

Zündgefahren bei Annäherung elektrostatisch aufgeladener Flüssigkeitsoberflächen an metallische geerdete Einbauten im leitfähigen Behälter

Florian Baumann¹, Matthias Himstedt¹, Dieter Möckel¹,
Malte Renken¹, Martin Thedens¹

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 3.7 „Grundlagen des Explosionsschutzes“, Braunschweig

Kurzfassung: Das Befüllen und Entleeren von Behältern mit Flüssigkeiten ist ein ladungserzeugender Prozess. Besonders bei strömenden Flüssigkeiten, die als isolierend / Flüssigkeit mit einer niedrigen elektrischen Leitfähigkeit einzustufen sind, kann es zu elektrostatischen Auf- und Entladungen kommen, die eine explosionsfähige Atmosphäre zünden könnten. Eine explosionsfähige Atmosphäre entsteht in Abhängigkeit des Dampfdrucks durch Ausgasungen entzündbarer Flüssigkeiten im Behälter. Untersucht wird, ob elektrostatische Gefährdungen beim Annähern der elektrostatisch aufgeladenen Flüssigkeitsoberfläche an Einbauten unterschiedlicher Geometrie vorliegen. Die Untersuchungen finden in einer 0,012 m³ Metallwanne und in einem 1 m³ Edelstahl IBC statt.

1 Einleitung

In Kooperation mit dem Unternehmen Merck KGaA finden bei der PTB in Braunschweig experimentelle Untersuchungen statt, bei denen die elektrostatischen Auf- und Entladungsvorgänge beim Befüllen und Entleeren von 1 m³ Edelstahl IBC nachgestellt und messtechnisch erfasst werden. Es wird ermittelt, ob Zündgefahren beim Annähern einer elektrostatisch aufgeladenen isolierenden Flüssigkeitsoberfläche an leitfähige geerdete Einbauten, wie z. B. Überfüllsicherungen, vorliegen. Welchen Effekt dabei die Geometrie von Einbauten auf die Größe der elektrostatischen Auf- und Entladungsvorgänge und insbesondere auf die Höhe der übertragenen Ladung hat, wird durch verschiedene Elektrodengeometrien (Elektroden) untersucht. Versuche im kleineren Maßstab, Metallwanne befüllt mit bis zu 8 l Testbenzin, zeigen, welche Höhe die übertragene Ladung von einer aufgeladenen isolierenden Flüssigkeitsoberfläche in Abhängigkeit der Elektroden und der angelegten Hochspannung erreicht.

Das Befüllen und Entleeren von Behältern mit Flüssigkeiten ist ein ladungserzeugender Prozess [1]. Besonders bei strömenden Flüssigkeiten mit einer elektrischen Leitfähigkeit von unter 50 pS/m bei Kohlenwasserstoffen und unter 100 pS/m bei sonstigen Flüssigkeiten kann es zu elektrostatischen Auf- und Entladungen kommen, die eine explosionsfähige Atmosphäre zünden könnten. Eine explosionsfähige Atmosphäre entsteht in Abhängigkeit des Dampfdrucks durch Ausgasungen entzündbarer Flüssigkeiten im Behälter.

2 Erläuterungen der Prüfspezifikationen

Laut TRGS 727 Abschnitt 4.5.1 [1] kann das Befüllen und Entleeren von entzündbaren Flüssigkeiten in leitfähigen oder ableitfähigen Behältern ohne Einbauten mit einem Volumen von ≤ 1 m³ gefahrlos durchgeführt werden. Um ein Überlaufen beim Befüllen zu verhindern oder Füllstandsmessungen durchzuführen, werden leitfähige geerdete Überfüllsicherungen als Einbauten in den Behältern eingesetzt. Diese sprechen an, wenn sie vom ansteigenden Flüssigkeitsspiegel erfasst werden. Beim Annähern einer elektrostatisch aufgeladenen Flüssigkeitsoberfläche an eine Überfüllsicherung können Büschelentladungen auftreten. In der TRGS 727 A1.1 [1] wird angegeben, dass ausgehend von isolierenden Flüssigkeiten keine Büschelentladungen zu erwarten sind, wenn das Potential der Flüssigkeitsoberfläche 25 kV

nicht überschreitet [1]. Für Gefahrstoffe der Gruppe IIA gilt ein Grenzwert von 58 kV [1, 2]. Ergänzend dazu gilt eine Entladung, ausgehend von einer aufgeladenen festen isolierenden Oberfläche mit einem Potential von bis zu 4 kV, für Stoffe der Gruppe IIC, als nicht zündfähig [3, 4]. Das Innere eines Behälters wird als Zone 0 eingeteilt, sofern der Betreiber nicht durch genaue Produktkenntnisse eine andere Zone festlegt [1]. Für Zone 0 gelten die Grenzwerte der übertragenen Ladung laut TRGS 727 Abschnitt 3.2.4 [1]:

für Gruppe IIA: 25 nC
für Gruppe IIB: 10 nC
für Gruppe IIC: Es dürfen keine Entladungen detektierbar sein.

3 Experimentelle Aufbauten

3.1 Aufbau mit 0,012 m³ Metallwanne

Um den Einfluss von Elektrodengeometrien auf die Höhe der übertragenen Ladung festzustellen, erfolgen zunächst Versuche im kleineren Maßstab in klimatisierten Laborräumen bei einer relativen Luftfeuchte von $(42 \pm 2) \%$ und einer Temperatur von $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Genutzt wird eine Metallwanne ($L = 0,450 \text{ m}$, $B = 0,350 \text{ m}$, $H = 0,075 \text{ m}$) mit einem Volumen von $0,012 \text{ m}^3$ und einer Flüssigkeitsoberfläche von $0,16 \text{ m}^2$, die unter negativer Hochspannung von -10 kV , -20 kV und -30 kV gesetzt wird, um das eingefüllte Testbenzin 175/195 aufzuladen. Es werden Füllstände von 2 l, 4 l und 8 l untersucht. Die Flüssigkeitsoberfläche überschreitet die höchstzulässigen Oberflächen von isolierenden Gegenständen und Einrichtungen zum Einsatz in den Zonen 0, 1 und 2 nach TRGS 727 Abschnitt 3.2.1 [1]. Die Flüssigkeit kann durch einen Magnetrührer bewegt und in Turbulenz versetzt werden. Die verschiedenen Elektroden werden mittels eines Flaschenzugs an die aufgeladene Flüssigkeitsoberfläche herangeführt, bis eine Entladung erfolgt oder die Elektrode die Flüssigkeitsoberfläche berührt. Die Detektion von Entladungen erfolgt mit Shunt ($0,260 \Omega$) und Oszilloskop nach DIN EN 50050-1 [5]. Der Shunt ist direkt mit den Elektroden verschraubt. Als Elektroden werden Kugel, Ellipse, Spitze und die Überfüllsicherung verwendet (Abbildung 1).

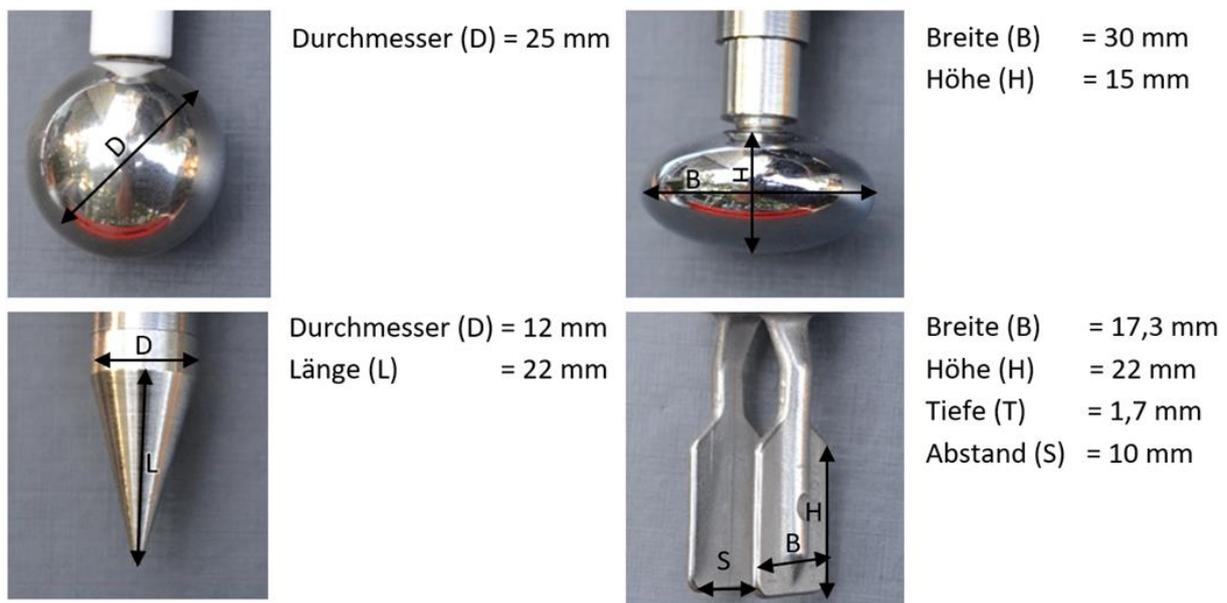


Abbildung 1: Kugelelektrode (links oben), Ellipsenelektrode (rechts oben), Spitzenelektrode (links unten), Überfüllsicherung (rechts unten)

3.2 Aufbau mit 1 m³ Edelstahl IBC

Die für die Versuche zur Verfügung gestellten 1 m³ Edelstahl IBC besitzen einen Durchmesser von 1,07 m. Sie ermöglichen die Unterspiegelbefüllung durch ein geerdetes Tauchrohr (DN 40). Für das Spritzbefüllen wird der Stutzen (DN 40) der Überfüllsicherung genutzt. Die eingesetzten 1000 l Testbenzin 175/195 besitzen eine elektrische Leitfähigkeit von kleiner 26 pS/m, gemessen mit Maihak MLA 900 (ASTM standard test method D2624, DIN 51412-2) und sind nach TRGS 727 Abschnitt 4.1 und Anhang I [1] als isolierende Flüssigkeit / Flüssigkeit mit einer niedrigen elektrischen Leitfähigkeit einzustufen. Dieser Wert entspricht dem in [3] verwendeten Testbenzin 145/200 mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 20 pS/m. In [3] erzeugte das Testbenzin 145/200 die höchsten elektrostatischen Aufladungen im Vergleich mit anderen einphasigen Flüssigkeiten.

Durch die Kreiselpumpe MNK-B/F-L 25-25-125 sind Durchflüsse von 1 m³/h, 3 m³/h, 5 m³/h und im Maximum 5,4 m³/h einstellbar. Der Durchfluss wird während der Messungen durch ein kalibriertes Coriolismessgerät (CMFS007), Messabweichung max. 0,25 %, ermittelt. Im tiefgezogenen Bodenauslauf des Tauchrohrs und im Anschluss der Spritzbefüllung DN 40 (Ø min. 38 mm) ergeben sich Strömungsgeschwindigkeiten nach $v = Q/A$ von 0,25 m/s, 0,73 m/s, 1,22 m/s und im Maximum 1,32 m/s. Q ist dabei der gemessene Durchfluss und A die Kreisfläche des Innenrohrdurchmessers von 38 mm. Anhand von zwei 3-Wege-Hähnen werden die beiden 1 m³ Edelstahl IBC abwechselnd mit Testbenzin befüllt. Alternativ ist das Pumpen im Kreislauf möglich, bei dem die Höhe des Flüssigkeitsspiegels konstant gehalten wird. Der 1 m³ Edelstahl-IBC kann geerdet oder durch die Verwendung von Isolationskörpern in der Zu- und Ableitung und an den Bodenkontakten isoliert aufgebaut werden (Abbildung 2).



Abbildung 2: Isolatorkörper des 1 m³ Edelstahl IBC

Die Detektion von Entladungen erfolgt mit Shunt (0,260 Ω) und Oszilloskop nach DIN EN 50050-1 [5]. Der Shunt wird im 1 m³ Edelstahl IBC an einen isoliert eingefassten Metallstab (Ø 21 mm) im Deckel montiert (Abbildung 3). Am dem der Flüssigkeitsoberfläche zugewandten Ende des Metallstabes sind die austauschbaren Elektroden angeschraubt (Abbildung 1). Die Elektroden werden bei den Füllständen 0,2 m³, 0,4 m³ und 0,8 m³ positioniert.

Beim 1 m³ Edelstahl IBC handelt es sich um ein geschlossenes System, in dem das Auftreten von Entladungen optisch nicht beobachtet werden kann. Aus diesem Grund wird als zweite Messtechnik eine 3 m lange Wurfantenne, nach dem Prinzip von [6], in einem der beiden

DN 25 Stutzen eingeführt. Die Wurfantenne hat keinen Kontakt mit dem Testbenzin. Beide Messtechniken sind mit dem Oszilloskop LeCroy WaveRunner 62Xi verbunden.

Tauchrohr-

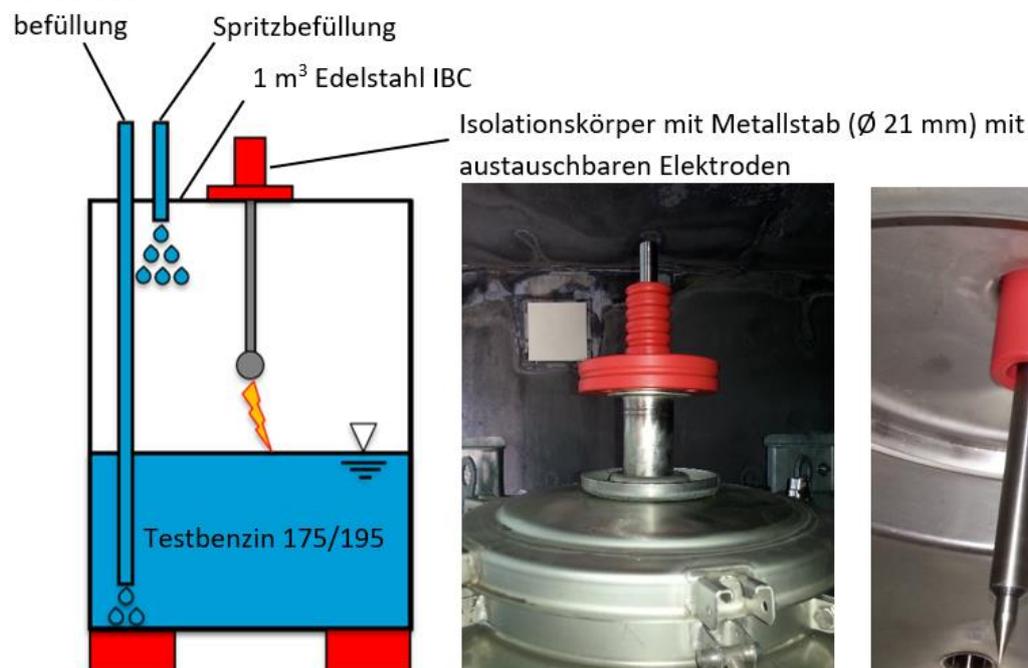


Abbildung 3: Anordnung zum Einbringen der Elektroden

Im anderen DN 25 Stutzen des 1 m³ Edelstahl IBC ist ein Isolationskörper montiert, durch den ein Metallstab (Ø 12,5 mm) in das Testbenzin getaucht ist (Abbildung 4). Der Abstand zum Behälterboden beträgt 0,2 m. Der Metallstab ist am unteren Punkt annähernd in der Mitte des 1 m³ Edelstahl IBC positioniert und verläuft schräg nach oben zum DN 25 Stutzen. Das aus dem 1 m³ Edelstahl IBC ragende Ende des Metallstabes ist mit dem Eltex EMF58 Influenz-E-Feldmeter und zugehörigen ± 40 kV Spannungsmesskopf verbunden. Mit dieser Anordnung wird kontaktbehaftet das Potential der Flüssigkeit gemessen. Das Potential des isoliert aufgebauten 1 m³ Edelstahl IBC wird in gleiche Weise, jedoch direkt am IBC, gemessen.

Tauchrohr-

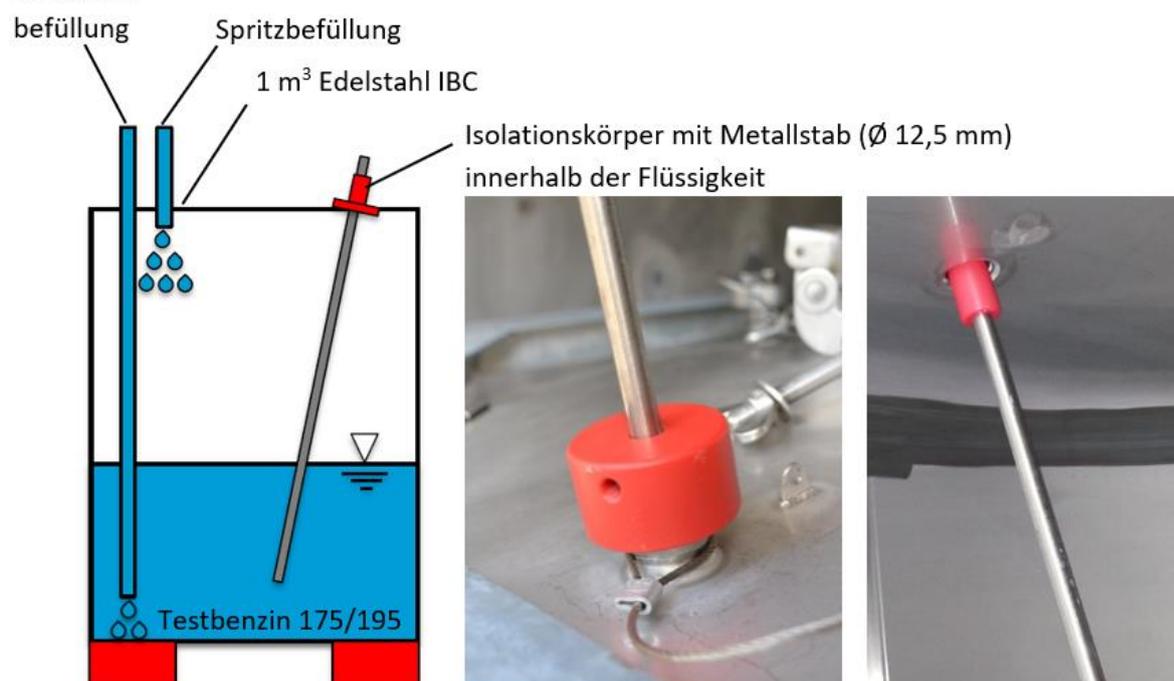


Abbildung 4: Anordnung zum Einbringen des Metallstabes zum Messen des Potentials der Flüssigkeit

Das Potential der Flüssigkeitsoberfläche wird nicht kontaktbehaftet (berührungslos) mit dem Eltex EMF58 Influenz-E-Feldmeter gemessen. Während der Messungen ist der Messkopf des Influenz-E-Feldmeters in eine geerdete Metallplatte mit einem Durchmesser von 0,4 m eingefasst, um eine Homogenisierung des elektrischen Feldes herbeizuführen. Die Metallplatte ist durch einen Isolationsring isoliert zum 1 m³ Edelstahl IBC montiert (Abbildung 5). Aufgrund der Einbauposition des Influenz-E-Feldmeters, erfolgt die Ausgabe der Werte über die Schnittstelle des Influenz-E-Feldmeters auf ein kalibriertes Agilent Multimeter. Eine Spritzbefüllung erfolgt nicht, da das Influenz-E-Feldmeter nicht flüssigkeitsbeständig ist. Die Messungen erfolgten bei einer relativen Luftfeuchte von $\leq 50\%$ und einer Temperatur von $(22 \pm 7)^\circ\text{C}$.

Tauchrohr-

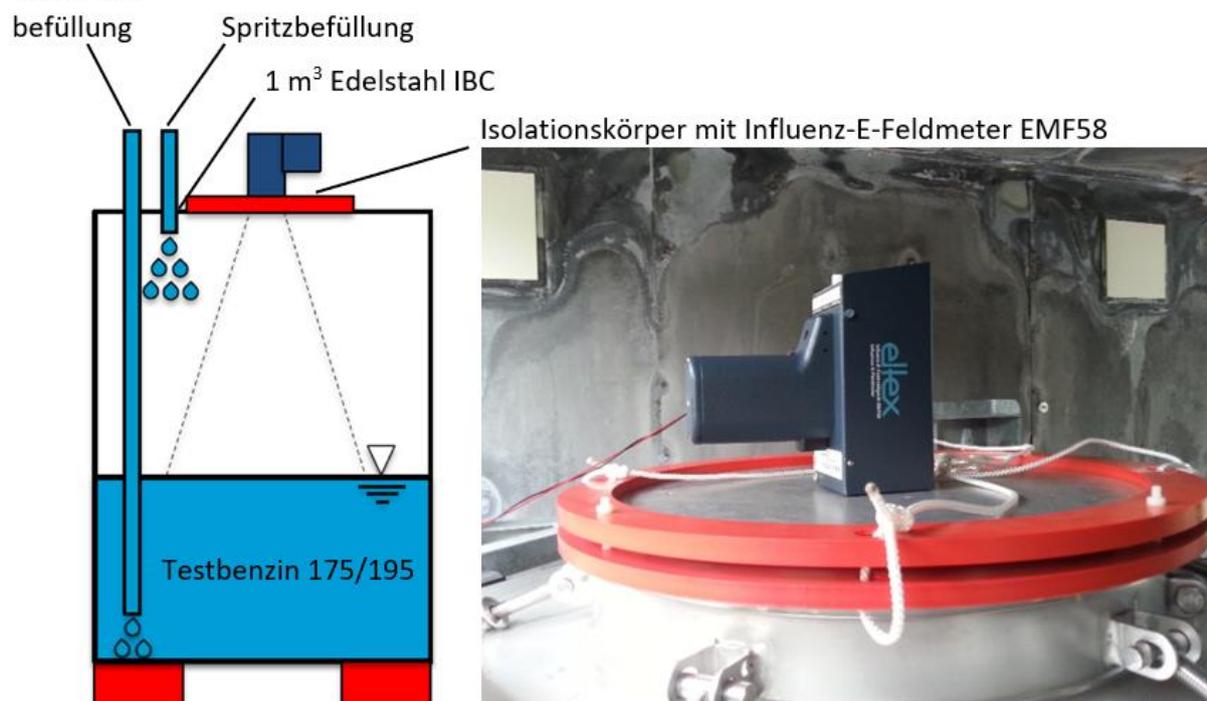


Abbildung 5: Anordnung mit Influenz-E-Feldmeter

4 Ergebnisse

4.1 Entladungen zu den Elektroden

In Tabelle 1 sind die maximal gemessenen übertragenen Ladungen, ausgehend von der in der Metallwanne aufgeladenen isolierenden Flüssigkeitsoberfläche, zur Überfüllsicherung oder den in Abschnitt 3 erwähnten Elektroden, aufgeführt. Das Testbenzin 175/195 befindet sich in Ruhe oder in Turbulenz. Der Füllstand beträgt 2 l, 4 l oder 8 l.

Tabelle 1: Maximale übertragene Ladungen von der elektrostatisch aufgeladenen isolierenden Flüssigkeitsoberfläche

Spannung	Kugel	Ellipse	Spitze	Überfüllsicherung
- 10 kV	keine Entladung	- 8,56 nC	- 10,48 nC	- 16,89 nC
- 20 kV	- 13,72 nC	- 9,40 nC	- 39,61 nC	- 73,77 nC
- 30 kV	- 44,83 nC	- 71,75 nC	- 80,01 nC	- 130,31 nC

Die Art und Anzahl der durchgeführten Versuche lassen keinen eindeutigen Rückschluss auf den Einfluss der Füllhöhe und der Turbulenz des Testbenzin innerhalb der Metallwanne zu. Bei der Kugelelektrode finden bei - 10 kV keine Entladungen statt. Bei - 20 kV werden bereits übertragene Ladungen von - 10 nC nachgewiesen. Mit der Spitzenelektrode und der Überfüllsicherung werden die höchsten Beträge der übertragenen Ladung gemessen. Dies wird dadurch begründet, dass sich bei Annäherung der Kugel- und Ellipsenelektrode an die aufgeladene Flüssigkeitsoberfläche das Testbenzin auftürmt und einen Flüssigkeitskanal zur Elektrode ausbildet, der vergleichbar zu einem hochohmigen Kurzschluss eine vom Messsystem detektierbare Entladung verhindert (Abbildung 6). Bei der Spitzenelektrode und bei der Überfüllsicherung finden die Entladungen bereits bei einem größeren Abstand zur Flüssigkeitsoberfläche statt und die Bildung eines Flüssigkeitskanals ist nicht möglich.

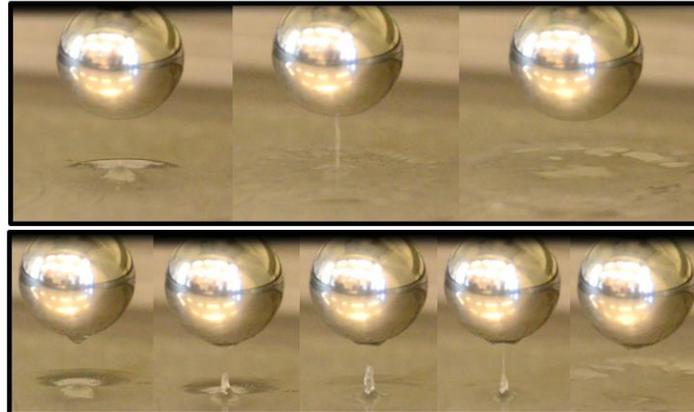


Abbildung 6: Flüssigkeitskanalbildung an Kugelelektrode (oben) ohne und (unten) mit Tropfen an Elektrode

4.2 Entladungen zu den Elektroden innerhalb des 1 m³ Edelstahl IBC

Bei den folgenden Parameterkombinationen fanden **keine** Entladungen beim Annähern einer elektrostatisch aufgeladenen Flüssigkeitsoberfläche an leitfähige geerdete Elektroden oder eine Überfüllsicherung innerhalb des 1 m³ Edelstahl IBC statt.

Kugelelektrode:

Tauchrohrbefüllung: Behälter geerdet; Füllstand 0,2 m³; Durchfluss 5,4 m³/h

Behälter ungeerdet; Füllstand 0,2 m³; Durchfluss 1,0 m³/h, 3,0 m³/h, 5,4 m³/h

Spritzbefüllung: Behälter ungeerdet; Füllstand 0,8 m³; Durchfluss 5,4 m³/h

Ellipsenelektrode:

Aufgrund der Tatsache, dass mit den anderen Elektroden keine Detektion von Entladungen im 1 m³ Edelstahl IBC detektiert werden, besteht keine Notwendigkeit weiterer Messungen mit der Ellipsenelektrode.

Spitzenelektrode:

Tauchrohrbefüllung: Behälter ungeerdet; Füllstand 0,8 m³; Durchfluss 5,4 m³/h

Spritzbefüllung: Behälter ungeerdet; Füllstand 0,8 m³; Durchfluss 5,4 m³/h

Überfüllsicherung:

Tauchrohrbefüllung: Behälter ungeerdet; Füllstand 0,8 m³; Durchfluss 5,4 m³/h

Spritzbefüllung: Behälter geerdet; Füllstand 0,4 m³, 0,8 m³; Durchfluss 5,4 m³/h

Behälter ungeerdet; Füllstand 0,4 m³, 0,8 m³; Durchfluss 5,4 m³/h

Nach 30 min Pumpen im Kreislauf: Spritzbefüllung; Behälter ungeerdet; Füllstand 0,95 m³; Durchfluss 5,4 m³/h; manuelle Annäherung der mit einem Handcoulombmeter verbundenen Überfüllsicherung an die aufgeladene Flüssigkeitsoberfläche.

Beim Entleeren des 1 m³ Edelstahl IBC fand durch das Leerfördern und dem damit verbundenen Ansaugen von Luft durch die Kreiselpumpe MNK-B/F-L 25-25-125 eine Entladung statt, die anhand der Wurfantenne detektiert werden konnte (Abbildung 7, rote

Linie). Die Messmethode Wurfantenne liefert gegenwärtig keine Aussage über die Höhe der übertragenen Ladung. Da keine Entladung mit dem Shunt detektiert werden konnte, erfolgte die Entladung am Auslass des 1 m³ Edelstahl IBC, innerhalb der Rohrleitung oder innerhalb der Kreiselpumpe und nicht zu Einbauten innerhalb des 1 m³ Edelstahl IBC. Durch das Ansaugen von Luft nehmen die Ausdehnungen der Phasengrenzen zu, es kommt verstärkt zu schnellen Trennvorgängen und die Strömungsgeschwindigkeit steigt an [7]. Dadurch kann es zu gefährlichen elektrostatischen Auf- und zündfähigen Entladungen kommen.

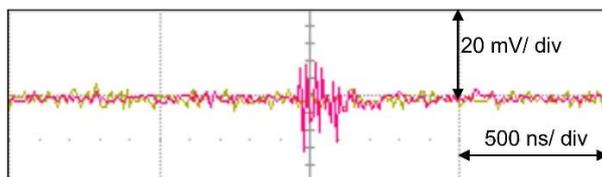


Abbildung 7: Entladung, aufgetreten beim Leerfördern des 1 m³ Edelstahl IBC

4.3 Messung des Potentials des Testbenzins beim Befüllen und Entleeren

Abbildung 8 zeigt die gemessenen Potentiale des Testbenzins 175/195 beim Befüllen und Entleeren des 1 m³ Edelstahl IBC in Abhängigkeit der Zeitdauer. Wie aus der TRGS 727 [1] bekannt, ergeben sich mit steigender Strömungsgeschwindigkeit höhere Potentiale innerhalb der Flüssigkeit. Aufgrund dieser Aussage erfolgten die Versuche bei einer maximal einstellbaren Strömungsgeschwindigkeit von 1,32 m/s. In Abhängigkeit dieser Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich eine Fülldauer von ca. 9 min und (45 ± 10) s. Es wird unterschieden zwischen Tauchrohr- und Spritzbefüllung und dem Entleeren des 1 m³ Edelstahl IBC. Im geerdeten 1 m³ Edelstahl IBC ergeben sich Potentiale innerhalb der Flüssigkeit von < 4 kV. Die gemessenen Potentiale beim Spritzbefüllen liegen um den Faktor 1,4 bis 2,2 unter den Potentialen beim Tauchrohrbefüllen. Im isolierten 1 m³ Edelstahl IBC ergeben sich Potentiale innerhalb der Flüssigkeit von > 4 kV bis maximal 8,2 kV unabhängig von der Art des Befüllens. Das Entleeren des 1 m³ Edelstahl IBC erzeugt eine maximale Aufladung von -0,6 kV. Für den Messbereich des Eltex EMF58 Influenz-E-Feldmeter und zugehörigen ± 40 kV Spannungsmesskopf gilt eine Messgenauigkeit von ± 2,5%.

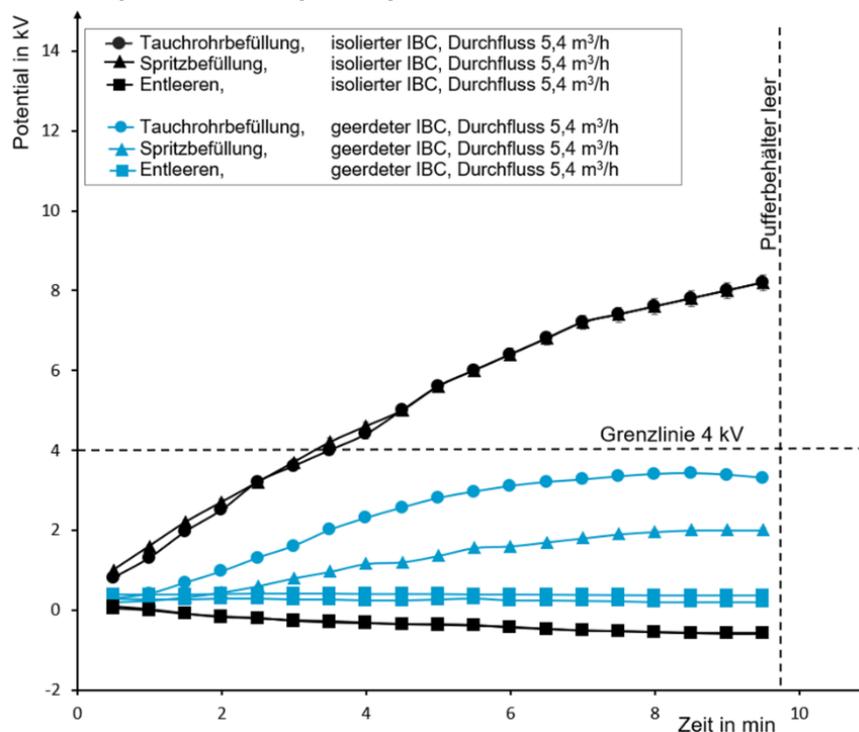


Abbildung 8: Potential der Flüssigkeit beim Befüllen und Entleeren des 1 m³ Edelstahl IBC

4.4 Messung des Potentials des Testbenzins beim Pumpen im Kreislauf

Abbildung 9 zeigt die gemessenen Potentiale des Testbenzins 175/195 in Abhängigkeit der Art des Befüllens und der Zeitdauer. Um die maximalen Potentiale innerhalb der Flüssigkeit zu generieren, wird das Testbenzin bis maximal 30 min im Kreislauf gepumpt. Bei konstanten Potentialwerten fand ein vorzeitiger Abbruch der Messwertaufnahme statt. Im geerdeten 1 m³ Edelstahl IBC ergeben sich Potentiale innerhalb der Flüssigkeit von < 4 kV. Im isolierten 1 m³ Edelstahl IBC ergeben sich Potentiale innerhalb der Flüssigkeit von > 4 kV. Das Potential am isolierten 1 m³ Edelstahl IBC beim kreislaufgeführten Spritzbefüllen erreicht im Maximum die gleichen Werte, wie die Potentialmessung innerhalb des Testbenzins. Eine Reduzierung des Füllstandes von 0,95 m³ auf 0,4 m³ beim kreislaufgeführten Spritzbefüllen im isolierten 1 m³ Edelstahl IBC hat fast eine Halbierung des Potentials von maximal 12,2 kV auf maximal 6,84 kV zur Folge. Dies wird durch die Halbierung des Umlaufvolumens des Testbenzins im Kreislauf und das damit verbundene häufigere Durchströmen der geerdeten Kreiselpumpe begründet. Im geerdeten 1 m³ Edelstahl IBC ist dieser Effekt nur sehr schwach zu beobachten, da das Testbenzin zusätzlich zur Kreiselpumpe im 1 m³ Edelstahl IBC und den Schlauchleitungen geerdet wird. Eine Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit von 1,32 m/s auf 0,25 m/s reduziert das Potential innerhalb der Flüssigkeit um den Faktor 1,7 bis 2,6. Für den Messbereich des Eltex EMF58 Influenz-E-Feldmeter und zugehörigen ± 40 kV Spannungsmesskopf gilt eine Messgenauigkeit von ± 2,5%.

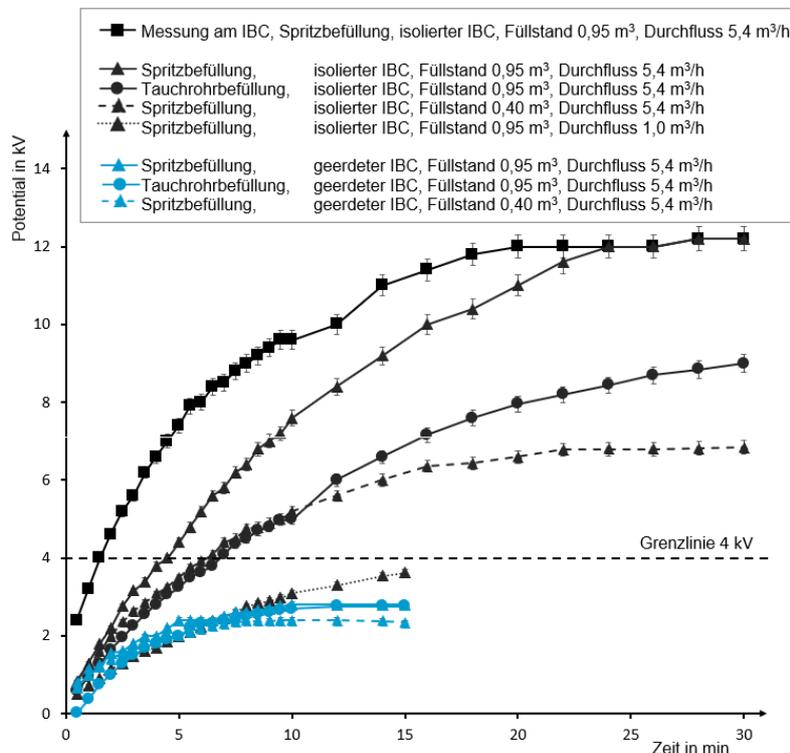


Abbildung 9: Potential der Flüssigkeit beim Kreislaufpumpen im 1 m³ Edelstahl IBC

4.5 Messung des Potentials der Flüssigkeitsoberfläche

Abbildung 10 zeigt die gemessenen Potentiale der Flüssigkeitsoberfläche in Abhängigkeit der Zeitdauer bei Tauchrohrbefüllung. Um die maximalen Potentiale auf der Flüssigkeitsoberfläche zu erlangen, wird das Testbenzin bis maximal 30 min im Kreislauf gepumpt. Es wird ein gleichbleibender Abstand der Flüssigkeitsoberfläche zum Influenz-E-Feldmeter von 0,275 m eingestellt. Die Berechnung des Oberflächenpotentials erfolgt über den Zusammenhang $E = U/s$. E ist dabei das gemessene elektrische Feld, U das Oberflächenpotential der Flüssigkeit und s der Abstand zwischen dem Messkopf des Influenz-E-Feldmeters und der Flüssigkeitsoberfläche. Bei konstanten Potentialwerten fand ein vorzeitiger Abbruch der Messwertaufnahme statt. Um das Influenz-E-Feldmeter nicht zu beschädigen, werden keine

Messungen beim Spritzbefüllen durchgeführt. Im geerdeten 1 m³ Edelstahl IBC ergeben sich Potentiale der Flüssigkeitsoberfläche von < 4 kV. Im isolierten 1 m³ Edelstahl IBC ergeben sich Potentiale der Flüssigkeitsoberfläche von > 4 kV. Die Potentiale der Flüssigkeitsoberfläche liegen im Maximum unter den gemessenen Potentialen innerhalb der Flüssigkeit (vergl. Abbildung 9). Für den Messbereich des Eltex EMF58 Influenz-E-Feldmeter ergibt sich aus [8] in Korrelation mit den Rohdaten aus [9] eine abgeschätzte Messgenauigkeit von ± 17%.

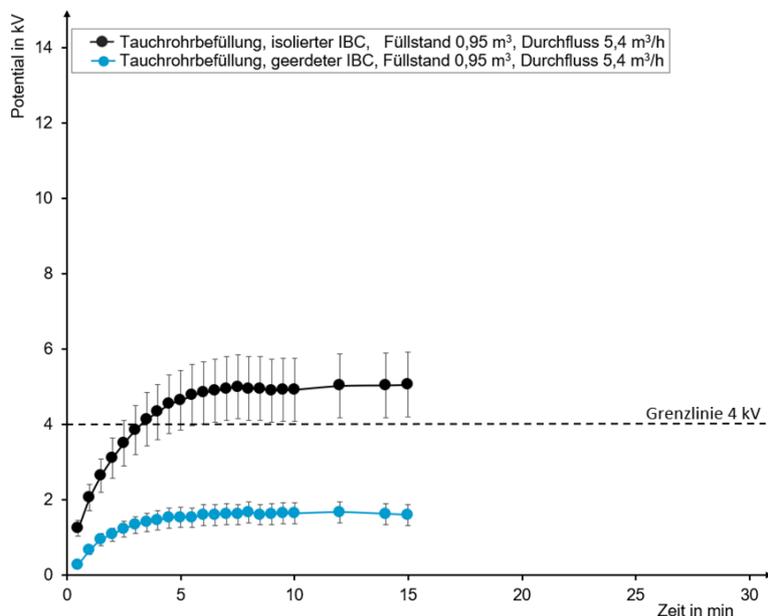


Abbildung 10: Potential der Flüssigkeitsoberfläche beim Kreislaufpumpen im 1 m³ Edelstahl IBC

5 Diskussion der Messergebnisse

Die durchgeführten Messungen belegen, dass sich Flüssigkeiten mit einer niedrigen elektrischen Leitfähigkeit von unter 50 pS/m beim Befüllen von 1 m³ Edelstahl IBC elektrostatisch aufladen. Im geerdeten 1 m³ Edelstahl IBC ergeben sich maximale Potentiale beim Tauchrohrbefüllen von 3,4 kV und beim Spritzbefüllen von 2,8 kV in der Flüssigkeit. Im isolierten 1 m³ Edelstahl IBC liegen die Werte höher und erreichen beim Tauchrohrbefüllen maximal 9,0 kV und beim Spritzbefüllen 12,2 kV in der Flüssigkeit. Die gemessenen Potentiale der Flüssigkeitsoberfläche (Abbildung 10) sind im Maximum unter den Potentialen, die innerhalb der Flüssigkeit gemessen werden (Abbildung 9). Für eine weitere Bewertung werden die innerhalb der Flüssigkeit gemessenen Potentiale herangezogen. In der TRGS 727 A1.1 [1] wird angegeben, dass ausgehend von isolierenden Flüssigkeiten keine Büschelentladungen zu erwarten sind, wenn das Potential der Flüssigkeitsoberfläche 25 kV nicht überschreitet. Für Stoffe der Gruppe IIA gilt ein Grenzwert von 58 kV. Diese Grenzwerte werden beim Tauchrohr- und Spritzbefüllen im geerdeten und isolierten 1 m³ Edelstahl IBC nicht überschritten. Diese Grenzwerte gelten jedoch nur für Kugelelektroden mit einem Durchmesser von 10 mm bis 40 mm und nicht für Einbauten [2]. Bei den Entladungsmessungen von der aufgeladenen Flüssigkeitsoberfläche innerhalb der Metallwanne mit einer angelegten Hochspannung von - 10 kV ergeben sich bei einer Kugel mit einem Durchmesser von 25 mm ebenfalls keine Entladungen. Bei - 20 kV werden bereits übertragene Ladungen von - 10 nC nachgewiesen, die nach TRGS 727 Abschnitt 3.2.4 die Grenzwerte für Stoffe der Gruppe IIC und IIB innerhalb der Zone 0 überschreiten. Entladungen zur Überfüllsicherung von der aufgeladenen Flüssigkeitsoberfläche mit angelegter Hochspannung von - 10 kV ergeben übertragene Ladungen von bis zu - 16,9 nC, die nach TRGS 727 Abschnitt 3.2.4 die Grenzwerte für Stoffe der Gruppe IIC und IIB innerhalb der Zone 0 überschreiten. Es zeigt sich, dass wie in [2] mit kleineren Radien der Elektrodengeometrie der Betrag der übertragenen Ladung größer wird (Tabelle 1). Am geerdeten 1 m³ Edelstahl IBC werden Potentiale von unter 4 kV gemessen und die Grenzwerte eingehalten. Bei einer mehrfach durchgeführten manuellen Annäherung der

Überfüllsicherung im isolierten 1 m³ Edelstahl IBC kommt es bei einem maximalen Potential von 12,2 kV zu keinen Entladungen. Der Grenzwert von 4 kV wird beim Tauchrohr- und Spritzbefüllen im isolierten 1 m³ Edelstahl IBC überschritten. Ist der 1 m³ Edelstahl IBC geerdet, wird der Grenzwert von 4 kV unter den in Abschnitt 3 angegebenen Versuchsbedingungen eingehalten, ist jedoch mit 3,4 kV nah an dem Grenzwert. Aus diesem Grund werden Stoffe der Gruppe IIC, unter Beachtung der möglichen Abweichungen durch Betriebs- und Umwelteinflüsse und der Messmethoden, nicht zugelassen (Tabelle 2). Stoffe der Gruppe IIB werden, unter Beachtung der möglichen Abweichungen durch Betriebs- und Umwelteinflüsse und der Messmethoden, nur unter Betriebsbedingungen, die bezogen auf die ladungserzeugenden Prozesse (maximale Strömungsgeschwindigkeit und Ausschluss von mehrphasigen Flüssigkeiten sowie Flüssigkeits-/Luft- Gemischen über einen Förderzeitraum vom mehr als 30 Sekunden [7]) vergleichbar sind, als geeignet eingestuft. Geerdete 1 m³ Edelstahl IBC können, optional zusammen mit leitfähigen geerdeten Einbauten, ohne die Entstehung elektrostatischer Zündgefahren, mit den zuvor genannten Begrenzungen, für das Befüllen und Entleeren mit Flüssigkeiten der Gruppe IIA und IIB eingesetzt werden. Überfüllsicherungen können innerhalb eines 1 m³ Edelstahl IBC (Zone 0) für Stoffe der Gruppe IIA und IIB, bei Beachtung der Begrenzungen, wie folgt eingesetzt werden:

Tabelle 2: Zulassung von Flüssigkeiten der Gruppe IIA, IIB und IIC im 1 m³ Edelstahl IBC

	Geerdeter 1 m ³ Edelstahl IBC optional mit leitfähigen geerdeten Einbauten	Isolierter 1 m ³ Edelstahl IBC optional mit leitfähigen geerdeten Einbauten
Gruppe IIA	zulässig	nicht zulässig
Gruppe IIB	zulässig	nicht zulässig
Gruppe IIC	nicht zulässig	nicht zulässig

Laut TRGS 727 Abschnitt 4.5.1 müssen leitfähige und ableitfähige Behälter mit einem Volumen von ≤ 1 m³ beim Befüllen und Entleeren mit Flüssigkeiten geerdet sein. Der Einsatz von isoliert aufgebauten Behältern ist dadurch für Stoffe der Gruppe IIA, IIB und IIC nicht zulässig. Des Weiteren muss das Leerfördern des 1 m³ Edelstahl IBC mit Pumpen und dem damit verbundenen Ansaugen von Luft auf maximal 30 Sekunden begrenzt sein [7], um das Auftreten von elektrostatischen Auf- bzw. potentiell zündfähigen Entladungen zu unterbinden. Untersucht wurden im Rahmen dieser Kooperation ausschließlich elektrostatische Effekte, die bei den in Abschnitt 3 beschriebenen Versuchen auftreten. Zu anderen potentiellen Zündgefahren und abweichenden Parametern werden keine Aussagen getroffen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] TRGS 727 Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen, Ausschuss für Gefahrstoffe - AGS-Geschäftsführung - BAuA, 2016.
- [2] Krämer H., Asano K. (1979): Incendivity of sparks from surfaces of electrostatically charged liquids, *Journal of Electrostatics*, 6 (1979) p.361 - p.371
- [3] von Pidoll U. (2016): Forschungsbericht FV 37029 Aufladbarkeit von Lösemitteln mittlerer und hoher Leitfähigkeit beim Rühren in Behältern, PTB Braunschweig
- [4] International Electrotechnical Commission, International Technical Specification IEC/TS 60079-32-1:2013, Explosive atmospheres, Part 32 Electrostatics, Part 1 Guidance
- [5] DIN EN 50050-1:2013, Elektrostatische Handsprüheinrichtungen – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Handsprüheinrichtungen für entzündbare flüssige Beschichtungsstoffe
- [6] von Pidoll U. (2018): 9. Messung elektrostatischer Kenngrößen, PTB Braunschweig, S.16 bis S.20
- [7] Himstedt M. (2018): Explosionsschutz an Membranpumpen, *Technische Sicherheit* Bd. 8 Nr. 3 - März

- [8] Schierding C. (2017): Messtechnische Charakterisierung der berührungslosen Messung elektrostatischer Aufladung mittels Feldmühlen, 13. Fachtagung Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit in Köthen 2017
- [9] Ladda C. (2017): Bachelorthesis – Messtechnische Charakterisierung der berührungslosen Messung elektrostatischer Aufladung mittels Feldmühlen, PTB Braunschweig