
Abbildung 26: Diagramm Temperatureinfluss auf die untere Explosionsgrenze	31
Abbildung 27: Diagramm Druckeinfluss auf die untere Explosionsgrenze	32

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Merseburg, den 07. Oktober 2013

Alexander Hennig