



## Dissertation

Florian Baumann

# Über elektrostatische Zündgefahren beim Versprühen von Wasser in explosionsgefährdeten Bereichen

DOI 10.7795/110.20230523

ISSN 2941-1297  
ISBN 978-3-944659-26-8



# Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dissertationen

PTB-Diss-1

Braunschweig, April 2023

Florian Baumann

## **Über elektrostatische Zündgefahren beim Versprühen von Wasser in explosionsgefährdeten Bereichen**

DOI 10.7795/110.20230523

ISSN 2941-1297

ISBN 978-3-944659-26-8

**Empfohlene Zitierweise/recommended citation**

Baumann, F., 2023. *Über elektrostatische Zündgefahren beim Versprühen von Wasser in explosionsgefährdeten Bereichen.*

Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

PTB-Bericht Diss-1. ISBN 978-3-944659-26-8.

Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20230523>

**Herausgeber:**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21

Telefax: (05 31) 592-92 92

[www.ptb.de](http://www.ptb.de)

# Über elektrostatische Zündgefahren beim Versprühen von Wasser in explosionsgefährdeten Bereichen

## Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Florian Baumann M. Eng.  
geb. am 26 Mai 1991 in Celle

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Eckehard Specht (Vorsitzender)  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause (Gutachter)  
Dr.-Ing. Michael Beyer (Gutachter)  
Dr.-Ing. Carsten Blum (Gutachter)

eingereicht am: 18. August 2022  
Promotionskolloquium am: 02. März 2023



## Kurzfassung

Der stark ladungserzeugende Prozess des Versprühens von Wasser ist, wenn er in explosionsgefährdeten Bereichen erfolgt, sicherheitstechnisch zu bewerten. Zur Prävention elektrostatischer Zündgefahren sind die Grenzwerte der Flüssigkeitsstrahler und Behälterabmessungen, die in der nationalen technischen Regel für Gefahrstoffe 727 und in der internationalen technischen Spezifikation IEC TS 60079-32-1 angegeben sind, einzuhalten. Die Grenzwerte resultieren aus den Leistungsgrenzen der Flüssigkeitsstrahler und den Behältern der damaligen Untersuchungen. Ob eine Überschreitung der Grenzwerte eine elektrostatische Zündgefahr darstellt, ist ungeklärt. Der technische Fortschritt verlangt nach einer Klärung dieser Wissenslücke.

In dieser Arbeit werden die bisherigen Messwerte, Erkenntnisse und Grenzwerte aus einschlägiger Literatur zusammengefasst und ein neuer Ansatz der sicherheitstechnischen Bewertung beschrieben. Um an Messwerte an Wasserstrahlen und -sprühnebeln aus der Literatur anzuschließen, erfolgten Messungen der elektrischen Feldstärke. Zur Verifizierung dieser Messtechnik diente die Messung des Raumpotentials. Der gegenseitige Vergleich zeigt die Eignung und Einsatzbeschränkungen der Messtechniken. Beim Versprühen von Wasser treten geladene Tropfen entgegengesetzter Polarität auf. Es wurde bestätigt, dass bei Messungen der elektrischen Feldstärke durch das Messprinzip des Feldstärkenmessgerätes eine Mittelung der geladenen Tropfen stattfindet. Dadurch können unwissentlich die maximalen Werte der Aufladung der Tropfen unerkannt bleiben. In Zusammenarbeit mit einem nationalen Interessentenkreis wurden Messungen bei grenzwertüberschreitenden Parametern in leitfähigen geerdeten Behältern bis 44 m<sup>3</sup> und ohne räumliche Begrenzung durchgeführt. Basierend auf der Auswertung der Messungen wurden die Parameter identifiziert, die den Prozess der Ladungstrennung maximieren. Ferner kann, in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers, den auftretenden Prozessen der Ladungstrennung eine Polarität und Höhe der Aufladung der Tropfen zugeordnet werden. Daraus lässt sich der dominierende Prozess der Ladungstrennung ableiten. Aus Berichten der Industrie ist bekannt, dass beim Aufprall von Wasser ein blaues Leuchten auftreten kann. Die dafür notwendigen Parameter wurden identifiziert und die elektrostatischen Zündgefahren untersucht.

Das Ergebnis der sicherheitstechnischen Bewertung dieser Arbeit erlaubt, unter Beachtung der beschriebenen Parameter der Messungen, eine Überschreitung der aktuell geltenden Grenzwerte, ohne dass eine elektrostatische Zündgefahr zu erwarten ist.

## Abstract

The process of spraying high pressurized water, which generates a strong charge, must be evaluated by a thorough risk assessment, when operating in an explosion protection hazardous areas. To prevent electrostatic ignition hazards, the thresholds of the individual liquid jets and the container dimensions, which are specified in the national technical rule for hazardous substances 727 and in the international technical specification IEC TS 60079-32-1, must be adhered to. The thresholds are based on the evaluation limits of the liquid jets and the containers used at that time. It has not been proven whether exceeding the limit values represents an electrostatic ignition hazard or not. Technological development calls for clarification, to close the knowledge gap.

In these studies, the previously evaluated values, findings and limits of the respective literature are summarized and a new approach of safety-related assessment is described. In order to connect to measured values for water jets and spray mist captured in literature, measurements of the electric field strength were carried out. The measurement of the space potential was used to verify this measurement. The mutual comparison shows the suitability as well as the limitations of use of the measuring techniques. Charged droplets of opposite polarity can appear, when spraying water. It was confirmed, that when measuring the electric field strength, an averaging of the charged droplets is happening, which is caused by measuring principle of the used field strength meter. As a result, the maximum charge of individual droplets can remain unnoticed. In cooperation with a national interested group, measurements were carried out using parameters that exceeded the thresholds in conductive, grounded containers up to 44 m<sup>3</sup> and without confinement. Based on the evaluation of the measurements, the parameters which maximize the charge separation process were identified. In addition, depending on the electrical conductivity of the water, the processes of charge separation can be assigned a polarity and level of charging of the droplets. The dominating process of charge separation can be derived from this. Industry reports indicate that a blue glow can occur on impact with water. The necessary parameters were worked out and the electrostatic ignition hazards were examined.

The result of the safety-related evaluation of this study allows to exceed the currently applicable thresholds without an electrostatic ignition hazard being expected, when the described parameters of the measurements are adhered to.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Ladungstrennung beim Versprühen von Wasser</b>	<b>5</b>
2.1 Historisch experimentelle Grundlagenforschung von P. Lenard.....	5
2.2 Elektrische Doppelschicht .....	6
2.2.1 Rohrströmung.....	6
2.2.2 Düsenaustritt.....	7
2.2.3 Tropfen.....	8
2.3 Sprühnebfördernde Eigenschaften von Flüssigkeiten .....	9
2.4 Sprühnebfördernde Eigenschaften der Pumpen- und Düsentechnik .....	12
2.5 Berechnung der Raumladungsdichte in Abhängigkeit der Geometrie des Behälters .....	14
2.6 Schlussfolgerungen.....	16
<b>3 Geltende Grenzwerte und Bewertungsgrundlagen</b>	<b>17</b>
3.1 Bildung explosionsfähiger Atmosphäre im Behälter.....	17
3.2 Flüssigkeitsstrahler und Behälterabmessungen .....	17
3.3 Entladungen der Raumladungswolke .....	19
3.3.1 Bewertungsgrundlagen und Messwerte des Raumpotentials .....	19
3.3.2 Bewertungsgrundlage und Messwerte der elektrischen Feldstärke.....	22
3.3.3 Bewertungsgrundlagen und Messwerte der Raumladungsdichte .....	23
3.3.4 Sicherheitstechnischer Bewertungsansatz von Entladungen der Raumladungswolke.....	27
3.3.5 Abhängigkeit der Raumladungsdichte vom Pumpendruck, vom Düsendurchmesser und von der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers .....	28
3.4 Entladungen durch gegen Erde isolierter Leiter.....	30
3.4.1 Einzelne gegen Erde isolierter Tropfen.....	31
3.4.2 Gegen Erde isolierte Segmente zerteilter Wasserstrahlen großer Düsendurchmesser ....	32
3.4.3 Herabfallende gegen Erde isolierte Wassermassen .....	34
3.4.4 Aufladung isolierter Leiter durch Akkumulation von Ladung .....	36
3.5 Schlussfolgerungen.....	37
<b>4 Versuchsaufbauten, Messtechniken, Voruntersuchungen und Parameter</b>	<b>38</b>
4.1 Versuchsaufbauten ohne räumliche Begrenzung des Behälters .....	38
4.2 Versuchsaufbauten im leitfähigen geerdeten Behälter .....	39
4.3 Warmwasseraufbereitung .....	42
4.4 Messtechnik.....	43
4.4.1 Feldstärkenmessgerät.....	43
4.4.2 Raumpotentialmesstechnik .....	46
4.4.3 Detektion elektrostatischer Gasentladungen .....	47
4.4.4 Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Wasserarten.....	50
4.5 Voruntersuchungen.....	51
4.5.1 Eignungsprüfung des Feldstärkenmessgerätes an Strahlen bekannten Potentials.....	51
4.5.2 Einfluss der Druckluftspülung und Einbausituation auf die Feldstärkenmessung .....	54
4.5.3 Isolationsprüfung der Raumpotentialmesstechnik.....	55
4.5.4 Temperaturmessung des versprühten Wassers im Behälter .....	58
4.6 Parameter .....	61

<b>5 Messungen an Strahlen ohne räumliche Begrenzung</b>	<b>63</b>
5.1 Feldstärkenmessung .....	63
5.2 Raumpotentialmessung.....	64
5.3 Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers .....	66
5.4 Messung der übertragenen Ladung.....	69
5.5 Schlussfolgerungen.....	74
<b>6 Messungen an Strahlen im leitfähigen geerdeten 1 m<sup>3</sup> Behälter</b>	<b>76</b>
6.1 Ladungstrennung beim mittigen Sprühen in den 1 m <sup>3</sup> Behälter .....	76
6.2 Ladungstrennung beim Sprühen im Winkel in den 1 m <sup>3</sup> Behälter.....	78
6.3 Einfluss der Düsengeometrie und des -durchmessers .....	81
6.4 Einfluss der Temperatur des Wassers .....	86
6.5 Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers .....	88
6.6 Pumpendrucke über 500 bar.....	92
6.7 Schlussfolgerungen.....	94
<b>7 Messungen an Strahlen im 6,2 m<sup>3</sup>, 16,8 m<sup>3</sup> und 44,0 m<sup>3</sup> Behälter</b>	<b>96</b>
7.1 Feldstärkenmessung .....	97
7.2 Raumpotentialmessung.....	99
7.3 Umrechnung der elektrischen Feldstärke in das Raumpotential .....	103
7.4 Schlussfolgerungen.....	105
<b>8 Blaues Leuchten beim Aufprall von Wasser</b>	<b>106</b>
8.1 Nachstellung der Reinigungsaufgaben.....	107
8.2 Nachweis der Elektrostatik .....	110
<b>9 Sicherheitstechnische Bewertung</b>	<b>112</b>
<b>10 Zusammenfassung</b>	<b>120</b>
<b>Literaturangaben</b>	<b>125</b>
<b>Anhang</b>	<b>131</b>

## Abbildungsverzeichnis

1.1: Folgen der durch Reinigungsarbeiten ausgelösten Explosionen auf den Tankern „Mactra“ links, „Kong Haakon VII“ mittig und „Marpessa“ rechts .....	1
1.2: Innenreinigung eines Behälters mit von Hand gehaltener Spritzeinrichtung .....	3
1.3: Tankwaschkopf mit Drehmechanismus und zwei Düsen .....	3
1.4: Struktur der Arbeit.....	4
2.1: Aufladung unter Beachtung der Geschwindigkeitsverteilung einer Rohrströmung .....	7
2.2: Oberflächenspannung und dynamische Viskosität von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur unter Normaldruck .....	10
2.3: Sprühbilder der Flachstrahldüse 652 der Firma Lechler in Abhängigkeit der dynamischen Viskosität bei einem Pumpendruck von 2,0 bar .....	10
2.4: Sauterdurchmesser in Abhängigkeit der Temperatur und dem Abstand zur Düse in Richtung des horizontalen Strahls; Versuchsaufbau zur Messung der Tropfengrößenverteilung.....	11
2.5: Sauterdurchmesser in Abhängigkeit vom Pumpendruck und dem Abstand zur Düse in Richtung des Strahls .....	13
2.6: Mittlere Geschwindigkeit der Tropfen in Abhängigkeit vom Pumpendruck und dem Abstand zur Düse in Richtung des Strahls .....	13
3.1: Grenzwerte aus [1, 2] und Bewertungsgrundlagen aus [6, 29] der Flüssigkeitsstrahler und Behälterabmessungen beim Versprühen von Wasser .....	18
3.2: Raumpotential in Abhängigkeit des Behälter-/Tankvolumens.....	20
3.3: Elektrische Feldstärke in Abhängigkeit des Behälter-/Tankdurchmessers.....	23
3.4: Behälterdurchmesser in Abhängigkeit der Raumladungsdichte.....	25
3.5: Zulässiger Behälterdurchmesser in Abhängigkeit der Raumladungsdichte und begrenzende Kurven, bzw. Bereiche, für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe II.....	28
3.6: Raumladungsdichte in Abhängigkeit vom Pumpendruck bei vollentsalztem Wasser .....	29
3.7: Raumladungsdichte in Abhängigkeit vom Pumpendruck bei Trink-, Betriebs- und Meerwasser .....	30
3.8: Durch Influenz aufgeladenes Segment des Wasserstrahls .....	33
3.9: Ladungsverschiebung durch Influenz innerhalb der Wassermasse im elektrischen Feld .....	33
4.1: Versuchsaufbau zur Feldstärkenmessung am horizontalen Strahl .....	38
4.2: Versuchsaufbau zur Raumpotentialmessung am horizontalen Strahl.....	39
4.3: 1 m <sup>3</sup> Behälter mit montiertem Feldstärkenmessgerät.....	40
4.4: 1 m <sup>3</sup> Behälter mit montierter Raumpotentialmesstechnik .....	41
4.5: 1 m <sup>3</sup> Behälter mit im Winkel eingebauter Spritzeinrichtung und Düse.....	42
4.6: Warmwasseraufbereitung im 1 m <sup>3</sup> Kunststoff IBC .....	43
4.7: Feldstärkenmessgerät mit auf- (links) und abgedeckter (rechts) Influenzelektrode.....	44
4.8: Aufbau der Feldstärkenmessung am Rand (Mantelfläche) des Behälters.....	45
4.9: Aufbau der Raumpotentialmessung; Ersatzschaltbild Hochspannungsmesskopf.....	46
4.10: Shunt mit montiertem Zylinder, Dichtring und Kugelelektrode; Ersatzschaltbild der Messtechnik Shunt.....	49
4.11: 2 m Isolationsstab mit eingebautem Shunt und montierter Schutzkappe.....	49

4.12: Prüfmethode zur Eignung des Feldstärkenmessgerätes JCI 131 an Wasserstrahlen und -sprühnebeln.....	51
4.13: Abweichungen zwischen der berechneten und gemessenen elektrischen Feldstärke bei einem Luftdruck der Zerstäuberdüsen von 3,8 bar (links) und 2,0 bar (rechts).....	53
4.14: Einfluss der Druckluftspülung auf das Feldstärkenmessgerät.....	55
4.15: Widerstand in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand direkt nach dem Sprühen mit Trinkwasser.....	56
4.16: Widerstand in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand direkt nach dem Sprühen mit vollentsalztem Wasser.....	56
4.17: Widerstand in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand beim Sprühen von Trinkwasser.....	57
4.18: Widerstand in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand beim Sprühen von vollentsalztem Wasser.....	57
4.19: 1 m <sup>3</sup> Behälter als Modellordnung mit sechs montierten Thermoelementen.....	58
4.20: Temperaturen an den Messpositionen beim Sprühen in den 1 m <sup>3</sup> Behälter, Pumpendruck 100 bar.....	59
4.21: Temperaturen an den Messpositionen beim Sprühen in den 1 m <sup>3</sup> Behälter, Pumpendruck 500 bar.....	59
5.1: Elektrische Feldstärke des horizontalen Trinkwasserstrahls in Abhängigkeit vom Abstand zur Düse und Pumpendruck.....	63
5.2: Raumpotential des horizontalen Trinkwasserstrahls in Abhängigkeit vom Abstand zur Düse und Pumpendruck.....	65
5.3: Raumpotential am horizontalen Strahl aus Meerwasser (links) und vollentsalztem Wasser (rechts) in Abhängigkeit vom Abstand zur Düse bei 500 bar.....	67
5.4: Elektrische Feldstärken am horizontalen Strahl aus vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit vom Abstand zur Düse, Pumpendruck und Düsendurchmesser.....	68
5.5: Ausbildung von Taylor-Kegeln zwischen Elektrode und Strahl.....	70
5.6: Ausbildung der Flüssigkeitsbrückenbildung zwischen Elektrode und Strahl.....	70
5.7: Kontakt des Strahls über die Elektrode des Handcoulombmeters zur geerdeten leitfähigen Düse.....	70
5.8: Positiver und negativer Spitzenwert der Messkurve des Shunts bei der Messung der übertragenen Ladung mit der Nadelelektrode (Krümmungsradius unter 0,0005 m).....	73
5.9: Negativer Spitzenwert der Messkurve des Shunts (rot) und der Antennenmesstechnik (gold) bei der Messung der übertragenen Ladung mit der Kugelelektrode mit einem Krümmungsradius von 0,0125 m.....	74
6.1: elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen in den 1 m <sup>3</sup> Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck (links), Angaben der Literaturwerte (rechts).....	76
6.2: Raumpotential beim mittigen Sprühen in den Behälter in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand und dem Pumpendruck.....	78
6.3: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel in den Positionen „oben rechts“, „unten rechts“ und beim „mittigen“ Sprühen in den Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck.....	79
6.4: Raumpotential beim Sprühen im Winkel in den Positionen „oben rechts“ und „unten rechts“ in den Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck.....	80

6.5: Raumpotential beim Sprühen in der Position „unten rechts“ in Abhängigkeit vom Abstand der Düse zur Behälterwand.....	80
6.6: Raumpotential beim Sprühen in der Position „unten rechts“ in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand und dem Pumpendruck .....	80
6.7: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen in den Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck, der Düsengeometrie und -durchmesser .....	82
6.8: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel in den Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck und von der Düsengeometrie .....	82
6.9: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel in den Behälter in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser bei einem Pumpendruck von 500 bar.....	83
6.10: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel in den Behälter in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser bei einem Pumpendruck von 100 bar.....	83
6.11: Raumpotential beim mittigen Sprühen in den Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck, der Düsengeometrie und -durchmesser, bei einem Abstand der Elektrode zur Behälterwand von 0,54 m.....	84
6.12: Raumpotential beim Sprühen im Winkel in den Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck, der Düsengeometrie und -durchmesser, bei einem Abstand zur Elektrode zur Behälterwand von 0,54 m.....	84
6.13: Raumpotential beim Sprühen im Winkel in den Behälter in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser bei einem Pumpendruck von 500 bar und einem Abstand der Elektrode zur Behälterwand von 0,54 m.....	85
6.14: Raumpotential beim Sprühen im Winkel in den Behälter in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser bei einem Pumpendruck von 100 bar und einem Abstand der Elektrode zur Behälterwand von 0,54 m.....	85
6.15: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen in Abhängigkeit der Temperatur des versprühten Wassers.....	86
6.16: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel in Abhängigkeit der Temperatur des versprühten Wassers.....	86
6.17: Raumpotential beim mittigen Sprühen in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand und Pumpendruck, bei einer Ausgangstemperatur von 45 °C .....	87
6.18: Potentialmessung, Sprühen im Winkel in Abhängigkeit der Temperatur .....	87
6.19: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von Meer- und Trinkwasser in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck.....	88
6.20: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck.....	88
6.21: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von Meer- und Trinkwasser in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck.....	89
6.22: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck.....	89
6.23: Raumpotential beim mittigen Sprühen von Meer- und Trinkwasser in den Behälter in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck.....	90
6.24: Raumpotential beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in den Behälter in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck.....	90

6.25: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von Meerwasser, Trinkwasser und vollentsalztem Wasser in den Behälter in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck.....	91
6.26: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser bei Pumpendrücken von über 500 bar.....	93
6.27: Elektrische Feldstärke beim mittigen (orange) und Sprühen im Winkel (schwarz) von vollentsalztem Wasser bei Pumpendrücken von über 500 bar.....	93
6.28: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser bei Pumpendrücken von über 500 bar.....	94
6.29: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser bei Pumpendrücken von über 500 bar.....	94
8.1: Leuchten beim Aufprall von vollentsalztem Wasser des Flachstrahls (links) auf eine ableitfähige Fliese und leitfähige Fuge und des Rundstrahls (rechts) auf eine ableitfähige Fliese.....	108
8.2: Leuchten beim Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser auf das Edelstahl- (links) und Aluminiumblech (rechts) bei einem Pumpendruck von 500 bar.....	108
8.3: Leuchten in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Düse und Oberfläche beim Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser auf eine ableitfähige Fliese bei einem Pumpendruck von 500 bar.....	109
8.4: Leuchten beim Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser auf die PVC-U-Platte bei einem Pumpendruck von 100 bar (links) und 500 bar (rechts).....	109
8.5: Leuchten beim Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser auf ein mit isolierender Folie beklebten Aluminiumblech bei einem Pumpendruck von 500 bar.....	110
9.1: Vom Behälterdurchmesser abhängige Raumladungsdichten der Messungen mit Trinkwasser in Behältern (links), Korrektur und „Worst-Case“-Annahmen der Raumladungsdichten (rechts) und begrenzende Kurven, bzw. Bereiche, für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe II.....	113
10.1: Grenzwerte der Flüssigkeitsstrahler und der Behälterabmessungen aus [1, 2] und die sich ergebenden Wissenslücken.....	120
10.2: Parameter, die die Raumladungsdichte beim Versprühen von Wasser erhöhen.....	122
10.3: Sicherheitstechnische Bewertung elektrostatischer Zündgefahren beim Versprühen von Trinkwasser und vollentsalztem Wasser in leitfähige geerdete Behälter.....	123
A.1: Gefahrendreieck.....	133
B.1: Geometrischer Zusammenhang zur Bestimmung der Messfläche und dessen Durchmesser des Feldstärkenmessgerätes JCI 131.....	137
C.1: Aufbau der Feldstärkenmessung an Strahlen und Sprühnebeln ohne Behälter.....	138
F.1: Messung der übertragenen Ladung mit der trockenen Kugelelektrode.....	142
F.2: Messung der übertragenen Ladung an der mit Wasser benetzten Kugelelektrode.....	142
G.1: Tropfengrößenverteilung beim Versprühen von vollentsalztem Wasser, bei einem Pumpendruck von 500 bar, einem Düsendurchmesser von 1,05 mm und einem Abstand zur Düse von 0,5 m.....	143
H.1: Anstieg der Wassertemperatur im IBC in Abhängigkeit von der Zeit.....	144
I.1: Technische Zeichnung und Lichtbild des 6,2 m <sup>3</sup> Behälters.....	145
I.2: Technische Zeichnung und Lichtbild des 16,8 m <sup>3</sup> Behälters.....	145

I.3: Technische Zeichnung und Lichtbild der Rührwerke des 44,0 m <sup>3</sup> Behälters .....	146
I.4: Am Düsenrohr montierte Prallplatte für Versuche im 16,8 m <sup>3</sup> Behälter.....	146
I.5: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von Trinkwasser in den 6,2 m <sup>3</sup> Behälter.....	147
I.6: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von Trinkwasser in den 44,0 m <sup>3</sup> Behälter.....	147
I.7: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in den 6,2 m <sup>3</sup> Behälter...	147
I.8: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in den 44,0 m <sup>3</sup> Behälter.....	147
I.9: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in den 6,2 m <sup>3</sup> Behälter.....	148
I.10: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in den 6,2 m <sup>3</sup> Behälter .....	148
I.11: Raumpotential beim mittigen Sprühen von Trinkwasser in den 6,2 m <sup>3</sup> Behälter.....	148
I.12: Raumpotential beim mittigen Sprühen von Trinkwasser in den 16,8 m <sup>3</sup> Behälter .....	148
I.13: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in den 6,2 m <sup>3</sup> Behälter .....	149
I.14: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in den 16,8 m <sup>3</sup> Behälter.....	149
I.15: Raumpotential beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in den 6,2 m <sup>3</sup> Behälter.....	149
I.16: Raumpotential beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in den 16,8 m <sup>3</sup> Behälter.....	149
I.17: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in den 6,2 m <sup>3</sup> Behälter.....	150
I.18: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in den 16,8 m <sup>3</sup> Behälter.....	150

## Tabellenverzeichnis

2.1: pH-Werte der Tropfen des Sprühnebels .....	9
2.2: Berechnung des Raumpotentials im Mittelpunkt und der elektrischen Feldstärke an der Wand des Behälters ohne Einbauteile .....	14
3.1: Tropfenradien, deren übertragene Ladung den Grenzwerten für Funkenentladungen in der Zone 0 entsprechen .....	31
3.2: Parameter von Tankwaschköpfen, deren Strahlen isolierte Leiter bilden .....	32
3.3: Maximal zulässige isolierte Leiter in Abhängigkeit des Raumpotentials .....	35
4.1: Messbereichsendwerte der Widerstandsmessung in Abhängigkeit der Prüfspannung .....	55
4.2: Düsengeometrie und -durchmesser der Versuche .....	61
4.3: Elektrische Leitfähigkeiten der verwendeten Wasserarten .....	62
4.4: Parameterbereiche .....	62
5.1: Vergleich der aus dem Raumpotential berechneten mit der maximal gemessenen elektrischen Feldstärke .....	66
5.2: Mit dem Handcoulombmeter gemessene übertragene Ladung am Strahl aus vollentsalztem Wasser .....	69
5.3: Geometrien der Elektroden für Messungen der übertragenen Ladung mit dem Shunt .....	71
5.4: Mit dem Shunt gemessene übertragene Ladungen am Strahl aus vollentsalztem Wasser .....	72
6.1: Polarität der durch Ladungstrennung geladenen Tropfen beim Versprühen .....	95
7.1: Abmessungen der mittelgroßen Behälter .....	96
7.2: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, Pumpendruck und Behälter .....	97
7.3: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, Pumpendruck und Behälter .....	98
7.4: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, Pumpendruck und Behälter .....	99
7.5: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, Pumpendruck und Behälter .....	100
7.6: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, Pumpendruck und Behälter .....	102
7.7: Raumpotential beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, Pumpendruck und Behälter .....	103
7.8: Korrekturfaktoren $KR$ der Raumpotentialmessung in Abhängigkeit der Wasserart .....	104
8.1: Reinigungsaufgaben, bei denen das blaue Leuchten aufgetreten ist .....	106
9.1: Bereich der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials der Messungen im 1,0 m <sup>3</sup> , 6,2 m <sup>3</sup> , 16,8 m <sup>3</sup> und 44,0 m <sup>3</sup> Behälter und ohne dessen räumlicher Begrenzung .....	112
A.1: Einteilung der elektrischen Leitfähigkeit $\gamma$ .....	132
A.2: Elektrische Leitfähigkeit von Wasser unterschiedlicher Salinität .....	132
A.3: Grenzwerte der übertragenen Ladung .....	134
D.1: Übertragene Ladungen in Abhängigkeit der Länge des Koaxialkabels .....	139
E.1: Nach [17] abgeschätzter Volumenstrom der in [6] verwendeten Flüssigkeitsstrahler .....	140
E.2: Volumenströme des Hochdruckreinigers HD 9/50 .....	141

---

E.3: Volumenströme der Flüssigkeitsstrahler des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH .....	141
J.1: Korrekturfaktor von vollentsalztem Wasser, Trinkwasser und Meerwasser .....	151

**Abkürzungsverzeichnis**

EA	Elektrostatische Applikationsanlage
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
IBC	Intermediate Bulk Container
IEC	International Electrotechnical Commission
ISGINTT	Internationale Sicherheitsrichtlinie für Binnentankschiffe und Terminals
ISGOTT	Internationale Sicherheitsrichtlinie für Öl Tanker und Terminals
JCI	John Chubb Instrumentation
MZE	Mindestzündenergie
MZQ	Mindestzündladung
PDA	Phasen-Doppler-Anemometer
PEEK	Polyetheretherketon
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PVC-U	Hart-Polyvinylchlorid
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TS	Technische Spezifikation
UEG	Untere Explosionsgrenze

## Symbolverzeichnis

### Lateinische Buchstaben

$a$	Seitenlänge der Raumladungswolke, bzw. des Behälters	[m]
$A$	Fläche einer Platte	[m <sup>2</sup> ]
$A_{Düse}$	Querschnittsfläche, berechnet aus Düsendurchmesser	[m <sup>2</sup> ]
$A_{MF}$	Messfläche des Feldstärkenmessgerätes	[m <sup>2</sup> ]
$A_Z$	Querschnittsfläche des Zulaufs vor der Düse	[m <sup>2</sup> ]
$B$	Breite der Schwinggabel	[m]
$C$	Kapazität	[F]
$d$	Durchmesser des isolierten Leiters	[m]
$d_{Düse}$	Düsendurchmesser	[m]
$d_i$	Tropfendurchmesser der Tropfengrößenverteilung	[m]
$d_{32}$	Sauterdurchmesser	[m]
$\Delta d_{Düse}$	Ausdehnung des Düsendurchmessers durch Temperatur	[m]
$D$	Diffusionskoeffizient	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{FSM}$	Durchmesser des Feldstärkenmessgerätes	[m]
$D_K$	Durchmesser der Kegelgrundfläche	[m]
$D_{MF}$	Durchmesser der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes	[m]
$D_N$	Durchmesser des Nadelkörpers	[m]
$D_R$	Durchmesser der Raumladungswolke, bzw. des Behälters	[m]
$D_{\ddot{A}}$	Äquivalenter Behälterdurchmesser	[m]
$E$	Elektrische Feldstärke	[V/m]
$E_a$	Elektrische Feldstärke am Rand eines Behälters mit quadratischer Querschnittsfläche	[V/m]
$E_i$	Elektrische Feldstärke an feldverzerrenden Einbauteilen im Zentrum einer Raumladungswolke	[V/m]
$E(R)$	Elektrische Feldstärke am Rand der Raumladungswolke oder des Behälters	[V/m]
$E(R, R_E)$	Elektrische Feldstärke des elliptischen Kegels	[V/m]
$F$	Oberfläche eines Körpers	[m <sup>2</sup> ]
$G$	Leitwert	[S]
$H$	Höhe der Schwinggabel	[m]
$H_B$	Höhe des Behälters	[m]
$I(t)$	Stromimpuls der Gasentladung in Abhängigkeit von der Zeit	[A]
$k$	Erweiterungsfaktor	[-]
$K_R$	Korrekturfaktor der Raumpotentialmessung	[-]
$l$	Länge des isolierten Leiters	[m]
$L$	Dimension des Behälters in Richtung des Wasserstrahls	[m]
$L_B$	Raumdiagonale des Behälters	[m]
$L_K$	Kegellänge	[m]
$\Delta p$	Druckdifferenz	[bar]
$Q$	Übertragene Ladung	[C]

$Q_{max}$	Maximale Anzahl Ladungen einer Polarität in einem Tropfen in Luft	[C]
$Q_{Rückfluss}$	Bei der Trennung von Oberflächen zurückfließende Ladung	[C]
$Q_{Trennung}$	Überschussladung der bei Düsenaustritt getrennten Doppelschicht	[C]
$r$	Tropfenradius	[m]
$r_{KE}$	Krümmungsradius der Elektrode	[m]
$R$	Radius der Raumladungswolke, bzw. des Behälters und der Abstand des Feldstärkenmessgerätes zur Mittellinie der Raumladungswolke	[m]
$R_E$	Radius der Aufweitung des Flachstrahls	[m]
$R_{Rohr}$	Innerer Rohrradius	[m]
$R_{Shunt}$	Shuntwiderstand	[ $\Omega$ ]
$s$	Plattenabstand	[m]
$S$	Abstand zwischen den Platten der Schwinggabel	[m]
$t$	Zeit	[s]
$\Delta T$	Temperaturänderung	[K]
$U$	Potential	[V]
$U(t)$	Spannungsverlauf am Shuntwiderstand	[V]
$\bar{v}_{DA}$	Düsenaustrittsgeschwindigkeit	[m/s]
$v_{max}$	Maximale Strömungsgeschwindigkeit eines Strömungsprofils	[m/s]
$v(Rohr)$	Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Rohrradius	[m/s]
$V$	Behältervolumen	[m <sup>3</sup> ]
$V_{FL}$	Volumen der Flüssigkeit, die durch einen Querschnitt strömt	[l]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[l/s]
$W_{min}$	MZE des Gefahrstoffs	[J]
<b>Griechische Buchstaben</b>		
$\alpha$	Längenausdehnungskoeffizient	[1/K]
$\beta$	Messwinkel des Feldstärkenmessgerätes	[ $^\circ$ ]
$\gamma$	Elektrische Leitfähigkeit	[S/m]
$\delta$	Debye-Länge	[m]
$\varepsilon$	Permittivität	[F/m]
$\varepsilon_r$	Permittivitätszahl, eine Materialgröße	[-]
$\theta$	Faktor zur Erhöhung der MZE nasser Oberflächen oder Wassermassen	[-]
$\rho$	Raumladungsdichte	[C/m <sup>3</sup> ]
$\rho_W$	Dichte Wasser	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Oberflächenspannung	[N/m]
$\tau$	Zeitkonstante	[s]
$\Phi$	Raumpotential	[V]
$\Phi(0)$	Raumpotential im Mittelpunkt der Raumladung oder des Behälters	[V]
<b>Kennzahlen</b>		
$e$	Eulersche Zahl	2,7182
$\varepsilon_0$	Elektrische Feldkonstante	$8,854 \cdot 10^{-12}$ [F/m]
$\pi$	Kreiszahl	3,1415

## 1 Einleitung

Wasser ist eine Flüssigkeit mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, von der keine gefährlich hohe elektrostatische Aufladung zu erwarten ist. Eine Ausnahme bildet der *stark ladungserzeugende*<sup>1</sup> Prozess des *Versprühens* oder wenn Wasser als *isolierter Leiter* auftritt [1, 2]. Der Wissenschaftler Philipp Lenard wies bereits im Jahre 1892 die Ladungstrennung beim Aufprall von Wassertropfen auf eine Oberfläche nach [3]. Der nach ihm benannte Lenard-Effekt (ugs. Wasserfallelektrizität) zeigt, dass Wasser durch das Versprühen ohne eine externe Ladungsquelle in der Lage ist, sich elektrostatisch aufzuladen und *Raumladungswolken* auszubilden [3, 4].

Zur Wiederherstellung der gesamten Ladekapazität von Supertankern sind die Rohölrückstände durch den Einsatz von Flüssigkeitsstrahlern zu entfernen. Die Rohölrückstände können im Tank ein *explosionsfähiges Gemisch* ausbilden. Im Jahre 1969 ereigneten sich *Explosionen* bei den Reinigungsarbeiten in den ca. 20 000 m<sup>3</sup> großen Rohöltanks der Supertanker Kong Haakon VII, Marpessa und Mactra, dessen Ausmaß der Zerstörung in Abbildung 1.1 dargestellt ist [5–10].

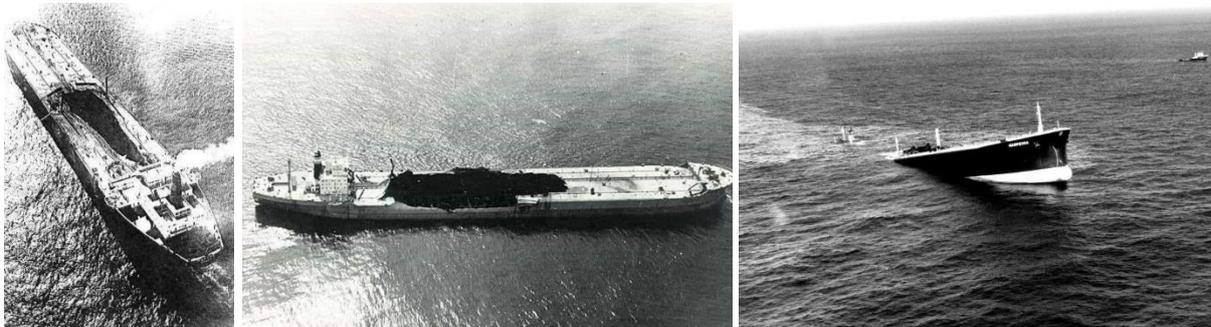


Abbildung 1.1: Folgen der durch Reinigungsarbeiten ausgelösten Explosionen auf den Tankern „Mactra“ links, „Kong Haakon VII“ mittig und „Marpessa“ rechts [8–10]

Der Unterschied zu bisherigen Supertankern waren die damals neuartigen, stationären und sehr leistungsstarken Flüssigkeitsstrahler mit Düsendurchmessern von etwa 0,04 m, einem Pumpendruck von 10 bar und einem Volumenstrom von 48,6 l/s [5]. Zum Schutz der Umwelt wurde bei diesen Flüssigkeitsstrahlern das Wasser rezirkuliert, wodurch sich der Anteil des Rohöls im Wasser mit dem Fortschritt des Reinigungsprozesses zunehmend erhöhte und eine zweite nicht mischbare Phase ausbildete [5, 7]. Der Lenard-Effekt rückte in den Fokus der Wissenschaft des Explosionsschutzes, da bei der Aufklärung der Tankerexplosionen als Zündquelle die „statische Elektrizität“ identifiziert wurde. Durch den Lenard-Effekt werden beim Prozess der Reinigung mit Meerwasser der Tanks Raumpotentiale von bis zu 30 kV erzeugt [11, 12]. Befindet sich im Meerwasser durch das Rohöl eine zweite nicht mischbare Phase, erhöht sich das Raumpotential auf bis zu 100 kV [13]. Die hohen Raumpotentiale der Untersuchungen bestätigen die „statische Elektrizität“ als mögliche Zündquelle. Solange die Elektrizität statisch bleibt, ist mit keiner Zündung des explosionsfähigen Gemisches zu rechnen. Erst die auftretenden *Gasentladungen* beim Ladungsausgleich sind als Zündquelle für ein explosionsfähiges Gemisch zu betrachten. Durch die Forschungsaktivitäten wurde erkannt, dass es sich im Wesentlichen um zwei Gasentladungsarten handelt, die beim Reinigungsprozess eine Zündgefahr darstellen können:

<sup>1</sup> Im Glossar (Anhang A) aufgeführte Begriffe sind bei der ersten Nennung im Text *kursiv* formatiert.

- Ein-Elektroden-Entladung in Form von *Büschelentladungen*, die zwischen der isolierend geladenen Raumladungswolke und geerdeten leitfähigen Einbauteilen erfolgen [5, 7].
- Zwei-Elektroden-Entladung in Form von *Funkenentladungen*, die zwischen einem durch *Influenz* aufgeladenen isolierten Leiter und geerdeten leitfähigen Einbauteilen oder der Tankwand erfolgt [5, 7].

Eine Entzündung des explosionsfähigen Gemisches in den Tanks durch auftretende Büschelentladungen zwischen der Raumladungswolke und geerdeten leitfähigen Einbauteilen konnten durch Versuche nicht nachgewiesen werden [12, 14]. Dahingegen stellten sich die aufgeladenen und gegen Erdpotential isolierten Segmente der *Strahlen* der damals neuartigen, stationären und sehr leistungsstarken Flüssigkeitsstrahler als zündfähig heraus [5, 7]. Gleiches gilt für aufgeladene, gegen Erde isolierte Wassermassen, die von einem höher gelegenen Ort im Behälter herabstürzen, sich durch den Effekt der Influenz der Raumladungswolke aufladen und gegenüber Einbauteilen oder der Behälterwand entladen [13]. Seit diesem Befund müssen beim Einsatz dieser Flüssigkeitsstrahler Tanks inertisiert werden [7]. Erfolgt keine Intertisierung der Tanks, sind beim Einsatz von Flüssigkeitsstrahlern die Grenzwerte der internationalen Sicherheitsrichtlinie für Binnentankschiffe und Terminals (ISGINTT) [15] und die internationale Sicherheitsrichtlinie für Öl Tanker und Terminals (ISGOTT) [16] einzuhalten.

Da nun bekannt war, dass bei Reinigungsarbeiten der Tanks von Schiffen eine Entzündung des explosionsfähigen Gemisches durch statische Zündgefahren nur bei Einhaltung gewisser Grenzwerte auszuschließen ist, ergab sich innerhalb der Industrie der Bedarf nach Grenzwerten für das Versprühen von Wasser über die der Reinigungsarbeiten von Schiffstanks hinaus. So besteht die Notwendigkeit der Behälterreinigung bei Stillstandsarbeiten, Rekonditionierungen und innerhalb von Produktionsprozessen, wobei das Versprühen von Wasser direkter Bestandteil des Produktionsprozesses sein kann. Anders als bei den Reinigungsarbeiten in Schiffstanks, werden Pumpendrucke von mehreren 100 bar bis einigen 1 000 bar genutzt [17–19]. Es war unklar, ob derart hohe Pumpendrucke elektrostatische Zündgefahren hervorrufen.

Um dem Bedarf nach Grenzwerten nachzukommen, erfolgten Messungen in Behältern bis 24 m<sup>3</sup> und Pumpendrucke bis 400 bar [6, 20]. Bei diesen Versuchen konnte keine elektrostatische Zündgefahr beim Versprühen von Wasser festgestellt werden. Auf den Leistungsgrenzen der Flüssigkeitsstrahler und den Behältern der damaligen Untersuchungen beruhen die aktuellen Grenzwerte für das Reinigen mit Wasserstrahlen der nationalen technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 727 [1] und der internationalen technischen Spezifikation IEC TS 60079-32-1 [2]. Ob eine Überschreitung der Grenzwerte eine elektrostatische Zündgefahr darstellt, ist ungeklärt. Der technische Fortschritt und kostenintensive Maßnahmen wie die gegebenenfalls unnötig durchgeführte Inertisierung von Behältern verlangen nach einer Klärung dieser Wissenslücke.

Ziel dieser Arbeit ist es, anhand von Messungen elektrostatischer Größen bei grenzwertüberschreitenden Parametern der Flüssigkeitsstrahler, Aussagen zu elektrostatischen Zündgefahren beim Versprühen von Wasser in *explosionsgefährdeten Bereichen* zu treffen. Um dieses Ziel zu erreichen, sind drei Forschungsfragen zu beantworten:

1. Welche Parameter der Flüssigkeitsstrahler und des Wassers maximieren den Prozess der Ladungstrennung und welchen Einfluss hat die räumliche Begrenzung des Behälters?

2. Ist das in der Literatur primär eingesetzte Verfahren der Feldstärkenmessung für Messungen an Wasserstrahlen und -sprühnebeln geeignet und gelingt die Verifizierung durch die Raumpotentialmessung?
3. Wie sind die Messwerte der elektrischen Feldstärke, des Raumpotentials und der übertragenen Ladung, bei grenzwertüberschreitenden Parametern der Flüssigkeitsstrahler beim Versprühen von Wasser, sicherheitstechnisch zu bewerten?

Diese Arbeit beschränkt sich auf Messungen in kleinen und mittelgroßen Behältern [1] bis 44 m<sup>3</sup>, die leitfähig und geerdet waren. Primär kamen Flüssigkeitsstrahler mit Pumpendrücker von bis zu 2500 bar zum Einsatz (Abbildung 1.2). Für die von Hand gehaltenen Spritzeinrichtungen gilt eine Begrenzung der Rückstoßkraft von 250 N [17, 21], die eingehalten wurde. Messungen mit Tankwaschköpfen (Abbildung 1.3) wurden zum Schutz der Messtechnik nicht durchgeführt.



Abbildung 1.2: Innenreinigung eines Behälters mit von Hand gehaltener Spritzeinrichtung<sup>2</sup>



Abbildung 1.3: Tankwaschkopf mit Drehmechanismus und zwei Düsen<sup>3</sup>

Die Struktur dieser Arbeit ist in Abbildung 1.4 dargestellt und wird im Folgenden erläutert. Zunächst wird auf die Ladungstrennung beim Versprühen von Flüssigkeiten eingegangen. Aus Erkenntnissen der einschlägigen Literatur und ersten eigenen Messungen lassen sich die auftretenden Prozesse der Ladungstrennung beim Versprühen von Flüssigkeiten benennen und erklären. Darüber hinaus erfolgt eine Beschreibung der Parameter, die die Prozesse der Ladungstrennung begünstigen. Anschließend werden die Messwerte, Bewertungsgrundlagen und Grenzwerte aus der einschlägigen Literatur zusammengefasst. Aus der Zusammenfassung resultiert ein neuer Ansatz der sicherheitstechnischen Bewertung. Es folgt eine Beschreibung der Feldstärken-, Raumpotentialmesstechnik und der Messtechnik der übertragenen Ladung. Anhand der Feldstärkenmessung wird an Messwerte der Literatur an Wasserstrahlen und -sprühnebeln [6, 11, 20, 22] angeknüpft. Als Vorbereitung für Messungen an Strahlen und Sprühnebeln der Flüssigkeitsstrahler werden Messungen der elektrischen Feldstärke an Strahlen und Sprühnebeln bekannten Raumpotentials beschrieben und die Eignung des Feldstärkenmessgerätes überprüft. Es werden Messungen ohne die räumliche Begrenzung des geerdeten leitfähigen Behälters beschrieben. An den Strahlen und Sprühnebeln aus vollentsalztem Wasser erfolgten Messungen der übertragenen Ladung, über die berichtet wird. Der 1 m<sup>3</sup> Behälter dient als Modellanordnung und zur Festlegung von Parametern, die den Prozess der Ladungstrennung maximieren und um den von der Wasserart abhängigen, dominierenden Ladungstrennungsprozess abschließend zu definieren. Die Messungen dienten als

<sup>2</sup> Die Firma BUCHEN UmweltService GmbH hat einer Verwendung des Lichtbilds in dieser Arbeit zugestimmt.

<sup>3</sup> Die Firma Hammelmann Maschinenfabrik GmbH hat einer Verwendung des Lichtbilds in dieser Arbeit zugestimmt.

Vorbereitung, um die Anzahl der aufwendigen und kostenintensiven Messungen in den mittelgroßen Behältern auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren. Anhand der Messungen in den mittelgroßen Behältern wird der Einfluss des Behältervolumens und -durchmessers bestimmt. Die Durchführung der Feldstärken- und Raumpotentialmessung bei den gleichen Parametern erlaubt eine Beschreibung der Eignung und Einsatzbeschränkungen der Messtechniken. Aus Berichten der Industrie ist bekannt, dass beim Aufprall von Wasser ein blaues Leuchten auftreten kann. Die dafür notwendigen Parameter wurden erarbeitet und die elektrostatischen Zündgefahren untersucht. Abschließend folgt eine sicherheitstechnische Bewertung der Messungen und eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit.

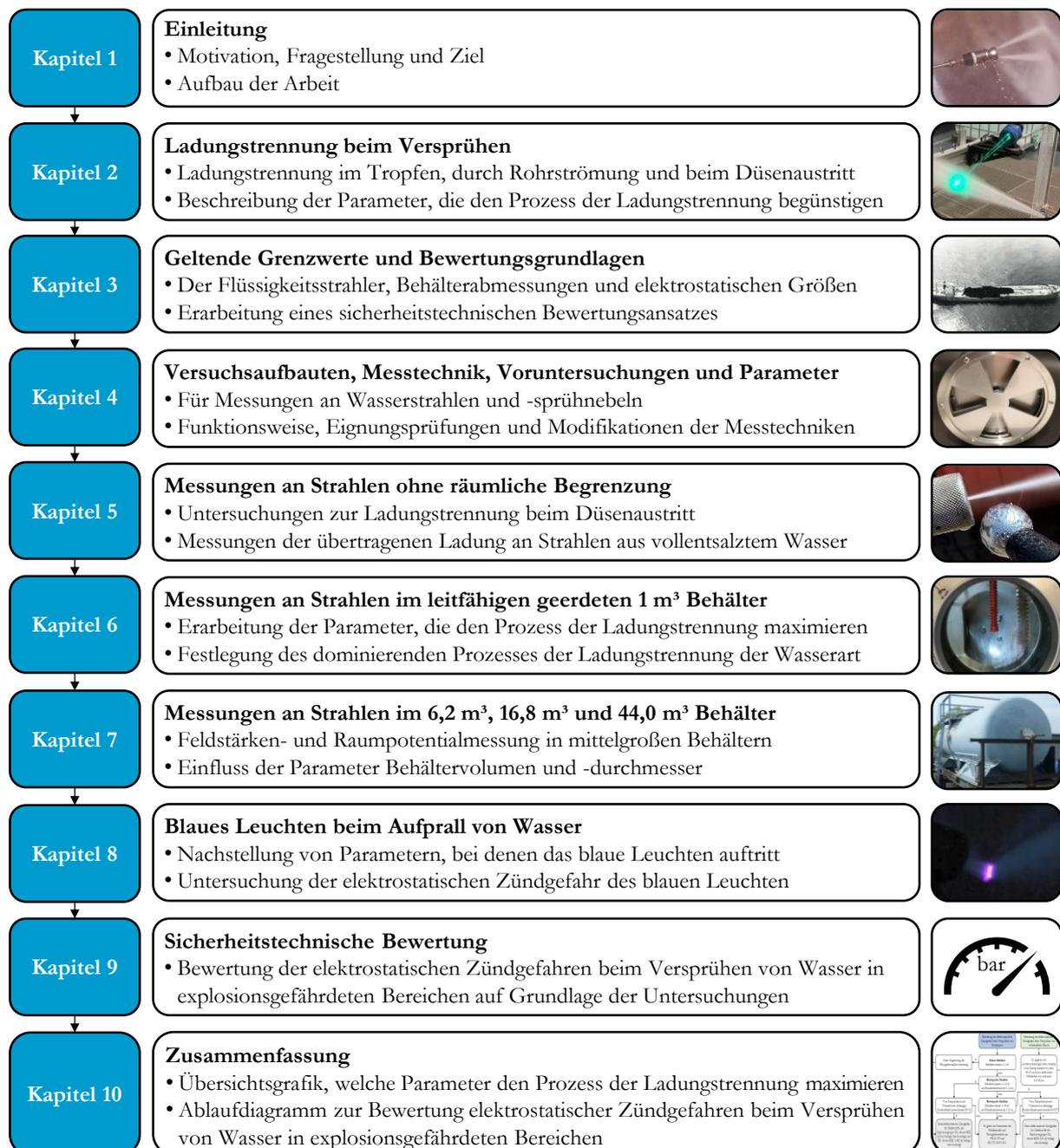


Abbildung 1.4: Struktur der Arbeit

## 2 Ladungstrennung beim Versprühen von Wasser

Ziel des Kapitels ist es, die beim Versprühen von Wasser auftretenden Prozesse der Ladungstrennung zu erläutern und erste Parameter zu identifizieren, die eine Ladungstrennung begünstigen. Weiterhin sind die Berechnungsgrundlagen der Raumladungsdichte Bestandteil dieses Kapitels.

### 2.1 Historisch experimentelle Grundlagenforschung von P. Lenard

Als Namensgeber des Lenard-Effekts (ugs. Wasserfallelektrizität) führte Phillip Lenard Messungen an Bachläufen und Wasserfällen durch. Die beim Aufprall des Wassers gebildeten Sprühnebel erzeugten an seinem Elektroskop einen negativen Messwert. Während an kleinen Bachläufen nur geringe negative Potentiale messbar waren, erhöhte sich der Wert an tosenden Wasserfällen. Lenard folgerte aus seinen Messungen, dass die Ladungstrennung und die sich daraus ergebende Aufladung abhängig vom Impuls (Masse mal Geschwindigkeit) sein muss, mit der Wassertropfen auf ein Hindernis treffen [3]. Um seine Beobachtungen zu prüfen, stellte Lenard Versuche in einem geschlossenen Raum an, in dem eine Brause in 2 m Höhe montiert war. Das Wasser traf in eine Zinkwanne. Das gemessene Potential des Sprühnebels war negativ und besaß das Minimum in der Mitte des Raums. In einem geschlossenen Volumen ergibt sich folglich zu geerdeten Wänden ein Potentialgefälle [3]. Eine Wiederholung der zunächst in Heidelberg durchgeführten Versuche führte in Bonn zu betragslich viel geringeren Werten. Während das Trinkwasser in Heidelberg zu seiner Zeit eine ähnliche Reinheit wie das damalige destillierte Wasser aufwies, stellte sich das Trinkwasser aus Bonn als unreiner heraus. Es bildete nach dem Verdunsten Salzkrusten. Die Reinheit des Wassers ist somit maßgebend für die Ladungstrennung und der daraus resultierenden Aufladung beim Aufprall auf ein Hindernis [3]. Um dies eingehender zu untersuchen, wurden von Lenard Strahlen aus destilliertem Wasser, Trinkwasser (Herkunft Bonn) und Kochsalzlösung (22,9 Massen-%) mit einem Druck von 3,54 bar schräg auf eine metallische Oberfläche versprüht. Im Vergleich zu Trinkwasser war das negative Potential des Sprühnebels bei destilliertem Wasser um das Vierzigfache reduziert und betrug -0,14 kV. Das Potential des Sprühnebels der Kochsalzlösung war vergleichbar mit dem von Trinkwasser, besaß jedoch ein positives Vorzeichen [3].

Es erfolgten durch Lenard Potentialmessungen an einem isoliert aufgestellten metallischen Behälter, in den ein Strahl aus Trinkwasser traf [3]. Diese Messungen bestätigten, dass das gemessene negative Potential des Sprühnebels in gleicher Größe, aber entgegengesetzter Polarität, im aufgefängenen Wasser des Strahls zu finden ist [3]. Eine interessante Beobachtung war, dass sich das am Behälter gemessene positive Potential reduzierte, wenn die Behälteröffnung, mit Ausnahme eines Loches für den Strahl, verschlossen war. Die negative Ladung verblieb zum Teil im Behälter und reduzierte das positive Potential [3].

Ein Ventilieren des beim Aufprall auf eine Oberfläche entstehenden Sprühnebels erhöhte die räumliche Ladungstrennung [3]. Hingegen hatte das Ventilieren des Strahls vor dem Aufprall keinen Effekt [3]. Der Ventilator dieser Versuche bewirkte keinen Strahl- oder Tropfenzerfall.

Lenard schloss aus seinen Versuchen, dass nicht die Reibung des Strahls oder einzelner Tropfen gegenüber Luft zu einer Aufladung führt. Entscheidend für die Aufladung ist der Aufprall auf eine Oberfläche, der ein Aufreißen der Tropfen bewirkt. An einem horizontalen Strahl, der aus dem Versuchszimmer durch das Fenster hinaus schoss, war deswegen keine Aufladung messtechnisch nachweisbar [3]. Der Strahl selbst erzeugte keine feinen Tropfen. In einem weiteren Versuch wurde der horizontale Strahl durch eine Messerklinge in zwei Wasserlamellen zerteilt. Durch dieses

Zerteilen erfolgte ebenfalls keine Aufladung, die messtechnisch nachweisbar war. Die höchsten Potentiale ergaben sich, wenn der horizontale Strahl erneut auf ein flaches Hindernis traf und zwar in dem Abstand, in dem der Strahl in einzelne Tropfen zerfallen war [3].

Grundlage der Wasserfallelektrizität ist die Bildung einer elektrischen Doppelschicht unmittelbar an der Oberfläche der Flüssigkeit. So bildet sie sich gegenüber Gasen (Luft) aus, ist aber ganz in der Flüssigkeit zu finden [4]. Eine Ladungstrennung und die daraus resultierende Aufladung findet nur dann statt, wenn eben diese äußerste Molekülschicht einer Polarität der Doppelschicht abgelöst wird. Die Erdbeschleunigung bewirkt beim Herabfallen der Tropfen oder Strahlen keine Ladungstrennung. Erst tangentiale Kräfte ausreichender Größe sind in der Lage, ein Ablösen der äußersten Molekularschicht der Doppelschicht herbeizuführen. Die für solche tangentialen Kräfte notwendigen Beschleunigungen erfahren die Tropfen beim Aufprall auf ein Hindernis [4].

Als Beweis, dass auch das Versprühen zu einer Ladungstrennung und Aufladung fähig ist, nutze Lenard einen Zerstäuber. Die äußere Schicht der Tropfen wird hohen Beschleunigungen durch Wirbelablösungen der Luft ausgesetzt. Das Potential der zu Boden fallenden Tropfen ist positiv. Die feinsten in Schwebelage befindlichen Tropfen sind negativer Polarität [4].

## 2.2 Elektrische Doppelschicht

Beim Versprühen von Wasser erfolgt eine Trennung elektrischer Doppelschichten, wenn Tropfen hohen Beschleunigungen ausgesetzt sind (Kapitel 2.1). Ob eine Ladungstrennung beim Durchströmen von Rohrleitungen oder beim Düsenaustritt stattfindet, ist Inhalt dieses Kapitels. Ferner wird die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit auf die Ladungstrennung und Polarität der Raumladungswolken beschrieben.

### 2.2.1 Rohrströmung

Flüssigkeiten bilden durch Adsorption gegenüber festen Oberflächen elektrische Doppelschichten aus [23]. Die Adsorption beschreibt einen Vorgang, bei dem Ionen der Flüssigkeit einer Polarität an der Oberfläche eines Feststoffes angelagert werden. Die zweite ladungsausgleichende diffuse Schicht aus beweglichen Ionen entgegengesetzter Polarität ist ebenfalls in der Flüssigkeit selbst zu finden (Abbildung 2.1). Die Konzentration dieser ladungsausgleichenden Ionen nimmt exponentiell mit dem Abstand zur festen Oberfläche ab. Zur Charakterisierung der diffusen Schicht ist die Debye-Länge  $\delta$  zu verwenden (Gleichung 2.1). Sie gibt die Dicke der diffusen Schicht an, bis der Wert der Ladung auf den Wert  $\frac{1}{e}$  abgefallen ist und ist abhängig vom Diffusionskoeffizienten  $D$ , der Permittivität  $\epsilon$  und der elektrischen Leitfähigkeit  $\gamma$  der Flüssigkeit [7].

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{\epsilon \cdot D}{\gamma}\right)} \quad 2.1$$

Erst das Strömen bewirkt einen Transport der Ionen der diffusen Schicht und folglich die Ladungstrennung und Aufladung der Flüssigkeit. Die Geschwindigkeitsverteilung einer laminaren Rohrströmung ist schematisch in Abbildung 2.1 dargestellt. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit  $v_{max}$  befindet sich auf der Mittelachse. Aufgrund der Haftbedingung gilt für die Geschwindigkeit an der Rohrwand  $v(R_{Rohr}) = 0$  [24].

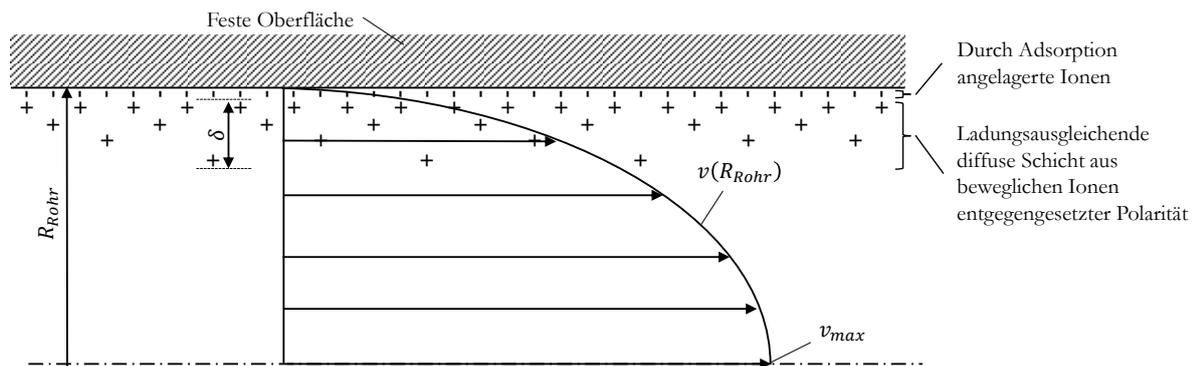


Abbildung 2.1: Aufladung unter Beachtung der Geschwindigkeitsverteilung einer Rohrströmung

Polare Flüssigkeiten, wie Wasser, bilden durch ihre hohe elektrische Leitfähigkeit Dicken der diffusen Schicht in der Größenordnung von 10 nm aus. Die aufgrund der Haftbedingung geringen Geschwindigkeit innerhalb dieser dünnen diffusen Schicht führt zu einer vernachlässigbaren Aufladung der Flüssigkeit. Durch die hohe elektrische Leitfähigkeit kommt es weiterhin zu einem Ladungsrückfluss, der einer Aufladung entgegenwirkt.

### 2.2.2 Düsenaustritt

Der Austritt von Wasser aus einer Düse beschreibt eine Trennung von Oberflächen. Die bei dieser Ladungstrennung wirksame elektrische Doppelschicht ist zwischen der festen Oberfläche der Düse und der Flüssigkeit zu finden. Sie besitzt eine Kapazität  $C$  und ein Potential  $U$ , woraus sich die Ladung  $Q_{Trennung}$  definiert (Gleichung 2.2) [23].

$$Q_{Trennung} = C \cdot U \quad 2.2$$

Unter Vernachlässigung des Ladungsrückflusses ist beim Trennen der Oberflächen die Ladung  $Q_{Trennung}$  konstant. Die Kapazität  $C$  reduziert sich durch Abstandsvergrößerung. Dieser Sachverhalt wird durch die Betrachtung der Gleichung 2.3 des Plattenkondensators verdeutlicht.  $\epsilon$  beschreibt die Permittivität und  $s$  den Abstand zwischen den Flächen  $A$ . Das Potential  $U$  in Gleichung 2.2 muss bei konstanter Ladung und einer Abstandsvergrößerung ansteigen [23].

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{s} \quad 2.3$$

Ein Ladungsrückfluss erfolgt beim letzten Kontakt des Tropfens mit der Düse. Die Zeitkonstante  $\tau$  des Ladungsrückflusses ist zu bestimmen durch Gleichung 2.4.

$$\tau = \frac{C}{G} \quad 2.4$$

Durch Einsetzen der nach der Kapazität umgestellten Gleichung 2.4 in Gleichung 2.2 ergibt sich folgende Gleichung 2.5 für die beim Abtrennen zurückfließende Ladung  $Q_{Rückfluss}$ .

$$Q_{Rückfluss} = \tau \cdot U \cdot G \quad 2.5$$

Bei hohen Trenngeschwindigkeiten (kurze Trennzeiten  $\tau$ ) und/oder bei einem niedrigen Leitwert  $G$  ist die Ladung  $Q_{\text{Rückfluss}}$  minimal. Der abgelöste Tropfen weist eine hohe Ladung  $Q_{\text{Trennung}}$  auf [23]. Laut [23] tritt diese durch Trennung bedingte Aufladung nur auf, wenn mindestens ein Reibpartner einen niedrigen Leitwert bzw. einen hohen Widerstandswert aufweist. Bei Flüssigkeiten wird statt des Leitwertes  $G$  die elektrische Leitfähigkeit in S/m angegeben. Die Düse ist im Bereich der Hochdrucktechnik meist aus elektrisch leitfähigen Stählen gefertigt. Begründet durch den hohen Ladungsrückfluss ist bei der Trennung von Wasser, mit einer hohen elektrischen Leitfähigkeit, von der elektrisch leitfähigen Düse keine Aufladung zu erwarten.

### 2.2.3 Tropfen

Die Ablösung der äußersten Molekularschicht der elektrischen Doppelschicht eines Tropfens ist als Grundvorgang der Ladungstrennung und der daraus resultierenden Aufladung beim Versprühen von Wasser zu verstehen (Kapitel 2.1). Als Grundvoraussetzung dieser Ladungstrennung ergibt sich, dass polare Flüssigkeiten vorliegen müssen. Polare Flüssigkeiten, wie Wasser, bilden aufgrund der negativen und positiven Ladungsschwerpunkte molekulare Dipole [23]. Durch die Eigendissoziation von Wasser ( $H_2O$ ) ergeben sich, definiert durch Reaktionsgleichung 2.6, Kationen (Hydroniumionen,  $H_3O^+$ ) und Anionen (Hydroxidionen,  $OH^-$ ) [25].



Erst diese durch Eigendissoziation gebildeten Ionen erzeugen die, aus elektrostatischer Sicht, hohe elektrische Leitfähigkeit von Wasser. Aus energetischen Gründen erfolgt eine Ausrichtung der Dipole und Ionen an den Grenzflächen zwischen Tropfen und Gas [23]. Bei Wassertropfen sind es die Hydroxidionen, die maßgeblich die Polarität der Raumladungswolke bestimmen. Das Einbringen von Ionen anderer Stoffe wie Salze, beeinflusst die äußerste molekulare Schicht der elektrischen Doppelschicht und damit die Aufladung und Polarität der Raumladungswolke [3, 4, 11, 26]. In [11] ist die Ladungstrennung konkret für das Versprühen von Wasser unterschiedlicher Salinität beschrieben:

- Bei destilliertem und vollentsalztem Wasser bilden die  $OH^-$  Ionen die äußerste Molekularschicht der Doppelschicht. Die  $H^+$  bzw.  $H_3O^+$  Ionen verbleiben nach der Ablösung der  $OH^-$  Ionen im größeren Tropfen (Haupttropfen). Der Sprühnebel ist negativ geladen, während der verbleibende Tropfen eine positive Ladung aufweist.
- Beim Versprühen von Trinkwasser sind es vorwiegend die aus Natrium und Chlorid gebildeten Ionen, die eine Auswirkung auf die Aufladung haben. Die  $Na^+$  Ionen verdrängen die  $OH^-$  Ionen der äußersten Schicht. Kommt es zum Ablösen der äußersten Schicht, weist der Sprühnebel gegenüber destilliertem und vollentsalztem Wasser eine betragsmäßig reduzierte Ladung auf.
- Der Salzgehalt von Meerwasser beträgt durchschnittlich 3,5 Massen-%, wovon der Anteil an Natrium und Chlorid ca. 3,0 Massen-% ausmacht [27]. Die  $Na^+$  Ionen des Meerwassers verdrängen und übersteigen die Anzahl der  $OH^-$  Ionen der äußersten Schicht. Der Sprühnebel ist daraufhin positiv geladen [11].

Ein Nachweis dieser Abhängigkeit war ebenfalls beim Reinigen von Schiffstanks mit Flüssigkeitsstrahlern zu beobachten [12, 28]. Die Tropfen des Sprühnebels bildeten negative Raumladungswolken aus. Wurde stattdessen Meerwasser für die Reinigungsarbeiten verwendet, war eine Raumladung positiver Polarität messbar. Die Höhe und Polarität der Aufladung ist folglich von der elektrischen Leitfähigkeit und der daraus resultierenden Salinität des Wassers abhängig.

Besitzt Wasser einen Überschuss an  $OH^-$  Ionen, muss es einen alkalischen pH-Wert von mehr als 7 annehmen. Wie bereits beschrieben bilden bei destilliertem und vollentsalztem Wasser die  $OH^-$  Ionen die äußerste molekulare Schicht des Tropfens. Beim Versprühen löst sich diese Schicht vom Tropfen ab und bildet den Sprühnebel. Zum Nachweis dieses Vorgangs wurde im Zuge dieser Arbeit vollentsalztes Wasser mit einer elektrischen Leitfähigkeit von  $(3,3 \pm 2,5) \cdot 10^{-4}$  S/m auf einem Freifeld versprüht. Der Pumpendruck lag bei 100 bar oder 500 bar, bei einem Düsendurchmesser von 1,05 mm. Es wurden die Tropfen des Sprühnebels am Rand des horizontalen Strahls mit einem Behälter aufgefangen und der pH-Wert gemessen (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: pH-Werte der Tropfen des Sprühnebels

Abstand zur Düse in m	pH-Wert bei einem Pumpendruck von 100 bar	pH-Wert bei einem Pumpendruck von 500 bar
2	7,81 bis 8,06	6,59 bis 8,18
3	8,60	7,48 bis 8,40
4	-	7,74 bis 7,90

Der pH-Wert ist als der negative dekadische Logarithmus der Hydroniumionenaktivität definiert [25]. Eine Kontrolle des pH-Messgerätes Knick Portamess mit der Sonde Hamilton LIQ-GLASS 400<sup>4</sup> erfolgte durch eine direkte Messung des vollentsalzten Wassers. Der pH-Wert betrug 6,92 und ist vergleichbar mit der Angabe aus [25] für reines Wasser mit 7,0. Die Gesamtheit der Messungen (Tabelle 2.1) belegt, dass die aufgefangenen Tropfen tendenziell einen alkalischen pH-Wert aufweisen und bestätigen die Theorie, dass sich  $OH^-$  Ionen vom Tropfen ablösen.

Luft besitzt keine eigene elektrische Doppelschicht. Erwiesenermaßen erfolgt keine Ladungstrennung, die eine elektrostatische Aufladung der Luft bewirkt [23]. Darüber hinaus erzeugt die Reibung der Flüssigkeitsoberfläche gegenüber Luft keine Aufladung der Flüssigkeit [23].

Beim Versprühen von Wasser ist die äußerste Schicht der Tropfen durch eine bereits vorhandene Raumladungswolke beeinflussbar. Als Beispiel sei das Versprühen von destilliertem Wasser genannt. Wie bereits bekannt ist die Raumladungswolke, gebildet durch die feinsten sich abgelösten Tropfen der äußersten Schicht, negativ. Diese wirkt abstoßend auf die negative äußerste Schicht der nachfolgenden versprühten Tropfen und beeinflusst den Ladungstrennungsprozess [29].

### 2.3 Sprühnebefördernde Eigenschaften von Flüssigkeiten

Als sprühnebefördernde Eigenschaften sind diejenigen zu verstehen, die ein Ablösen der äußersten Schicht eines Tropfens begünstigen. Zu diesen Eigenschaften zählen die von der Temperatur abhängige Oberflächenspannung und Viskosität von Wasser (Abbildung 2.2) [27].

<sup>4</sup> Keine gültige Kalibrierung vorhanden. Eine Überprüfung der Funktion und ein Plausibilitätscheck des Messgerätes erfolgte unter Laborbedingungen vor den Versuchen.

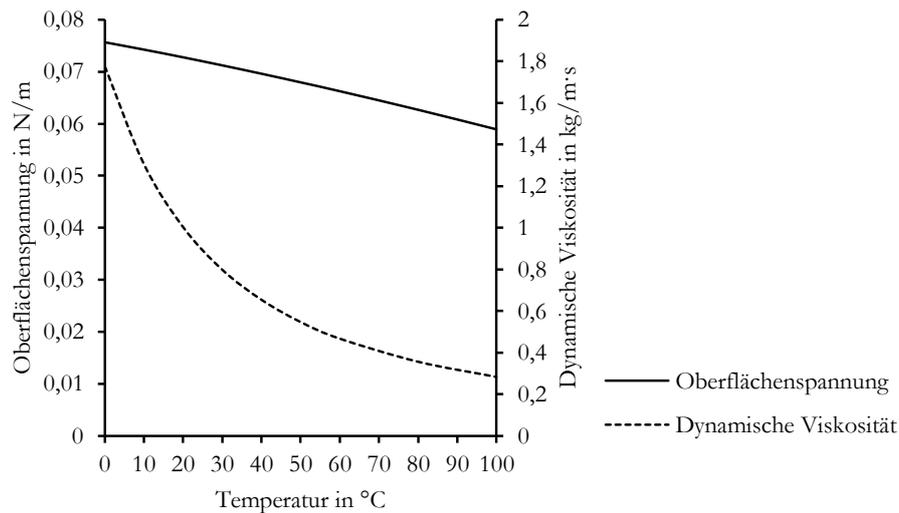


Abbildung 2.2: Oberflächenspannung und dynamische Viskosität von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur unter Normaldruck nach [27]

Bei Untersuchungen aus [30] fielen Tropfen aus destilliertem Wasser auf eine Prallplatte. Wie bei den Versuchen aus [3] wies das aufgefangene destillierte Wasser ein positives Potential auf. In Abhängigkeit von der Temperatur erhöhte sich das Potential. Betrug es bei 15 °C noch 0,23 kV, waren bei 95 °C Potentiale von 0,42 kV messbar. Eine Temperaturdifferenz von 80 K erhöhte das Potential um den Faktor 1,83. Der Potentialanstieg erfolgte nicht linear. Bei einer Temperatur von 75 °C betrug das Potential bereits 0,39 kV. Der Anstieg des Potentials ist direkt abhängig von der dynamischen Viskosität. Die Abnahme der dynamischen Viskosität bei steigender Temperatur ist die dominante Eigenschaft des Wassers, die den Tropfenzerfall begünstigt [31].

In Abbildung 2.3 sind Sprühbilder von Flüssigkeiten unterschiedlicher dynamischer Viskosität aufgeführt. Genutzt wurde eine Flachstrahldüse. Der Pumpendruck betrug 2,0 bar. Die Differenzen der dynamischen Viskositäten sind außerhalb des Bereiches von Abbildung 2.2, verdeutlichen jedoch, dass ein Anstieg der dynamischen Viskosität ein Ablösen der äußersten Schicht der Tropfen reduziert. Während sich beim Versprühen von Wasser mit einer dynamischen Viskosität von 1 kg/(m·s) feine Tropfen ablösen, verminderte sich deren Anzahl stark bei Flüssigkeiten mit einer dynamischen Viskosität von 51 kg/(m·s). Bei Flüssigkeiten mit einer dynamischen Viskosität von 111 kg/(m·s) waren keine feinen Tropfen mehr erkennbar [32].



Abbildung 2.3: Sprühbilder der Flachstrahldüse 652 der Firma Lechler in Abhängigkeit der dynamischen Viskosität bei einem Pumpendruck von 2,0 bar<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Der Hersteller Lechler GmbH hat einer Verwendung der Lichtbilder in dieser Arbeit zugestimmt.

Der Sauterdurchmesser  $d_{32}$  ist eine charakteristische Kenngröße und resultiert aus der gemessenen Tropfengrößenverteilung. Er beschreibt das Verhältnis des Volumens zur Oberfläche aller gemessenen Tropfendurchmesser  $d_i$  (Gleichung 2.7) [24].

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} n_i \cdot d_i^3}{\sum_{i=1}^{i=n} n_i \cdot d_i^2} \quad 2.7$$

Im Zuge dieser Arbeit erfolgten Messung der Tropfengrößenverteilung am horizontalen Wasserstrahl mit einem Phasen-Doppler-Anemometer (PDA) [24]. Der Versuchsaufbau und die elektrischen Leitfähigkeiten des versprühten Trinkwassers und vollentsalzten Wassers sind Abbildung 2.4 zu entnehmen. Der Düsendurchmesser betrug 1,05 mm und der Pumpendruck 500 bar. Das Wasser wurde vor dem Versprühen auf 25 °C oder 45 °C temperiert.

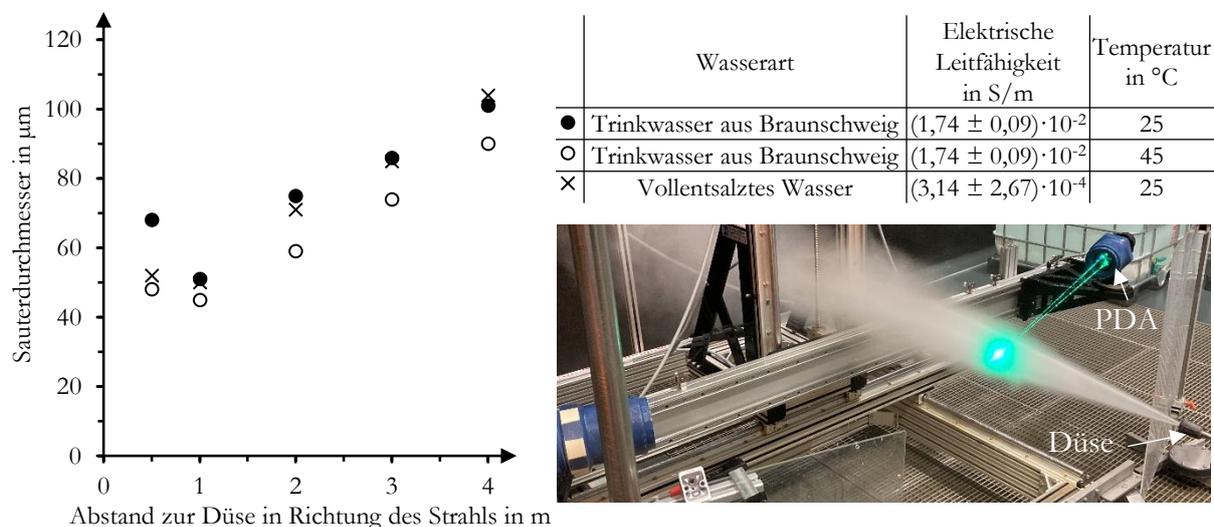


Abbildung 2.4: Sauterdurchmesser in Abhängigkeit der Temperatur und dem Abstand zur Düse in Richtung des horizontalen Strahls; Versuchsaufbau zur Messung der Tropfengrößenverteilung

Der Sauterdurchmesser reduzierte sich, wenn die Temperatur des Wassers von 25 °C auf 45 °C erhöht wurde (Abbildung 2.4). Die Ladungstrennung durch Tropfenzerfall ist bei höheren Temperaturen ausgeprägter und die Aufladung nimmt zu. Die elektrische Leitfähigkeit der untersuchten Wasserarten hat keinen Einfluss auf den Sauterdurchmesser (Abbildung 2.4). Grundsätzlich ist das PDA nur in der Lage kugelförmige Tropfen zu erfassen [24]. Eine Kugelform erlangen die Tropfen erst mit einem zunehmenden Abstand zur Düse in Strahlrichtung. Erfahrungen zeigen, dass besonders die größeren Tropfen unzureichend vom PDA erfasst werden. Daraus resultiert bei kleineren Abständen zur Düse ein reduzierter Sauterdurchmesser (Abbildung 2.4).

Der Düsendurchmesser  $d_{Düse}$  vergrößert sich bei Temperaturanstieg. Der Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha$  von Edelstahl beträgt  $16 \cdot 10^{-6} 1/K$  [33]. Die Änderung des Düsendurchmessers  $\Delta d_{Düse}$  ist durch Gleichung 2.8 zu berechnen [33].

$$\Delta d_{Düse} = d_{Düse} \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad 2.8$$

In einem Bereich der Temperatur von 0 °C bis 100 °C ( $\Delta T = 100 \text{ K}$ ) ist die Änderung des Düsendurchmessers vernachlässigbar und hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Ladungstrennung. Beispielsweise beträgt sie bei einem Düsendurchmesser von 1,00 mm nur  $1,6 \cdot 10^{-6}$  m.

Der Anstieg des Pumpendrucks erhöht die Temperatur der versprühten Tropfen. In der Höchstdrucktechnik gilt der grobe Richtwert, dass sich bei einer Druckerhöhung von 40 bar die Temperatur um 1 K erhöht<sup>6</sup>.

## 2.4 Sprühnebel-fördernde Eigenschaften der Pumpen- und Düsentechnik

Bei den Versuchen aus [31] erfolgte der Tropfenzerfall durch einen gezielten Luftstrom. Die Geschwindigkeit des herabfallenden Tropfens ist vernachlässigbar, da der Luftstrom im 90° Winkel auf diesen traf. Luftströme dieser Art sind beim Versprühen unüblich. Es sind die Tropfen, die nach Düsenaustritt eine hohe Geschwindigkeit gegenüber der Luft aufweisen. Im Kontaktbereich zweier Medien unterschiedlicher Dichte (Wasser/Luft) verursacht die Beschleunigung eine Störung im Kontaktbereich. Dieser als hydrodynamische Instabilität bezeichnete Vorgang wird in [29] als Ursache des Aufladungsprozesses der Tropfen beim Versprühen beschrieben. Es ist also gleichgültig, ob die Luft oder die Tropfen hohe Geschwindigkeiten aufweisen. Bei typischen Hochdruckreinigern beträgt die Düsenaustrittsgeschwindigkeit 30,7 m/s oder mehr [17]. Eine Unterschreitung der Geschwindigkeiten von 10,8 m/s [3] und 16 m/s [31], um eine Ladungstrennung auszuschießen, ist bei Hochdruckreinigern undenkbar.

Mit dem in Abbildung 2.4 gezeigten Versuchsaufbau erfolgten im Zuge dieser Arbeit Messungen der Tropfenverteilung am horizontalen Strahl bei unterschiedlichen Pumpendrücken (Abbildung 2.5). Der Düsendurchmesser der Versuche betrug 1,05 mm. Die elektrische Leitfähigkeit des Trinkwassers hatte einen Wert von  $(1,74 \pm 0,09) \cdot 10^{-2} \text{ S/m}$ . Um den Einfluss der Temperatur auf die Ladungstrennung zu minimieren, erfolgten die Messungen bei einer konstanten Temperatur des Wassers von 25 °C.

Eine Erhöhung des Pumpendrucks von 100 bar auf 300 bar führte zu einem kleineren Sauterdurchmesser (Abbildung 2.5). Steigt der Pumpendruck weiter auf 500 bar sind die Sauterdurchmesser identisch oder leicht reduziert. Die Diskussion des Messwertverlaufs der Abbildung 2.5 ist in Kapitel 2.3 näher erläutert. Der Aufprall des Strahls auf die Behälterwand wurde durch eine Prallplatte simuliert. Der Abstand zwischen Düse und Prallplatte betrug 0,19 m und der Winkel zwischen auftreffendem Strahl und der Prallplatte 20°. Bei diesen Versuchen war ein konstanter Pumpendruck von 500 bar eingestellt. Der Aufprall bewirkte gegenüber den Versuchen ohne Prallplatte am rückprallenden Strahl leicht erhöhte Sauterdurchmesser.

Zusätzlich wurde mit dem PDA die mittlere Geschwindigkeit der Tropfen gemessen (Abbildung 2.6). Die Geschwindigkeit der Tropfen ist vom Pumpendruck abhängig. Betrug sie bei einem Pumpendruck von 100 bar, bei einem Abstand zur Düse von 0,5 m rund 60 m/s, erhöhte sich die Geschwindigkeit bei einem Pumpendruck von 500 bar um rund das Dreifache. Mit der Geschwindigkeit des Strahls erhöht sich die Ladungstrennung [34].

Der Strömungswiderstand der Luft reduzierte die Geschwindigkeit der Tropfen mit steigendem Abstand zur Düse. Ab einem Abstand zur Düse von 2,0 m wurde bei den Pumpendrücken von 100 bar und 500 bar die für eine Ladungstrennung notwendige Geschwindigkeit laut [31] von

<sup>6</sup> Der Richtwert stammt aus der Kommunikation und Befragung während der Besichtigung von Prozessen der Behälterreinigung und konnte tendenziell durch nicht veröffentlichte Messdaten der Firma Alfred Kärcher SE & Co. KG bestätigt werden.

16 m/s unterschritten. Bei einem Pumpendruck von 100 bar und einem Abstand zur Düse von 3,0 m war eine Unterschreitung der nach [3] notwendigen Geschwindigkeit von 10,8 m/s messbar. Der Prozess der Ladungstrennung durch das Ablösen der äußersten Schicht der Tropfen muss sich ab einem Abstand zur Düse von 2,0 m stark reduzieren oder unwirksam werden. Die Verwendung der Prallplatte bei einem Pumpendruck von 500 bar reduzierte direkt beim Aufprall die Geschwindigkeit der Tropfen. So war bei einem Abstand zur Düse von 0,5 m die Geschwindigkeit der Tropfen mit 26 m/s um das Siebenfache reduziert, gegenüber dem Sprühen ohne Prallplatte bei 500 bar mit 183 m/s.

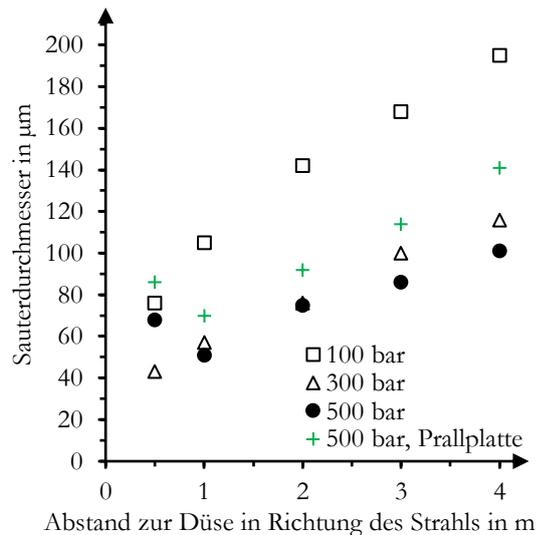


Abbildung 2.5: Sauterdurchmesser in Abhängigkeit vom Pumpendruck und dem Abstand zur Düse in Richtung des Strahls

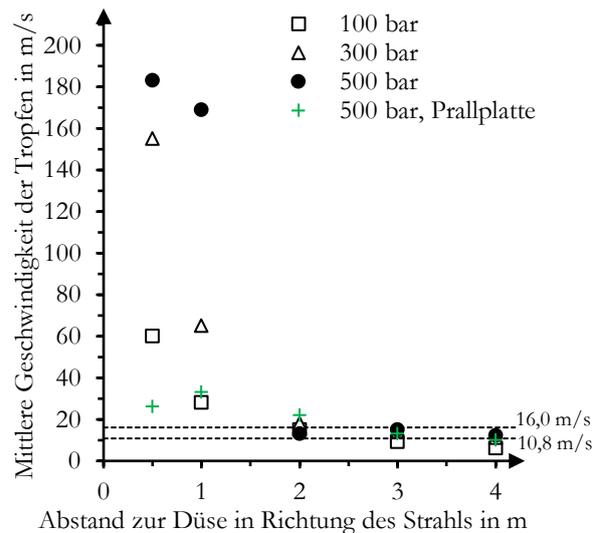


Abbildung 2.6: Mittlere Geschwindigkeit der Tropfen in Abhängigkeit vom Pumpendruck und dem Abstand zur Düse in Richtung des Strahls

Wie Abbildung 2.6 zu entnehmen ist, erhöhte sich mit dem Pumpendruck die mittlere Geschwindigkeit der Tropfen. Die Düsenaustrittsgeschwindigkeit  $\bar{v}_{DA}$  ist nach Gleichung 2.9 zu berechnen und erhöht sich ebenfalls bei einem Anstieg der Druckdifferenz  $\Delta p$  [24].

$$\bar{v}_{DA} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_W \cdot \left(1 - \left(\frac{A_{Düse}}{A_Z}\right)^2\right)}} \quad 2.9$$

$A_Z$  entspricht der Querschnittsfläche des Zulaufs und  $A_{Düse}$  der Querschnittsfläche der Düse. Die Dichte  $\rho_W$  von Wasser, im flüssigen Aggregatzustand, ist von der Temperatur abhängig. Das Dichtemaximum entspricht 1 000 kg/m<sup>3</sup> bei einer Temperatur von 4 °C und das Dichteminimum 959 kg/m<sup>3</sup> bei einer Temperatur von 100 °C. Von 4 °C bis 40 °C liegt die Abhängigkeit von der Temperatur bei unter 1 % [27]. Anhand von Gleichung 2.9 wird bestätigt, dass die mittlere Geschwindigkeit der Tropfen des Strahls mit dem Pumpendruck zunehmen muss (Abbildung 2.6). Ein Anstieg der Geschwindigkeit der Tropfen und der Düsenaustrittsgeschwindigkeit führt zu kleineren Sauterdurchmessern (Abbildung 2.5), die den Prozess der Ladungstrennung erhöhen.

Abschließend sei die Abhängigkeit vom Volumenstrom erläutert. So erhöht sich bei einem gleichbleibenden Düsendurchmesser  $d_{Düse}$  die Düsenaustrittsgeschwindigkeit mit dem

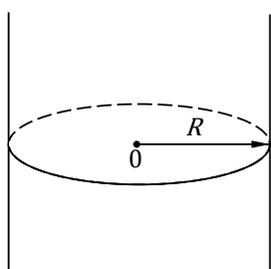
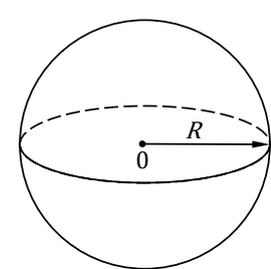
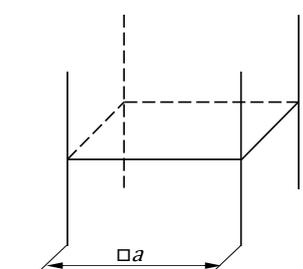
Volumenstrom  $\dot{V}$  (Gleichung 2.10) [33]. Verluste durch Wärme und Reibung sind nicht Teil dieser Betrachtungen [24].

$$\bar{v}_{DA} = \frac{\dot{V} \cdot 4}{\pi \cdot d_{Düse}^2} \quad 2.10$$

## 2.5 Berechnung der Raumladungsdichte in Abhängigkeit der Geometrie des Behälters

Beim Versprühen von Wasser bilden sich Raumladungswolken im Behälter aus. Um deren Raumladungsdichte zu berechnen, ist eine Messung der elektrischen Feldstärke an der raumbegrenzenden Wand oder des maximalen Raumpotentials im Mittelpunkt des Behälters durchzuführen. Die im Folgenden aufgeführten Gleichungen 2.11 bis 2.20 beruhen auf der Annahme einer räumlich konstanten Raumladungsdichte [29]. Die in Tabelle 2.2 aufgeführten Gleichungen aus [11, 28, 29] gelten für Behälter zylindrischer und kugelförmiger Bauformen sowie für Behälter mit quadratischer Querschnittsfläche. Durch Umstellungen der Gleichungen der elektrischen Feldstärke an der Wand  $E(R)$  und des Raumpotentials  $\Phi(0)$  im Mittelpunkt des Behälters, ist die Raumladungsdichte  $\rho$  zu berechnen.

Tabelle 2.2: Berechnung des Raumpotentials im Mittelpunkt und der elektrischen Feldstärke an der Wand des Behälters ohne Einbauteile

	Zylinder	Kugel	Behälter mit quadratischer Querschnittsfläche
			
Maximales Raumpotential	$\Phi(0) = \frac{\rho \cdot R^2}{4 \cdot \varepsilon}$ [29] 2.11	$\Phi(0) = \frac{\rho \cdot R^2}{6 \cdot \varepsilon}$ [29] 2.12	$\Phi(0) = \frac{0,056 \cdot \rho \cdot a^2}{\varepsilon}$ [28] 2.13
El. Feldstärke an der Wand	$E(R) = \frac{\rho \cdot R}{2 \cdot \varepsilon}$ [29] 2.14	$E(R) = \frac{\rho \cdot R}{3 \cdot \varepsilon}$ [29] 2.15	$E_a = \frac{27 \cdot \rho \cdot a}{\pi^4 \cdot \varepsilon}$ [11] 2.16
	$\Phi(0) = R \cdot \frac{E(R)}{2}$ [29] 2.17		

Die Gleichungen 2.14 und 2.15 ergeben sich aus einer der Grundgleichungen der Elektrostatik (Gleichung 2.18) [35]. Das Flächenintegral der Mantelfläche und das Volumenintegral ist für die jeweilige Geometrie des Behälters zu lösen.

$$\int_F \varepsilon \cdot E \cdot dF = \int_V \rho \cdot dV \quad 2.18$$

Um das maximale Raumpotential im Mittelpunkt des Behälters  $\Phi(0)$  zu erhalten, muss die vom Radius  $R$  abhängige elektrische Feldstärke  $E(R)$ , die ansonsten für den kompletten Raum gilt, halbiert werden (Gleichung 2.17). Diese Vorgehensweise ist nur gültig, wenn das zu betrachtende Volumen achsensymmetrisch ist.

Die Lösung der Grundgleichung für Behälter mit quadratischer Querschnittsfläche ergibt, anders als in [11], folgenden Zusammenhang (Gleichung 2.19).

$$E_a = \frac{\rho \cdot a}{\varepsilon \cdot 4} \quad 2.19$$

$E_a$  beschreibt die elektrische Feldstärke am Rand des Behälters mit quadratischer Querschnittsfläche. Die quadratische Querschnittsfläche besitzt die Seitenlänge  $a$ . Der Faktor  $\frac{27}{\pi^4}$  der Gleichung 2.16 ist als Dezimalzahl ausgedrückt 0,277. Er entspricht mit einer Abweichung von rund 10 % dem Faktor  $\frac{1}{4}$  der aufgeführten Lösung der Grundgleichung für einen Behälter mit quadratischer Querschnittsfläche (Gleichung 2.19).

Für das maximale Raumpotential des Behälters mit quadratischer Querschnittsfläche muss die Gleichung 2.17 angepasst werden. Die Hälfte der Seitenlänge  $a$  entspricht in diesem Fall dem Radius  $R$  (Gleichung 2.20).

$$\Phi(0) = \frac{\rho \cdot a^2}{16 \cdot \varepsilon} \quad 2.20$$

Der Faktor  $\frac{1}{16}$  der Gleichung 2.20 ist als Dezimalzahl ausgedrückt 0,0625. Dieser Wert gleicht dem in [28] angegebenen Faktor von 0,056 ebenfalls mit einer Abweichung von rund 10 %. Für Berechnungen dieser Arbeit sind nicht die in Tabelle 2.2 angegebenen Gleichungen 2.13 und Gleichung 2.16, sondern die Gleichungen 2.19 und Gleichung 2.20 für Behälter mit quadratischer Querschnittsfläche zu verwenden. Diese beruhen, wie die bereits etablierten Gleichungen für Behälter zylindrischer und kugelförmiger Bauform [6, 29, 35], auf der Lösung der Grundgleichung der Elektrostatik (Gleichung 2.18). Ein weiterer Grund für die Anwendung ist das nicht nachvollziehbare Eingehen der Kreiszahl  $\pi$  bei der in [11] angegebenen Berechnung der elektrischen Feldstärke an der Wand eines Behälters mit quadratischer Querschnittsfläche (Gleichung 2.16).

Die Permittivität  $\varepsilon$  der Raumladungswolke resultiert aus dem Produkt der Permittivitätszahl  $\varepsilon_r$  und der elektrischen Feldkonstante  $\varepsilon_0$  (Gleichung 2.21).

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad 2.21$$

Die Permittivitätszahl der Raumladungswolke beim Prozess der Behälterreinigung wird in [6, 28, 36] mit 1,0 angenommen. Als Begründung ist heranzuziehen, dass die feinen, sich in Schwebefindlichen Wassertropfen gegenüber Dampf nicht unähnlich sind. Die Permittivitätszahl von

Dampf bei einem Druck von 1,0 bar beträgt maximal 1,01 [37]. Dieser Wert wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit genutzt.

## 2.6 Schlussfolgerungen

Für das Versprühen von Wasser gelten die im Folgenden zusammengefassten Schlussfolgerungen, die sich aus der Literatur und Messungen der Tropfengrößenverteilung und mittleren Geschwindigkeit der Tropfen ergeben:

- Vernachlässigbare Ladungstrennung beim Durchströmen von Rohrleitungen und beim Düsenaustritt.
- Durch die hydrodynamische Instabilität erfolgt ein Ablösen der äußersten Schicht eines Tropfens. Der verbleibende Tropfen ist entgegengesetzt zum Sprühnebel geladen. Das Ablösen der äußersten Schicht der Tropfen findet ebenfalls beim Aufprall auf ein Hindernis statt. Die Ablösung und daraus resultierende Ladungstrennung wird als Lenard-Effekt bezeichnet.
- Die Polarität des Sprühnebels ist abhängig von den Ionen der äußersten molekularen Schicht des Tropfens. Bei Trinkwasser und vollentsalztem Wasser ist der Sprühnebel negativ. Beim Versprühen von Meerwasser ergeben sich positiv geladene Sprühnebel.
- Das Versprühen von vollentsalztem Wasser generiert, im Vergleich zu Trink- und Meerwasser, die höchsten Aufladungen.
- Ein Anstieg der Temperatur des Wassers reduziert dessen dynamische Viskosität. Eine Reduzierung der dynamischen Viskosität begünstigt das Ablösen der äußersten Schicht der Tropfen und somit die Anzahl getrennter Ladungen.
- Mit dem Pumpendruck erhöht sich die Düsenaustrittsgeschwindigkeit und die mittlere Geschwindigkeit der versprühten Tropfen. Mit der Zunahme dieser Geschwindigkeiten reduzieren sich die Sauterdurchmesser. Kleinere Sauterdurchmesser bedeuten, dass sich die Anzahl getrennter Ladungen durch das Ablösen der äußersten Schicht der Tropfen erhöht.
- Die Düsenaustrittsgeschwindigkeit von Hochdruckreinigern beträgt über 10,8 m/s [3] beziehungsweise 16 m/s [31], ab der mit dem Ablösen der äußersten Schicht des Tropfens und der dadurch entstehenden Ladungstrennung zu rechnen ist.

Teilweise gelten die aufgezählten Schlussfolgerungen nur für kleine Apparaturen und/oder niedrige Pumpendrucke, wie sie in der Literatur häufig Verwendung fanden. Es ist zu prüfen, ob die Schlussfolgerungen ihre Gültigkeit beim Versprühen von Wasser unter hohem Druck in Behälter kleiner und mittlerer Größe [1] beibehalten und mit welchen Raumladungsdichten zu rechnen ist. Dafür fehlt die Bewertungsgrundlage durch Messdaten, die in dieser Arbeit erarbeitet wird.

### 3 Geltende Grenzwerte und Bewertungsgrundlagen

Zündgefahren für eine *explosionsfähige Atmosphäre* bestehen, wenn Gasentladungen statischer Elektrizität erfolgen. Bisher lokalisierte Entladungen entstehen beim Versprühen von Wasser zwischen der Raumladungswolke und geerdeten leitfähigen Einbauteilen oder durch isolierte Leiter.

Ziel ist es, die bei Reinigungsarbeiten mit Wasserstrahlen einzuhaltenden Grenzwerte, Bewertungsgrundlagen und Messungen der einschlägigen Literatur darzustellen und zu diskutieren. Auf Grundlage dessen wird ein neuer Ansatz für eine sicherheitstechnische Bewertung der elektrostatischen Zündgefahren beschrieben.

#### 3.1 Bildung explosionsfähiger Atmosphäre im Behälter

In Behältern ohne Inertisierung liegt eine *Zone 0* vor, wenn Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten vorhanden sind, beispielsweise wenn die Verarbeitungstemperatur oberhalb des *Flammpunktes* liegt. Die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre ist durch das Ausspülen von Behältern (Tanks) mit Wasser nicht sicher auszuschließen. Unfallgeschehen zeigen, dass Rückstände leicht flüchtiger brennbarer Flüssigkeiten hinter Rostansätzen oder im Bodensatz ausreichen, um nach dem Ausspülen mit Wasser eine explosionsfähige Atmosphäre zu bilden [35]. Längere Zeit unterbliebene Nutzung der Behälter ist kein Garant zum Ausschließen einer explosionsfähigen Atmosphäre [35]. Um eine explosionsfähige Atmosphäre in Behältern sicher auszuschließen, müssen die Rückstände brennbarer Flüssigkeiten durch weitere Reinigungsverfahren restlos entfernt werden [35].

Der Flammpunkt der Rückstände im Behälter ist heranzuziehen, um die Notwendigkeit einer Inertisierung im Behälter zu bewerten [15]. Werden im Behälter verschiedene Produkte hergestellt und/oder transportiert, ist von den letzten drei Produkten der niedrigste Flammpunkt zu analysieren [15]. Diese Vorgabe hat keine Gültigkeit, wenn zwischen den Produkten gereinigt wird. Das Reinigen mit erwärmtem Wasser kann zum Überschreiten des Flammpunktes der Rückstände im Behälter führen. Die Ausgangstemperatur des Behälters und/oder Wassers als Bewertungskriterium ist unzureichend. Entscheidend ist die Temperatur des versprühten Wassers und des dadurch erwärmten Behälters.

#### 3.2 Flüssigkeitsstrahler und Behälterabmessungen

Zur Prävention einer Explosion ergeben sich Grenzwerte und Bewertungsgrundlagen der Flüssigkeitsstrahler und Behälterabmessungen, die das Auftreten potenziell zündfähiger Entladungen vermeiden (Abbildung 3.1). Der Grenzwert des Volumenstroms entspricht der Summe der Volumenströme der eingesetzten Düsen. Aus Abbildung 3.1 lassen sich die Wissenslücken des aktuell gültigen nationalen Regelwerkes der Elektrostatik TRGS 727 [1] und der internationalen technischen Spezifikation IEC TS 60079-32-1 [2] ableiten. Diese Dokumente sind aktuell und thematisch ähnlich, jedoch nicht vollständig untereinander abgeglichen. Die Grenzwerte aus [1, 2] weisen teils untereinander und gegenüber den Bewertungsgrundlagen aus [6, 29] Unterschiede auf. Als Beispiel sei das Volumen des Behälters bei einem Pumpendruck von bis zu 12 bar genannt. Während die TRGS 727 [1] ein maximales Volumen von 10 m<sup>3</sup> zulässt, wird in der IEC TS 60079-32-1 [2] einem Volumen von unter 100 m<sup>3</sup> eine sehr niedrige Gefahrenstufe zugeordnet. Die Zusammenfassung aus [6] beschreibt ein Volumen bis 30 m<sup>3</sup> als zulässig. In [29] wird ein Volumen bis 100 m<sup>3</sup> genannt. Ergänzend zu den Angaben in Abbildung 3.1 sind folgende Begrenzungen zu beachten:

- Beträgt der Anteil der zweiten nicht mischbaren Phase im Wasser weniger als 1,0 Massen-%, kann mit einem Pumpendruck von bis zu 50 bar und einem Volumenstrom von bis zu 1 l/s gereinigt werden. Als Einschränkung gilt ein Behältervolumen von 5 m<sup>3</sup> oder eine Querschnittsfläche von 5 m<sup>2</sup>, bei einem beliebigen Behältervolumen. Weiterhin muss der Behälterausschlauf geöffnet sein, um ein Befüllen zu verhindern [7].
- In einem Behälter mit einem Volumen von bis zu 100 m<sup>3</sup> wird das Reinigen mit Strahlen aus Hydrantenwasser bei einem Pumpendruck von 3 bar bis 6 bar als unkritisch eingeschätzt [7].
- Beim Reinigen von Schiffstanks, mit einem Behältervolumen von bis zu 30 000 m<sup>3</sup>, sind keine gewitterblitzähnlichen Entladungen zu erwarten [2].

	Pumpendruck ≤ 12 bar				12 bar < Pumpendruck < 500 bar (In IEC TS 60079-32-1 [2]; [6]; [29] ist ein Pumpendruck bis 500 bar zulässig)			
	TRGS 727 [1]	IEC TS 60079-32-1 [2]	[6]	[29]	TRGS 727 [1]	IEC TS 60079-32-1 [2]	[6]	[29]
<b>Flüssigkeitsstrahler</b>								
Volumenstrom	7 l/s	-	5 l/s	5 l/s	5 l/s	5 l/s	5 l/s	5 l/s
Anzahl Düsen	20	-	-	-	-	-	-	-
Zweite nicht mischbare Phase	-	-	-	keine nennenswerten ungelösten Bestandteile	-	0,5 %	-	-
<b>Behälter</b>								
Durchmesser	-	-	3 m	-	3 m	3 m	3 m	-
Volumen	10 m <sup>3</sup>	sehr niedrige Gefahrenstufe bei < 100 m <sup>3</sup>	30 m <sup>3</sup>	100 m <sup>3</sup>	-	-	30 m <sup>3</sup>	30 m <sup>3</sup>
Querschnittsfläche	-	-	-	5 m <sup>2</sup>	-	-	-	5 m <sup>2</sup>

*Der Behälterausschlauf muss geöffnet sein, um ein Befüllen zu vermeiden*

*Einschränkung der Grenzwerte für das Reinigen auf Kohlenwasserstoffe in Behältern mit metallischen Komponenten*

*Einschränkung der Grenzwerte für Kohlenwasserstoffe in Luft-Atmosphäre*

*Der Behälterausschlauf muss geöffnet sein, um ein Befüllen zu vermeiden*

*Der Füllgrad des Behälters darf 5 % des Behältervolumens nicht überschreiten*

Abbildung 3.1: Grenzwerte aus [1, 2] und Bewertungsgrundlagen aus [6, 29] der Flüssigkeitsstrahler und Behälterabmessungen beim Versprühen von Wasser

Im direkten Widerspruch zu den in Abbildung 3.1 aufgezeigten Begrenzungen des Volumenstroms und des Behältervolumens stehen die einzuhaltenen Grenzwerte beim Reinigen von Schiffstanks ohne Inertisierung. Zur Prävention der Zündquelle „statische Elektrizität“ ist beim Reinigen von Schiffstanks ohne Inertisierung der Volumenstrom der einzelnen Tankwaschköpfe auf 16,7 l/s zu begrenzen [15, 16]. Diese Typen von Tankwaschköpfen arbeiten bei Pumpendrücken von bis zu 10 bar [5]. Pro Behälter (Tank) liegt der Grenzwert des gesamten Volumenstroms aller Tankwaschköpfe und weiterer Reinigungsanlagen bei 50,0 l/s [15, 16].

Dieser Wert überschreitet auch den Volumenstrom von 48,6 l/s, der bei den Tankern Mactra, Kong Haakon VII und Marpessa zur Explosion führte [5]. Seit diesen Explosionen sind das Rezikulieren und die Ansammlung von Wasser unzulässig. Ferner darf, begleitet durch eine ständige Messung der Tankatmosphäre, 35 % der unteren Explosionsgrenze (UEG) nicht überschritten werden. Chemische Zusätze sind zulässig, wenn die Temperatur des Wassers unter 60 °C beträgt.

Weitere Maßnahmen und detaillierte Informationen sind [15] zu entnehmen. Die Einhaltung der Maßnahmen begründet die Zulässigkeit des Volumenstroms von bis zu 50 l/s.

Wasserdampf kann unbeabsichtigt durch eine hohe Ausgangstemperatur in Kombination mit der Temperaturerhöhung sowie der Expansion durch den Prozess des Versprühens in den Behälter eingebracht werden. Damit sind die Grenzwerte des Dampfstrahlens und nicht die des Versprühens anzuwenden. Das Reinigen mit Dampfstrahlen von mit Kohlenwasserstoff benetzten leitfähigen, geerdeten Behältern ist zulässig, wenn das Volumen bis zu 100 m<sup>3</sup> beträgt [2].

Das Wasserstrahlschneiden von Stahl in einem mit Wasserstoff/Luft-Gemisch (17 Volumen-% H<sub>2</sub>) gefüllten Versuchsbehälter, mit einem Durchmesser von 0,61 m und einer Höhe von 1,37 m, führte nicht zu einer Entzündung der explosionsfähigen Atmosphäre [38]. Der Pumpendruck betrug bis 1400 bar. Dem Wasser wurde eine zweite nicht mischbare Phase in Form von Granatsand als Abrasivmittel hinzugegeben. Die Prüfung der Zündfähigkeit der explosionsfähigen Atmosphäre erfolgte nach dem Versuch durch eine in den Behälter ragende Zündkerze [38].

Die widersprüchlichen Grenzwerte und Wissenslücken führen in der Anwendung im Industriebereich zu Unsicherheiten und Diskussionsbedarf. Veranlasst durch die heutige Effizienz und Leistungsfähigkeit der Flüssigkeitsstrahler bedarf es einer einheitlichen, mit wissenschaftlichen Fakten hinterlegten Grenzwertfestlegung.

### 3.3 Entladungen der Raumladungswolke

Zwischen geerdeten leitfähigen Einbauteilen und der durch das Versprühen entstehenden Raumladungswolke können Gasentladungen auftreten [39]. Zur Prävention dieser Gasentladungen sind Grenzwerte zum Raumpotential und zur elektrischen Feldstärke einzuhalten:

- Raumpotentiale von 58 kV, gebildet von als isolierend zu betrachtetem Sprühnebel aus Wasser, können an geerdeten leitfähigen Einbauteilen Gasentladungen in Form von Büschelentladungen hervorrufen. Diese gelten als zündfähig für Kohlenwasserstoff/Luft-Gemische [2].
- Bei einer elektrischen Feldstärke von unter 100 kV/m in einem homogen elektrischen Feld sind keine Büschelentladungen zu erwarten [1]. Diese Angabe behält ihre Gültigkeit beim Einbringen feldverzerrender Einbauteile.

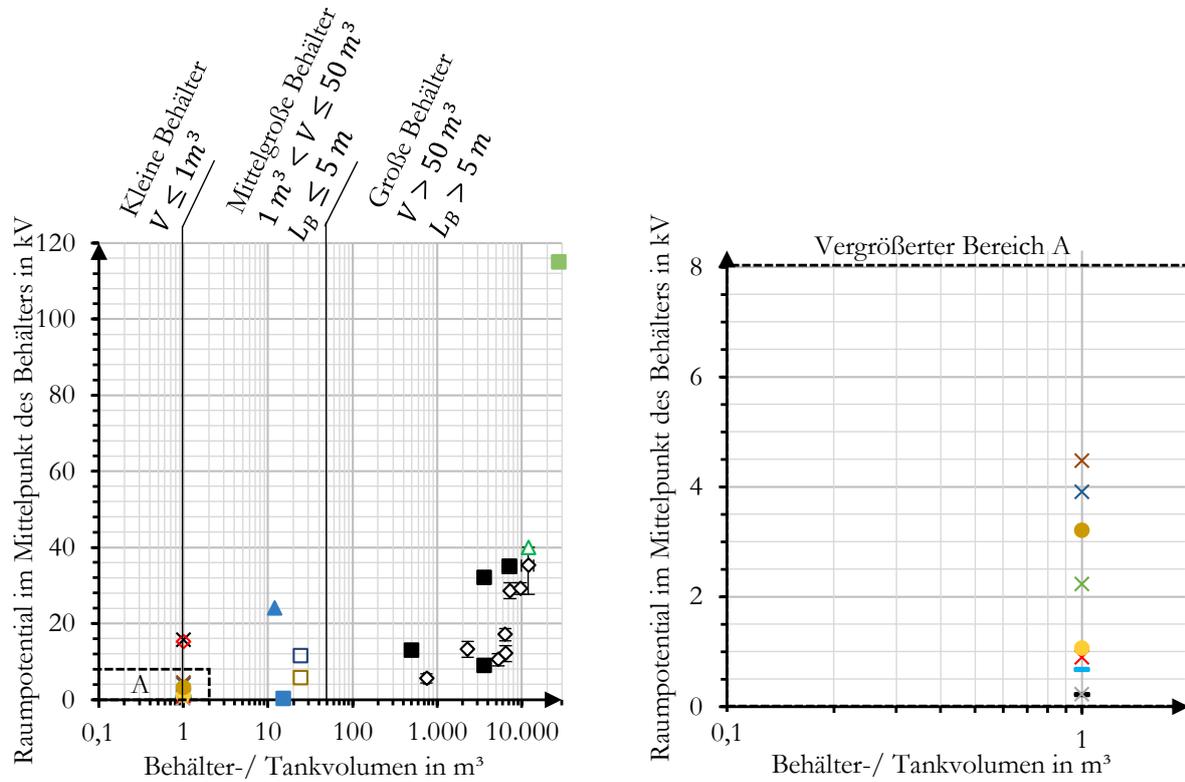
Es folgt eine Zusammenfassung der Bewertungsgrundlagen und Messwerte des Raumpotentials, der elektrischen Feldstärke und der Raumladungsdichte.

#### 3.3.1 Bewertungsgrundlagen und Messwerte des Raumpotentials

In diesem Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung von Erkenntnissen bezüglich des sich im Behälter ausbildenden Raumpotentials. Aus den Erkenntnissen lassen sich Parameter ableiten, die zu hohen Raumpotentialen führen. Aus der Literatur ist Folgendes bekannt:

- Die Höhe und Anzahl der Volumenströme, von einer oder mehrerer Düsen, beeinflusst die Anstiegszeit und unwesentlich den Endwert des Raumpotentials [15].
- Das sich beim Versprühen von Wasser ausbildende Raumpotential besitzt das Maximum im Mittelpunkt des Behälters [1]. Konkreter ist das Raumpotential maximal, wenn die Entfernung zu geerdeten Einbauteilen, Behälterwänden oder Tankwaschköpfen höchstmöglich ist [15].

- Das Raumpotential steigt mit dem Behältervolumen [12, 15]. Diese Erkenntnis deckt sich mit den in Abbildung 3.2 aufgetragenen Raumpotentialen aus [6, 11, 12, 22, 36, 40, 41] in Abhängigkeit des Behälter-/Tankvolumens<sup>7</sup>. Die Abgrenzung zwischen kleinen, mittelgroßen und großen Behältern erfolgt nach [1]. Angaben der Volumens  $V$  und Raumdiagonalen  $L_B$  sind Abbildung 3.2 zu entnehmen.



Quelle	Flüssigkeit	Elektrische Leitfähigkeit in S/m	Ø Düse in mm	Druck in bar
[6]	Toluol	$5 \cdot 10^{-10}$	1,8	50
	Aceton	$5 \cdot 10^{-7}$	1,8	50
	Betriebswasser	$5 \cdot 10^{-2}$	1,8	50
	Xylol	$1 \cdot 10^{-9}$	1,8	50
	Vollentsalztes Wasser	$1 \cdot 10^{-5}$	1,8	50
	Toluol + 8,0 Volumen-% Wasser	$2,5 \cdot 10^{-10}$	1,8	50
	Xylol + 4,7 Gewichts-% Aktivkohle	$5 \cdot 10^{-11}$	1,8	50
	Xylol + 2,6 Gewichts-% SiO <sub>2</sub>	$3 \cdot 10^{-10}$	1,8	50
	Betriebswasser	$5 \cdot 10^{-2}$	1,5	100 bis 400
	Betriebswasser	$5 \cdot 10^{-2}$	2,5	100 bis 400
[22]	Trinkwasser	$6,6 \cdot 10^{-2}$	1,05	500
	Vollentsalztes Wasser	$9,2 \cdot 10^{-5}$	1,05	500
[11]	Trinkwasser	$5 \cdot 10^{-2} \text{ *1}$	Duschbrause	3
	Meerwasser	$5 \text{ *1}$	Tankwaschkopf	10
[40]	Trinkwasser	$1,7 \cdot 10^{-2}$	EA mit 8 bar	
[41]	Trinkwasser	$5 \cdot 10^{-2} \text{ *1}$	EA	
[12]	Wasser, Meerwasser	k. A., $5 \text{ *1}$	Tankwaschkopf	
	Wasser	k. A.	Tankwaschkopf oder Dampf	
[36]	Simulation, konstante Raumladungsdichte von $40 \text{ nC/m}^3$			

\*1 Werte der elektrischen Leitfähigkeit aus [66] entnommen

Abbildung 3.2: Raumpotential in Abhängigkeit des Behälter-/Tankvolumens

<sup>7</sup> Die Raumpotentiale aus [12] ergeben sich aus den dort gemessenen elektrischen Feldstärken. Die in Abbildung 3.2 angegebenen Fehlerbalken resultieren aus der Unsicherheit der Umrechnungsmethode aus [12] von  $\pm 1 \text{ kV}$  und der Unsicherheit, die sich aus dem Ablesen ergibt.

Die folgenden zwei miteinander korrelierenden „Worst-Case“-Betrachtungen zeigen, dass das maximal mögliche Raumpotential in einem 1 m<sup>3</sup> Behälter unter 16 kV beträgt:

1. Im Zuge dieser Arbeit wurden mittels einer elektrostatischen Applikationsanlage (EA) Tropfen bekannten Potentials in einen 1 m<sup>3</sup> Behälter gesprüht. Obwohl die Tropfen ein Potential von bis zu 90 kV besaßen, betrug das maximale Raumpotential 15,2 kV (nähere Angaben zu den Versuchen sind [40] zu entnehmen).
2. Das Versprühen von Xylol + 2,6 Massen-% SiO<sub>2</sub> in einen 1 m<sup>3</sup> Behälter erzeugte, im Vergleich zum Versprühen einer Vielzahl weiterer Flüssigkeiten (Abbildung 3.2), die höchste elektrische Feldstärke von 90 kV/m und Raumladungsdichten von 3219 nC/m<sup>3</sup> [6]. Nach Gleichung 2.20 ergibt dies ein Raumpotential von 15,7 kV.

Messungen in einem 12 m<sup>3</sup> Behälter, bei denen ebenfalls eine EA genutzt wurde, ergaben Raumpotentiale von bis zu 24 kV [41]. Die sich bei der Verwendung einer EA im 1 m<sup>3</sup> und 12 m<sup>3</sup> Behälter ergebenden Raumpotentiale zeigen, dass in kleinen und mittelgroßen Behältern hohe Raumpotentiale auftreten können, die ansonsten erst bei großen Behältern zu erwarten sind.

Aus [36] sind Simulationen bekannt, bei denen die Raumpotentiale in großen Behältern berechnet wurden. Es wurde eine konstante Raumladungsdichte von 40 nC/m<sup>3</sup> angenommen. Ausgangszustand war ein Behälter mit den Abmessungen 30 m x 30 m x 8 m. Das maximale Raumpotential betrug 35 kV. Am Ausgangszustand des Behälters wurde jeweils eine Änderung vorgenommen und die Reduzierung des Raumpotentials untersucht:

1. Das Einbringen einer geerdeten leitfähigen Strebe, die im Mittelpunkt der Grundfläche von 30 m x 30 m senkrecht nach oben zeigte und der Höhe des Behälters von 8 m entsprach, reduzierte das Raumpotential von 35 kV nicht.
2. Die Reduzierung der Länge von 30 m auf 15 m wies nur einen geringen Einfluss auf.
3. Die Halbierung der Höhe von 8 m auf 4 m reduzierte das Raumpotential auf 9 kV.

Durch die Veränderungen Nr. 1 und Nr. 2 wurde das Behältervolumen von 7 200 m<sup>3</sup> (Ausgangszustand) auf 3 600 m<sup>3</sup> reduziert. Aus den Simulationen geht hervor, dass eine Begrenzung des Behältervolumens für eine sicherheitstechnische Bewertung bedingt geeignet ist. Entscheidend ist das kleinste, die Raumladungswolke begrenzende Maß. Diese Erkenntnis deckt sich mit der in [1, 13, 23] getroffenen Aussage, dass eine Reduzierung der kleinsten Dimension eines Behälters durch geerdete Seile, Drähte oder eines zentralen Leiters das Raumpotential senkt.

Laut [42] muss das Raumpotential 60 kV betragen, um ein Kohlenwasserstoff/Luft-Gemisch zu entzünden. Derart hohe Raumpotentiale treten beim Reinigen von Behältern selten auf [2]. Die in Abbildung 3.2 gezeigten Raumpotentiale aus [6, 11, 12, 22, 36, 40, 41] bestätigen diese Aussage. Ergänzend zur Aussage aus [2] ergaben sich grenzwertüberschreitende Raumpotentiale von bis zu 100 kV beim Reinigen von Schiffstanks, wenn das verwendete Meerwasser mit Rohöl eine Emulsion bildete [13]. Weiterhin sind aus [11] Versuche bekannt, bei denen Meerwasser in einen Schiffstank mit einem Volumen von 27 500 m<sup>3</sup> versprüht wurde. Nach Gleichung 2.20 ergeben sich bei solch großen Volumina ebenfalls Raumpotentiale von bis zu 115 kV. Anzumerken ist, dass bei keinem der Versuche der Pumpendruck oberhalb des Grenzwertes von 500 bar lag.

Laut [7, 43] treten für das zündempfindlichste Propan/Luft-Gemisch, Referenzgasgemisch der *Explosionsgruppe* IIA, zündfähige Büschelentladungen gegenüber Einbauteilen im Behälter erst auf, wenn das Raumpotential des Sprühnebels mindestens 72 kV erreicht. Der Grenzwert des Raumpotentials von 58 kV besitzt folglich eine Sicherheitsmarge von bis zu 14 kV, gilt für das Referenzgasgemisch der *Explosionsgruppe* IIA und wird, unter Beachtung möglicher Messunsicherheiten oder Unsicherheiten der Berechnung des Raumpotentials, für die sicherheitstechnische Bewertung dieser Arbeit genutzt.

### 3.3.2 Bewertungsgrundlage und Messwerte der elektrischen Feldstärke

Es wird die Bewertungsgrundlage der elektrischen Feldstärke aus [35] erläutert und deren Anwendbarkeit anhand von Messwerten aus der Literatur geprüft.

Überschreitet die elektrische Feldstärke  $E(R)$ , gemessen an der raumbegrenzenden Wand, nicht die Beziehung  $E(R) \cdot D_R^2 < 100 \text{ kVm}$ , sind Büschelentladungen auszuschließen [35]. Einbauteile, die Büschelentladungen auslösen können, sind nicht Bestandteil dieser Abschätzung. Der Behälterdurchmesser  $D_R$  entspricht bei quadratischen Querschnitten der Seitenlänge [35]. Anhand von Gleichung 3.1 lässt sich die vom Behälterdurchmesser abhängige sichere elektrische Feldstärke errechnen und graphisch abbilden (Abbildung 3.3).

$$E(R) < \frac{100 \text{ kVm}}{D_R^2} \quad 3.1$$

Die Zündgefahr durch Büschelentladungen ist reduziert, wenn sich die explosionsfähige Atmosphäre in einem schnellströmenden oder turbulenten Zustand befindet [35]. Im Folgenden wird durch Messwerte aus der Literatur, bei denen neben der Messung der elektrischen Feldstärke auch Entladungsmessungen durchgeführt wurden, die Anwendbarkeit der Gleichung 3.1 geprüft:

- Gasentladungen waren bei den Versuchen aus [6] nicht nachweisbar. Der Abgleich der elektrischen Feldstärken und der Behälterdurchmesser aus [6] mit der umgestellten Beziehung aus [35] (Gleichung 3.1) bestätigt das Ausbleiben von Büschelentladungen in Behältern ohne leitfähige geerdete Einbauteile (Abbildung 3.3).
- Bei den Versuchen aus [11, 12, 41] wird die umgestellte Beziehung aus [35] (Gleichung 3.1) überschritten (Abbildung 3.3). Die schwarzen Pfeile in Abbildung 3.3 zeigen die Korrektur der Behälterdurchmesser oder Seitenlängen auf das kleinste raumbegrenzende Maß (Kapitel 3.3.1). Die gemessenen Büschelentladungen in [12] und [14] (für [14] gelten die in [41] beschriebenen Parameter der Raumladungswolke), entstanden gegenüber leitfähigen geerdeten Einbauteilen.

Die Messungen aus [6, 11, 12, 14, 41] beweisen die Anwendbarkeit der Gleichung 3.1 auch bei Einbauteilen im Behälter. Anders als beim Grenzwert von 100 kV/m geht der Behälterdurchmesser in die Beziehung aus [35] mit ein. Der Grenzwert von 100 kV/m lässt nachweislich das Auftreten von Büschelentladungen zu. Deshalb wird für die sicherheitstechnische Betrachtung dieser Arbeit die umgestellte Beziehung aus [35] (Gleichung 3.1) genutzt.

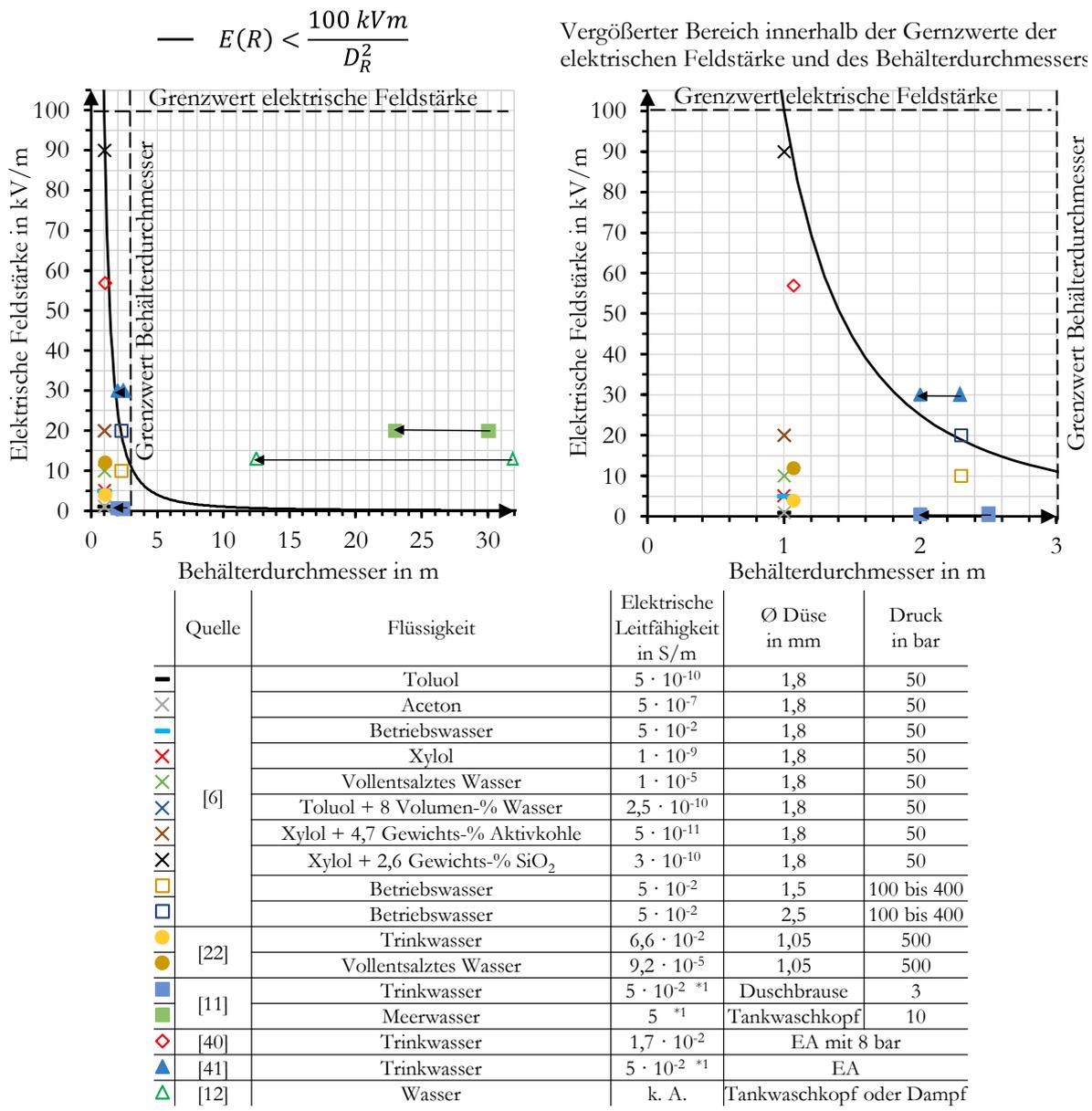


Abbildung 3.3: Elektrische Feldstärke in Abhängigkeit des Behälter-/Tankdurchmessers

### 3.3.3 Bewertungsgrundlagen und Messwerte der Raumladungsdichte

In diesem Kapitel werden Bewertungsgrundlagen der Raumladungsdichte zusammengefasst. Durch den Vergleich mit den Raumladungsdichten und Entladungsmessungen aus der Literatur wird die Anwendbarkeit der Bewertungsgrundlagen hinterfragt.

Büschelentladungen zwischen der Raumladungswolke und wandnahen Einbauteilen sind theoretisch möglich [39]. Dafür sind, im Vergleich zu Einbauteilen im Zentrum des Behälters, Raumladungsdichten nötig, deren Auftreten bei Reinigungsprozesses als unwahrscheinlich eingeschätzt wird [39]. Aufgrund dieser Abschätzung ist die weitere Betrachtung dieser Einbauteile verzichtbar. Die elektrische Feldstärke an feldverzerrenden Einbauteilen  $E_i$  im Zentrum des Behälters mit dem Radius  $R$  wird wie folgt berechnet (Gleichung 3.2)<sup>8</sup> [41].

<sup>8</sup> In [41] steht vereinfacht  $\epsilon_0$ . Der Einfluss vom Sprühnebel wurde in [41] mit  $\epsilon_r = 1$  und nicht wie in dieser Arbeit mit  $\epsilon_r = 1,01$  berücksichtigt.

$$E_i = \frac{\rho \cdot R^2}{6 \cdot \varepsilon \cdot r_{KE}} \quad 3.2$$

Der noch sichere Durchmesser der Raumladungswolke  $D_R$  ist durch das Einsetzen der Durchbruchfeldstärke von Luft mit 3 MV/m [44] für  $E_i$  zu berechnen (Gleichung 3.3) [6].

$$D_R = 2 \cdot R = 2 \cdot \sqrt{\frac{E_i \cdot 6 \cdot \varepsilon \cdot r_{KE}}{\rho}} \quad 3.3$$

In das Behältervolumen ragende Einbauteile reduzieren die Raumladungsdichte [39]. Die Raumladungsdichte  $\rho$ , im Behälter ohne Einbauteile („Worst-Case“-Betrachtung), ist durch die Gleichung 2.11 bis Gleichung 2.20 anhand der elektrischen Feldstärke  $E(R)$ , gemessen an der raumbegrenzenden Wand oder dem Raumpotential  $\Phi(0)$ , gemessen im Mittelpunkt des Behälters, zu bestimmen. Einbauteile werden vereinfacht als Kugelelektroden mit dem Krümmungsradius  $r_{KE}$  beschrieben. Es gilt  $r_{KE} \ll R$  [45]. Die Permittivität  $\varepsilon$  ist anhand von Gleichung 2.21 zu bestimmen. Durch Anwendung der Gleichung 3.3 ergeben sich die in Abbildung 3.4 eingezeichneten Kurven der Krümmungsradien von 0,0005 m und 0,005 m. Büschelentladungen entstehen vorwiegend bei Krümmungsradien geerdeter Einbauteile von über etwa 0,005 m [1, 42].

Für ein Einbauteil im Zentrum des Behälters mit einem Krümmungsradius von 0,005 m sind aus [39] Simulationen bekannt, die angeben, ab welchen Raumladungsdichten in Abhängigkeit des Behälterdurchmessers mit dem Auftreten von Büschelentladungen zu rechnen ist (Abbildung 3.4 schwarze Kreise)<sup>9</sup>. Die Raumladungsdichten der Simulation sind bis zu einem Behälterdurchmesser von 2 m deckungsgleich mit der anhand von Gleichung 3.3 berechneten Kurve des Krümmungsradius von  $r_{KE} = 0,005 \text{ m}$ . Bei einem Behälterdurchmesser von über 2 m ergeben sich laut der Simulation aus [39] Büschelentladungen bei niedrigeren Raumladungsdichten, die für folgende sicherheitstechnische Bewertungen verwendet werden.

Ein Krümmungsradius von unter 0,0005 m führt zu *Koronaentladungen* [1]. Krümmungsradien von 0,0005 m bis 0,005 m beschreiben einen Übergangsbereich von Korona- zu Büschelentladungen. Die Kurve des Krümmungsradius  $r_{KE} = 0,0005 \text{ m}$  gilt als Schwellenwert, ab der erste energiewache Büschelentladungen auftreten können.

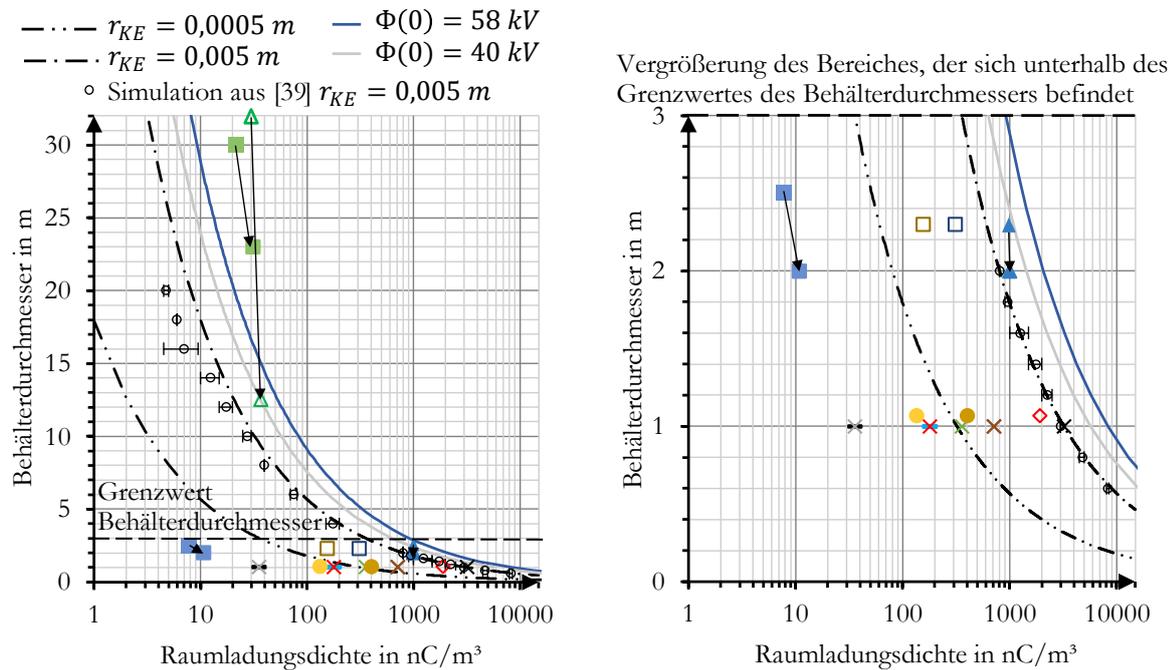
Um Büschelentladungen an Einbauteilen zu erzeugen, müssen bei kleineren Behälterdurchmessern höhere Raumladungsdichten vorliegen [39]. Größere Krümmungsradien der Einbauteile erhöhen die Energie der Büschelentladung, begründet durch eine dafür notwendige höhere Raumladungsdichte [39]. Diese Abhängigkeiten sind in gleicher Weise bei den Kurven der Krümmungsradien in Abbildung 3.4 zu erkennen.

Anhand von Gleichung 2.11 ist aus dem Grenzwert des Raumpotentials aus [2] von 58 kV der für dieses Raumpotential notwendige Behälterdurchmesser und die Raumladungsdichte zu bestimmen (Abbildung 3.4, dunkelblaue Kurve).

Im Folgenden wird anhand von Messwerten aus der Literatur, bei denen neben der Messung der elektrischen Feldstärke zum Teil auch Entladungsmessungen durchgeführt wurden, die

<sup>9</sup> Die Raumladungsdichten wurden der Fig. 3 und Fig. 6 der Veröffentlichung [39] entnommen. Die aus dem Ablesen resultierenden Unsicherheiten der Raumladungsdichten sind in Abbildung 3.4 als Fehlerbalken angegeben.

Anwendbarkeit der in Abbildung 3.4 eingezeichneten Kurven geprüft. Die schwarzen Pfeile in Abbildung 3.4 zeigen die Korrektur des Behälterdurchmessers auf das kleinste raumbegrenzende Maß.



Quelle	Flüssigkeit	Elektrische Leitfähigkeit in S/m	Ø Düse in mm	Druck in bar
[6]	Toluol	$5 \cdot 10^{-10}$	1,8	50
	Aceton	$5 \cdot 10^{-7}$	1,8	50
	Betriebswasser	$5 \cdot 10^{-2}$	1,8	50
	Xylol	$1 \cdot 10^{-9}$	1,8	50
	Vollentsalztes Wasser	$1 \cdot 10^{-5}$	1,8	50
	Toluol + 8 Volumen-% Wasser	$2,5 \cdot 10^{-10}$	1,8	50
	Xylol + 4,7 Gewichts-% Aktivkohle	$5 \cdot 10^{-11}$	1,8	50
	Xylol + 2,6 Gewichts-% SiO <sub>2</sub>	$3 \cdot 10^{-10}$	1,8	50
[22]	Betriebswasser	$5 \cdot 10^{-2}$	1,5	100 bis 400
	Betriebswasser	$5 \cdot 10^{-2}$	2,5	100 bis 400
[22]	Trinkwasser	$6,6 \cdot 10^{-2}$	1,05	500
	Vollentsalztes Wasser	$9,2 \cdot 10^{-5}$	1,05	500
[11]	Trinkwasser	$5 \cdot 10^{-2} \text{ }^{*1}$	Duschbrause	3
	Meerwasser	$5 \text{ }^{*1}$	Tankwaschkopf	10
[40]	Trinkwasser	$1,7 \cdot 10^{-2}$	EA mit 8 bar	
[41]	Trinkwasser	$5 \cdot 10^{-2} \text{ }^{*1}$	EA	
[12]	Wasser	k. A.	Tankwaschkopf oder Dampf	

\*1 Werte der elektrischen Leitfähigkeit aus [66] entnommen

Abbildung 3.4: Behälterdurchmesser in Abhängigkeit der Raumladungsdichte

- Büschelentladungen zu geerdeten Einbauteilen im Behälter waren bei den Versuchen aus [6] nicht nachweisbar. Nach Gleichung 2.19 ergibt sich eine Raumladungsdichte von maximal 3219 nC/m<sup>3</sup> und liegt auf der Kurve des Krümmungsradius  $r_{KE} = 0,005 \text{ m}$  (Abbildung 3.4, schwarzes Kreuz). Mögliche Unsicherheiten der Messmethode, die Tatsache, dass sich die Einbauteile nicht im Zentrum des Behälters befanden und dass Einbauteile die Raumladungsdichte reduzieren, begründen das Ausbleiben von Büschelentladungen.
- Die Versuche aus [22] unterschreiten die Kurve des Krümmungsradius von  $r_{KE} = 0,005 \text{ m}$  und bestätigen die in [22] getroffene sicherheitstechnische Aussage, dass keine zündfähigen Entladungen zu erwarten sind.

- Die Raumladungsdichte der Versuche aus [11] belegt, dass beim Versprühen von Meerwasser in große Behälter zündfähige Büschelentladungen an Einbauteilen auftreten können.
- Die Raumladungsdichten der Zündversuche aus [14] überschreiten die Kurve des Krümmungsradius von  $r_{KE} = 0,005 \text{ m}$ . Die Kurve bestätigend traten Büschelentladungen gegenüber leitfähigen Elektroden auf. In dem Behälter befand sich Propan/Luft-Gemisch oder Stadtgas/Luft-Gemisch mit einer vergleichbaren *Mindestzündenergie* (MZE). Die Entladungen an der Elektrode führten zu keiner Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre [14].
- Bei den Versuchen aus [12] im  $12\,000 \text{ m}^3$  Behälter war die Höhe des Behälters mit  $12,5 \text{ m}$  kleiner als der Durchmesser von  $32 \text{ m}$ . Die Höhe begrenzt die im Behälter erzeugte Raumladungswolke, das Raumpotential auf  $40 \text{ kV}$  und die elektrische Feldstärke auf  $13 \text{ kV/m}$  [12]. Die aus dem Raumpotential (Gleichung 2.11) oder der elektrischen Feldstärke (Gleichung 2.14) berechnete Raumladungsdichte beträgt  $37 \text{ nC/m}^3$ . In [12] wurde eine Raumladungsdichte von  $30 \text{ nC/m}^3$  messtechnisch bestimmt. Als Beweis für die Begrenzung durch die Höhe ist das Raumpotential von  $40 \text{ kV}$  durch die Anwendung von Gleichung 2.11 als hellgraue Kurve in Abbildung 3.4 eingezeichnet. Die Korrelation der berechneten und messtechnisch erfassten Raumladungsdichte mit dieser Kurve beweisen, dass die Höhe von  $12,5 \text{ m}$  als raumbegrenzendes Maß zu verwenden ist. Zündversuche im  $12\,000 \text{ m}^3$  Tank belegten, dass die Raumladungsdichte nicht ausreichte, um ein Propan/Luft-Gemisch (MZE  $0,24 \text{ mJ}$ ) durch auftretende Büschelentladungen an Einbauteilen zu entzünden [12]. Die gemessenen Energien der Entladungen lagen bei unter  $0,001 \text{ mJ}$  [14].

Zusammengefasst treten bei einer Überschreitung der Kurve des Krümmungsradius  $r_{KE} = 0,005 \text{ m}$  erste Büschelentladungen auf [12, 14], während bei einer Unterschreitung der Kurve Büschelentladungen ausbleiben [6, 22]. Diese Aussage deckt sich mit der in Kapitel 3.3.2 betrachteten und umgestellten Beziehung aus [35] (Gleichung 3.1).

Die Behälterdurchmesser und Raumladungsdichten der Zündversuche aus [12, 14] unterschreiten die dunkelblaue Kurve des Grenzwertes von  $58 \text{ kV}$ . Dies bestätigt, dass die Entladungen nicht ausreichen, um ein Propan/Luft- oder Stadtgas/Luft-Gemisch zu entzünden.

Folgende Erläuterung begründet, dass erst bei ausreichend hohen Raumladungsdichten Büschelentladungen zwischen geerdeten leitfähigen Einbauteilen und der als isolierend geltenden Raumladungswolke auftreten können. Einbauteile, Schwallwände und Vorsprünge wirken feldverzerrend und führen lokal zur einer Erhöhung der elektrischen Feldstärke [15]. Beim Prozess des Versprühens im Behälter entsteht eine hohe Luftfeuchtigkeit, ein Sprühnebel und eine Benetzung der Oberflächen mit Wasser. Unter Einfluss des elektrischen Feldes türmen sich die Tropfen auf der Oberfläche zu Taylor-Kegeln auf [29, 46, 47]. Diese Taylor-Kegel besitzen einen Krümmungsradius von unter  $0,0005 \text{ m}$ , der zu Koronaentladungen führt. Koronaentladungen sind für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA und IIB nicht zündfähig [23]. Der Pinch-Effekt und somit die Bildung eines zündfähigen Plasmakanals bleibt aus [23]. Versuche aus [46] zeigten, dass sich eine aufgeladene Flüssigkeitsoberfläche zu einem Taylor-Kegel gegenüber einer geerdeten Kugelelektrode mit einem Krümmungsradius von  $0,0125 \text{ m}$  ausformte. Die Bildung von Büschelentladungen blieb bei einem Oberflächenpotential der Flüssigkeit von bis zu  $10 \text{ kV}$  aus. Wurde das Oberflächenpotential der Flüssigkeit auf  $20 \text{ kV}$  erhöht, erfolgte die Entladung vor der vollständigen Ausbildung des Taylor-Kegels und Büschelentladungen waren nachweisbar. Übertragen auf die bei [12,

14] vorliegenden Raumladungswolken bleiben zündfähige Büschelentladungen zunächst durch auftretende Taylor-Kegel und bei höheren Raumpotentialen von bis zu 40 kV durch das Unterschreiten der Grenzkurve von 58 kV aus.

Die Polarität der sich von den Taylor-Kegeln ablösenden Tropfen und Ionen, die aufgrund von Koronaentladungen an scharfen Kanten in die Raumladungswolke diffundieren, ist entgegengesetzt zu der der Raumladungswolke [13, 42]. Die Koronaentladungen der Taylor-Kegel begrenzen das Raumpotential und die Raumladungsdichte [7, 13, 15, 29].

### 3.3.4 Sicherheitstechnischer Bewertungsansatz von Entladungen der Raumladungswolke

Abbildung 3.5 zeigt die Kurven und Bereiche, denen Raumpotentiale, die MZE der repräsentativen Gasgemische der Explosionsgruppen und Krümmungsradien der Einbauteile zugeordnet sind. Grundlage sind die bereits in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Versuche und Kurvendiskussionen.

K1 ist die dem Raumpotential von 2,25 kV entsprechende Kurve, die dem Krümmungsradius von  $r_{KE} = 0,0005 \text{ m}$  zugeordnet ist. Die auftretenden Entladungen gelten als Zündfähigkeit für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIC. Unterhalb der Kurve K1 befindet sich der Bereich I. In diesem Bereich treten keine oder vorwiegend Koronaentladungen auf, die nicht zündfähig für Gemische der Explosionsgruppe IIA und IIB sind. Die Zündfähigkeit gegenüber Gefahrstoffen der Explosionsgruppe IIC steht in Diskussion.

K2 ist die dem Raumpotential von 19,5 kV zugeordnete Kurve, ab der Büschelentladungen für das repräsentative Ethen/Luft-Gemisch (MZE 0,082 mJ) der Explosionsgruppe IIB als zündfähig angenommen werden. Grundlage der Kurve K2 ist die Bestimmung der Zündfähigkeit von Büschelentladungen gegenüber repräsentativen Gasgemischen der Explosionsgruppe IIA, IIB und IIC [48]. Dabei wurde eine aufgeladene isolierende Kunststoffoberfläche zu einer Kugelelektrode, mit einem Krümmungsradius von 0,0125 m, entladen. Diese Büschelentladungen sind vergleichbar mit Entladungen von als isolierend geltenden Raumladungswolken zu geerdeten Einbauteilen. In beiden Systemen besteht ein direkt proportionaler Zusammenhang zum Potential, bzw. Raumpotential, und begründet somit die Vergleichbarkeit. Aus [48] ist das Verhältnis der Zündfähigkeit von Büschelentladungen zu repräsentativen Gasgemischen der Explosionsgruppe IIA zu IIB abzuleiten. Es beträgt 2,97 [48]. Auf Grundlage dieses Verhältnisses wurde die Kurve K3 (58 kV) in die Kurve K2 (19,5 kV) umgerechnet. Die Kurve K2 mit 19,5 kV entspricht dem Krümmungsradius von  $r_{KE} = 0,0043 \text{ m}$  und unterschreitet geringfügig die Kurve des Krümmungsradius von  $r_{KE} = 0,005 \text{ m}$  (Abbildung 3.4), ab dem angenommen wird, dass vorwiegend Büschelentladungen auftreten [1]. Die Kurve K2 ist ab einem Behälterdurchmesser von 2 m den Werten der Simulation aus [39] zum Krümmungsradius  $r_{KE} = 0,005 \text{ m}$  angepasst, da diese als kritischer zu bewerten sind. Unterhalb der Kurve K2 bis einschließlich der Kurve K1 befindet sich der Bereich II, der als Übergangsbereich von Korona- zu Büschelentladungen gilt. Die auftretenden Entladungen sind zündfähig für Gefahrstoffe, deren MZE unterhalb der des repräsentativen Gemisches der Explosionsgruppe IIB liegt. Weiterhin sind sie zündfähig für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIC.

K3 ist die dem Raumpotential von 58 kV entsprechende Kurve, ab der Büschelentladungen für das repräsentative Propan/Luft-Gemisch (MZE 0,24 mJ) der Explosionsgruppe IIA als zündfähig gelten [2]. Der Krümmungsradius dieser Kurve beträgt  $r_{KE} = 0,013 \text{ m}$ . Unterhalb der Kurve K3 bis einschließlich der Kurve K2 befindet sich der Bereich III, in dem vorwiegend Büschelentladungen auftreten. Die Büschelentladungen sind zündfähig für Gefahrstoffe, deren MZE gleich der des

repräsentativen Gemisches der Explosionsgruppe IIB ist oder unterhalb der des repräsentativen Gemisches der Explosionsgruppe IIA liegt. Oberhalb der Kurve K3 ist der Bereich IV, in dem zündfähige Büschelentladungen für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe II auftreten.

Das Diagramm (Abbildung 3.5) gilt auf Grundlage von sicherheitstechnischen Überlegungen und auf Grundlage von elektrostatischen Größen als neuer Ansatz der sicherheitstechnischen Bewertung elektrostatischer Zündgefahren durch Büschelentladungen beim Versprühen von Wasser in leitfähige geerdete Behälter.

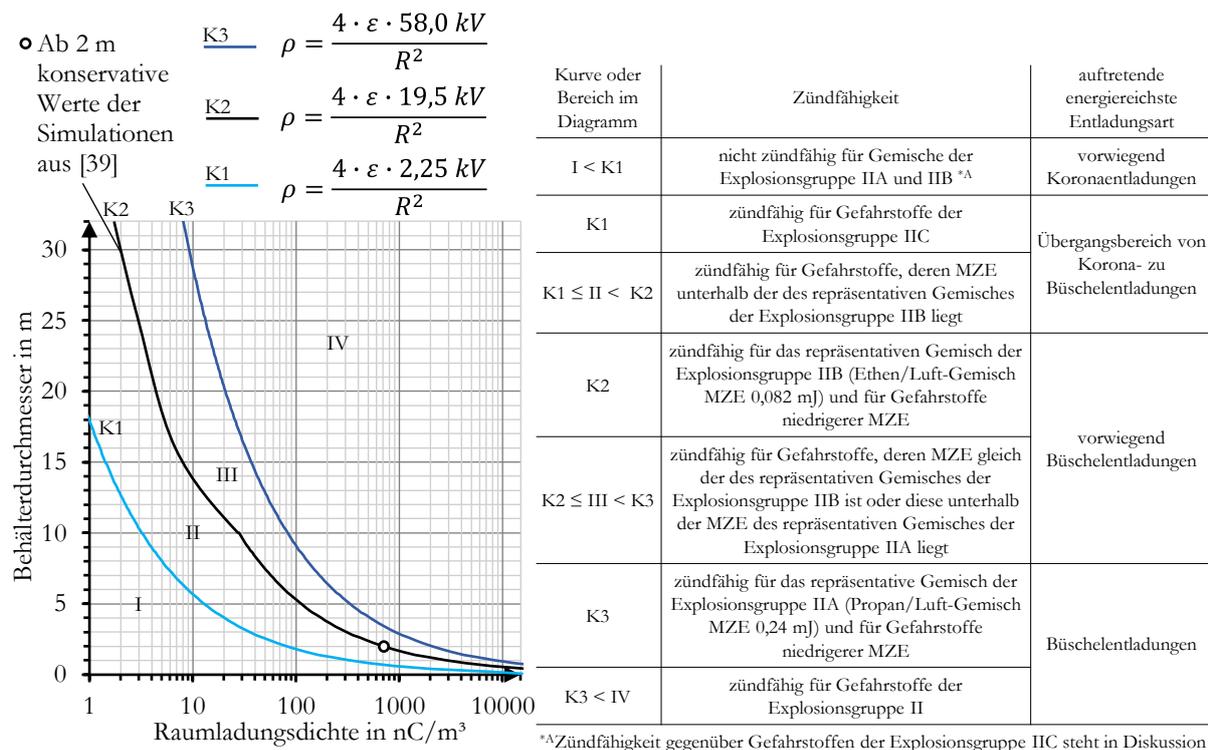


Abbildung 3.5: Zulässiger Behälterdurchmesser in Abhängigkeit der Raumladungsdichte und begrenzende Kurven, bzw. Bereiche, für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe II

### 3.3.5 Abhängigkeit der Raumladungsdichte vom Pumpendruck, vom Düsendurchmesser und von der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers

Die Höhe der Raumladungsdichte ist beim Versprühen von Wasser vom Pumpendruck abhängig [6, 19]. Um die Abhängigkeit der Raumladungsdichte vom Pumpendruck, Düsendurchmesser und der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers abzubilden, wurden die bestimmten Raumladungsdichten aus [6, 11, 19, 22] in den Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7 zusammengefasst<sup>10</sup>.

**Vollentsalztes Wasser:** Bei den Versuchen aus [19] wurde vollentsalztes Wasser mit einem Pumpendruck von bis zu 840 bar und einem Volumenstrom von 0,18 l/s versprüht. 0,45 m nach Düsenaustritt traten beim Versprühen von vollentsalztem Wasser Raumladungsdichten von bis zu 4 000 nC/m<sup>3</sup> auf [19]. Der Düsendurchmesser dieser Messung betrug 0,6 mm. Wurde der Düsendurchmesser auf 0,8 mm vergrößert, reduzierte sich die Raumladungsdichte des Strahls um bis zu

<sup>10</sup> Die Raumladungsdichten aus [19] wurden der Fig. 2 und Fig. 3 der Veröffentlichung entnommen. Die aus dem Ablesen resultierenden Unsicherheiten der Raumladungsdichten sind in Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7 als Fehlerbalken angegeben.

fünfzig Prozent (Abbildung 3.6). Ein Düsendurchmesser von 1,0 mm erzeugte Raumladungsdichten, die auf ein Drittel bis ein Viertel reduziert waren. Daraus folgt, dass sich die Raumladungsdichte des Strahls reduziert, wenn der Düsendurchmesser vergrößert wird. 0,90 m nach Düsenaustritt traf der Strahl aus vollentsalztem Wasser auf eine geerdete leitfähige Prallplatte. Das von der Prallplatte reflektierte vollentsalzte Wasser wies, bei den Düsendurchmessern von 0,6 mm, 0,8 mm und 1,0 mm, Raumladungsdichten von unter  $100 \text{ nC/m}^3$  auf. Als Ergebnis zeigte sich, dass die Raumladungsdichten des reflektierten Wassers um zwei Zehnerpotenzen niedriger als die des Strahls waren. Gasentladungen waren bei den Versuchen aus [19] nicht nachweisbar.

Bei einem Düsendurchmesser von 1,8 mm und einem Pumpendruck von 50 bar wurde eine Raumladungsdichte von  $358 \text{ nC/m}^3$  bestimmt [6]. Betrug der Düsendurchmesser 1,05 mm und der Pumpendruck 500 bar ergab sich eine Raumladungsdichte von  $401 \text{ nC/m}^3$  [22]. Die Raumladungsdichten beim Sprühen in Behälter der Versuche aus [6, 22] sind, im Vergleich zu den Raumladungsdichten nach dem Aufprall auf die Prallplatte [19], um das Drei- bis Vierfache höher. Während in [19] nur die Raumladungsdichte des Rückpralls gemessen wurde, resultierte die Raumladungsdichte aus [6, 22] aus dem Strahl (vor Rückprall) und dem Sprühnebel des Rückpralls von der Behälterwand. Um die Abhängigkeit der Raumladungsdichte vom Düsendurchmesser und Pumpendruck beim Sprühen von vollentsalztem Wasser in Behälter eindeutig zu identifizieren sind weitere Untersuchungen durchzuführen, die Bestandteil dieser Arbeit sind.

Aus Abbildung 3.6 geht hervor, dass die Ladungstrennung an der Düse die Aufladung der Tropfen beim Versprühen von vollentsalztem Wasser dominiert.

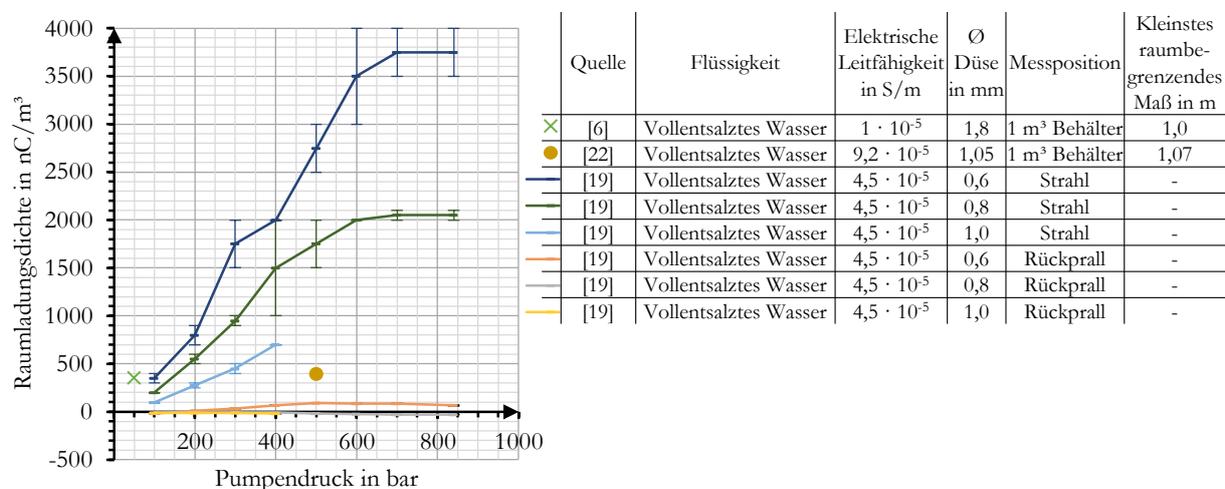


Abbildung 3.6: Raumladungsdichte in Abhängigkeit vom Pumpendruck bei vollentsalztem Wasser

**Trinkwasser:** 0,45 m nach Düsenaustritt traten beim Versprühen von Trinkwasser, bei einem Pumpendruck von 300 bar, maximale Raumladungsdichten von  $110 \text{ nC/m}^3$  auf [19] (Abbildung 3.7). Der Düsendurchmesser betrug 0,8 mm. Aus den gemessenen elektrischen Feldstärken aus [6] an einem Strahl aus Betriebswasser ergaben sich Raumladungsdichten von maximal  $18 \text{ nC/m}^3$ , gemessen bei einem Abstand zur Düse von 1 m bis 4 m und einem Pumpendruck von 400 bar. Die Düse dieser Versuche besaß einen Durchmesser von 1,2 mm. Im Vergleich zu den Versuchen aus [6] erhöhte der kleinere Düsendurchmesser von 0,8 mm [19] die Raumladungsdichte um rund das Sechsfache. Es gilt der gleiche Zusammenhang wie bei vollentsalztem Wasser.

Bei den Versuchen aus [6, 22] resultierte die Raumladungsdichte beim Sprühen in den Behälter aus dem Strahl und dem reflektierten Wasser (Rückprall). Bei einem Pumpendruck von 500 bar

und einem Düsendurchmesser von 1,05 mm ergaben sich Raumladungsdichten von  $134 \text{ nC/m}^3$  [22] (Abbildung 3.7). Ein Pumpendruck von 50 bar, bei einem Düsendurchmesser von 1,8 mm, generierte Raumladungsdichten von  $179 \text{ nC/m}^3$  [6]. Noch höhere Raumladungsdichten von  $311 \text{ nC/m}^3$  waren bei einem Pumpendruck von 100 bar bis 400 bar und einem Düsendurchmesser von 2,5 mm möglich [6]. Bei den Versuchen aus [6] im  $24 \text{ m}^3$  Behälter war bei einem Pumpendruck von 100 bar bis 400 bar keine Abhängigkeit vom Pumpendruck zu beobachten. Beim Versprühen von Meerwasser mit rund 10 bar oder Trinkwasser bei einem Pumpendruck von 3 bar ergaben sich Raumladungsdichten in einem geschlossenen Volumen von unter  $32 \text{ nC/m}^3$  [11].

Die Auswertungen der Messungen ergeben, dass der Aufprall des Strahls die Ladungstrennung beim Versprühen von Betriebs-/Trinkwasser dominiert. Größere Düsendurchmesser erhöhen die Raumladungsdichte. Entgegen der Abhängigkeit des reflektierten Wassers erhöht sich die Raumladungsdichte im Strahl, wenn der Düsendurchmesser reduziert wird. Eine Erhöhung des Pumpendrucks auf über 100 bar hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Raumladungsdichte.

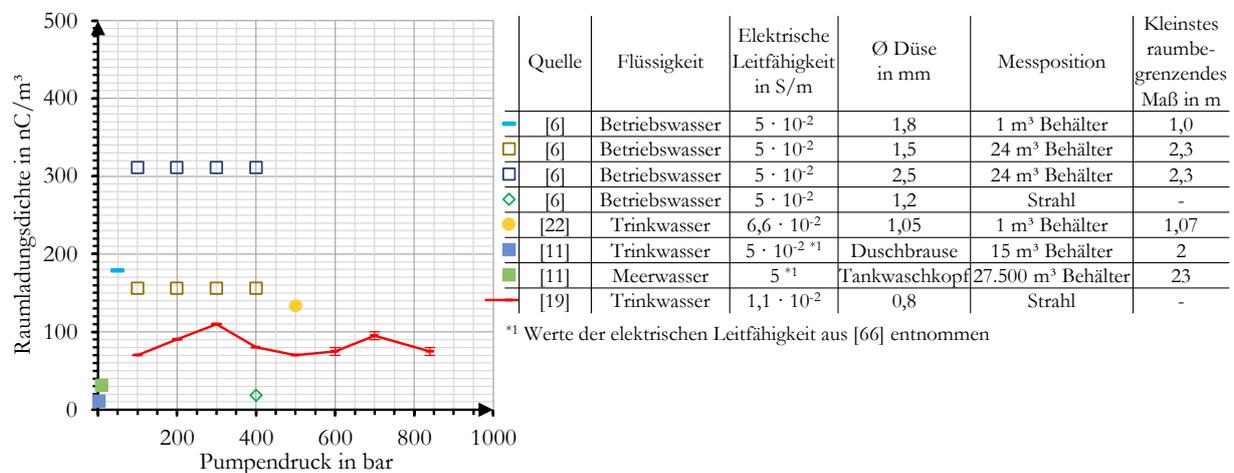


Abbildung 3.7: Raumladungsdichte in Abhängigkeit vom Pumpendruck bei Trink-, Betriebs- und Meerwasser

### 3.4 Entladungen durch gegen Erde isolierter Leiter

Beim stark ladungserzeugenden Prozess des Versprühens sind isolierte Leiter, unabhängig von ihrer Kapazität, zu erden [1]. Aus dem Sprühnebel bilden sich durch Koaleszenz größere Tropfen, die durch Sedimentation zu Boden fallen [7]. In Abhängigkeit von der Behältergröße dauert es bis zu mehreren Stunden, bis sich der aufgeladene Sprühnebel gesetzt und die Raumladung relaxiert hat [2]. Daraus resultiert, dass sich beim und nach dem Prozess der Behälterreinigung isolierte Leiter durch das Raumpotential im Behälter aufladen [1, 29]. Die IEC TS 60079-32-1 [2] gibt für isolierte Leiter ein Raumpotential von 5 kV bis 20 kV an, um zündfähige Funkenentladungen für Kohlenwasserstoff/Luft Atmosphäre zu erzeugen. Eine sicherheitstechnische Bewertung nur durch das Raumpotential ist schwer möglich. Ergänzend sind die übertragene Ladung und Energie von den Abmessungen und der Kapazität der isolierten Leiter abhängig. Isolierte Leiter mit einer Kapazität von über  $3 \text{ pF}$  führen bei vergleichsweise niedrigen Potentialen zu Zündgefahren im Behälter [7]. Durch isolierende Schichten im Behälter und/oder ungeeignete persönliche Schutzausrüstung (PSA) sind Personen als Leiter gegen Erde isoliert. Bei diesen Personen ist mit einer Auf- und zündfähiger Entladung zu rechnen [49]. Weitere Beispiele für isolierte Leiter sind isoliert

aufgehängte Probeentnahmegefäße, Tankwaschköpfe, Messgeräte oder herabfallende Werkzeuge, Verschraubungen und Kleinteile [5].

Als Maßnahme gilt, dass alle leitfähigen und ableitfähigen Gegenstände und Personen zu erden oder mit maximal  $1\text{ M}\Omega$  mit Erde zu verbinden sind [1, 2, 6]. Auf Grundlage dieser Maßnahme ist eine Entzündung durch isolierte Leiter auszuschließen. Ungeeignet ist diese Maßnahme bei isolierten Leitern in Form von Wassermassen. Im Folgenden wird auf die sicherheitstechnische Bewertung dieser isolierten Leiter in Form von Wassermassen eingegangen.

### 3.4.1 Einzelne gegen Erde isolierter Tropfen

Beim Versprühen entstehen Tropfen innerhalb der Atmosphäre im Tank. Jeder dieser Tropfen ist laut Definition ein isolierter Leiter. Die zu geringe Ladung der einzelnen Tropfen besitzt keine Möglichkeit sich zu sammeln und gebündelt in einer Funkenentladung zu entladen [5, 42]. In einem in Luft befindlichen Tropfen mit dem Radius  $r$  ist die maximale Anzahl Ladungen  $Q_{max}$  einer Polarität begrenzt. Diese Begrenzung wird als Rayleigh-Grenze bezeichnet (Gleichung 3.4) [50].

$$Q_{max} = 8 \cdot \pi \cdot \sqrt{\sigma \cdot \epsilon_0 \cdot r^3} \quad 3.4$$

Die Rayleigh-Grenze resultiert aus den abstoßenden Kräften der Ladungen einer Polarität. Ist die Anzahl der Ladungen zu hoch, übersteigt deren abstoßende Kraft die Kapillarkraft, folglich die Oberflächenspannung  $\sigma$  des Tropfens. Der Tropfen wird instabil und zerfällt in immer kleinere Fragmente [50].  $\epsilon_0$  entspricht der Permittivität des Vakuums [50]. Gleichung 3.4 wurde nach dem Tropfenradius  $r$  umgestellt (Gleichung 3.5).

$$r = \sqrt[3]{\frac{Q_{max}^2}{64 \cdot \pi^2 \cdot \sigma \cdot \epsilon_0}} \quad 3.5$$

Für  $Q_{max}$  sind die Grenzwerte der übertragenen Ladung in Zone 0 [1, 2] der Tabelle 3.1 einzusetzen. Die daraus berechneten Tropfenradien der Tabelle 3.1 sind mindestens notwendig, um zündfähige Funkenentladungen für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA und IIB zu erzeugen.

Tabelle 3.1: Tropfenradien, deren übertragene Ladung den Grenzwerten für Funkenentladungen in der Zone 0 entsprechen [1, 2]

Explosionsgruppe	Grenzwert der übertragenen Ladung in Zone 0 in nC	Tropfenradius bei 20 °C in m	Tropfenradius bei 80 °C in m
IIA	25	0,0115	0,0121
IIB	10	0,0063	0,0066
IIC	Es dürfen keine Entladungen detektierbar sein	-	-

Um den Einfluss der Temperatur zu demonstrieren, erfolgte die Berechnung für eine Oberflächenspannung von Wasser mit  $0,0728\text{ N/m}$  bei  $20\text{ °C}$  und  $0,0627\text{ N/m}$  bei  $80\text{ °C}$  [27]. Da sich die Oberflächenspannung bei steigender Temperatur reduziert, ist bei gleichbleibender Ladung ein

größerer Tropfenradius nötig, um zündfähige Funkenentladungen zu generieren. Aus Abbildung 2.4 geht hervor, dass sich mit der Temperatur des Wassers die Tropfenradien beim Versprühen reduzieren. Zündfähige Funkenentladungen einzelner Tropfen gegenüber leitfähigen geerdeten Einbauteilen gelten unter der Annahme, dass sich auf Ihnen die maximal mögliche Anzahl Ladungen befindet als weniger wahrscheinlich, wenn Wasser bei erhöhten Temperaturen versprüht wird.

Die in Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5 aufgeführten Sauterdurchmesser und die denen hinterlegten Tropfengrößenverteilungen ergeben, dass sich beim Düsenaustritt und beim Rückprall von einem Hindernis bei den untersuchten Parametern ein maximaler Tropfendurchmesser von 0,0005 m ergibt. Unter der Annahme, dass auf diesem Tropfen die maximale Anzahl Ladungen vorherrscht, reicht der Durchmesser nicht aus, um zündfähige Funkenentladungen für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA und IIB zu erzeugen. Gleiches gilt für Tropfen, die sich durch Koaleszenz bilden und infolge der Sedimentation zu Boden fallen.

### 3.4.2 Gegen Erde isolierte Segmente zerteilter Wasserstrahlen großer Düsendurchmesser

Besitzen Tankwaschköpfe einen ausreichend großen Düsendurchmesser, um zusammenhängende Wasserstrahlen zu erzeugen, zerfallen diese in Abhängigkeit der Entfernung zur Düse in einzelne Segmente [5]. Die gegen Erde isolierten Segmente werden mit einer Länge ab 0,5 m als potentielle Zündquelle betrachtet. Beispielhaft seien die aus [5] entnommenen und in Tabelle 3.2 aufgeführten Parameter genannt, die dazu in der Lage sind. Der Pumpendruck der Flüssigkeitsstrahler in [5] betrug 10 bar. Das Rotieren der Düsen änderte das Zerteilen unwesentlich.

Tabelle 3.2: Parameter von Tankwaschköpfen, deren Strahlen isolierte Leiter bilden [5]

Nr.	Düsen- durchmesser in m	Anzahl Düsen	Volumenstrom pro Düse in l/s	Abstand zur Düse bis Strahlzerteilung in Segmente in m	Abstand zur Düse in der 0,5 m lange Segmente vorhanden sind in m
1	0,011	2	3,9	3,3	5
2	0,014	2	6,7	4,0	10
3	0,038	1	48,6	8,0	20

Die Segmente der Strahlen der Tankwaschköpfe Nr. 1 und Nr. 2 (Tabelle 3.2) erzeugten bei einem maximalen Raumpotential von bis zu 20 kV keine zündfähigen Funkenentladungen [5]. Unter gleichen Bedingungen war, von durch Tankwaschkopf Nr. 3 (Tabelle 3.2) gebildeten Segmenten, das Auftreten einer zündfähigen Funkenentladung nicht auszuschließen. Für mit Wasser benetzte Oberflächen wird eine MZE von 0,5 mJ zugrunde gelegt [5].

Die Aufladung der Segmente ist maximal, wenn die Strahlzerteilung im Zentrum des Behälters erfolgt. In diesem Bereich maximaler Feldstärke bewirkt die Influenz eine Ladungsverschiebung im Strahl. Der Strahl ist vor dem Zerteilen über den Tankwaschkopf geerdet. Ist die Raumladungswolke negativ geladenen, bewirkt dies eine Ansammlung positiver Ladungen im Strahl (Abbildung 3.8). Beim Ablösen verbleibt die positive Ladung in den einzelnen Segmenten [5, 7]. Dieser Aufladungsprozess ist unabhängig von der Behältergröße. Er ist abhängig vom Raumpotential [5]. Eine Entzündung der explosionsfähigen Atmosphäre ist am wahrscheinlichsten, wenn das aufgeladene Segment des Strahls geerdete Einbauteile in Wandnähe oder die Behälterwand tangential

und im optimalen Zündabstand passiert. Reduziert sich beim Passieren der Zündabstand zwischen dem aufgeladenen Segment und dem geerdeten Einbauteil in Wandnähe oder der Behälterwand, kann die entstehende Flamme erlöschen [5, 7].

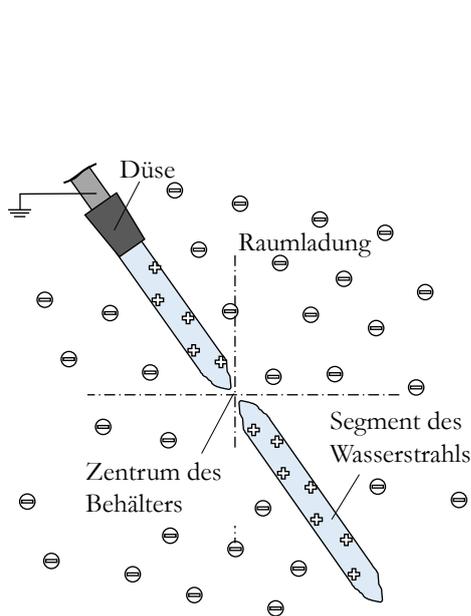


Abbildung 3.8: Durch Influenz aufgeladenes Segment des Wasserstrahls

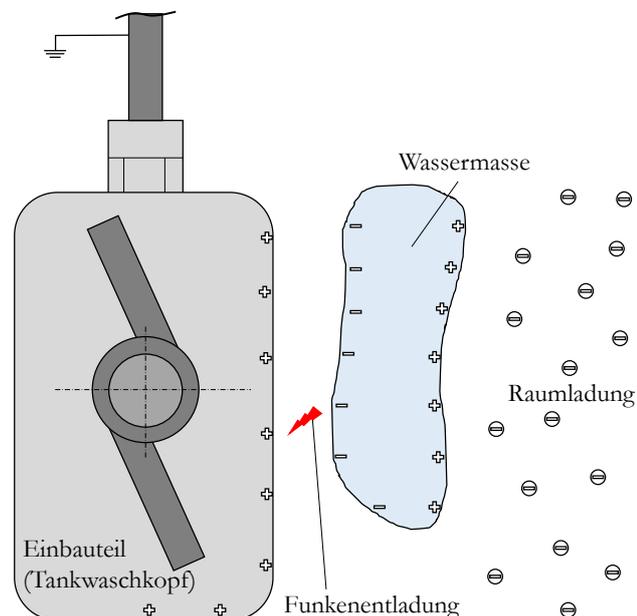


Abbildung 3.9: Ladungsverschiebung durch Influenz innerhalb der Wassermasse im elektrischen Feld

Innerhalb einer explosionsfähigen Atmosphäre gilt als Empfehlung Tankwaschköpfe zu vermeiden, die in der Lage sind größere zusammenhängende Wassermassen zu bilden [2, 42]. Kann aufgrund der Reinigungsaufgabe dies nicht vermieden werden, müssen genaue Kenntnisse über die auftretenden Segmente, das Raumpotential und die MZE des Gemisches für eine sicherheitstechnische Bewertung vorliegen. Alternativ sind Maßnahmen zu treffen, durch die eine Entzündung der explosionsfähigen Atmosphäre hinreichend unwahrscheinlich wird.

Ein theoretischer Ansatz zur sicherheitstechnischen Bewertung von durch Influenz aufgeladenen Segmenten der Wasserstrahlen ist aus [7, 36] bekannt (Gleichung 3.6). Zündfähige Entladungen von durch Influenz aufgeladenen Segmenten der Wasserstrahlen sind zu erwarten, wenn das aus dem rechten Teil der Gleichung 3.6 bestimmte Raumpotential das im Behälter vorliegende Raumpotential  $\Phi(0)$  überschreitet [7, 36].

$$\Phi(0) < \sqrt{\left[ \frac{\theta}{\pi \cdot \varepsilon \cdot l \left[ \ln\left(\frac{2 \cdot l}{d}\right) - 0,5 \cdot \ln(3) \right]} \right]} \cdot \ln\left(\frac{D_A}{d}\right) \cdot \sqrt{W_{min}} \quad 3.6$$

Wie in [5, 51, 52] beschrieben, ist die MZE ( $W_{min}$ ) um den Faktor zwei zu erhöhen, wenn die Entladung von einer mit Wasser benetzten Oberfläche oder Wassermasse ausgeht. Daraus ergibt sich, wie ebenfalls in [36] angegeben, ein Wert von zwei für den Faktor  $\theta$ . Angaben zur Permittivität  $\varepsilon$  der Raumladungswolke sind Kapitel 2.5 zu entnehmen.

Der rechte Teil der Gleichung 3.6 umfasst die geometrischen Faktoren. Diese sind abhängig von den Abmessungen des Behälters und Segmenten der Wasserstrahlen. Das Segment des

Wasserstrahls wird näherungsweise als zylindrischer Körper angenommen. Er ist über die Länge  $l$  und den Durchmesser  $d$  charakterisiert.  $D_{\bar{A}}$  beschreibt den als konservativ zu betrachtenden, äquivalenten Behälterdurchmesser (Gleichung 3.7). Für die Berechnung sind Angaben zum Behältervolumen  $V$  und die Dimension des Behälters in Richtung des Wasserstrahls  $L$  nötig [36]. Für eine „Worst-Case“-Betrachtung ist für die Dimension des Behälters in Richtung des Wasserstrahls  $L$  der kleinstmögliche Wert einzusetzen, bei dem Segmente auftreten.

$$D_{\bar{A}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot L}} \quad 3.7$$

### 3.4.3 Herabfallende gegen Erde isolierte Wassermassen

Die Bildung isolierter Leiter ist durch eine Ansammlung von Wasser an Vorsprüngen und Vertiefungen möglich, die bei einer plötzlichen Bewegung des Behälters als zusammenhängenden Wassermassen herabstürzen. Sind Vorsprünge und Vertiefungen konstruktiv unvermeidbar, gilt als präventive Maßnahme die Empfehlung, diese so auszulegen, dass Wassermassen sich abseits der Bereiche mit maximalen Raumpotential ansammeln und herabfallen [42]. Das Raumpotential ist maximal, wenn die Entfernung zu geerdeten Einbauteilen, Behälterwänden oder Tankwaschköpfen höchstmöglich ist [15]. Zusätzlich ist das tangentielle Passieren von Einbauteilen, wie Tankwaschköpfe, durch isolierte Leiter zu vermeiden. Das Ansammeln von Reinigungswasser im unteren Teil des Behälters ist ebenfalls zu vermeiden (Kapitel 3.2) [6]. Wird diese Maßnahme eingehalten, ist die Bildung zusammenhängender Wassermassen durch Wellenbildung oder dem Schwappen über Schwallwände auszuschließen. Größere fadenförmige Wassermassen entstehen, wenn der Strahl auf eine Oberfläche trifft, die kurzzeitig Wasser zurückhält. Diese Wassermassen bleiben nach dem Ablösen bis zu einer Fallhöhe von einem Meter bestehen [5]. Beim Abschalten der Tankwaschköpfe zerfällt der Strahl in einen Schauer aus großen Tropfen [5].

Die von der Decke, einem höher gelegenen Teil oder durch eine Öffnung des Behälters fallende Wassermasse unterliegt bei Annäherung an geerdete Einbauteile der Ladungsverschiebung durch Influenz (Abbildung 3.9). Dieser Effekt ist maximal, wenn sich das Einbauteil im Zentrum des Behälters befindet [7]. Ist die Raumladungswolke negativ geladen, verschieben sich die positiven Ladungsträger zur Raumladungswolke und die negativen zum Einbauteil. Ist der Zündabstand zwischen Wassermasse und Einbauteil im optimalen Bereich und das Potential zwischen ihnen ausreichend hoch, folgt eine Funkenentladung [5, 14]. Nach dieser Funkenentladung verbleibt in der Wassermasse eine positive Ladung. Vergleichbar zu den Segmenten des Strahls kann sich die Wassermasse gegenüber geerdeten Einbauteilen in Wandnähe oder der Behälterwand erneut entladen. Die Höhe der übertragenen Ladung beider beschriebenen Aufladungsprozesse durch Influenz (Abbildung 3.8 und Abbildung 3.9) ist vergleichbar, wenn von einer gleichgroßen Wassermasse ausgegangen wird [5].

Unter Annahme der für eine Entzündung der explosionsfähigen Atmosphäre günstigsten Bedingungen ergeben sich maximal zulässige isolierte Leiter in Form von Stäben und Kugeln in Abhängigkeit des Raumpotentials, um eine Energie von 0,25 mJ oder 0,50 mJ zu erreichen (Tabelle 3.3) [5]. Angaben zu den Durchmessern der Stäbe erfolgen in [5] nicht. Für eine Energie von 0,2 mJ und 0,5 mJ wurden in [51] ebenfalls Aussagen über zulässige Längen von Stäben in

Abhängigkeit des Raumpotentials getroffen (Tabelle 3.3)<sup>11</sup>. Der Durchmesser der Stäbe betrug in [51] 0,013 m.

Tabelle 3.3: Maximal zulässige isolierte Leiter in Abhängigkeit des Raumpotentials [5]

Raumpotential in kV	Aus [5]				Aus [51]	
	0,25 mJ		0,50 mJ		0,2 mJ	0,5 mJ
	Länge Stab in m	Durchmesser Kugel in m	Länge Stab in m	Durchmesser Kugel in m	Länge Stab in m	Länge Stab in m
< 10	0,9	0,3	-	-	-	-
10	-	-	-	-	0,85	-
14	0,6	0,22	0,9	0,3	0,50	0,97
20	0,3	0,1	0,6	0,22	0,25	0,58

Die elektrische Leitfähigkeit der Oberflächen der Elektroden beeinflusst die Zündfähigkeit der Entladungen. An mit Wasser benetzten Oberflächen ist eine höhere Entladeenergie notwendig. Aus diesem Grund gilt für mit Wasser benetzte Oberflächen statt der MZE von Propan (0,25 mJ, aktueller Wert 0,24 mJ [1, 53]), eine Entladeenergie von mindestens 0,5 mJ [5, 51]. Einen weiteren Einfluss hat die Deformation der Wasseroberfläche, wenn sie einem elektrischen Feld ausgesetzt ist [47]. Es bilden sich Taylor-Kegel und Vorentladungen, bevor es bei höheren Entladeenergien zu zündfähigen Funkenentladungen kommt. Die Längen der Stäbe für eine Energie von 0,50 mJ stimmen mit einer maximalen Abweichung von 0,07 m überein (Tabelle 3.3).

In [5] gilt bei einem Raumpotential von 20 kV, dass die übertragene Ladung pro 0,010 m Länge bei einem stabförmigen Objekt um 1,6 nC zunimmt. Bei einem kugelförmigen Objekt nimmt die übertragene Ladung pro 0,010 m Durchmesser um 5,9 nC zu. Mit diesen Angaben lassen sich für die maximal zulässigen Längen und Durchmesser der Tabelle 3.3 die übertragenen Ladungen ermitteln. Die übertragene Ladung des Stabs von 48 nC und die der Kugel von 59 nC unterschreiten die *Mindestzündladung* (MZQ) von Propan von 70 nC. Im mit Wasser benetzten Zustand ergeben sich für den Stab 96 nC und für die Kugel 130 nC. Unter der Voraussetzung, dass sich wie die MZE auch die MZQ um den Faktor zwei erhöht, wenn mit Wasser benetzte Oberflächen vorliegen, sind diese Werte ebenfalls unterhalb der Zündgrenze. Da ein Anstieg der übertragenen Ladung pro Meter nur für 20 kV beschrieben wird und der Sicherheitsabstand der maximalen Längen, bezogen auf die Zündenergie, nicht bekannt ist, wird die MZQ im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht angewendet.

Für isolierte Leiter, die aus Wassermassen entstehen, ist in [2] ein Raumpotential von mindestens 15 kV angegeben, um zündfähige Funkenentladungen zu erzeugen. Der in [51] durch Zündversuche ermittelte Grenzwert ist nur für das zündempfindlichste Propan/Luft-Gemisch (Referenzgasgemisch der Explosionsgruppe IIA) gültig. Laut [29] gilt für aufgeladene, gegen Erde isolierte Wassermassen erst ein Raumpotential von ca. 45 kV als zündfähig. Dieses Raumpotential ist aufgrund der Zündversuche aus [51] und der Angabe aus [2] als unsicher zu bewerten.

<sup>11</sup> Die Längen der Stäbe wurden der Fig. 4 der Veröffentlichung [51] entnommen. Durch das Ablesen ergab sich eine Unsicherheit für die Längen der Stäbe von  $\pm 0,01$  m.

Für von der Decke, einem höher gelegenen Teil oder durch eine Öffnung des Behälters fallende Wassermasse gibt es keine allgemeingültige Berechnungsgrundlage zur Durchführung einer sicherheitstechnischen Bewertung. Anders als bei den Segmenten der Wasserstrahlen lässt sich ihre Geometrie und Masse nur schwer abschätzen. Präventiv ist die Bildung dieser Wassermassen durch konstruktive Anpassungen des Behälter zu vermeiden [52].

#### 3.4.4 Aufladung isolierter Leiter durch Akkumulation von Ladung

Die Akkumulation von Ladung durch den Kontakt des isolierten Leiters mit den aufgeladenen Tropfen des Sprühnebels ist vernachlässigbar [5]. Entgegen dieser Aussage zeigten die Versuche aus [51], dass die Akkumulation ausreichte, um die Grenzwerte der übertragenen Ladungen der Zone 0, bezogen auf Funkenentladungen (Tabelle 3.1), zu überschreiten.

Der Anstieg der übertragenen Ladung  $Q$  durch Akkumulation von Ladung durch den Kontakt des isolierten Leiters mit den aufgeladenen Tropfen des Sprühnebels bei Reinigungsprozessen ohne Dampf, kann in Abhängigkeit des Raumpotentials  $\Phi(0)$  durch folgende anhand der Messdaten aus [51] empirisch ermittelten Beziehung ausgedrückt werden (Gleichung 3.8).

$$Q = 1,44 \cdot 10^{-12} \cdot \Phi(0) \quad 3.8$$

Für den Grenzwert der Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA von 25 nC ergibt sich ein noch zulässiges Raumpotential von 17,36 kV. Mit 10 nC für die Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIB liegt das zulässige Raumpotential bei 6,94 kV. Diese Raumpotentiale sind nur gültig, wenn keine oder eine vernachlässigbare Aufladung durch Influenz zu erwarten ist. Aus folgenden Gründen ist Gleichung 3.8 eine „Worst-Case“-Betrachtung und für eine sicherheitstechnische Bewertung anwendbar:

- Mit einer Länge von 1,0 m und einem Durchmesser bis 0,018 m repräsentieren die metallischen Zylinder der Versuche aus [51] eine große zusammenhängenden Wassermasse.
- Die Höhe der Aufladung durch Akkumulation ist abhängig von der Fallhöhe [14]. Bei den Versuchen aus [51] beträgt die Fallhöhe der Zylinder durch die Raumladungswolke 12 m.
- Der Unterschied fester Körper gegenüber Wassermassen ist, dass sich diese beim Herabstürzen nicht weiter zerteilen. Beim Aufprall entlädt sich im Funken theoretisch die gesamte Kapazität des Zylinders und entspricht der maximal möglichen übertragenen Ladung.

Aus [14] sind Gleichungen für die Akkumulation von Ladung durch Kontakt mit Tropfen des Sprühnebels und der Aufladung durch Koronaentladungen einzelner Tropfen bekannt. Für die Anwendung der Gleichungen müssten genaue Kenntnisse über die Geometrie, Masse, Fallwinkel und Fallhöhe vorliegen. Die genaue Bestimmung dieser Parameter ist schwer und unzureichend genau. Als präventive Maßnahme gilt es die Bildung von herabfallenden Wassermassen durch konstruktive Anpassungen des Behälter zu vermeiden [52].

Die Ladung der Tropfen des Sprühnebels ist entgegengesetzt der durch Influenz erzeugten Ladung isolierter Wassermassen. Folglich reduziert die Akkumulation von Ladung beim Kontakt der isolierten Wassermasse mit den Tropfen des Sprühnebels die durch Influenz erzeugte Ladung der isolierten Wassermasse. Scharfe Kanten (Krümmungsradius kleiner 0,0005 m) am isolierten

Leiter reduzieren durch Koronaentladungen weiterhin die Aufladung [5, 51]. Es bedarf daher keiner Korrektur der Berechnung des noch sicheren Raumpotentials nach Gleichung 3.6.

### 3.5 Schlussfolgerungen

Der Grenzwert des Pumpendrucks der Flüssigkeitsstrahler von 500 bar wird bei Messungen dieser Arbeit überschritten. Für die sicherheitstechnische Bewertung dieser Messungen wurde anhand der Betrachtung bereits vorhandener Bewertungsgrundlagen der Literatur für Büschelentladungen zwischen der Raumladungswolke und Einbauteilen im Behälter ein neuer Ansatz der sicherheitstechnischen Bewertung entwickelt (Kapitel 3.3.4). Aus dem Ansatz der sicherheitstechnischen Bewertung geht hervor, dass es nicht zwingend notwendig ist das Versprühen von Wasser auf Behälter mit einem Durchmesser von 3,0 m [1, 2] zu beschränken. Vielmehr ist das sich einstellende Raumpotential beziehungsweise die sich ausbildende elektrische Feldstärke und die dazu proportionale Raumladungsdichte einem zulässigen Behälterdurchmesser zuzuordnen. Geerdete Einbauten im Behälter reduzieren die Raumladungsdichte und sind bei den Versuchen dieser Arbeit im Behälter zu vermeiden, um die maximalen Messwerte der elektrostatischen Größen zu erfassen. Durch die Betrachtung von Messwerten der Raumladungsdichte ist die Formulierung folgender Schlussfolgerungen zu den in Kapitel 2.6 aufgeführten zu ergänzen:

- Beim Versprühen von Trinkwasser ist der dominierende Prozess der Ladungstrennung der Aufprall des Strahls. Größere Düsendurchmesser erhöhen die Raumladungsdichte im Behälter und reduzieren die Raumladungsdichte des Strahls. Ein Pumpendruck von über 100 bar hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Raumladungsdichte.
- Beim Versprühen von vollentsalztem Wasser ist der dominierende Prozess der Ladungstrennung die Strahlablösung von der Düse. Kleine Düsendurchmesser und hohe Pumpendrucke erhöhen die Raumladungsdichte des Strahls.

Treten isolierte Leiter in Form zusammenhängender Wassermassen auf, sind die zusammengefassten Bewertungsgrundlagen aus Kapitel 3.4 anzuwenden.

## 4 Versuchsaufbauten, Messtechniken, Voruntersuchungen und Parameter

Zunächst erfolgt in diesem Kapitel eine Beschreibung der Versuchsaufbauten und wie die Messtechniken in diese integriert wurden. Nachfolgend wird detailliert auf die Aufbauten und die Funktionsweisen der Messtechniken eingegangen. Ergänzend werden die notwendigen Modifikationen für Messungen an Strahlen und Sprühnebeln beschrieben. Die durchgeführten Vorversuche gliedern sich auf in:

- Eignungsprüfung des Feldstärkenmessgerätes an Strahlen bekannten Potentials
- Einfluss der Druckluftspülung und Einbausituation auf die Feldstärkemessung
- Isolationsprüfung der Raumpotentialmesstechnik
- Temperaturmessung des versprühten Wassers im Behälter

Zu guter Letzt erfolgt eine Zusammenfassung der Parameter, die Bestandteil der Untersuchungen dieser Arbeit sind.

### 4.1 Versuchsaufbauten ohne räumliche Begrenzung des Behälters

Die Düse des Flüssigkeitsstrahlers und die Mittellinie des horizontalen Strahls befanden sich auf einer vom Boden gemessenen Höhe von 1,3 m. Das Volumen des sich aufweitenden Strahls wurde alleinig durch den Boden begrenzt. Die Messungen erfolgten bei einem Abstand zur Düse von 0,5 m, 1,0 m, 2,0 m, 3,0 m und 4,0 m. Betrachtet wurden ausschließlich Rundstrahldüsen.

**Feldstärkemessung:** Das Feldstärkenmessgerät JCI (John Chubb Instrumentation) 131 war zur Homogenisierung des elektrischen Feldes [23] bündig in einer  $\varnothing$  0,4 m Metallplatte eingelassen. Das Feldstärkenmessgerät war um  $90^\circ$  gedreht. Die nach unten zeigende Messkopfföffnung befand sich in einer Höhe von 1,8 m (Abbildung 4.1). Am Feldstärkenmessgerät war eine Druckluftspülung montiert. Der Abstand zwischen dem Messkopf und der Mitte des Strahls betrug 0,5 m.

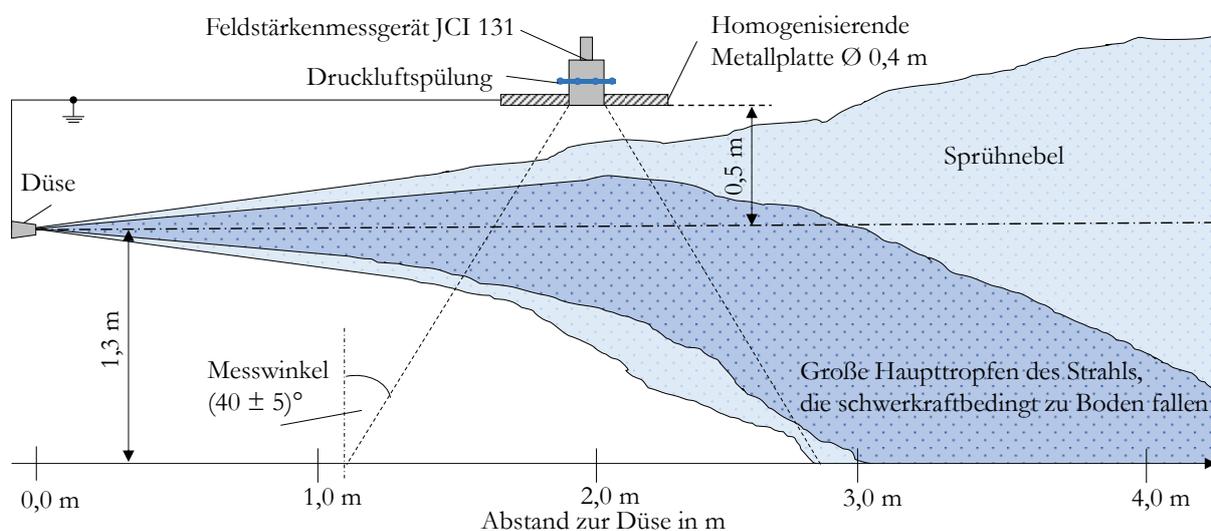


Abbildung 4.1: Versuchsaufbau zur Feldstärkemessung am horizontalen Strahl

Das Feldstärkenmessgerät besitzt einen Messwinkel von  $(40 \pm 5)^\circ$  [54, 55]. Es ergibt sich ein Messkegelstumpf vor dem Feldstärkenmessgerät. In der daraus resultierenden kreisrunden Messfläche wurden die geladenen Tropfen des Strahls und Sprühnebels erfasst (Abbildung 4.1). Die Messungen der elektrischen Feldstärke erfolgten erst ab einem Abstand zur Düse von 1,0 m. Die Aufweitung des Strahls ist ansonsten nicht ausreichend groß und vom Feldstärkenmessgerät werden Teile der Umgebung gemessen, die den Messwert reduzieren [40]. Die Düse, die Metallplatte und das Gehäuse des Feldstärkenmessgerätes waren an der Potentialausgleichschiene angeschlossen und geerdet.

**Raumpotentialmessung:** Der Versuchsaufbau der Raumpotentialmessung ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Der Isolationsstab wurde in der Hand gehalten. Die im Isolationsstab befestigte Elektrode wurde an den Strahl oder Sprühnebel herangeführt. Die Elektrode nahm ortsaufgelöst das Potential der Tropfen an und war über ein Hochspannungskabel leitfähig mit dem  $\pm 2$  kV oder  $\pm 40$  kV Hochspannungsmesskopf in Kombination mit dem Feldstärkenmessgerät EMF 58 oder dem Nachfolgegerät EFM 235 verbunden. Die Düse, der Erdungsanschluss des Feldstärkenmessgerätes und das Äußere des Hochspannungsmesskopfes waren an der Potentialausgleichschiene angeschlossen und geerdet.

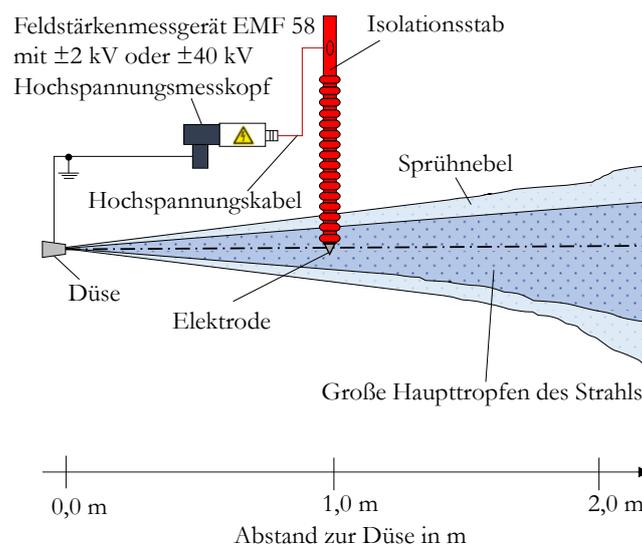


Abbildung 4.2: Versuchsaufbau zur Raumpotentialmessung am horizontalen Strahl

## 4.2 Versuchsaufbauten im leitfähigen geerdeten Behälter

In der Industrie werden zum Transport und zur Lagerung „Intermediate Bulk Container (IBC)“ eingesetzt. Die leitfähige Ausführung aus Edelstahl besitzt ein Volumen von  $1 \text{ m}^3$  bei einem Durchmesser von 1,07 m [56]. Die gemessene Höhe des Behälters, entlang der Mittellinie, beträgt 1,00 m. Einer dieser Behälter diente als Modellanordnung für Versuche in einem räumlich begrenzten Volumen (Abbildung 4.3). In [1] werden Behälter nach ihrem Volumen in Kategorien eingeteilt. Das Volumen von  $1 \text{ m}^3$  bildet das Maximum der Kategorie „kleine Behälter“ ab. Der  $1 \text{ m}^3$  Edelstahl IBC dieser Versuche war liegend angeordnet. Diese Anordnung war durch das Einbringen der Messtechnik begründet. Ragte diese von oben in den Behälter, flossen die Wassertropfen schwerkraftbedingt ab. Die Öffnung der Messtechnik war auf halber Höhe (0,5 m) angeordnet (Abbildung 4.3). Die im Deckel eingefasste Düse schloss innen bündig mit der Deckelöffnung ab.

Die Düsen waren leitfähig und wie der Behälter geerdet. Eine konstante Ausgangssituation wurde durch das Trocknen des Behälters nach jedem Versuch geschaffen. Dafür wurden der PVC-U (Hart-Polyvinylchlorid) Deckel des Behälters und das Sichtfenster demontiert. An der Öffnung des Sichtfensters wurde das Gebläse angeschlossen und der Behälter gespült und gleichzeitig getrocknet. An dem Behälter war ein Ablauf montiert, durch den das eingebrachte Wasser abließ.

In Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 ist das mittige Sprühen abgebildet. Beim mittigen Sprühen wurde entlang der horizontalen Mittelachse des zylindrischen Volumens des 1 m<sup>3</sup> Behälters gesprüht. Der Strahl traf bei einem Abstand zur Düse von 1,0 m auf die Behälterwand.

Die Positionierung der Messtechnik und Spritzeinrichtung in den mittelgroßen Behältern entsprachen generell denen der Modellanordnung. Auf die Nutzung von Adaptern und geänderten Abmessungen wird hingewiesen.

**Feldstärkenmessung:** Das Feldstärkenmessgerät JCI 131 wurde in die Öffnung der Messtechnik des 1 m<sup>3</sup> Behälters montiert (Abbildung 4.3). Der Messkopf schloss bündig mit der Mantelinnenfläche des Behälters ab. Durch den bündigen Einbau erfolgte, vergleichbar zum Kalibrier- aufbau, eine Homogenisierung des elektrischen Feldes [23]. Am Feldstärkenmessgerät war eine Druckluftspülung montiert.

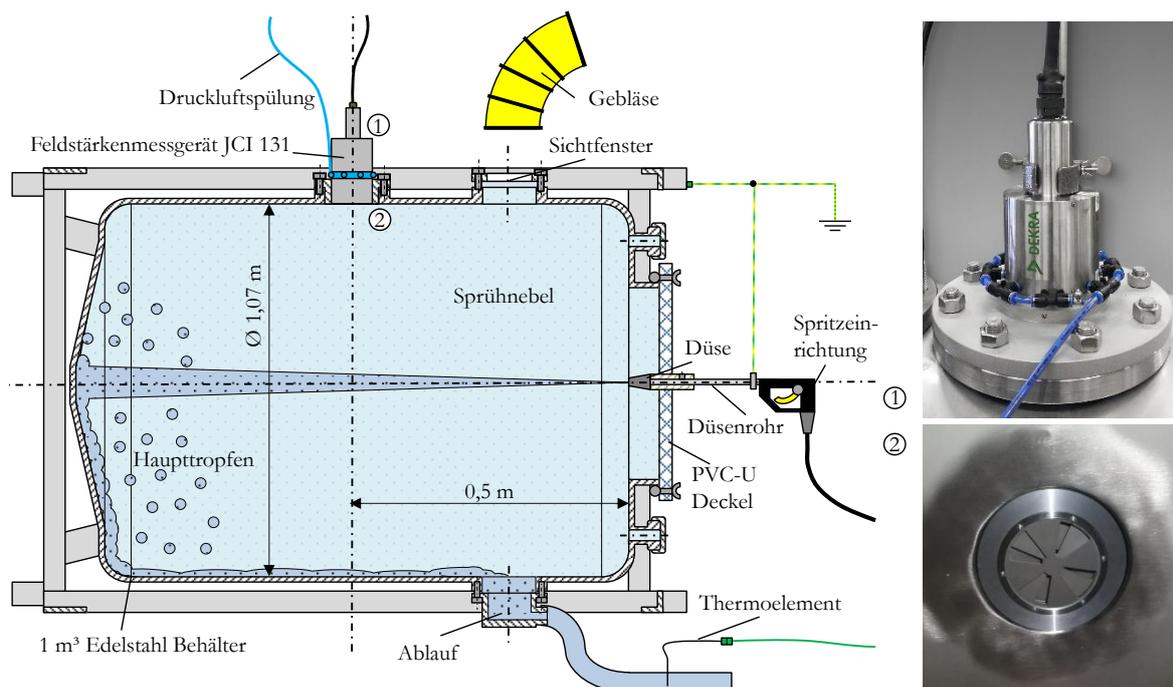


Abbildung 4.3: 1 m<sup>3</sup> Behälter mit montiertem Feldstärkenmessgerät

**Raumpotentialmessung:** Die Raumpotentialmessung erfolgte mit einer gegen den geerdeten Behälter isoliert aufgebauten Elektrode (Abbildung 4.4). Das Raumpotential der Tropfen wurde gegenüber dem geerdeten Behälter leistungslos gemessen. Die Elektrode nahm das Potential der Tropfen an. Als Isolation diente ein in einem PVC-U Träger montierter Isolationsstab, der pro Auflagerpunkt auf zwei Isolationsscheiben gelagert war. Im unteren Ende des Isolationsstabs war die Elektrode montiert. Über das innerhalb des Isolationsstabs verlegte Hochspannungskabel war die Elektrode leitfähig mit dem kalibrierten Messsystem, bestehend aus dem  $\pm 2$  kV oder  $\pm 40$  kV Hochspannungsmesskopf in Kombination mit dem Feldstärkenmessgerät EMF 58 oder dem

Nachfolgergerät EFM 235, verbunden. Ein Isolationskörper mit Abtropfkante und die montierte Druckluftspülung (4 bar) verhinderten das Austreten der Tropfen aus dem Behälter. Der Abstand zwischen der Elektrode und der Behälterwand wurde in den Schritten 0,15 m, 0,30 m, 0,45 m und 0,54 m variiert. Die Position im Abstand von 0,54 m entsprach ungefähr dem Mittelpunkt des Behälters. Diese orts aufgelöste Messung erlaubte die Angabe des Raumpotentials des Strahls und des Sprühnebels beim mittigen Sprühen in den Behälter. Durch die vier Positionen der Elektrode war eine Angabe des Raumpotentialverlaufs, ausgehend vom Mittelpunkt bis zum Rand des Behälters, möglich.

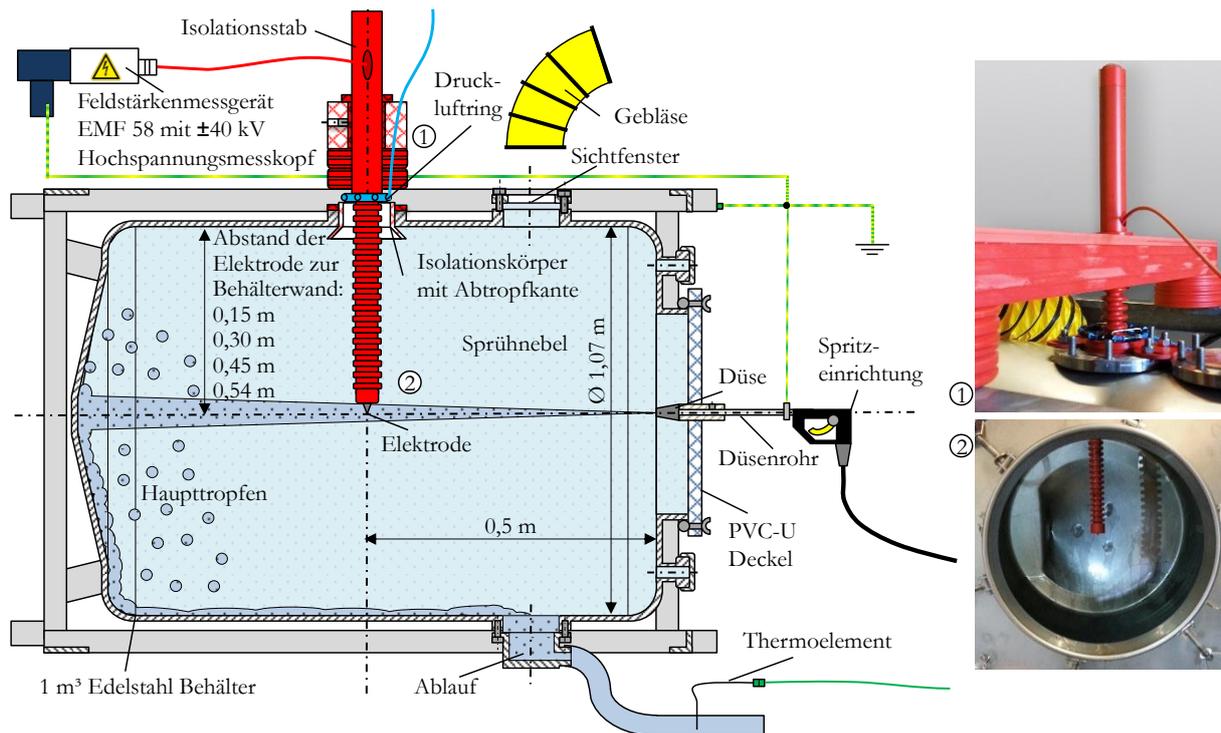


Abbildung 4.4: 1 m<sup>3</sup> Behälter mit montierter Raumpotentialmesstechnik

**Sprühen im Winkel:** Das Sprühen im Winkel bildet den realen Prozess der Behälterreinigung nach. Die Spritzeinrichtung war in einer Kugelblende<sup>12</sup> montiert (Abbildung 4.5). Mit einem Abstand zur Mittelachse des Behälters von 0,14 m, war die Kugelblende exzentrisch im PVC-U Deckel angeordnet. Durch Drehung des PVC-U Deckels wurde die exzentrisch angeordnete Kugelblende in ihrer Position verändert. Definiert waren die Positionen „oben rechts“ und „unten rechts“ der Düse (Abbildung 4.5):

„oben rechts“: Die Kugelblende war 0,14 m oberhalb der Mittelachse angeordnet. Die Spritzeinrichtung wurde bis zum Anschlag an die Deckelöffnung nach unten gedrückt. Es folgte eine Drehung der Spritzeinrichtung im Uhrzeigersinn bis zur 60° Markierung.

„unten rechts“: Die Kugelblende war 0,14 m unterhalb der Mittelachse angeordnet. Die Spritzeinrichtung wurde bis zum Anschlag an die Deckelöffnung nach oben gedrückt. Es folgte eine Drehung der Spritzeinrichtung entgegen dem Uhrzeigersinn bis zur 300° Markierung.

<sup>12</sup> In zwei konkaven Halbschalen gelagerte Kugel mit hoher Bewegungsfreiheit



Abhängigkeit vom Pumpendruck erhöht sich die Ausgangstemperatur durch den Prozess des Versprühens. Aus diesem Grund werden zu den Messwerten der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials die gemessenen Temperaturen des versprühten Wassers angegeben.

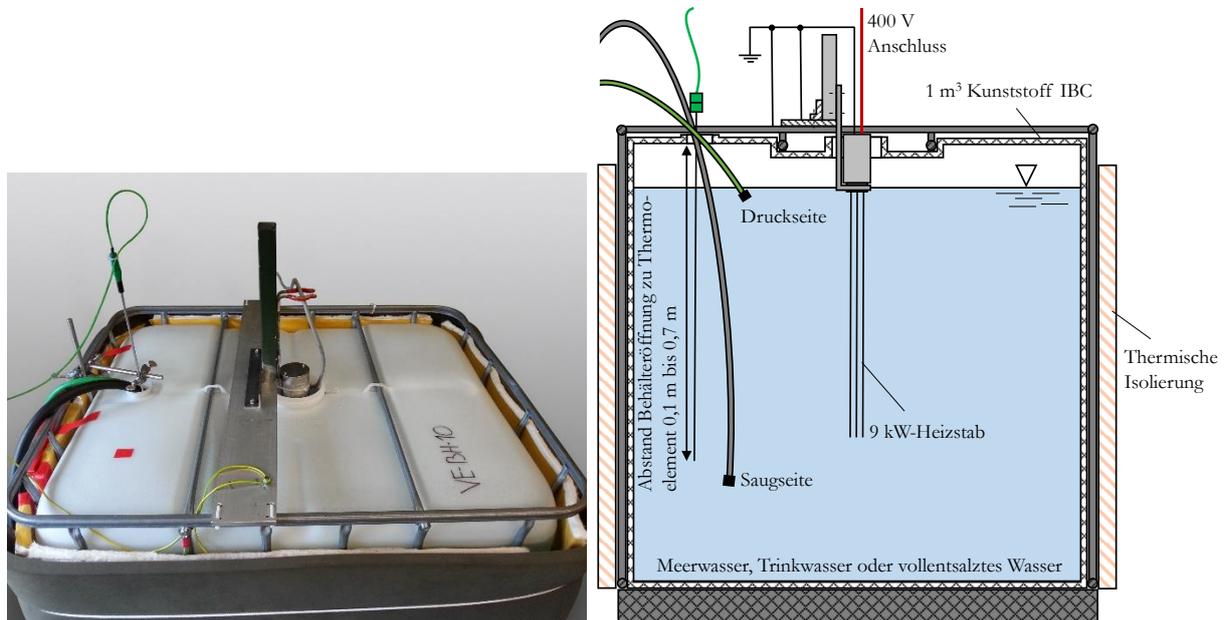


Abbildung 4.6: Warmwasseraufbereitung im 1 m<sup>3</sup> Kunststoff IBC

#### 4.4 Messtechnik

Beim prozessbedingten Versprühen von Wasser bilden sich Raumladungswolken aus. In Hinblick auf eine Zündgefahrenbewertung dieser Raumladungswolken und auftretender isolierter Leiter sind das Raumpotential, die elektrische Feldstärke und die übertragene Ladung von Gasentladungen zu messen. Die Messtechnik ist dabei Strahlen und Sprühnebeln der Flüssigkeitsstrahler ausgesetzt. Geeignet für diesen Einsatz sind wasserfeste Messtechniken. Bei einigen Messungen ist es notwendig, dass die Messtechnik direkt mit dem Strahl beaufschlagt wird. Ausgenommen davon sind Feldstärkenmessgeräte. Diese dürfen aufgrund der empfindlichen Bauteile im Messkopf nicht direkt mit dem Strahl beaufschlagt werden. Aus diesem Grund erfolgten keine Messungen mit Tankwaschköpfen, deren Drehmechanismus die Düsenausrichtung ändert. Stattdessen wurden statische Düsen, die einen konstant ausgerichteten Strahl aufwiesen, verwendet. Die notwendigen konstruktiven Anpassungen der Messtechniken dieser Arbeit werden beschrieben.

Eine Messung der Stromstärke an der Düse ist weder praktikabel noch zielführend [58]. Um an Messwerte der Literatur anzuschließen ist die Messung der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials geeignet. Diese und die Entladungsmesstechnik werden im Folgenden näher erläutert.

##### 4.4.1 Feldstärkenmessgerät

Die Messung der elektrischen Feldstärke beruht auf einer Ladungsverschiebung durch Influenz. Der Aufbau des Messkopfes des Feldstärkenmessgerätes JCI 131 des Herstellers John Chubb Instrumentation Ltd. (ehemalig Chilworth Technology Ltd.) ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Der Messkopf besteht aus einer geerdeten Frontplatte mit vier Öffnungen, dem dahinter liegenden Rotor mit vier Abschirmflügeln und der Influenzelektrode. Eine Hälfte der Influenzelektrode ist

durch die geerdete Frontplatte dauerhaft abgedeckt (Abbildung 4.7, links). Der Rotor besitzt vier Abschirmflügel, deren Fläche der anderen Hälfte der Influenzelektrode entspricht. Dieser ist konstant kapazitiv aufgebaut. Das bedeutet, dass während der Rotation Kapazitätsschwankungen kompensiert werden und sich die Kapazität des Rotors nicht ändert [59]. In einer bestimmten Rotorstellung ist die Influenzelektrode voll abgedeckt (Abbildung 4.7, rechts). In diesem Fall bewirkt das elektrische Feld keine Ladungsverschiebung durch Influenz auf der Influenzelektrode. Wird hingegen die Influenzelektrode durch die Abschirmflügel freigegeben, bewirkt dies eine Ladungsverschiebung durch Influenz. Durch die konstante Drehzahl des Rotors, der durch einen Motor angetrieben wird, ergibt sich aufgrund der andauernden Ladungsverschiebung des Auf- und Abdeckens der Influenzelektrode ein messbarer Verschiebestrom. Der Verschiebestrom wird gleichgerichtet, verstärkt und ist proportional zur elektrischen Feldstärke [23].

Das Feldstärkenmessgerät JCI 131 ist für die Anwendung in sprühnebelbelasteter Umgebung ausgelegt [57]. Der Abstand der Influenzelektrode zu geerdeten Oberflächen beträgt 7 mm. Dieser Abstand und lange Isolationsstrecken verhindern laut Hersteller, unabhängig vom Eindringen von Wassertropfen, Ableitpfade von der Influenzelektrode zu geerdeten Oberflächen [57]. Das Ansammeln von Wasser im Messkopf wird durch acht 4 mm Bohrungen in der Mantelfläche verhindert [57]. Das Feldstärkenmessgerät ist für Messungen an Hochdruckwasserstrahlen geeignet [22]. Die Messunsicherheit des in genereller Übereinstimmung mit dem BS 7506: Part 2: 1996 Annex A2 kalibrierten Feldstärkenmessgerätes beträgt  $\pm 1,5\%$  des Messbereichsendwerts [57].

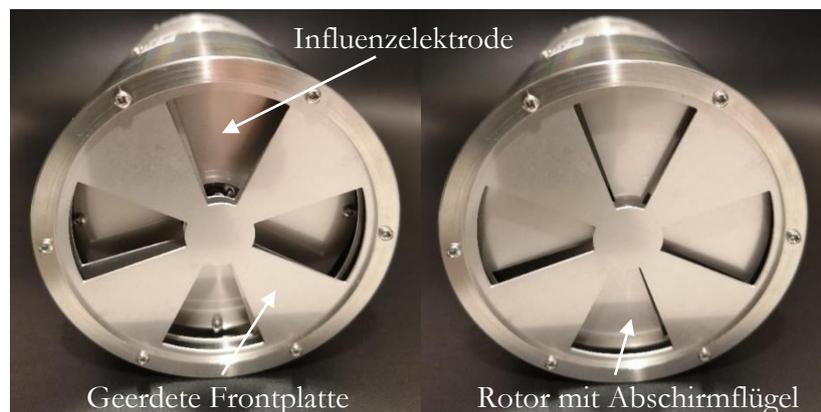


Abbildung 4.7: Feldstärkenmessgerät mit auf- (links) und abgedeckter (rechts) Influenzelektrode

Das Feldstärkenmessgerät JCI 131 besitzt einen Messwinkel von  $(40 \pm 5)^\circ$  [55, 60]. Ähnlich dem Lichtkegel einer Taschenlampe ergibt sich ein Messkegelstumpf vor dem Feldstärkenmessgerät. Die Größe der daraus resultierenden kreisrunden Messfläche ist abhängig vom Abstand zum Messobjekt [54, 60]. Der Messwinkel spannt sich zwischen der Rotationsachse des Feldstärkenmessgerätes und dem Rand des Messkegelstumpfs auf (Anhang B). Bedingt durch das Messprinzip erfolgt eine Mittelung der Oberflächen, die sich im Messkegelstumpf bzw. Messfläche befinden.

Um die Raumladungsdichte im Behälter zu berechnen (Kapitel 2.5), muss die Messung der elektrischen Feldstärke an der Behälterwand erfolgen. Ein möglichst homogenes *elektrisches Feld* ergibt sich durch den bündigen Einbau des Feldstärkenmessgerätes JCI 131 in der Mantelfläche des Behälters. Dafür notwendige Adapter wurden den Messöffnungen und Innenradien der Behälter angepasst. Der Adapter für die Messöffnung des  $1\text{ m}^3$  Behälters wurde so gefertigt, dass er in die Adapter größerer Behälter eingelassen werden konnte. In Abbildung 4.8 ist der Adapter des  $6,2\text{ m}^3$  Behälters mit im Adapter des  $1\text{ m}^3$  Behälters montierten Feldstärkenmessgerät abgebildet.

Die Druckluftspülung bestand aus acht 4 mm großen Düsen (3 bar). Die Düsen wurden in den Ablauföffnungen, die sich auf der Mantelfläche des Feldstärkenmessgerätes befanden, montiert und reduzierten das Eindringen von Wassertropfen in den Messkopf. Der Luftdruck war am Druckregelventil mit Manometer einstellbar und wurde durch ein elektronisches Magnetventil geschaltet.

Das 19-polige Messkabel diente der Spannungsversorgung und der Datenübertragung zwischen dem Feldstärkenmessgerät und der Basiseinheit. An den Bedienelementen der Basiseinheit war der Messbereich einzustellen. Auf dem LCD-Display der Basiseinheit wurde die aktuelle gemessene elektrische Feldstärke angezeigt. Um den Messbereich und die gemessene elektrische Feldstärke über eine festgelegte Zeit zu erfassen, war die Basiseinheit über einen Adapter mit dem Spannungseingangsmodul NI-9215 verbunden. Das kalibrierte Spannungseingangsmodul NI-9215 besaß eine Messunsicherheit von  $\pm 0,01$  V. Neben diesem Modul war im CompactDAQ-Chassis des Herstellers National Instruments Corp. ein Temperatureingangsmodul NI-9212 verbaut. An diesem konnten acht Thermoelemente angeschlossen werden. Das in Abbildung 4.8 gezeigte Mantelthermoelement maß die Temperatur des Wassers im Ablauf des Behälters. Die Messunsicherheit der kalibrierten Thermoelemente vom Typ K (NiCr-Ni) in Kombination mit dem Temperatureingangsmodul NI-9212 betrug laut Kalibrierprotokoll  $\pm 2$  K. Das elektronische Magnetventil der Druckluft wurde mit einem 230 V Schaltgerät angesteuert, dass mit einem Relaisausgangsmodul NI-9482 geschaltet wurde. Die Kommunikation des CompactDAQ-Chassis mit den drei darin befindlichen Modulen erfolgte über das Notebook und dem darauf installierten Programm „Behälterreinigung 1.1“. Die Messdaten der mindestens drei Minuten andauernden Messung wurden mit 100 Samples/s erfasst und im Dateiformat .txt gespeichert. Dieses Vorgehen erlaubte eine statistische Auswertung und die Angabe des Mittelwertes und der betraglich höchsten Werte als Fehlerbalken. Das Feldstärkenmessgerät, die Adapter, der Behälter, die Basiseinheit und das CompactDAQ-Chassis wurden gemeinsam an der Potentialausgleichschiene geerdet.

Bei Messungen, die ohne eine räumliche Begrenzung des Behälters erfolgten, wurde das Feldstärkenmessgerät in einer Metallplatte zur Homogenisierung des elektrischen Feldes montiert. Die Metallplatte besaß einen Durchmesser von 0,4 m. Eine Abbildung des Stativs und dem in der Metallplatte montierten Feldstärkenmessgerätes ist in Anhang C hinterlegt. Der übrige Aufbau entspricht dem der Feldstärkenmessungen im Behälter (Abbildung 4.8).

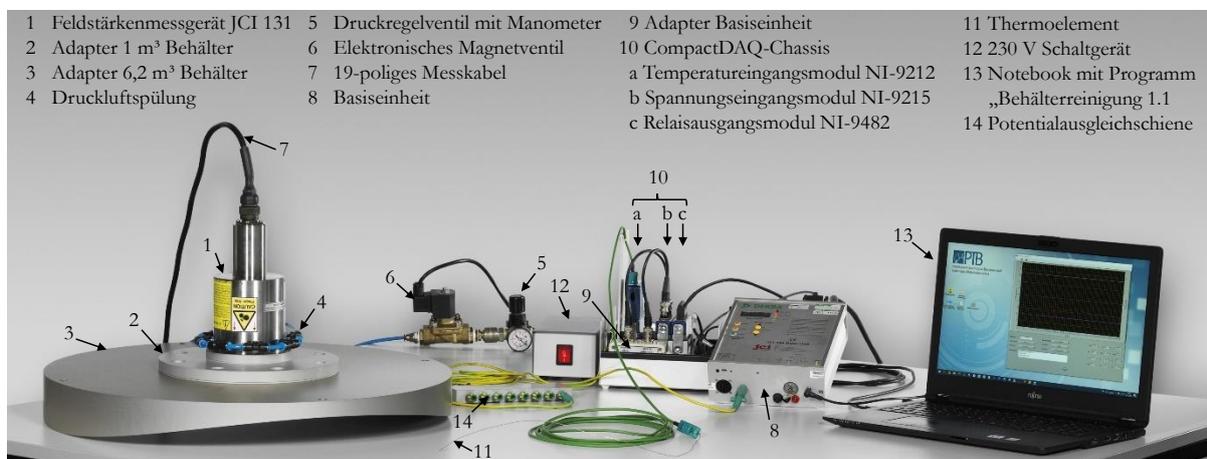


Abbildung 4.8: Aufbau der Feldstärkenmessung am Rand (Mantelfläche) des Behälters

## 4.4.2 Raumpotentialmesstechnik

Die Raumpotentialmessung erfolgte gegenüber Erdpotential. Abbildung 4.9 zeigt den Aufbau der Raumpotentialmessung. Der Träger aus PVC-U befand sich außerhalb des Behälters und war pro Auflagerpunkt auf zwei aus PVC-U gefertigten Isolationsscheiben gelagert. Die Auflagerpunkte sind vom Behälter abhängig. Geeignet sind Rahmen, Trittgitter oder die äußere Mantelfläche des Behälters. Der 2 m lange und aus PVC-U gefertigte Isolationsstab ragte durch eine Öffnung von oben in den Behälter und wurde im Träger durch drei Stiftschrauben, die auf den Klemmring eine Kraft ausübten, in Position gehalten. Die robuste Bauweise war notwendig, um dem Aufprall des Strahls standzuhalten. Der Druckluftring, bestehend aus acht 4 mm großen Düsen (4 bar), verdrängte den aus dem Behälter austretenden Sprühnebel und hielt den Isolationsstab trocken. Am unteren Ende des Isolationsstabes war die leitfähige und kegelförmige Elektrode ( $\varnothing = 10$  mm,  $L = 10$  mm) montiert. Die gerippte Form der Isolationsscheiben und des -stabes bildeten lange Kriechwegstrecken, vergleichbar zu denen von Freiluftisolatoren [61]. Alle aus PVC-U gefertigten Bauteile wurden vor jeder Messkampagne gereinigt und poliert. Das Polieren bewirkte die Bildung einer möglichst hydrophoben Oberfläche. Die langen Kriechwegstrecken, die hydrophobe Oberfläche und die Trocknung durch den Druckluftring bezweckten eine dauerhafte Isolierung der Elektrode gegenüber dem geerdeten Behälter. Durch das Lösen der kraftschlüssigen Verbindung des Klemmrings war der Abstand der Elektrode zur Behälterwand verstellbar und erlaubte eine ortsaufgelöste Messung des Raumpotentials. Bei Messungen ohne Behälter war der Isolationsstab an einem Stativ zu befestigen oder in der Hand zu halten.

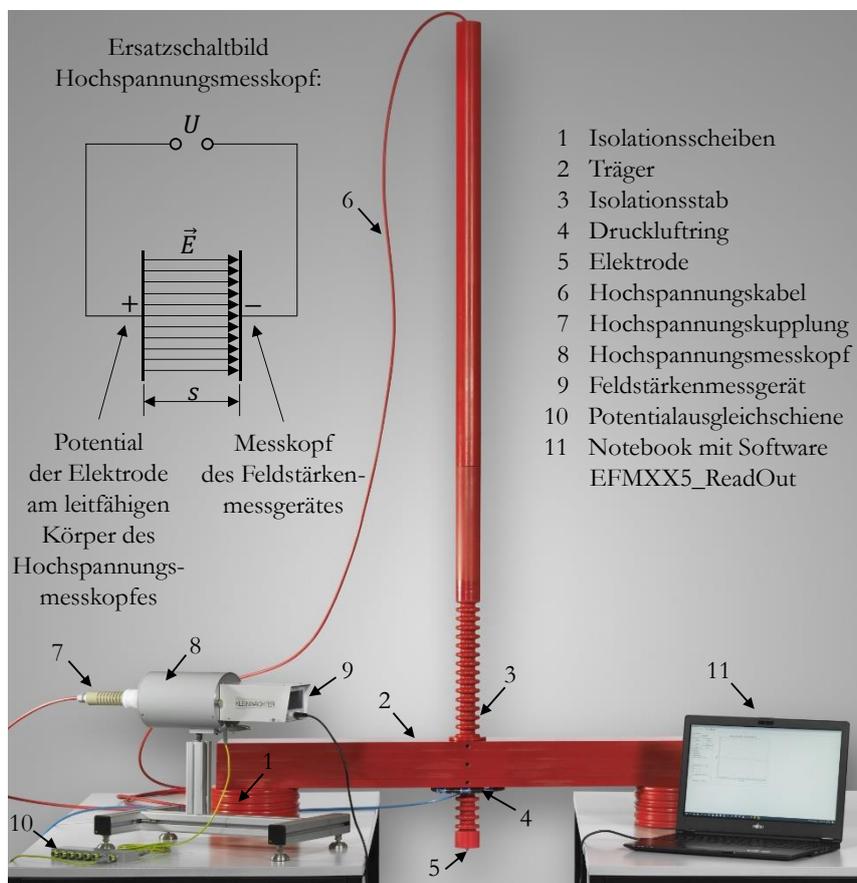


Abbildung 4.9: Aufbau der Raumpotentialmessung; Ersatzschaltbild Hochspannungsmesskopf

Die Elektrode nahm, in Abhängigkeit der Messposition, durch Kontakt das Raumpotential des Strahls oder Sprühnebels an. An der Elektrode ist ein Hochspannungskabel angeschlossen, das durch den Isolationsstab geführt wurde. Über einen aus PEEK (Polyetheretherketon) gefertigten Hochspannungsanschluss war es an dem zylindrischen  $\pm 40$  kV Hochspannungsmesskopf HMK 40 vom Hersteller Kleinwächter GmbH angeschlossen. Bei Potentialen von bis zu  $\pm 2$  kV hat sich der  $\pm 2$  kV Hochspannungsmesskopf bewährt. Das Äußere des Hochspannungsmesskopfes war mit der Potentialausgleichschiene verbunden und geerdet. Im Inneren des Hochspannungsmesskopfes befand sich ein leitfähiger, mit einem Widerstand von über  $10^{15} \Omega$  [23] gegen Erde isolierter leitfähiger Körper, der mit dem Hochspannungskabel verbunden war und das Potential der Elektrode annahm. In einem definierten Abstand  $s$  zu diesem Körper befand sich, innerhalb des Hochspannungsmesskopfes, der Messkopf des Feldstärkenmessgerätes. Der Erdungsanschluss des Feldstärkenmessgerätes war mit der Potentialausgleichschiene zu verbinden. Beim Feldstärkenmessgerät handelte es sich um das EMF 58 des Herstellers Eltex GmbH oder dem Nachfolgegerät EFM 235 des Herstellers Kleinwächter GmbH. Das Feldstärkenmessgerät maß die elektrische Feldstärke  $E$  des elektrischen Feldes, das sich zwischen dem gegen Erde isolierten Körper des Hochspannungsmesskopfes und dem Messkopf des Feldstärkenmessgerätes ausbildete. Nach Gleichung 4.1 ergab sich aus diesem elektrischen Feld und dem definierten Abstand  $s$  das Potential  $U$  des Körpers und somit das an der Elektrode anliegende Raumpotential  $\Phi$ .

$$\Phi = U = E \cdot s \quad 4.1$$

Der Aufbau entsprach der Definition eines statischen Voltmeters und erlaubte die leistunglose Messung des Raumpotentials [23]. Per USB-Schnittstelle war das Feldstärkenmessgerät mit dem Notebook verbunden. Über die Software EFMXX5\_ReadOut wurde das Raumpotential über die Zeit dargestellt. Weiterhin ermöglichte es das Abspeichern der Rohdaten für eine weiterführende Auswertung im Dateiformat .txt. Die gemäß dem GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) ermittelte erweiterte Messunsicherheit des Aufbaus der Raumpotentialmessung, mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$ , unterschritt  $\pm 2,5$  % des Messbereichsendwertes. Die Angabe der erweiterten Messunsicherheit von  $\pm 2,5$  % des Messbereichsendwertes verliert ihre Gültigkeit, wenn außerhalb des Sprühs oder des Behälters eine relative Feuchte der Luft von über 50 % vorliegt. Beträgt diese relative Feuchte der Luft über 70 % ergeben sich erfahrungsgemäß Ableitpfade, die den Messwert reduzieren.

Der bereits beschriebene maximale Messwert aus [40] des Raumpotentials im zylindrischen  $1 \text{ m}^3$  Behälter (Kapitel 3.3.1) und der maximale Messwert der elektrischen Feldstärke am Rand des zylindrischen  $1 \text{ m}^3$  Behälters (Kapitel 3.3.2) belegen, dass der durch Gleichung 2.17 gezeigte Zusammenhang messtechnisch mit einer Abweichung von unter 8 % nachweisbar ist. Die Feldstärken- und Raumpotentialmessungen verifizieren sich, bei dem in [40] beschriebenen Aufbau, gegenseitig und bestätigen deren Eignung für Messungen im Behälter.

#### 4.4.3 Detektion elektrostatischer Gasentladungen

Das Handcoulombmeter und der Shunt sind geeignet, um Büschel- und Funkenentladungen zu detektieren und die dabei übertragene Ladung messtechnisch zu erfassen. Die Höhe der übertragenen Ladung ist mit den Grenzwerten der technischen Regel [1] oder technischen Spezifikation

[2] abzugleichen und die Zündgefahr zu bewerten. Die Elektroden der Messgeräte sind dem aufgeladenen Körper ohne Kontakt anzunähern, bis eine Gasentladung erfolgt. Die Elektroden der Messgeräte sind nach erfolgter Gasentladung aus dem elektrischen Feld zu entfernen und der Messwert abzulesen [62]. Beim Kontakt der Elektroden der Messgeräte mit dem aufgeladenen Körper handelt es sich um eine Kontaktentladung. Bei einer Kontaktentladung findet keine Gasentladung statt, deren Zündgefahr zu bewerten ist [63]. Gasentladungen, wie bspw. Büschel- und Funkenentladungen, bilden einen Plasmakanal aus und emittieren eine hochfrequente elektromagnetische Strahlung [23]. Das Erfassen dieser Strahlung ist durch Mittelwellenradios anhand von Knackgeräuschen möglich. Dem aktuellen technischen Stand entsprechend sind Antennen, die mit dem Oszilloskop verbunden sind, zu verwenden [23]. Für die Messungen mit dem Shunt und der Antenne wurden Oszilloskope vom Typ MSO54 des Herstellers Tektronix oder Wave-Runner 62 Xi des Herstellers Teledyne LeCroy genutzt. Im Folgenden werden die Funktionsweise des Handcoulombmeters, des Shunts und der Antennenmesstechnik erläutert.

**Handcoulombmeter:** Das kalibrierte Handcoulombmeter vom Typ HMG 11/02 des Herstellers Schnier Elektrostatik GmbH erfasst die übertragene Ladung von Gasentladungen in einem Messbereich von 5 nC bis 200 nC [63]. Das Handcoulombmeter besitzt eine Messunsicherheit von  $\pm 5,9$  nC [64]. Die Kugelelektrode des Handcoulombmeters ist dem aufgeladenen Objekt anzunähern, bis die Durchbruchfeldstärke erreicht ist und eine Gasentladung entsteht. Der Krümmungsradius der Kugelelektrode betrug 0,010 m [64]. Vom Hochdruckwasserstrahl ging eine Personengefährdung aus. Zusätzlich zur angelegten PSA war ein Personenschutz durch Abstand zu gewährleisten. Dafür war das Handcoulombmeter an einem 2 m langen Holzstab montiert.

**Shunt:** Mit dem Shunt ist die übertragene Ladung von Gasentladungen messbar. Anders als beim Handcoulombmeter sind übertragene Ladungen von unter 5 nC detektierbar. Die am Shunt montierte Elektrode ist dem aufgeladenen Objekt anzunähern, bis die Durchbruchfeldstärke erreicht ist und eine Gasentladung entsteht. Aus der Gasentladung resultiert ein Stromimpuls  $I(t)$ , der über einen Messwiderstand  $R_{Shunt}$  zur Erde erfolgt (Abbildung 4.10) [64]. Das für den Messabgriff verwendete Koaxialkabel ist mit dem Oszilloskop verbunden. Das Oszilloskop ist dadurch parallel zum Messwiderstand geschaltet und besitzt einen Eingangswiderstand von  $50 \Omega$ . Durch die Parallelschaltung ergibt sich nach dem kirchhoff'schen Gesetz (Knotenpunktsatz) ein Knotenpunkt, an dem sich der Stromimpuls aufteilt [33]. Um zu erreichen, dass der Hauptteil vom Stromimpuls über den Messwiderstand des Shunts erfolgt, ergibt sich ein Messwiderstand von  $(0,3 \pm 0,2) \Omega$  [64]. Am Oszilloskop wird der zeitliche Verlauf der Spannung  $U(t)$  am Messwiderstand gemessen, über die Zeit der Entladung integriert und durch den Messwiderstand geteilt, um die übertragene Ladung  $Q$  zu erhalten (Gleichung 4.2) [64]:

$$Q = \int I(t) \cdot dt = \frac{1}{R_{Shunt}} \cdot \int U(t) \cdot dt \quad 4.2$$

Der Messwiderstand des Shunts betrug  $(0,250 \pm 0,001) \Omega$  und wurde mit der kalibrierten LCR-Messbrücke 6440B vom Hersteller WAYNE KERR bestimmt. Die gemäß dem GUM ermittelte erweiterte Messunsicherheit der Widerstandsmessung der LCR-Messbrücke, mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$ , besaß eine maximale Abweichung von  $0,26 \cdot 10^{-3} \Omega$ . Gegenüber dem

Handcoulombmeter ist die Erfassung von Mehrfachentladungen erkennbar und auszuschließen [62]. Die kalibrierten Oszilloskope dieser Arbeit erfüllten die in [62] gestellten Anforderungen mit einer Bandbreite von mindestens 300 MHz und einer Abtastrate von mindestens 1 Gigasample/s.

Um Beschädigungen an den Lötstellen des Shunts durch den Aufprall des Hochdruckwasserstrahls zu vermeiden, war zwischen der Elektrode und dem Messwiderstand ein Metallzylinder montiert (Abbildung 4.10). Der Metallzylinder wurde in den Isolationsstab eingelassen und durch zwei Stiftschrauben fest verklemt. Der Impuls des Aufpralls wurde durch diese Konstruktion statt vom Shunt durch den Isolationsstab aufgenommen. Um Gasentladungen statt zur Elektrode zu den Stiftschrauben zu vermeiden, wurden die Stiftschrauben durch die Montage der Schutzkappe abgedeckt. Die Schutzkappe schützte weiterhin den Isolationsstab und war nach einer Beschädigung durch den Strahl auszutauschen. Zwischen Elektrode und Zylinder war ein Dichtring montiert, der die Elektronik vor dem Eindringen von Wasser schützte und Fehlmessungen vermied. In Abbildung 4.10 ist beispielhaft die Kugelelektrode mit einem Krümmungsradius von 0,0125 m montiert. Das Erdungs- und Koaxialkabel des Shunts wurden durch den Isolationsstab geführt. An der geerdeten Potentialausgleichschiene wurden der Erdkontakt des Oszilloskops und das Erdungskabel des Shunts angeschlossen. Der Isolationsstab hatte eine Länge von 2 m und wurde in der Hand gehalten (Abbildung 4.11). Zusätzlich zur angelegten PSA ergab sich durch den Isolationsstab ein Sicherheitsabstand zum Strahl. Die notwendige Länge des Koaxialkabels von 10 m bewirkte, gegenüber der typischen Länge des Koaxialkabels von 2 m, eine Abweichung der gemessenen übertragenen Ladung von unter  $\pm 5\%$  (Anhang D).

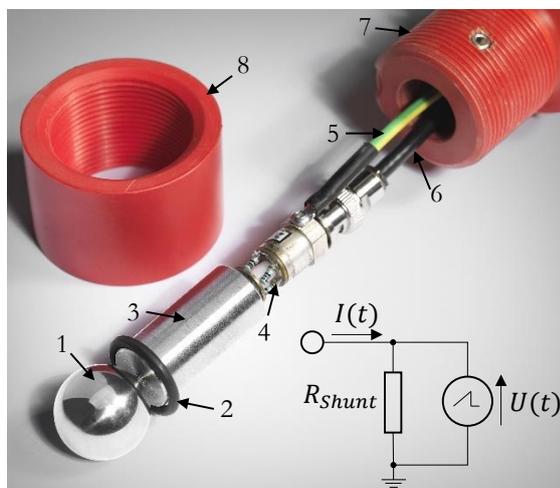


Abbildung 4.10: Shunt mit montiertem Zylinder, Dichtring und Kugelelektrode; Ersatzschaltbild der Messtechnik Shunt [64]

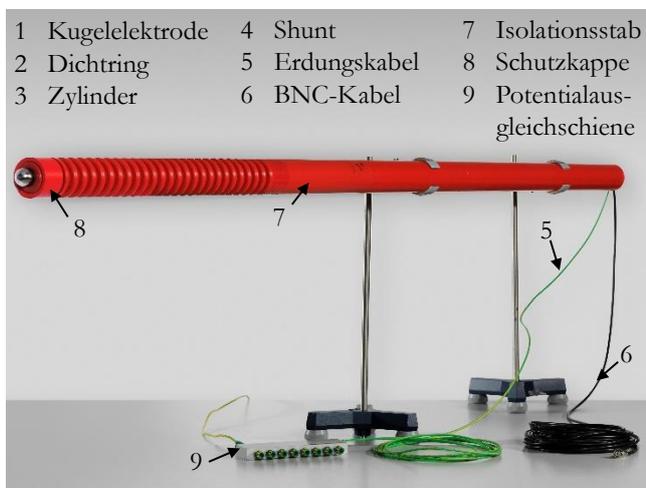


Abbildung 4.11: 2 m Isolationsstab mit eingebautem Shunt und montierter Schutzkappe

**Antennenmesstechnik:** Ist der Ort des Auftretens unbekannt, nicht zugänglich oder besteht die Gefahr einer Beschädigung des Messgerätes, ist auf die Erfassung der hochfrequenten elektromagnetischen Strahlung der Gasentladungen mittels der Antennenmesstechnik zurückzugreifen. Voraussetzung für die hochfrequente elektromagnetische Strahlung ist die Ausbildung eines Plasmakanals, wie er bei Büschel- und Funkenentladungen vorkommt [23]. Koronaentladungen bilden keinen Plasmakanal aus, der eine hochfrequente elektromagnetische Strahlung emittiert und ist mit dieser Messtechnik nicht detektierbar [23]. Mit der Antennenmesstechnik ist es möglich Gasentladungen bis zu Entfernungen von mehreren Metern nachzuweisen. Ein standardisiertes

Kalibrierverfahren ist für die Antennenmesstechnik bisher nicht vorhanden. Aus diesem Grund dient die Antennenmesstechnik zum Nachweis des Auftretens von Gasentladungen, ohne dass diesen eine übertragene Ladung zugeordnet wird. Die nach dem Prinzip eines kreisförmigen Dipols funktionierende Antenne aus [23] wurde nachgebaut und für Messungen innerhalb dieser Arbeit verwendet. Die Antennenmesstechnik wurde am Eingang des Oszilloskops angeschlossen, um die Signale aufzuzeichnen. Die Wellenimpedanz des gesamten Aufbaus betrug  $50 \Omega$  [23].

#### 4.4.4 Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Wasserarten

Der Prozess der Ladungstrennung und die daraus resultierende Aufladung und Polarität des versprühten Wassers ist abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit [11]. Um diese Abhängigkeit zu untersuchen und eine Vergleichbarkeit zu bestehenden Messwerten der Literatur herzustellen, war die elektrische Leitfähigkeit der Wasserarten dieser Arbeit zu bestimmen.

Die Messungen wurden mit Wechselspannung durchgeführt, aus der ein Wechselstrom in der Flüssigkeit resultierte. Die als Ladungsträger fungierenden Ionen des Elektrolyten schwingen dabei um ihre Ausgangslage. Als Richtwert gilt eine Frequenz von über 1 000 Hz [65]. Unter diesen Bedingungen war die Ausbildung elektrochemischer Doppelschichten (Polarisation), die einen Widerstand und eine Kapazität besitzen, an den Elektroden der Leitfähigkeitsmesszelle minimiert [65, 66]. Neben der zu verwendenden Wechselspannung ließ sich eine weitere Optimierung durch eine Vier-Elektroden-Leitfähigkeitsmesszelle erzielen. Diese bestand aus einem Strom- und Spannungselektrodenpaar, zwischen denen sich die Flüssigkeit befand [66]. Bei der Vier-Elektroden-Leitfähigkeitsmesszelle ist die Reduzierung der elektrischen Leitfähigkeit durch die Ausbildung elektrochemischer Doppelschichten weitestgehend auszuschließen [66]. Die elektrische Leitfähigkeit ist temperaturabhängig [65]. Deswegen wurde, zeitgleich zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit, von der Leitfähigkeitsmesszelle die Temperatur des Wassers gemessen. Um Messwerte miteinander zu vergleichen, erfolgte anhand von nichtlinearen Temperaturkompensationsfunktionen eine Umrechnung der elektrischen Leitfähigkeit auf eine Referenztemperatur von  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  [66].

Vollentsalztes Wasser der Firma Merck KGaA stand in 1 000 l Behältern zur Verfügung. Aus jedem Behälter wurde eine 1 l Probe entnommen. Durchschnittlich beträgt die Salinität von Meerwasser 3,5 Massen-% [27] und hat eine elektrische Leitfähigkeit von  $5 \text{ S/m}$  [66]. Als Ausgangszustand für das Ansetzen von Meerwasser wurde das aus Braunschweig stammende Trinkwasser verwendet. Die 3,5 Massen-% dienten als Richtwert, um die elektrische Leitfähigkeit von  $5 \text{ S/m}$  zu erreichen. Messungen der elektrischen Leitfähigkeit ergaben, dass für das Ansetzen von Meerwasser, mit einer elektrischen Leitfähigkeit von  $5 \text{ S/m}$ , in 1 000 l Trinkwasser aus Braunschweig 33,5 kg Meersalz gegeben werden mussten. Das Meersalz stammt aus dem toten Meer, war laut Hersteller 100 % naturrein und unbehandelt. Pro 1 000 l wurde eine 1 l Probe entnommen. Bei dem aus Braunschweig stammenden Trinkwasser wurde pro 2 000 l eine Probe entnommen. Während der Versuchsreihen bei Industriepartnern waren es mindestens zwei Proben des Leitungs- oder Brauchwassers.

Für Messungen der elektrischen Leitfähigkeit des vollentsalzten Wassers, Trinkwassers und Brauchwassers wurde das kalibrierte Messgerät Multi 3510 IDS mit der Vier-Elektroden-Leitfähigkeitsmesszelle TetraCon 925 vom Hersteller Xylem Analytics Germany GmbH genutzt. Die Messunsicherheit der Leitfähigkeitsmessung wurde dem Kalibrierprotokoll entnommen und ist abhängig vom Messbereich. Bei einer elektrischen Leitfähigkeit von  $5 \cdot 10^{-5} \text{ S/m}$  bis  $5 \cdot 10^{-4} \text{ S/m}$  betrug die Messunsicherheit bis 14,6 % vom Messwert. Bei einer elektrischen Leitfähigkeit von

$1 \cdot 10^{-3} \text{ S/m}$  bis  $5 \cdot 10^{-2} \text{ S/m}$  betrug die Messunsicherheit unter 1,0 % vom Messwert. Für die Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Meerwassers wurde das Mikroprozessor-Präzisions-Leitfähigkeitsmessgerät LF 3000 mit der Leitfähigkeitsmesszelle TetraCon 96 genutzt und besaß im Messbereich von  $3 \cdot 10^{-3} \text{ S/m}$  bis  $200 \text{ S/m}$  eine Messunsicherheit von 0,5 % vom Messwert [67].

## 4.5 Voruntersuchungen

### 4.5.1 Eignungsprüfung des Feldstärkenmessgerätes an Strahlen bekannten Potentials

Die herstellerseitige Kalibrierung des Feldstärkenmessgerätes JCI 131 erfolgte im homogenen elektrischen Feld eines Plattenkondensators in genereller Übereinstimmung mit dem BS 7506: Part 2: 1996 Annex A2 [57]. Der Aufbau der Kalibrierung ist abweichend von Messungen am Strahl oder Sprühnebel, die ein Volumen ausbilden. Für diese Messaufgabe wurde eine Prüfmethode entwickelt (Abbildung 4.12), bei der aus dem bekannten Raumpotential des Strahls die elektrische Feldstärke berechnet und mit der gemessenen elektrischen Feldstärke des Feldstärkenmessgerätes verglichen wurde [40].

Für die Prüfmethode eignete sich eine elektrostatische Applikationsanlage (EA), die einen horizontalen Flachstrahl aus Trinkwasser ohne eine räumliche Begrenzung und unter negativer Hochspannung (bis -90 kV) versprühte. Die Hochspannung der EA und somit das Raumpotential  $\Phi(0)$  des Strahls wurden mit einem kalibrierten elektrostatischen Voltmeter gemessen. Der Pumpendruck der EA war auf 8,0 bar eingestellt, bei einem Volumenstrom von 0,87 l/s. An den zwei Zerstäuberdüsen war der Luftdruck auf 3,8 bar oder 2,0 bar eingestellt. Der Flachstrahl bildete einen elliptischen Kegel aus. Bei 3,8 bar war der Strahl fein zerstäubt und erzeugte eine nahezu homogene Raumladungsdichte. Bei 2,0 bar bildeten sich größere Tropfen in der Mitte des inhomogenen Strahls aus, die nach einem kleinen Abstand zur Düse zu Boden fielen (Abbildung 4.12).

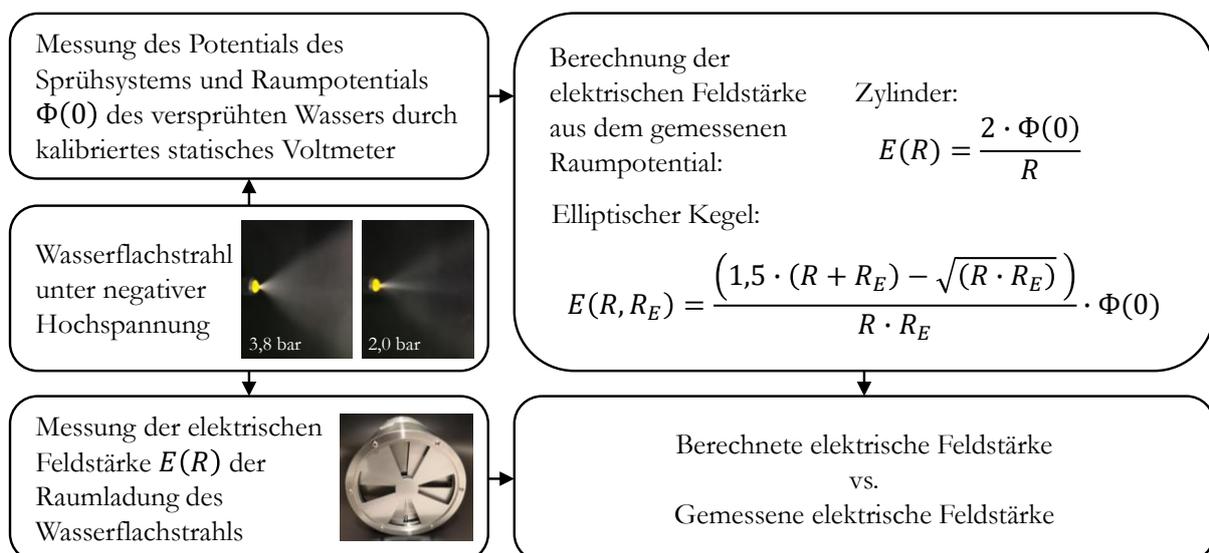


Abbildung 4.12: Prüfmethode zur Eignung des Feldstärkenmessgerätes JCI 131 an Wasserstrahlen und -sprühnebeln

Das Feldstärkenmessgerät war in einem Abstand  $R$  von 0,4 m zur Mittellinie und orthogonal zur sich aufweitenden Fläche des Flachstrahls positioniert. Um das elektrische Feld zwischen dem Feldstärkenmessgerät und dem Strahl zu homogenisieren, war das Feldstärkenmessgerät in einer

0,01 m dicken Metallplatte montiert, die einen Durchmesser von 0,40 m besaß [23, 54]. Die Messöffnung schloss bündig mit der Metallplatte ab. Der Abstand zwischen der Rotationsachse des Feldstärkenmessgerätes und dem Boden betrug 1,70 m. Durch den Messwinkel von  $(40 \pm 5)^\circ$  (Kapitel 4.4.1) ergab sich in dieser Konfiguration eine kreisrunde Messfläche von  $0,47 \text{ m}^2$  mit einem Durchmesser von 0,77 m. Diese Werte unterscheiden sich geringfügig gegenüber denen in [40], da sie unter Beachtung der neusten Erkenntnisse der Feldstärkenmessgeräte aus [54, 60] neu berechnet wurden (Anhang B). Nur innerhalb der Messfläche wurde der aufgeladene Strahl vom Feldstärkenmessgerät erfasst. Die vom Abstand zur Düse und Luftdruck der Zerstäuberdüsen abhängige Aufweitung des Flachstrahls ist durch den Radius  $R_E$  charakterisiert. Bei einem Abstand zur Düse von über 1,25 m entstanden starke Turbulenzen im Strahl, die keine Bestimmung des Radius der Aufweitung  $R_E$  ermöglichten. Die Berechnung der elektrischen Feldstärke erfolgte für den „Elliptischen Kegel“ und für einen „Idealen Zylinder“:

„Elliptischer Kegel“: Durch die vom Abstand zur Düse und vom Luftdruck der Zerstäuberdüsen abhängige Aufweitung des Strahls  $R_E$  bildete sich ein elliptischer Kegel aus. Die elektrische Feldstärke  $E(R, R_E)$  des elliptischen Kegels wurde für einen Abstand zur Düse von 0,25 m bis 1,25 m berechnet (Gleichung 4.3):

$$E(R, R_E) = \frac{(1,5 \cdot (R + R_E) - \sqrt{R \cdot R_E})}{R \cdot R_E} \cdot \Phi(0) \quad 4.3$$

„Idealer Zylinder“: Es wurde vereinfacht angenommen, dass der Strahl einen idealen Zylinder mit homogener Raumladungsdichte ausbildete und die elektrische Feldstärke  $E(R)$  an dessen Rand gemessen wurde (Gleichung 2.14).

Die Ergebnisse der Berechnungen sowie die Messwerte der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials sind [40] zu entnehmen. Im Folgenden wird auf die Abweichungen der berechneten zur gemessenen elektrischen Feldstärke eingegangen. Messfehler entstanden teilweise bei einer Hochspannung der EA von über 40 kV und resultierten aus vereinzelt Ableitpfaden des Strahls, die zu einer Reduzierung der Raumladungsdichte führten. Diese als Messfehler deklarierten Messwerte waren nicht Teil der Abweichungsberechnung. Zunächst wird die Berechnungsgrundlage des „Elliptischen Kegels“ und nachfolgend die des „Idealen Zylinders“ betrachtet:

**Elliptischer Kegel:** Die Abweichungen der berechneten gegenüber der gemessenen elektrischen Feldstärke, bei einem Luftdruck der Zerstäuberdüsen von 3,8 bar, sind in Abbildung 4.13 (links) dargestellt. Es ließ sich bereits bei der Aufweitung des Strahls bei einem Abstand zur Düse von 0,50 m, im Vergleich zu der bei 0,25 m, eine Reduzierung der Abweichungen beobachten. Bei einem Abstand zur Düse von 0,75 m und 1,00 m war die Aufweitung des Strahls ausreichend groß und wurde von der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes voll erfasst. Es ergaben sich Abweichungen von um die 5 % bis maximal 18 %. Bei einem Abstand zur Düse von 1,25 m nahm die Aufweitung des Strahls weiter zu, wodurch sie die Messfläche weiter übersteigt und die Tropfen- und Raumladungsdichte in der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes reduzierte. Dadurch ergab sich ein leichter Anstieg der mittleren Abweichung gegenüber der bei 1,00 m.

Bei 2,0 bar war die Aufweitung des Strahls gegenüber dem Luftdruck der Zerstäuberdüsen von 3,8 bar geringer und die bereits beschriebenen größeren Tropfen, die bei einem kurzen Abstand zur Düse zu Boden fielen, reduzierten die Tropfen- und Raumladungsdichte. Daraus folgten die, im Vergleich der Abweichungen bei einem Luftdruck der Zerstäuberdüsen von 3,8 bar, höheren Abweichungen (Abbildung 4.13, rechts).

**Idealer Zylinder:** In orange sind in Abbildung 4.13 die Abweichungen der gemessenen elektrischen Feldstärke zur berechneten elektrischen Feldstärke des „idealen Zylinders“ dargestellt. Bei einem Abstand zur Düse von 0,25 m und 0,50 m ergaben sich geringere Abweichungen, als bei der Berechnung der elektrischen Feldstärke des „elliptischen Kegels“. Die Aufweitung des Strahls war kleiner als die Messfläche des Feldstärkenmessgerätes. Es erfolgte ein Messfehler durch Mittelung der Anteile des Strahls und der Umgebung. Die vom Abstand und Luftdruck der Zerstäuberdüsen abhängige Aufweitung des Strahls ging nicht in die Berechnung der elektrischen Feldstärke des „idealen Zylinders“ ein. Dies führte zu einem Berechnungsfehler, der vergleichbar zum Messfehler war und erklärt die geringen Abweichungen. Bei einem Abstand zur Düse von 0,75 m und 1,00 m ergab sich eine gute Übereinstimmung der Abweichungen beider Berechnungsgrundlagen. Das lag daran, dass der „Ideale Zylinder“ mit seinem Durchmesser nahezu der Aufweitung des Strahls entsprach. Bei einem Abstand zur Düse von 1,25 m weitete sich der Strahl weiter auf. Diese Aufweitung ging wiederum nicht in die Berechnung der elektrischen Feldstärke des „idealen Zylinder“ ein, was zu höheren Abweichungen gegenüber der berechneten elektrischen Feldstärke des „elliptischen Kegels“ führte.

Zusammengefasst ist die Messungen der elektrischen Feldstärke an Strahlen und Sprühnebeln geeignet, wenn die Messfläche des Feldstärkenmessgerätes der Aufweitung des Strahls entspricht oder geringfügig kleiner ist. In diesem Fall ist die Berechnungsgrundlage des „idealen Zylinders“ und des „elliptischen Kegels“ anwendbar. Bei davon abweichenden Fällen ist die Berechnungsgrundlage des „elliptischen Kegels“ zu nutzen. Ist die Tropfen- und Raumladungsdichte zu gering, wie bspw. bei einem zu geringen Luftdruck der Zerstäuberdüsen oder einer zu starken Aufweitung des Strahls, reduziert sich der Messwert der elektrischen Feldstärke [40].

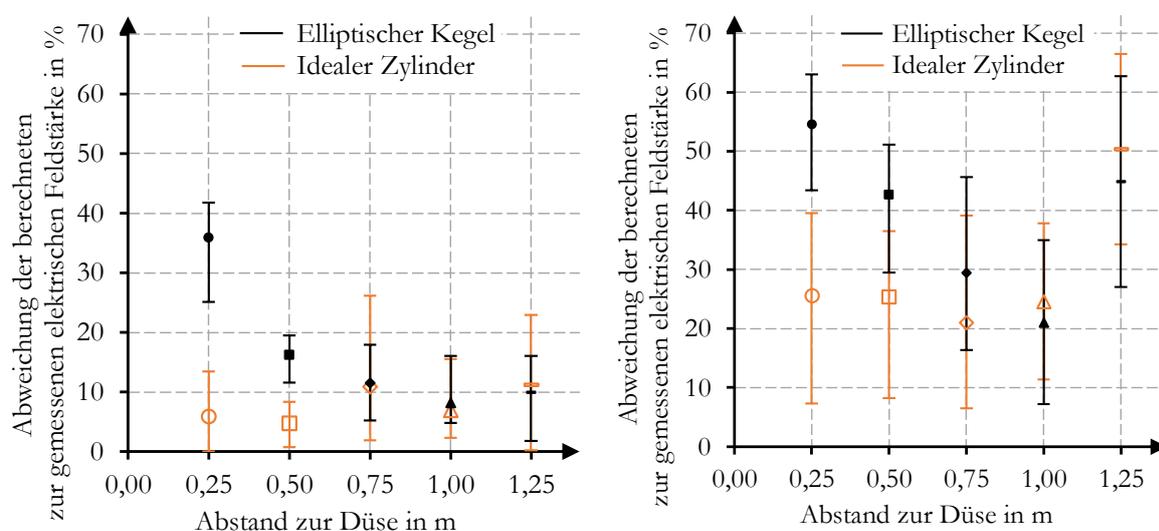


Abbildung 4.13: Abweichungen zwischen der berechneten und gemessenen elektrischen Feldstärke bei einem Luftdruck der Zerstäuberdüsen von 3,8 bar (links) und 2,0 bar (rechts)

#### 4.5.2 Einfluss der Druckluftspülung und Einbausituation auf die Feldstärkenmessung

Das Ziel dieses Kapitels ist es, den Einfluss der Druckluftspülung und Einbausituation auf die Feldstärkenmessung zu untersuchen.

Die Einbausituation des Feldstärkemessgerätes ist entscheidend. Bei Voruntersuchungen stand der Behälter der Modellanordnung zunächst aufrecht und das Feldstärkenmessgerät war horizontal angeordnet. Die Druckluftspülung war nicht montiert. Trotz der 4 mm großen Bohrungen in der Mantelfläche des Feldstärkenmessgerätes kam es zur Ansammlung von Wasser im Messkopf. Die Wasseransammlung führte zum Kontakt der Sensorplatte und des Rotors mit dem geerdeten Gehäuse. Dieser Umstand führte zu Messfehlern in Gestalt des Zusammenbruchs auf 0,0 kV/m, zum plötzlichen An- und Abstieg oder zur dauerhaften Reduzierung des Betrags der elektrischen Feldstärke. Um diese Messfehler zu vermeiden war bei Messungen mit Hochdruckwasserstrahlen in Behältern die Öffnung des Messkopfes nach unten zeigend auszurichten. Dadurch war schwerkraftbedingt eine Ansammlung von Wasser im Messkopf auszuschließen.

In [6] verwendete Feldstärkenmessgeräte wurden mit Stickstoff durchströmt, um während der Messung das Eindringen von Tropfen in die Messköpfe zu vermeiden. Das gleiche Prinzip fand Anwendung beim Feldstärkenmessgerät dieser Arbeit. Am Messkopf wurden die acht Ablauföffnungen genutzt, um Druckluftschläuche zu montieren (Kapitel 4.4.1).

Die im liegenden Behälter durchgeführten Voruntersuchungen, bei denen der Messkopf nach unten zeigend ausgerichtet war, erfolgten mit Drücken der Druckluftspülung von 0,8 bar, 1,0 bar, 1,2 bar, 2,0 bar und 3,0 bar. Erst ein Druck der Druckluftspülung von 3,0 bar reduzierte das Eindringen von Tropfen in den Messkopf und die daraus entstehenden Abweichungen und Messfehler deutlich. Drücke von über 3,0 bar wurden unterlassen, um das Messgerät nicht zu beschädigen. Für die folgenden Messungen der elektrischen Feldstärke in Behältern wurde die Druckluftspülung mit einem Druck von 3,0 bar genutzt.

Das Durchströmen des Messkopfes mit Druckluft von bis zu 3 bar kann die Ausrichtung und Position der Rotorblätter verändern. Im homogenen elektrischen Feld wurde dieser Einfluss überprüft. Dazu wurde die Messöffnung des Feldstärkenmessgerät bündig in die geerdete Metallplatte des Stativs, für Messungen an Strahlen und Sprühnebeln ohne räumliche Begrenzung des Behälters, eingebaut (Anhang C). In einem Abstand von 0,1 m oder 0,2 m war eine zweite Metallplatte angeordnet. Diese war mit dem Hochspannungsgenerator verbunden. Die sich gegenüberstehenden Metallplatten besaßen einen Durchmesser von 0,4 m. Aufbauten dieser Art werden für Kalibrieraufgaben und zur messtechnischen Charakterisierung von Feldstärkenmessgeräten genutzt [54].

Am Gleichspannungsgenerator war die Hochspannung einzustellen. Gemessen wurde die Hochspannung mit der kalibrierten Gleichspannungsmesseinrichtung, bestehend aus Spannungsteiler Spellmann HVD 100 (Teilerfaktor 1:10 000) und Digitalvoltmeter Agilent 34410 A. Nach dem Kalibrierprotokoll betrug die Messunsicherheit  $\pm 5 \cdot 10^{-4} \%$  vom Messwert. Aus dem bekannten Abstand und der eingestellten Hochspannung war die zu erwartende elektrische Feldstärke zu berechnen. Die erste Messung der elektrischen Feldstärke erfolgte ohne Druckluft. Anschließend wurde der Druck auf 0,8 bar, 1,0 bar, 1,2 bar, 2,0 bar und 3,0 bar am Ventil des Manometers eingestellt. Der Schreiberausgang des Feldstärkenmessgerätes wurde mit einem Keysight 34465A 6½ Digit Multimeter Truevolt DMM mit Datenloggerfunktion mit 100 Samples/Sekunde ausgelesen. Die gemäß dem GUM ermittelte erweiterte Messunsicherheit des Multimeters, mit dem

Erweiterungsfaktor  $k = 2$ , betrug im 10 V Messbereich bei den genutzten  $\pm 2$  V eine Messunsicherheit von  $1,6 \cdot 10^{-5}$  V. Es wurden Messungen bis  $-120$  kV/m durchgeführt (Abbildung 4.14).

Bei einem Abstand von 0,1 m betrug die maximal Abweichung 0,13 kV/m und bei 0,2 m 0,22 kV/m. Diese Abweichungen traten zufällig auf. Eine Abhängigkeit vom Druck besteht nicht. Das Durchströmen des Messkopfes mit Druckluft von bis zu 3,0 bar hat keinen Einfluss auf das Messgerät. Diese Aussage verliert ihre Gültigkeit, wenn nicht aufbereitete Druckluft verwendet wird. Beobachtungen zeigten, dass mit Wasser belastete Druckluft zu elektrischen Feldstärken von bis zu 10 kV/m führte. Empfohlen wird, dass die Druckluft möglichst frei von Wasser, Öl und Partikeln ist. Die Druckluft ist geeignet, wenn sich durch das Einschalten der Druckluft keine Abweichungen der elektrischen Feldstärke vom Nullpunkt des Feldstärkenmessgerätes ergeben.

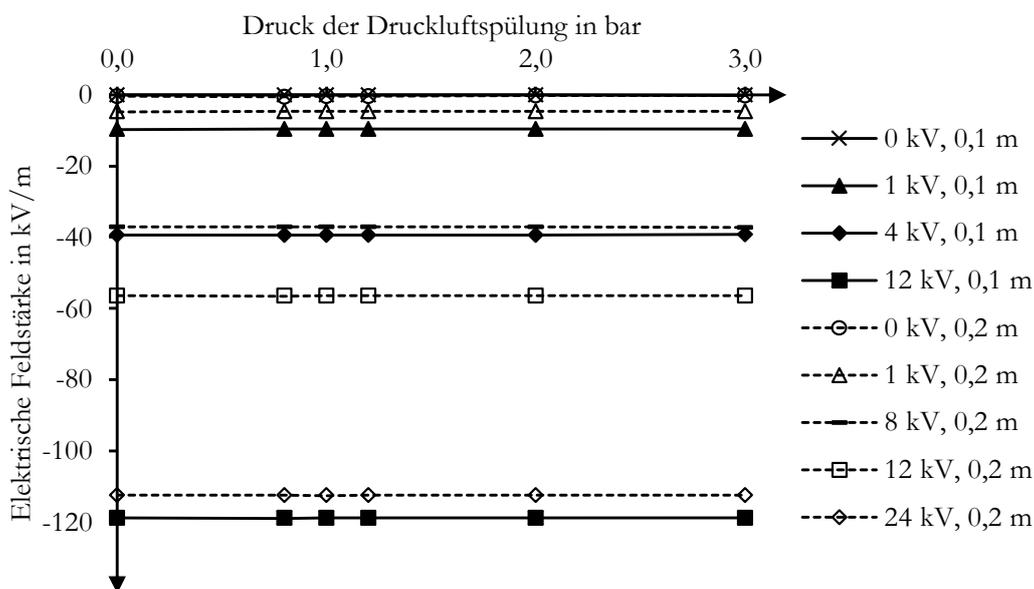


Abbildung 4.14: Einfluss der Druckluftspülung auf das Feldstärkenmessgerät

#### 4.5.3 Isolationsprüfung der Raumpotentialmesstechnik

Der isolierte Aufbau der Elektrode der Raumpotentialmesstechnik gegenüber dem geerdeten Behälter wurde durch Widerstandsmessungen, bei den Abständen 0,15 m, 0,30 m und 0,54 m, geprüft. Das kalibrierte Teraohmmeter Megger MIT 1025 erzeugte eine Prüfspannung bis 10,0 kV, die am Hochspannungskabel der Elektrode angelegt wurde. Die zweite Anschlussklemme wurde mit dem geerdeten Behälter verbunden. Das Teraohmmeter misst Widerstände bis  $20 \cdot 10^{12} \Omega$  [68]. Die von der Prüfspannung abhängigen Messbereichsendwerte der Widerstandsmessung sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Wird der Widerstandsendwert erreicht, liegt der Widerstand darüber und ist mit höheren Prüfspannungen zu bestimmen. Die Messgenauigkeit vom tatsächlich vorliegenden Widerstandswert betrug laut Kalibrierprotokoll unter  $\pm 15$  %.

Tabelle 4.1: Messbereichsendwerte der Widerstandsmessung in Abhängigkeit der Prüfspannung des Teraohmmeters Megger MIT 1025 [68]

Prüfspannung in kV	0,5	1,0	2,5	5,0	10,0
Messbereichsendwert in $x \cdot 10^{12} \Omega$	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0

Laut [1] gilt ein Feststoff ab  $10^9 \Omega$ , bei  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $50 \%$  relativer Feuchte, als isolierend. Während der Widerstandsmessungen betrug die Umgebungstemperatur  $(25,8 \pm 3,0) \text{ }^\circ\text{C}$  bei  $(43,8 \pm 7,1) \%$  relativer Feuchte. Unter diesen Bedingungen wurden bis  $5,0 \text{ kV}$  die Messbereichsendwerte angezeigt. Bei einer Prüfspannung von  $10,0 \text{ kV}$  betrug der Widerstand rund  $14,0 \cdot 10^{12} \Omega$ . Es lag kein optimales Trockenklima vor. Aus diesem Grund war der Widerstand von rund  $14,0 \cdot 10^{12} \Omega$ , gegenüber dem Messbereichsendwert von  $20,0 \cdot 10^{12} \Omega$ , reduziert.

Zum gleichmäßigen Benetzen des Behälters und der Potentialmesstechnik mit Wasser wurde für eine Dauer von drei Minuten mittig in den Behälter gesprüht. Der Durchmesser der rotierenden Rundstrahldüse betrug  $1,05 \text{ mm}$ . Eingestellt war ein Pumpendruck von  $500 \text{ bar}$ . Dadurch befand sich während der Messung ein Sprühnebel im Behälter. Die Widerstandsmessungen erfolgten direkt nach dem Sprühvorgang. Der Vergleich der gemessenen Widerstände direkt nach dem Versprühen von Trinkwasser (Abbildung 4.15) mit den Widerstandswerten direkt nach dem Versprühen von vollentsalztem Wasser (Abbildung 4.16), zeigten den Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit. Direkt nach dem Sprühen von Trinkwasser ergaben sich bei einer Prüfspannung von  $0,5 \text{ kV}$  und  $1,0 \text{ kV}$  die Messbereichsendwerte bei den untersuchten Abständen zur Behälterwand. Betrug die Prüfspannung  $2,5 \text{ kV}$ , wurde bei einem Abstand zur Behälterwand von  $0,15 \text{ m}$  der Messbereichsendwert erreicht. Bei den Prüfspannungen von  $2,5 \text{ kV}$ ,  $5,0 \text{ kV}$  und  $10,0 \text{ kV}$  reduzierte sich der Widerstand, wenn der Abstand zwischen Elektrode und Behälterwand vergrößert wurde. Im Mittelpunkt des Behälters war der Widerstand mit  $(2,0 \pm 0,3) \cdot 10^{12} \Omega$  minimal.

Direkt nach dem Sprühen von vollentsalztem Wasser ergaben sich bei einer Prüfspannung von  $0,5 \text{ kV}$ ,  $1,0 \text{ kV}$  und  $2,5 \text{ kV}$  die Messbereichsendwerte bei den untersuchten Abständen zur Behälterwand. Bei einer Prüfspannung von  $5,0 \text{ kV}$  betrug die Differenz des gemessenen Widerstands zum Messbereichsendwert unter  $1,0 \cdot 10^{12} \Omega$ . Die Messbereichsendwerte wurden bei einer Prüfspannung von  $10 \text{ kV}$  bei allen Abständen der Elektrode zur Behälterwand unterschritten. Trotz des Sprühnebels und den mit Wasser benetzten Oberflächen wurde bei der Prüfspannung von  $10,0 \text{ kV}$  der Widerstandswert des trockenen Behälters von rund  $14,0 \cdot 10^{12} \Omega$ , bei einem Abstand der Elektrode von  $0,30 \text{ m}$ , erreicht.

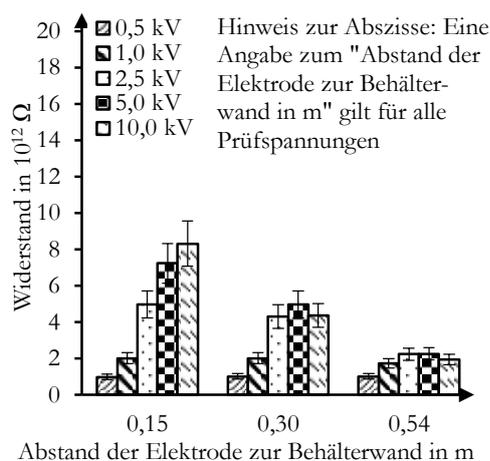


Abbildung 4.15: Widerstand in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand direkt nach dem Sprühen mit Trinkwasser

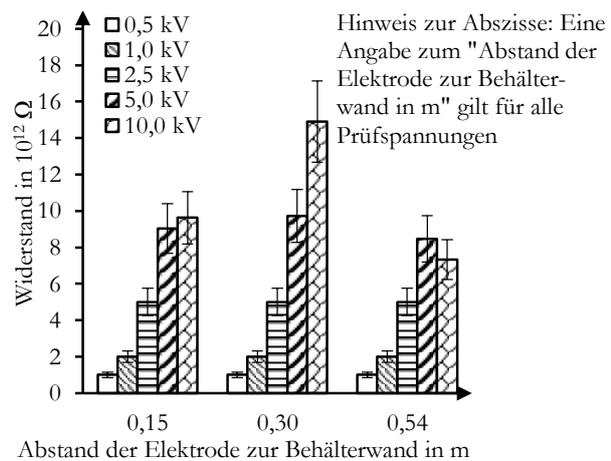


Abbildung 4.16: Widerstand in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand direkt nach dem Sprühen mit vollentsalztem Wasser

Vollentsalztes Wasser besaß mit  $(3,14 \pm 2,67) \cdot 10^{-4} \text{ S/m}$  eine niedrigere elektrische Leitfähigkeit als Trinkwasser mit  $(1,74 \pm 0,09) \cdot 10^{-2} \text{ S/m}$ . Aus diesem Unterschied der elektrischen

Leitfähigkeit resultierten, bei den Widerstandsmessungen direkt nach dem Versprühen, die höheren Widerstandswerte. Im Mittelpunkt des Behälters wurden die geringsten Widerstände gemessen. Diese Tatsache demonstriert, dass ein Ableitpfad von der Elektrode über die Potentialmesssonde zur Behälterwand auszuschließen ist, da die Länge des Ableitpfades maximal ist. Prozessbedingt ergaben sich von der Elektrode über die Tropfen hochohmige Ableitpfade zu Einbauteilen oder der Behälterwand. Zum Beweis dieser These wurden die Messungen während des mittigen Sprühens in den Behälter wiederholt. Betrag der Abstand der Elektrode zur Behälterwand 0,54 m, befand sich die Elektrode direkt im Strahl. Die Widerstandsmessungen beim mittigen Versprühen von Trinkwasser in den Behälter, in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand, sind in Abbildung 4.17 dargestellt. Die beim Versprühen von vollentsalztem Wasser in Abbildung 4.18. Das Versprühen reduzierte die Widerstände um bis zu zwei Größenordnungen. Folglich wurden bei keiner der Prüfspannungen und Abständen der Elektrode zur Behälterwand die Messbereichsendwerte erreicht. Erneut zeigte sich, dass sich bei einem größeren Abstand der Elektrode zur Behälterwand der Widerstand reduzierte. Eine Ausnahme ergab sich bei der niedrigsten Prüfspannung von 0,5 kV, und zeigte den Einfluss der, im Gegensatz zu Trinkwasser, geringeren elektrischen Leitfähigkeit des vollentsalzten Wassers. Direkt im Strahl wurden die geringsten Widerstände von größer  $10^9 \Omega$  gemessen.

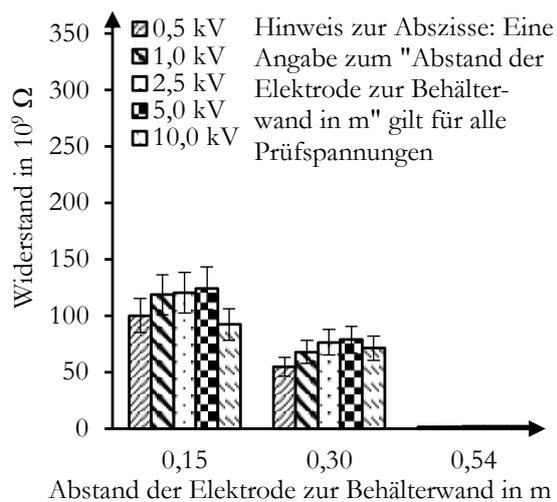


Abbildung 4.17: Widerstand in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand beim Sprühen von Trinkwasser

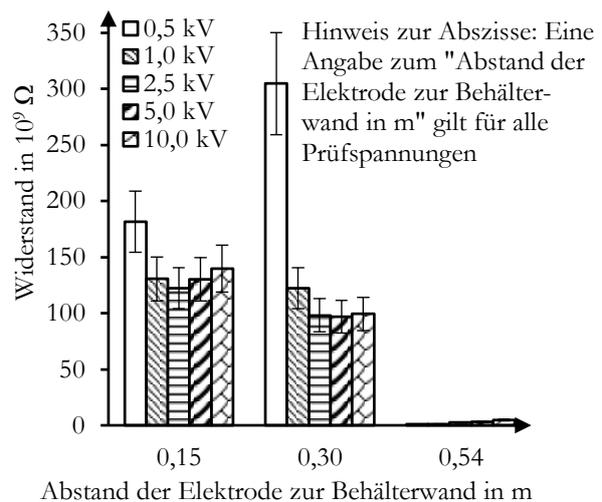


Abbildung 4.18: Widerstand in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand beim Sprühen von vollentsalztem Wasser

Während und direkt nach dem Sprühen war die Isolation des Aufbaus der Raumpotentialmessung maximal mit Wasser benetzt. Der um zwei Größenordnungen reduzierte Widerstand ergab sich jedoch erst beim Sprühen. Weiterhin reduzierte sich während und direkt nach dem Sprühen der Widerstand, wenn der Abstand zwischen Behälterwand und Elektrode zunahm. Aus diesen Gründen ist ein Ableitpfad über die Isolation des Aufbaus der Raumpotentialmessung auszuschließen. Prozessbedingt sind hochohmige Ableitpfade von der Elektrode über die Tropfen des Sprühnebels und Strahls zu geerdeten Einbauteilen oder der Behälterwand möglich. Die Prüfspannung der Widerstandsmessungen erzeugte Potentialdifferenzen zwischen den Tropfen und der Elektrode. Dieser Umstand begünstigte die Bildung von Ableitpfaden. Beim Messen der Potentiale der Tropfen nimmt die Elektrode deren Potentiale an. Die Bildung von Potentialdifferenzen bleibt aus.

Die hochhohmigen Ableitpfade von der Elektrode über den Strahl oder Sprühnebel zur Erde entsprechen den realen Gegebenheiten beim Hochdruckversprühen von Wasser und müssen nicht vermieden werden. Die Isolation des Aufbaus der Raumpotentialmessung ist für Messungen in sprühnebelbelasteter Umgebung geeignet, da sich etwaige Ableitpfade nicht über eben diesen ergeben. Bei größeren Behältern erhöht sich die Länge der Ableitpfade, die zu höheren Widerständen führt. Eine erneute Prüfung der Isolation des Aufbaus der Raumpotentialmessung an größeren Behälter ist deshalb nicht notwendig.

#### 4.5.4 Temperaturmessung des versprühten Wassers im Behälter

Ein Anstieg der Temperatur reduziert die Oberflächenspannung und die dynamische Viskosität von Wasser (Kapitel 2.3). Laut [65] erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit von Wasser durch die Reduzierung der dynamischen Viskosität. Mit dem Anstieg der Temperatur des Wassers erhöht sich weiterhin die Ladungstrennung und die daraus resultierende Aufladung der Tropfen beim Aufprall [30, 31]. Um den Einfluss der Temperatur auf die Ladungstrennung zu untersuchen, ist eine Messung der Temperatur des versprühten Wassers notwendig. Die alleinige Messung der Ausgangstemperatur des Wassers reicht nicht aus, da durch Reibung ein Temperaturanstieg des Wassers erfolgt. Thermoelemente besitzen kleine Krümmungsradien, die im Volumen des Behälters zu Feldverzerrungen und zu einer Reduzierung des Raumpotentials führen können. Es musste eine Messposition gefunden werden, die keinen Einfluss auf das Messergebnis hat und der Temperatur des versprühten Wassers entspricht. Es wurden Thermoelemente an sechs Positionen montiert und die gemessenen Temperaturen verglichen (Abbildung 4.19).

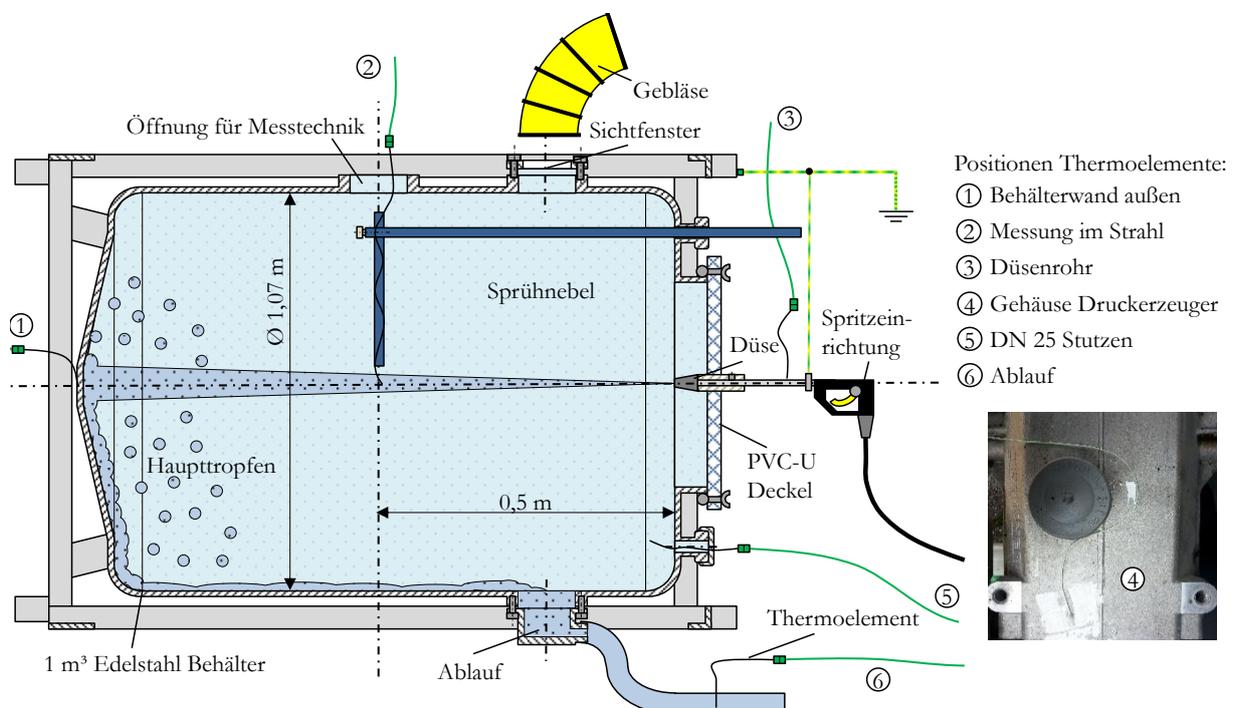


Abbildung 4.19: 1 m<sup>3</sup> Behälter als Modellordnung mit sechs montierten Thermoelementen

An der Stelle der Behälterwand, auf die der Strahl auftraf, war von außen das Thermoelement der Position eins befestigt. Das Thermoelement der Position zwei ragte in den Strahl und war an einem extra dafür vorgesehenen Stativ montiert. Außen am Düsenrohr befand sich das Thermoelement der Position drei. Ergänzend erfolgte eine Temperaturmessung an Position vier, die sich

außerhalb am Gehäuse des Druckerzeugers des Hochdruckreinigers HD 9/50 befand. Das Thermoelement der Position vier bestimmte den Einfluss der Erwärmung des Druckerzeugers auf das versprühte Wasser. Durch den DN 25 Stutzen ragte das Thermoelement der Position fünf in das Innere des Behälters und hatte Kontakt mit dem Sprühnebel. Die Thermoelemente der Position zwei und fünf maßen direkt die Temperatur des Strahls und des Sprühnebels. Das Thermoelement der Position sechs war im Ablauf des Behälters montiert. Es hatte direkten Kontakt zum abfließenden Wasser, ragte wiederum nicht in das Volumen des Behälters. Die Positionen eins, drei, vier und sechs waren nicht im Volumen des Behälters. Es wurde die Abweichung der gemessenen Temperaturen an diesen Positionen von den Werten der Positionen zwei und fünf bestimmt.

Die Temperatur wurde automatisiert mit 100 Samples pro Sekunde gemessen (Kapitel 4.4.1). Für die Versuche wurde der Hochdruckreiniger HD 9/50 verwendet. Die Umgebungstemperatur betrug  $(23 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ . Der Durchmesser der Düse betrug 1,05 mm. Versprüht wurde Trinkwasser für eine Dauer von zehn Minuten. Die Messungen erfolgten bei einem Pumpendruck von 100 bar (Abbildung 4.20) und 500 bar (Abbildung 4.21).

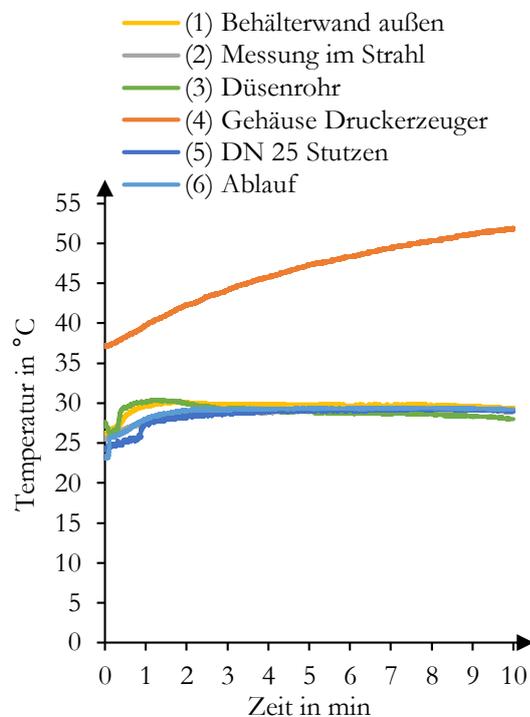


Abbildung 4.20: Temperaturen an den Messpositionen beim Sprühen in den  $1 \text{ m}^3$  Behälter, Pumpendruck 100 bar

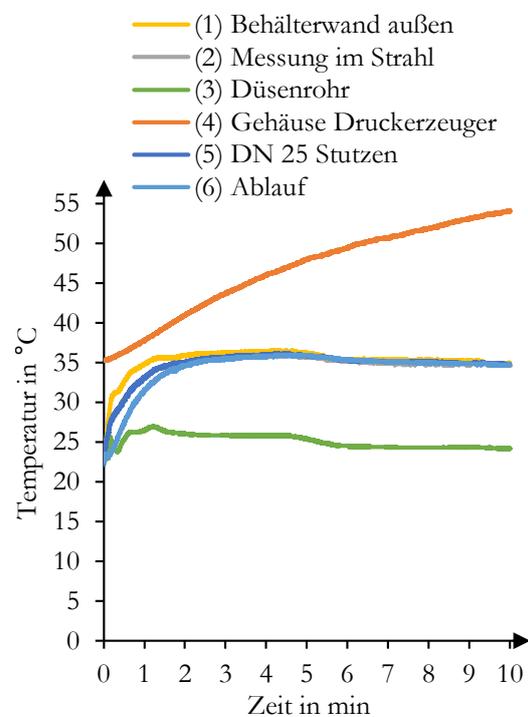


Abbildung 4.21: Temperaturen an den Messpositionen beim Sprühen in den  $1 \text{ m}^3$  Behälter, Pumpendruck 500 bar

Im Volumen des Behälters musste sich zunächst der Gleichgewichtszustand zwischen der Erwärmung des Behälters durch den Strahl und der Abkühlung des Behälters durch die Wärmeabgabe an die Umgebung einstellen. Das erklärt den abnehmenden Anstieg der Temperaturmesskurven der Positionen eins, zwei, fünf und sechs, die sich am und im Behälter befanden.

**(1) Behälterwand außen:** Die am Thermoelement der Position eins, das sich außen an der Behälterwand befand, gemessene Temperatur überstieg die des Thermoelements der Position zwei, das sich im Strahl befand. Das Auftreffen des Strahls erzeugte zusätzlich Wärme, aus diesem Grund war die Temperatur etwas erhöht. Beim realen Prozess der Behälterreinigung wird vom mittigen

Sprühen abgewichen. Die Messposition an der Behälterwand ist dem Aufprallort des Strahls anzupassen. Aufgrund der zusätzlichen Temperaturerhöhung beim Aufprall und der notwendigen Anpassung der Positionierung des Thermoelements ist diese Messposition nicht zu bevorzugen.

**(2) Messung im Strahl:** Die Messkurve des Thermoelements der Position zwei, das sich im Strahl befand, war bei einem Pumpendruck von 100 bar deckungsgleich mit der Messkurve des Thermoelements der Position sechs, das sich im Ablauf befand. Bei einem Pumpendruck von 500 bar war die Messkurve des Thermoelements der Position zwei deckungsgleich mit der Messkurve des Thermoelements der Position fünf, das durch den DN 25 Stutzen in das Volumen des Behälters ragte.

**(3) Düsenrohr:** Die Messkurve des Thermoelements der Position drei, das sich am Düsenrohr befand, entspricht bei 100 bar den Messkurven der Thermoelemente am und im Behälter. Ein Vergleich der Messung am Düsenrohr bei 500 bar zeigt wiederum eine Differenz von rund 10 K. Die Messung der Temperatur am Düsenrohr ist ungeeignet, um auf die Temperatur des versprühten Wassers zu schließen, da eine Temperaturerhöhung durch Reibung in der Düse stattfindet.

**(4) Gehäuse Druckerzeuger:** Die Messkurve des Thermoelements der Position vier, das am Druckerzeuger montiert war, zeigte einen abnehmenden Anstieg der Temperatur. Der Temperaturanstieg des Druckerzeugers korrelierte nicht mit dem Temperaturanstieg des versprühten Wassers. So erhöhte sich die Temperatur, anders als die des versprühten Wassers, nach drei Minuten durch Reibung und dem Verbrennungsmotor weiter. Die Messposition am Druckerzeuger ist ungeeignet, um die Temperatur des versprühten Wassers zu bestimmen. Wie die Temperaturmessungen an dem Düsenrohr und dem Druckerzeuger zeigen, erfolgte eine Wärmeabgabe über die Zuleitung. Die Reibung in der Düse führte zu einem Anstieg der Temperatur des Wassers.

**(5) DN 25 Stutzen:** Bei 100 bar waren der Volumenstrom und die Aufweitung des Strahls, in Relation zu 500 bar, geringer. Aus diesem Grund wurde erst ab einer Minute am Thermoelement der Position fünf der gleiche Anstieg der Temperatur, wie mit dem Thermoelement der Position zwei, das sich im Strahl befand, erfasst. Bei 500 bar wiesen die Messkurven keine Abweichung auf.

**(6) Ablauf:** Am Thermoelement der Position sechs, das sich im Ablauf befand, wurde unabhängig vom Pumpendruck nach drei Minuten die Temperatur des versprühten Wassers gemessen. Die Messposition im Ablauf ist unabhängig vom Winkel der Düse. Es ragt nicht in das Volumen des Behälters und beeinflusst die Messungen des Raumpotential und der elektrischen Feldstärke nicht. Aus diesen Gründen ist die Messung der Temperatur des versprühten Wassers im Ablauf geeignet und wurde für die Durchführung der Versuche genutzt.

Aus den Messungen an den Positionen zwei, fünf und sechs geht hervor, dass die hohe Anzahl eingebrachter Tropfen zu einer ausreichend langen Kontaktzeit der Thermoelemente mit den Tropfen führte und eine hinreichend genaue Messung der Temperatur des versprühten Wassers erlaubte. Die Thermoelemente und deren Stative der Positionen eins bis fünf wurden für die folgenden Messungen des Raumpotential und der elektrischen Feldstärke demontiert. Ein Anstieg des Pumpendrucks von 100 bar auf 500 bar erhöhte die Temperatur des Wassers im versprühten

Zustand um ca. 7 K. Der grobe Richtwert, dass sich die Temperatur des versprühten Wassers bei einem Anstieg des Pumpendruck von 40 bar um 1 K erhöht (Kapitel 2.3), wurde bei dieser Messung um 3 K unterschritten.

#### 4.6 Parameter

Es wurden Düsen des Hochdruckreiniger HD 9/50 vom Hersteller Alfred Kärcher SE & Co. KG [18] und die Düsen im Düsenträger A und Düsenträger T der Flüssigkeitsstrahler des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH [17] verwendet. Die zur Verfügung gestellten Düsen sind in Tabelle 4.2 aufgelistet:

Tabelle 4.2: Düsengeometrie und -durchmesser der Versuche

<b>Hochdruckreiniger HD 9/50:</b>		<b>Flüssigkeitsstrahler Hammelmann:</b>	
Düsengeometrie	Düsensdurchmesser in mm	Düsengeometrie	Düsensdurchmesser in mm
Rund	1,05	Rund	0,50
Rund	1,25	Rund	1,00
Rotation	1,05	Rund	2,00
Flach	1,05 bis 1,10	Rund	4,00
Flach	1,35		

Die Flachstrahldüsen hatten einen Strahlwinkel von 15°. Die Abweichung von einer kreisrunden Bohrung am Düsenaustritt war bei den Flachstrahldüsen vernachlässigbar gering. Die Bestimmung der Düsensdurchmesser erfolgte mit Düsenlehren.

Der maximale Pumpendruck des Hochdruckreinigers HD 9/50 betrug 500 bar. Bei den Flüssigkeitsstrahlern des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH waren Pumpendrucke bis 2500 bar einstellbar. Für die von Hand gehaltenen Spritzeinrichtungen der Flüssigkeitsstrahler gilt eine Begrenzung der Rückstoßkraft von 250 N [17, 21]. In Abhängigkeit vom Düsensdurchmesser war der Pumpendruck zu begrenzen, um den Grenzwert von 250 N einzuhalten. Die untersuchten Kombinationen aus Düsensdurchmesser und Pumpendruck, ergänzt durch die Angaben des Volumenstroms, sind in Anhang E aufgeführt.

Die Versuche erfolgten überwiegend mit dem Hochdruckreiniger HD 9/50, da dieser ohne geschultes Personal betrieben werden konnte. Um einen optimalen Betrieb zu gewährleisten ist laut Hersteller dieser Hochdruckreiniger mit einem Düsensdurchmesser von 1,05 mm zu betreiben. Die Rundstrahldüse wurde gewählt, um an Versuche der Literatur anzuknüpfen. Diese Düse wurde als Standard für die Versuche festgelegt. Auf davon abweichende Düsengeometrien und -durchmesser und der kostenintensiven Nutzung der Flüssigkeitsstrahler der Firma Hammelmann Maschinenfabrik GmbH wird in den nachfolgenden Kapiteln gesondert hingewiesen.

Es ergaben sich folgende elektrische Leitfähigkeiten der für Versuche dieser Arbeit verwendeten Wasserarten (Tabelle 4.3). Die angegebenen Abweichungen in Tabelle 4.3 ergaben sich aus den Messwerten der Proben. Die Vergleichbarkeit zu Angaben der Literatur [66] ist gegeben.

Tabelle 4.3: Elektrische Leitfähigkeiten der verwendeten Wasserarten

Entnahmeort	Wasserart	Gemessene elektrische Leitfähigkeit in S/m bei 25 °C	Elektrische Leitfähigkeit in S/m bei 25 °C aus [66]
Hersteller Merck KGaA, Darmstadt	Vollentsalztes Wasser	$(3,14 \pm 2,67) \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
1 000 l Trinkwasser aus Braunschweig mit 33,5 kg Meersalz	Meerwasser	$5,01 \pm 0,05$	5
BUCHEN Umwelt-Service GmbH, Voerde	Trinkwasser	$(6,22 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
PTB, Braunschweig	Trinkwasser	$(1,74 \pm 0,09) \cdot 10^{-2}$	
Merck KGaA, Darmstadt	Trinkwasser	$(7,53 \pm 2,24) \cdot 10^{-2}$	
	Brauchwasser	$(8,56 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$	-
BASF Coatings GmbH, Münster	Brauchwasser	$(3,30 \pm 0,02) \cdot 10^{-2}$	-

Gegenstand der Untersuchungen dieser Arbeit sind die in Tabelle 4.4 zusammengefassten Parameterbereiche der Behälter, Pumpentechnik, Düsen und des zu versprühenden Wassers:

Tabelle 4.4: Parameterbereiche

Parameter	Einheit	Beschreibung, Wert
<b>Kleine und mittelgroße Behälter</b>		
Werkstoff	-	Leitfähig und geerdet (Metall)
Volumen	m <sup>3</sup>	1,0; 6,2; 16,8; 44,0
Innendurchmesser	m	1,07; 1,40; 1,79; 4,10 (Reduzierung auf 2,5 durch Rührwerke)
Innenlänge	m	1,00; 4,19; 7,04; 4,00
Geometrie	-	Zylinder
<b>Pumpentechnik</b>		
Volumenstrom	l/s	0,09 bis 7,92
Pumpendruck	bar	6 bis 2500
<b>Düse/n</b>		
Werkstoff	-	leitfähig und geerdet (Metall)
Position	-	Mittiges Sprühen oder Sprühen im Winkel
Anzahl Düse/n	Anzahl	1
Geometrie	-	Rund-, Flach- und Rotationsdüse
Durchmesser	mm	0,50 bis 4,00
<b>Wasser</b>		
Bezeichnung	-	Meer-, Brauch-, Trinkwasser und vollentsalztes Wasser
Leitfähigkeit	S/m	Hohe elektrische Leitfähigkeit
Temperatur vor Versprühen	°C	bis 90 (kein Verdampfen)

## 5 Messungen an Strahlen ohne räumliche Begrenzung

Um die Versuche von der Ladungstrennung beim Aufprall des Strahls auf ein Hindernis oder der Behälterwand abzugrenzen, waren Messungen der elektrischen Feldstärke, des Raumpotentials und der übertragenen Ladung an Strahlen ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters durchzuführen. Es wurde die in Kapitel 2.2.2 beschriebene Ladungstrennung an der Düse und die der hydrodynamischen Instabilität im Strahl wirksam. Der aus feinen Tropfen bestehende Sprühnebel verteilte sich in der Umgebung. Die größeren Haupttropfen des Strahls fielen, getrieben durch die Schwerkraft, zu Boden. Es entstand eine räumliche Ladungstrennung der entgegengesetzt geladenen Tropfen (Abbildung 4.1). Ziel der Messungen war die Quantifizierung der Aufladung der Tropfen, ab welchem Abstand zur Düse eine räumliche Ladungstrennung vorlag und ob eine Ladungstrennung bereits an der Düse erfolgte. Die Versuche wurden generell mit der 1,05 mm Rundstrahldüse des Hochdruckreinigers HD 9/50 durchgeführt. Auf die Nutzung davon abweichender Düsen und anderer Flüssigkeitsstrahler wird hingewiesen.

### 5.1 Feldstärkenmessung

Die Messungen der elektrischen Feldstärke erfolgten zunächst mit dem aus Braunschweig stammenden Trinkwasser (Abbildung 5.1). Bei einem Abstand zur Düse von 1,0 m bis 3,0 m wurden positive elektrische Feldstärken bis +1,1 kV/m gemessen. Bis 2,0 m erhöhte sich die positive elektrische Feldstärke bei Drücken ab 200 bar. Mit dem Druck steigt die Geschwindigkeit der Tropfen an (Kapitel 2.4) [17]. Aus diesem Grund fielen bei 100 bar die positiven Tropfen im Strahl bereits bei 2,0 m schwerkraftgetrieben zu Boden. Der Anteil positiver Tropfen wurde reduziert und es folgte eine räumliche Ladungstrennung der entgegengesetzt geladenen Tropfen. Bei Drücken ab 200 bar wurde dies, durch die erhöhte Geschwindigkeit der Tropfen, erst bei einem Abstand zur Düse von 3,0 m beobachtet. Bei 4,0 m überwog der negativ geladene Sprühnebel. Dadurch wurde die elektrische Feldstärke negativ und erreichte Werte bis -1,0 kV/m. Ab 300 bar war bei 4,0 m das Verhältnis der verbleibenden positiven Tropfen und des negativen Sprühnebels ausgeglichen. Es ergaben sich Mittelwerte der elektrischen Feldstärke von rund 0 kV/m. Die hohen Abweichungen vom Mittelwert weisen auf einen Ausgleich der Ladungen der entgegengesetzt geladenen Tropfen bei 3,0 m und 4,0 m innerhalb der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes hin.

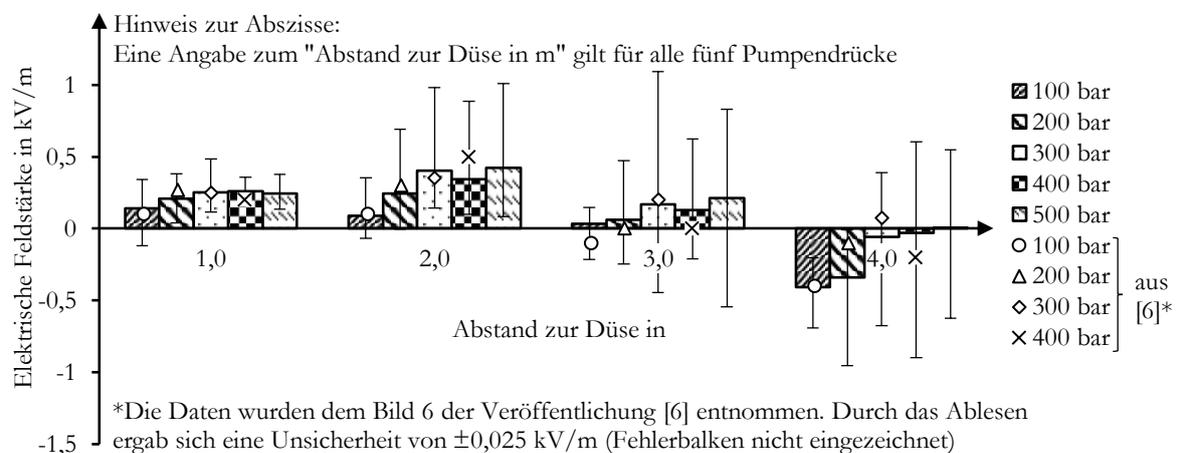


Abbildung 5.1: Elektrische Feldstärke des horizontalen Trinkwasserstrahls in Abhängigkeit vom Abstand zur Düse und Pumpendruck

Ab 300 bar wurde kein nennenswerter Anstieg der elektrischen Feldstärke bei den Abständen zur Düse von 1,0 m, 2,0 m und 3,0 m beobachtet. Der Zusammenhang korreliert mit den in Kapitel 2.4 aufgeführten Messungen der Sauterdurchmesser der versprühten Tropfen in Abhängigkeit vom Pumpendruck und Abstand zur Düse. Während sich der Sauterdurchmesser bei einem Anstieg des Pumpendrucks von 100 bar auf 300 bar reduzierte, war er bei einem Anstieg von 300 bar auf 500 bar annähernd gleich. Folglich lagen im Strahl annähernd gleiche Bedingungen der Ladungstrennung durch die hydrodynamische Instabilität vor.

Der sich aufweitende Strahl erfährt mit zunehmendem Abstand zur Düse und Pumpendruck einen Anstieg der Ladungstrennung durch die hydrodynamische Instabilität. Folglich nehmen der Anteil und die Aufladung der positiv geladenen Tropfen im Strahl zu und ein Anteil des negativ geladenen Sprühnebels wird in der Umgebung verteilt. Die Ladungstrennung an der Düse wurde, bedingt durch die hohe elektrische Leitfähigkeit des Trinkwassers, nicht wirksam (Kapitel 3.3.5).

Der in Abbildung 4.1 gezeigte Versuchsaufbau zur Feldstärkenmessung an einem horizontalen Strahl, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters, ist vergleichbar mit den Messungen aus [6]. In [6] betrug der Pumpendruck 100 bar bis 400 bar, bei einem Düsendurchmesser von 1,20 mm. Die Temperatur und der Volumenstrom des verwendeten Trinkwassers (Ruheleitfähigkeit von  $5 \cdot 10^{-2}$  S/m, gemessen bei 20 °C) ist nicht bekannt. Es erfolgte eine Abschätzung des Volumenstroms durch den Düsenkatalog der Firma Hammelmann [17] (Anhang E). Das Feldstärkenmessgerät war 0,5 m von der Mitte des Strahls angeordnet. Um Fehlmessungen durch Tropfen im Messkopf zu vermeiden, wurde der Messkopf dauerhaft mit Stickstoff gespült. Die in [6] angegebenen Werte werden überwiegend durch die Mittelwerte der im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Messungen reproduziert (Abbildung 5.1). Positive elektrische Feldstärken von bis zu +0,5 kV/m wurden bis 3,0 m nach Düsenaustritt gemessen. Ab 3,0 m nach Düsenaustritt wurde die elektrische Feldstärke negativ. Laut [6] erfolgt dieser Polaritätswechsel durch den ab 3,0 m überwiegenden negativ geladenen Sprühnebel.

## 5.2 Raumpotentialmessung

Die Anteile der positiven Haupttropfen des Strahls und des negativen Sprühnebels wurden bei der Feldstärkenmessung gemittelt (Kapitel 5.1). Aufgrund der Mittelung ist die Erfassung der orts aufgelösten höchsten Aufladungen der Tropfen nicht möglich. Für eine sicherheitstechnische Bewertung ist deshalb ergänzend zur Feldstärken- eine Raumpotentialmessung durchzuführen.

Trinkwasser überschritten die Abweichungen vom Mittelwert nicht die Messungenauigkeit von  $\pm 0,05$  kV des kalibrierten Feldstärkenmessgerätes EMF 58 mit  $\pm 2$  kV Hochspannungsmesskopf.

Vergleichbar zur Feldstärkenmessung (Abbildung 5.1) stieg bis zu einem Abstand zur Düse von 2,0 m das Raumpotential an (Abbildung 5.2). Das Raumpotential betrug maximal  $(0,25 \pm 0,05)$  kV. Bei einem Abstand zur Düse von 3,0 m und 4,0 m reduzierte sich, wie bei der Feldstärkenmessung, das positive Raumpotential. Eine Ausnahme ergab die Raumpotentialmessung bei einem Pumpendruck von 500 bar, bei dem durch die Geschwindigkeit der Tropfen das Raumpotential bei einem Abstand zur Düse von 2,0 m und 3,0 m annähernd konstant blieb.

Durch die orts aufgelöste Raumpotentialmessung reduzieren sich gegenüber den Feldstärkenmessungen die Abweichungen. Es besteht nicht die Gefahr von Falschaussagen, die durch die Mittelung bei der Feldstärkenmessung entstehen können. Bei einem Abstand zur Düse von 3,0 m und 4,0 m ergaben sich bei der Feldstärkenmessung Mittelwerte im Bereich von 0 kV/m. Dadurch kann die Falschaussage getroffen werden, dass keine aufgeladenen Tropfen vorliegen. Die orts aufgelöste

Potentialmessung beweist, dass sich bei einem Pumpendruck von über 300 bar und einem Abstand zur Düse von 3,0 m und 4,0 m noch positiv geladene Tropfen im Strahl befinden und das negative Potential im Sprühnebel vorhanden sein muss.

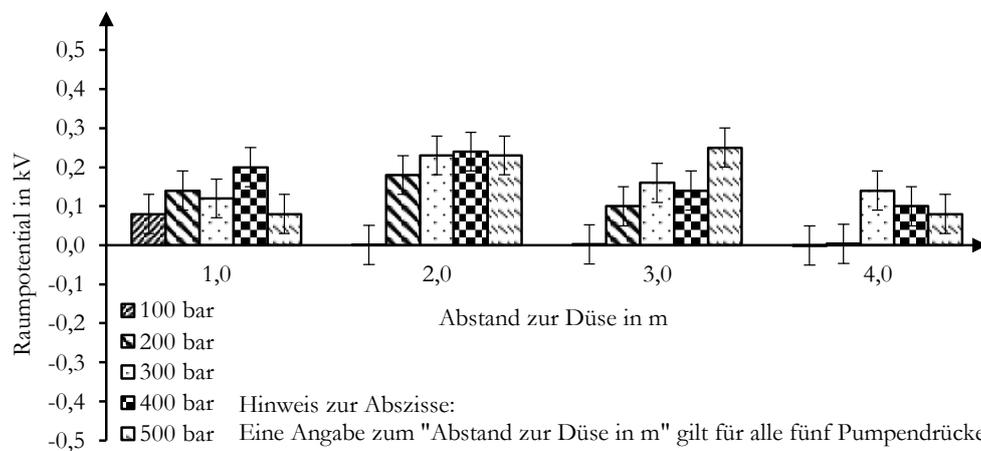


Abbildung 5.2: Raumpotential des horizontalen Trinkwasserstrahls in Abhängigkeit vom Abstand zur Düse und Pumpendruck

Bei der Raumpotentialmessung fand infolge des innigen Kontakts beim Aufprall auf die Elektrode und der schnellen Trennung beim Rückprall von der Elektrode kein nennenswerter Ladungstrennungsprozess statt. Beispielsweise war bei einem Pumpendruck von 500 bar und einem Abstand von 1,0 m zur Düse die Geschwindigkeit der Tropfen mit 169 m/s, im Vergleich zu einem Abstand zur Düse von 2,0 m mit 13 m/s, um ein Vielfaches höher (Kapitel 2.4). Trotz dieser enormen Geschwindigkeitsdifferenz wurden bei einem Abstand zur Düse von 2,0 m höhere Raumpotentiale gemessen und beweisen, dass kein nennenswerter Ladungstrennungsprozess durch den Aufprall des Strahls auf die Elektrode erfolgte. Bei einer ergänzenden Messung, mit einem Abstand zur Düse von 0,5 m und einem Pumpendruck von 500 bar, betrug das Raumpotential  $(0,06 \pm 0,05)$  kV und ist gegenüber dem Raumpotential von  $(0,08 \pm 0,05)$  kV, bei einem Abstand zur Düse von 1,0 m, reduziert. Diese Messung unterstreicht die getroffene Aussage, dass beim Aufprall des Strahls auf die Elektrode kein nennenswerter Ladungstrennungsprozess erfolgte.

Mit den Flüssigkeitsstrahlern des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH wurden Raumpotentialmessungen bei einem Pumpendruck von 2500 bar, bei einem Düsendurchmesser von 1,00 mm (Düsenträger T), durchgeführt. Eine Erhöhung des Pumpendrucks auf 2500 bar ergab bei einem Abstand zur Düse von 0,5 m bis 1,0 m ein Raumpotential von maximal  $(0,27 \pm 0,05)$  kV. Die Messung zeigt, dass eine Erhöhung des Pumpendrucks von 500 bar auf 2500 bar keinen weiteren Anstieg des Raumpotential des Strahls bewirkt und belegt ebenfalls, dass beim Aufprall des Strahls auf die Elektrode kein nennenswerter Ladungstrennungsprozess erfolgt. Im durch die hydrodynamische Instabilität erzeugten Sprühnebel waren Raumpotentiale von bis zu  $(-0,57 \pm 0,05)$  kV messbar und überstiegen das Raumpotential des Strahls um den Faktor zwei.

Nach Gleichung 2.17 kann aus dem gemessenen Raumpotential die elektrische Feldstärke berechnet werden (Tabelle 5.1). Gleichung 2.17 ist nur anzuwenden, wenn eine konstante Raumladungsdichte vorliegt [29]. Diese Bedingung wurde nicht erfüllt, da der positiv geladene Strahl und der negativ geladene Sprühnebel in der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes vorhanden waren. Die berechneten elektrischen Feldstärken entsprechen teilweise den Maximalwerten der gemessenen elektrischen Feldstärke. Der Maximalwert entspricht dem Zeitpunkt, an dem der Anteil des

negativen Sprühnebels innerhalb der Messfläche minimal ist. Dadurch ist eine Vergleichbarkeit mit den Raumpotentialmessungen bedingt möglich, wie die in Tabelle 5.1 aufgeführten Werte belegen:

Tabelle 5.1: Vergleich der aus dem Raumpotential berechneten mit der maximal gemessenen elektrischen Feldstärke

Abstand zur Düse	Elektrische Feldstärke in kV/m in Abhängigkeit vom Pumpendruck									
	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.
	100 bar		200 bar		300 bar		400 bar		500 bar	
1,0 m	0,34	0,32	0,38	0,56	0,49	0,48	0,36	0,80	0,38	0,32
2,0 m	0,36	0,00	0,69	0,72	0,98	0,72	0,89	0,96	1,01	0,92
3,0 m	0,15	0,01	0,47	0,40	1,09	0,64	0,62	0,56	0,83	1,00
4,0 m	-0,20	0,00	-0,01	0,02	0,39	0,56	0,60	0,40	0,55	0,32

gem. = gemessen ber. = berechnet

Unsicherheit zwischen der berechneten und maximal gemessenen elektrischen Feldstärke:

■  $\leq 0,10$  kV/m      □  $\leq 0,20$  kV/m      □  $> 0,20$  kV/m

Blau sind die elektrischen Feldstärken mit einer Unsicherheit von 0,10 kV/m oder weniger, in hellblau mit einer Unsicherheit von 0,20 kV/m oder weniger und ohne farbliche Hinterlegung mit einer Unsicherheit von über 0,20 kV/m gekennzeichnet.

Bestätigt wird durch den Vergleich der berechneten mit den maximalen gemessenen Werten der elektrischen Feldstärke, dass der Mittelwert der elektrischen Feldstärke aus der Mittelung des mit dem Abstand zur Düse zunehmenden negativ geladenen Sprühnebels und der positiven Haupttropfen des Strahls innerhalb der Messfläche resultiert.

### 5.3 Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers

Ziel war es den Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit auf die Ladungstrennung an der Düse und durch die hydrodynamische Instabilität zu untersuchen. Dafür wurden die am Strahl aus Trinkwasser durchgeführten Raumpotentialmessungen mit Meerwasser und vollentsalztem Wasser wiederholt. Der Pumpendruck des Hochdruckreinigers HD 9/50 betrug 500 bar. Die in Kapitel 3.3.5 beschriebenen Raumladungsdichten des Strahls beim Versprühen von vollentsalztem Wasser [19] und die in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Raumpotentiale beim Versprühen von Meerwasser in Schiffstanks [11], gaben Anlass zur Nutzung des  $\pm 40$  kV Hochspannungsmesskopfes bei Messungen des Raumpotentials.

Die Messunsicherheit der Raumpotentialmessungen beim Versprühen von Meerwasser betrug, in Abhängigkeit des gewählten Messbereiches, bei einem Abstand zur Düse von 0,5 m  $\pm 0,1$  kV und bei einem Abstand zur Düse von 1,0 m, 2,0 m und 3,0 m  $\pm 0,025$  kV. Im Gegensatz zu Trinkwasser war der Mittelwert des Raumpotentials bei Meerwasser zunächst bei ca. 0 kV und wurde mit steigendem Abstand zur Düse negativ (Abbildung 5.3, links). Die positiven Abweichungen bei 1,0 m und 2,0 m und das mit dem Abstand zur Düse ansteigende negative Raumpotential weisen auf einen positiv geladenen Sprühnebel hin. Bei einem Abstand zur Düse von 3,0 m wurde das negativste Raumpotential von -0,22 kV gemessen. In Hinsicht auf die geringen Raumpotentiale und um die Messtechnik nicht unnötig mit Meerwasser zu beaufschlagen, wurde auf eine Messung bei einem Abstand von 4,0 m verzichtet. Meerwasser wurde bei Pumpendrücken der Flüssigkeitsstrahler von über 500 bar nicht versprüht und begründet das Auslassen weiterer Messungen bei

höheren Pumpendrücken<sup>15</sup>. Durch Messungen des Raumpotentials am Strahl aus Meerwasser war keine gefährlich hohe Ladungstrennung an der Düse nachweisbar. Die Ladungstrennung durch die hydrodynamische Instabilität wird, wie bei Trinkwasser, nur schwach wirksam.

Die Messunsicherheit der Raumpotentialmessungen beim Versprühen von vollentsalztem Wasser betrug  $\pm 1,0$  kV. Beim Versprühen von vollentsalztem Wasser überschritten die gemessenen negativen Raumpotentiale, bei einem Abstand zur Düse von 0,5 m und 1,0 m, den Messbereich der Messtechnik von  $\pm 40$  kV (Abbildung 5.3, rechts). Das negativste messbare Raumpotential betrug  $-48,04$  kV, gemessen bei einem Abstand zur Düse von 0,5 m. Es gilt zu beachten, dass das tatsächlich vorliegende Raumpotential, aufgrund der Überschreitung des Messbereichs, höher liegen kann. Bei einem Abstand zur Düse von 2,0 m betrug der Mittelwert des Raumpotentials ca. 0 kV. Ab 3,0 m wurde das Raumpotential positiv und erreichte Werte bis  $+7,32$  kV. Bei höheren Pumpendrücken wird ein weiterer Anstieg des Raumpotentials erwartet, der den Messbereich von  $\pm 40$  kV überschreitet. Die hohe Aufladung wurde daher durch die Betrachtung und Durchführung von Feldstärkenmessungen an Strahlen aus vollentsalztem Wasser weiter untersucht.

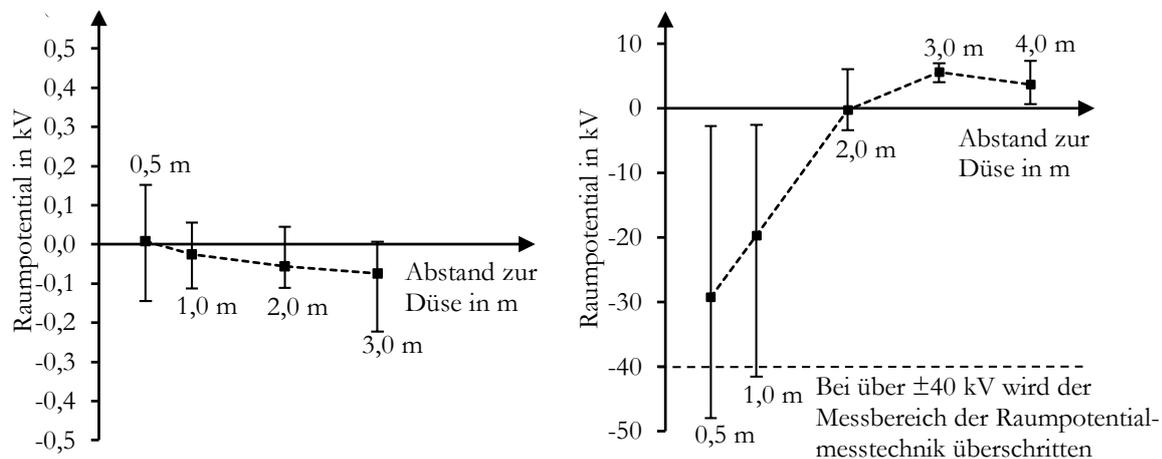


Abbildung 5.3: Raumpotential am horizontalen Strahl aus Meerwasser (links) und vollentsalztem Wasser (rechts) in Abhängigkeit vom Abstand zur Düse bei 500 bar

In [22] wurden Messungen der elektrischen Feldstärke mit dem Feldstärkenmessgerät JCI 131 an einem horizontalem Strahl aus vollentsalztem Wasser durchgeführt. Der Pumpendruck betrug 300 bar und die rotierende Rundstrahldüse besaß einen Durchmesser von 1,05 mm. Der Volumenstrom entsprach dem des Hochdruckreinigers HD 9/50 (Anhang E). Der Abstand zum Mittelpunkt des Strahls ist unbekannt. Der Abstand zur Düse betrug 2,0 m bis 15,0 m. Es wurden positive elektrische Feldstärken bis  $+400$  kV/m gemessen. Nach der Durchsicht der Abbildungen der Versuche aus [22], wurde ein Abstand zum Mittelpunkt des Strahls von 0,25 m bis 1,00 m angenommen. Eine Berechnung des Raumpotentials nach Gleichung 2.17, anhand der gemessenen elektrischen Feldstärke von  $+400$  kV/m, ergibt ein Raumpotential von  $+50$  kV bis  $+200$  kV. Dieses berechnete Raumpotential übersteigt die gemessenen Raumpotentiale von bis zu  $+7,32$  kV (Abbildung 5.3, rechts) um eine Größenordnung. Gleiches gilt, wenn aus dem Raumpotential von  $+7,32$  kV die elektrische Feldstärke mit  $+14,6$  kV/m bis  $+58,6$  kV/m berechnet wird.

Zur Prüfung des Auftretens der elektrischen Feldstärke von bis zu  $400$  kV/m der Versuche aus [22] erfolgten im Zuge dieser Arbeit vergleichbare Messungen der elektrischen Feldstärke an einem

<sup>15</sup> Resultat der im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Befragung der Hersteller und Betreiber von Flüssigkeitsstrahlern.

horizontalen Strahl nicht rotierender Düsen aus vollentsalztem Wasser. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Das Feldstärkenmessgerät war, wie in Anhang C beschrieben, angeordnet. Vergleichbar zu [22] betrug der Düsendurchmesser 1,00 mm (Düsenräger A) und der Pumpendruck 300 bar. Die gemessenen elektrische Feldstärken von  $-31,4$  kV/m bis  $+13,5$  kV/m (Abbildung 5.4) sind ungleich dem Wert aus [22] von bis zu  $+400$  kV/m. Eine Berechnung des Raumpotentials aus der gemessenen elektrischen Feldstärke dieser Arbeit ergibt  $-7,85$  kV bis  $+3,38$  kV und ist, unter Beachtung des auf 300 bar reduzierten Pumpendrucks, in der Größenordnung der Raumpotentialmessung bei einem Pumpendruck von 500 bar (Abbildung 5.3, rechts).

Bei einem Pumpendruck von über 300 bar erfolgten die Messungen bis zu einem Abstand zur Düse von 3,0 m (Abbildung 5.4). Ein Pumpendruck von 2500 bar (Düsenräger T) erhöhte die elektrische Feldstärke auf bis zu  $+65,0$  kV/m. Eine Reduzierung des Düsendurchmessers auf 0,50 mm (Düsenräger A) führte bei einem Pumpendruck von 1500 bar zu elektrischen Feldstärken von bis zu  $+184,8$  kV/m.

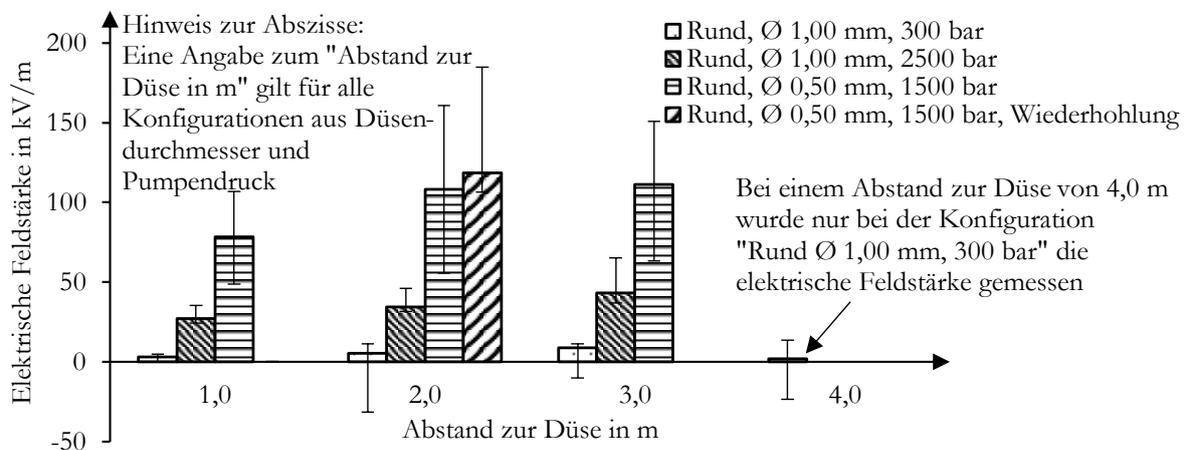


Abbildung 5.4: Elektrische Feldstärken am horizontalen Strahl aus vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit vom Abstand zur Düse, Pumpendruck und Düsendurchmesser

In Kapitel 3.3.5 sind die in [19] bestimmten Raumladungsdichten aufgeführt. Ab einem Pumpendruck von 700 bar war bei den untersuchten Düsendurchmesser von 0,6 mm und 0,8 mm kein Anstieg der Raumladungsdichte mit einer Erhöhung des Pumpendrucks zu beobachten. Es wird angenommen, dass auch bei einem Düsendurchmesser von 1,0 mm bei über 700 bar kein weiterer Anstieg der Raumladungsdichte erfolgt. Unter Beachtung der getroffenen Annahme, dass ab 700 bar kein weiterer Anstieg der Raumladungsdichte erfolgt, entspricht der Anstieg der elektrischen Feldstärke von  $+65,0$  kV/m bei 2500 bar und einem Düsendurchmesser von 1,00 mm (Düsenräger T) auf eine gemessene elektrische Feldstärke von  $+184,8$  kV/m bei 1500 bar und einem Düsendurchmesser von 0,5 mm (Düsenräger A), wie in [19] einer Erhöhung um das Drei- bis Vierfache, wenn der Düsendurchmesser von 1,0 mm auf 0,6 mm reduziert wurde.

Anhand der durchgeführten Messungen ist bewiesen, dass die elektrische Leitfähigkeit die Ladungstrennung an der Düse und die Ladungstrennung durch die hydrodynamische Instabilität im Strahl beeinflusst. In Kapitel 2.2.3 wurden die aus [11] bekannten Polaritäten des Strahls und Sprühnebels, in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit (Salinität) des Wassers, beschrieben. Die Polaritäten stimmen mit den Polaritäten der durchgeführten Messungen des Raumpotentials und der elektrischen Feldstärke bei Trink- und Meerwasser überein. Eine Ausnahme bildet das Versprühen von vollentsalztem Wasser. Durch die Ladungstrennung an der Düse weisen die

Tropfen des Strahls bereits eine negative Überschussladung auf und kehren die in [11] beschriebenen Polaritäten um. So ist der Strahl aus vollentsalztem negativ und der sich durch die hydrodynamische Instabilität ablösende Sprühnebel positiv geladen.

#### 5.4 Messung der übertragenen Ladung

Es galt zu prüfen, ob sich die aufgeladenen Tropfen des Strahls und/oder Sprühnebels gegenüber leitfähigen geerdeten Einbauteilen oder der Behälterwand entladen können. Die Ladungstrennung an der Düse generierte bei vollentsalztem Wasser elektrische Feldstärken von bis zu +184,8 kV/m und negative Raumpotentiale von unter -48,04 kV (Kapitel 5.3). Im Folgenden wird auf die durchgeführten Messungen der übertragenen Ladung an diesen hoch aufgeladenen Strahlen und Sprühnebeln eingegangen. Die gemessenen Raumpotentiale von bis zu  $\pm 0,5$  kV und Feldstärken von rund  $\pm 1$  kV/m beim Versprühen von Trink- und Meerwasser gaben keinen Anlass zur Durchführung von Messungen der übertragenen Ladung.

**Handcoulombmeter:** Mit dem Handcoulombmeter wurden Messungen der übertragenen Ladung an horizontalen Strahlen aus vollentsalztem Wasser, erzeugt durch die Flüssigkeitsstrahler des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH, durchgeführt. Am Handcoulombmeter war die vom Hersteller vorgesehene Kugelelektrode, mit einem Krümmungsradius von 0,0100 m, montiert. Der Pumpendruck und der Düsendurchmesser wurden, wie in Tabelle 5.2 aufgelistet, variiert:

Tabelle 5.2: Mit dem Handcoulombmeter gemessene übertragene Ladung am Strahl aus vollentsalztem Wasser

	Düsendurchmesser in mm	Pumpendruck in bar	Messposition	Übertragene Ladung in nC
Flüssigkeitsstrahler Hammelmann	0,50 (Düsenträger A)	1500	Strahl	k. E.
	0,50 (Düsenträger A)	1500	Kontakt des Strahls über die Elektrode zur Düse	$-40,4 \pm 27,5$
	0,50 (Düsenträger A)	500	Strahl	k. E.
	0,50 (Düsenträger A)	500	Kontakt des Strahls über die Elektrode zur Düse	$-15,5 \pm 3,5$
	2,00 (Düsenträger A)	500	Strahl	k. E.
	2,00 (Düsenträger A)	500	Kontakt des Strahls über die Elektrode zur Düse	k. E.
	2,00 (Düsenträger A)	200	Strahl	k. E.
	2,00 (Düsenträger A)	200	Kontakt des Strahls über die Elektrode zur Düse	k. E.

k. E. = keine Entladung messtechnisch detektierbar

Die Düse war leitfähig und wie das Handcoulombmeter geerdet. Beim Versprühen war an der Düse keine übertragene Ladung mit dem Handcoulombmeter messbar. Das Heranführen der Kugelelektrode des Handcoulombmeters an den Strahl aus vollentsalztem Wasser, bei einem Pumpendruck von 1500 bar und einem Düsendurchmesser von 0,50 mm, führte ebenfalls zu keiner messbaren übertragenen Ladung. Wasser auf der Kugelelektrode des Handcoulombmeters bildete,

ausgelöst durch das sich ausbildende elektrische Feld, bei Annäherung an den aufgeladenen Strahl Taylor-Kegel aus (Abbildung 5.5) [29]. Wiederholt traten, neben den Taylor-Kegeln, durch die Flüssigkeitsbrückenbildung fadenähnliche Gebilde zwischen der Kugelelektrode des Handcoulombmeter und dem Strahl auf, die optisch vergleichbar mit einer Gasentladung waren (Abbildung 5.6). Die Flüssigkeitsbrückenbildung trat genauso entgegen der Richtung des Strahls auf.

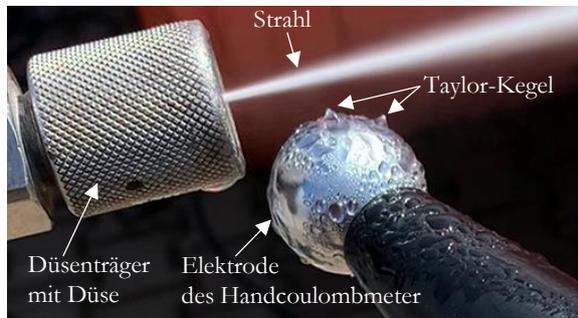


Abbildung 5.5: Ausbildung von Taylor-Kegeln zwischen Elektrode und Strahl

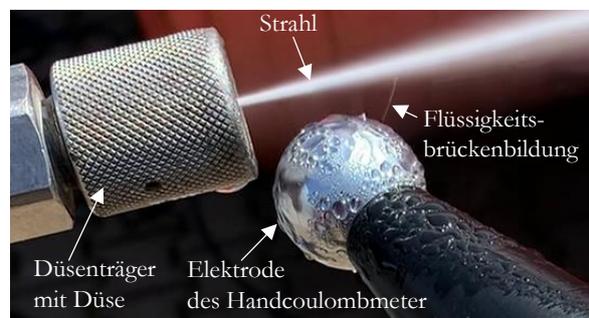


Abbildung 5.6: Ausbildung der Flüssigkeitsbrückenbildung zwischen Elektrode und Strahl

Auf dem Display des Handcoulombmeters wurde ein Messwert der übertragenen Ladung angezeigt, wenn die Elektrode des Handcoulombmeters über einen Wassertropfen Kontakt zwischen dem Strahl und der geerdeten leitfähigen Düse herstellte (Abbildung 5.7). Bei einem Pumpendruck von 1500 bar und einem Düsendurchmesser von 0,50 mm betrug die gemessene übertragene Ladung  $(-40,4 \pm 27,5)$  nC. Eine Reduzierung des Pumpendrucks auf 500 bar, bei gleichbleibendem Düsendurchmesser, führte zu einer übertragenen Ladung von  $(-15,5 \pm 3,5)$  nC. Folglich reduziert sich die Aufladung des Strahls mit dem Pumpendruck. Die in dieser kontaktbehafteten Konfiguration gemessenen übertragenen Ladungen resultieren nicht aus einer Gasentladung und bleiben, in Hinsicht auf eine sicherheitstechnische Bewertung, unbeachtet.

Betrag der Düsendurchmesser 2,00 mm, bei einem Pumpendruck von 200 bar und 500 bar, waren am Strahl und beim Kontakt des Strahls über die Elektrode des Handcoulombmeters zur leitfähigen geerdeten Düse keine übertragenen Ladungen mit dem Handcoulombmeter messbar.

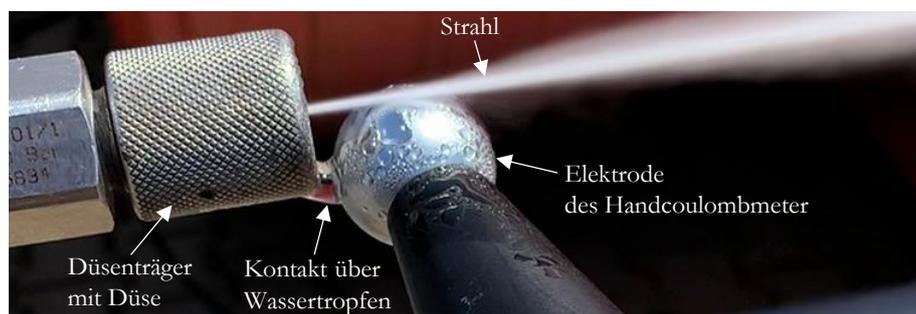


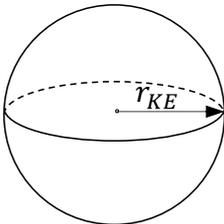
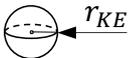
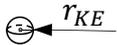
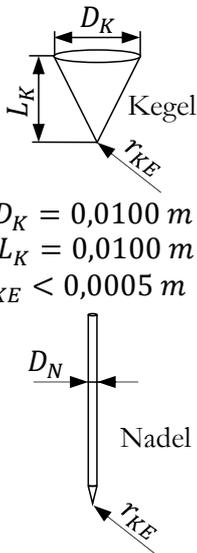
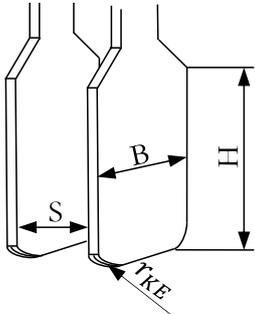
Abbildung 5.7: Kontakt des Strahls über die Elektrode des Handcoulombmeters zur geerdeten leitfähigen Düse

Mit dem Handcoulombmeter waren keine sicherheitstechnisch zu bewertenden übertragenen Ladungen am Strahl und Sprühnebel messbar. Bedingt durch die Messtechnik sind nur Gasentladungen detektierbar, die eine übertragene Ladung von über 5 nC besitzen (Kapitel 4.4.3). Treten Gasentladungen am Strahl und/oder Sprühnebel gegenüber leitfähigen geerdeten Einbauteilen oder der Behälterwand auf, muss deren übertragene Ladung unter 5 nC betragen.

**Shunt:** Mit dem Shunt wurden Messungen der übertragenen Ladung an horizontalen Strahlen aus vollentsalztem Wasser durchgeführt. Anders als mit dem Handcoulombmeter waren übertragene Ladungen von unter 5 nC messbar (Kapitel 4.4.3). Der Hochdruckreiniger HD 9/50 erzeugte einen Pumpendruck von 100 bar, 300 bar und 500 bar. Der Düsendurchmesser betrug 1,05 mm oder 1,25 mm. Erweitert wurden die Messreihen durch das Versprühen von vollentsalztem Wasser durch die Flüssigkeitsstrahler des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH. Der Flüssigkeitsstrahler erzeugte einen Pumpendruck von 1500 bar, bei einem Düsendurchmesser von 0,5 mm. Diese Konfiguration aus Pumpendruck und Düsendurchmesser wurde verwendet, da bei dieser die höchsten elektrischen Feldstärken auftraten (Kapitel 5.3) und beim Kontakt des Strahls über die Elektrode des Handcoulombmeters zur leitfähigen geerdeten Düse die höchsten übertragenen Ladungen messbar waren.

Kleinere Krümmungsradien von Einbauteilen erhöhen die übertragene Ladung, ausgehend von aufgeladenen Flüssigkeitsoberflächen [46, 69]. Aus diesem Grund und zur Nachbildung von Geometrien möglicher Einbauteile oder der Behälterwand wurden sechs unterschiedliche Elektroden verwendet. Für die Messungen der übertragenen Ladung wurden die Elektroden am im Isolationsstab befindlichen Shunt (Kapitel 4.4.3) montiert und an den Strahl und Sprühnebel aus vollentsalztem Wasser herangeführt. Die Geometrien der Elektroden sind in Tabelle 5.3 aufgezeigt:

Tabelle 5.3: Geometrien der Elektroden für Messungen der übertragenen Ladung mit dem Shunt

Kugelelektroden	Spitzenelektroden	Füllstandsensor
 <p><math>r_{KE} = 0,0125 \text{ m}</math></p>  <p><math>r_{KE} = 0,0030 \text{ m}</math></p>  <p><math>r_{KE} = 0,0015 \text{ m}</math></p>	 <p><math>D_K = 0,0100 \text{ m}</math>  <math>L_K = 0,0100 \text{ m}</math>  <math>r_{KE} &lt; 0,0005 \text{ m}</math></p> <p><math>D_N = 0,0010 \text{ m}</math>  <math>r_{KE} &lt; 0,0005 \text{ m}</math></p>	 <p><math>B = 0,0173 \text{ m}</math>  <math>H = 0,0220 \text{ m}</math>  <math>S = 0,0100 \text{ m}</math>  <math>r_{KE} = 0,0005 \text{ m}</math></p>

Die Kugelelektroden wiesen einen Krümmungsradius  $r_{KE}$  von 0,0125 m, 0,0030 m und 0,0015 m auf. Die Grundfläche der Kegelelektrode besaß einen Durchmesser  $D_K$  von 0,0100 m. Der Krümmungsradius der sich auf einer Länge  $L_K$  von 0,0100 m ausbildenden Spitze betrug weniger als 0,0005 m. Weiterhin wurde eine Nadelspitze verwendet. Der Durchmesser  $D_N$  des Nadelskörpers betrug 0,0010 m und die Spitze besaß einen Krümmungsradius von unter 0,0005 m. Ein reales Einbauteil wurde durch die Gabel des Füllstandensors nachgebildet. Diese bestand aus zwei, mit einem Abstand  $S$  von 0,0100 m, parallel angeordneten Platten. Die Platten besaßen eine

Breite  $B$  von 0,0173 m und eine Höhe  $H$  von 0,0220 m. Die untere, der Flüssigkeit zugewandten Kante hatte einen Krümmungsradius von 0,0005 m.

Die Messungen der übertragenen Ladung erfolgten bis zu einem Abstand zur Düse von 3,0 m. Die Elektrode wurde langsam an den horizontalen Strahl herangeführt, bis ein Signal detektiert wurde oder sich die Elektrode unmittelbar im Strahl befand. Die in Tabelle 5.4 aufgeführten Werte wurden bei einem Abstand zur Düse von 0,01 m bis 0,10 m gemessen. Bei größeren Abständen von der Düse waren keine Entladungen messbar.

Tabelle 5.4: Mit dem Shunt gemessene übertragene Ladungen am Strahl aus vollentsalztem Wasser

	Düsen- durchmesser in mm	Pumpendruck in bar	Elektroden- geometrie	Krümmungs- radius in m	Übertragene Ladung in nC	
					positiv	negativ
Hochdruckreiniger HD 9/50	1,05	500	Kugel	0,0125	k. E.	k. E.
	1,05	100	Kugel	0,0015	k. E.	k. E.
	1,05	300	Kugel	0,0015	0,038	-0,008
	1,05	500	Kugel	0,0015	0,029	-0,023
	1,05	500	Kegel	< 0,0005	0,047	-0,141
	1,05	300	Nadel	< 0,0005	0,058	-0,037
	1,05	500	Nadel	< 0,0005	0,107	-0,158
	1,25	340	Nadel	< 0,0005	0,114	-0,029
Flüssigkeitsstrah- ler Hammelmann	0,50 (Typ A)	1500	Kugel	0,0125	k. E.	-0,160
	0,50 (Typ A)	1500	Kugel	0,0030	k. E.	k. E.
	0,50 (Typ A)	1500	Kugel	0,0015	k. E.	k. E.
	0,50 (Typ A)	1500	Füllstand- -sensor	0,0005	k. E.	k. E.

k. E. = keine Entladung messtechnisch, optisch oder akustisch detektierbar

Bei der Kugelelektrode, mit einem Krümmungsradius von 0,0125 m waren keine Entladungen, bei einem Pumpendruck von 500 bar des Hochdruckreinigers HD 9/50 und einem Düsendurchmesser von 1,05 mm, messbar. Die Reduzierung des Krümmungsradius der Kugelelektrode auf 0,0015 m generierte eine übertragene Ladung von bis zu 0,038 nC, bei einem Pumpendruck von 300 bar. Die Erhöhung des Pumpendrucks auf 500 bar erzeugte maximal eine übertragene Ladung von 0,029 nC. Eine Reduzierung des Pumpendrucks auf 100 bar führte zu keiner messbaren Gasentladung. Bei Krümmungsradien von unter 0,0005 m wurden übertragene Ladung von bis zu -0,158 nC, bei einem Pumpendruck von 500 bar, gemessen. Messungen bei geringeren Pumpendrücken mit den Elektroden, die einen Krümmungsradius von unter 0,0005 m besaßen, ergaben betragsmäßig niedrigere übertragene Ladungen.

Bei den Messungen der übertragenen Ladung am horizontalen Strahl aus vollentsalztem Wasser des Hochdruckreinigers HD 9/50, mit einem maximalen Pumpendruck von 500 bar, wurde immer zuerst ein positiver, direkt gefolgt von einem negativen Spitzenwert gemessen (Abbildung 5.8). Vor und nach den Spitzenwerten war die Messkurve deckungsgleich mit der Nulllinie (0 mV). Die Zeit

pro Division entsprach 20 ns und die Spannung pro Division 10 mV. Die Messung erfolgte mit dem Oszilloskop MSO54 des Herstellers Tektronix.

Der sich vom Strahl ablösende Sprühnebel war positiv geladen. Der verbleibende Strahl negativ (Kapitel 5.3). Vor dem Ablösen kam es zur Bildung elektrochemischer Doppelschichten, die sich am Rand des Tropfens bildeten. Der durch die Ladungstrennung an der Düse negativ geladene Tropfen verdrängte die verbliebenen positiven Ladungsträger in den Randbereich des Tropfens. Bei Kontakt mit der Elektrode wurden zunächst die positiven Ladungsträger im Randbereich, der sich durch die hydrodynamische Instabilität ablösen würde, gemessen. Direkt im Anschluss wurde der Anteil negativer Ladungsträger im Inneren des Tropfens gemessen. Es gilt zu beachten, dass mit großer Wahrscheinlichkeit die Übertragung der Ladung durch den Kontakt der Elektrode mit dem Tropfen erfolgte. Es wurde somit der Stromimpuls einer Kontaktentladung erfasst.

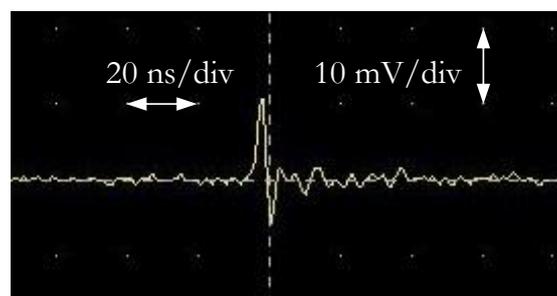


Abbildung 5.8: Positiver und negativer Spitzenwert der Messkurve des Shunts bei der Messung der übertragenen Ladung mit der Nadelelektrode (Krümmungsradius unter 0,0005 m)

Bei den Messungen der übertragenen Ladung am horizontalen Strahl aus vollentsalztem Wasser des Flüssigkeitsstrahlers des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH, mit einem Pumpendruck von 1500 bar und einem Düsendurchmesser von 0,50 mm, wies die Messkurve des Shunts einen negativen Spitzenwert auf (Abbildung 5.9). Das Signal des Shunts ist als rote Kurve dargestellt. Vor und nach dem Spitzenwert wies die Messkurve ein Offset von über 2 mV auf. Die Zeit pro Division entsprach 20 ns und die Spannung pro Division 2 mV. Die Messung erfolgte mit dem Oszilloskop Wave-Runner 62 Xi des Herstellers Teledyne LeCroy. Der Offset entstand durch Koronaentladungen an den Taylor-Kegeln. Der negative Spitzenwert der durchgeführten Messungen besaß eine übertragene Ladung von bis zu -0,160 nC. Der Spitzenwert trat zeitgleich mit den Flüssigkeitsbrücken auf. Durch den Offset ergab sich, anders als bei Messungen der übertragenen Ladung am Strahl aus vollentsalztem Wasser des Hochdruckreinigers HD 9/50 (Abbildung 5.8), kein positiver Spitzenwert. Der Offset trat in gleicher Weise bei den anderen untersuchten Krümmungsradien der Elektroden auf.

Zum Nachweis, dass es sich bei dem Offset um Koronaentladungen handelte, die bedingt durch die sich zu Taylor-Kegeln ausformenden Wassertropfen auftraten, wurden Messungen der übertragenen Ladung an der trockenen und mit Wasser benetzten Kugelelektrode des Shunts, mit einem Krümmungsradius von 0,0125 m, durchgeführt (Anhang F). Die provozierten Gasentladungen wurden am Plattenrand der am Gleichspannungsgenerator (-70 kV Leerlaufspannung) montierten Fakirelektrode erzeugt. Die so nachgestellten Bedingungen der Messungen der übertragenen Ladung am Strahl wiesen das Auftreten des Offsets durch Koronaentladungen nach.

Anders als bei den Messungen der übertragenen Ladung mit dem Handcoulombmeter war keine übertragene Ladung messbar, wenn durch die Elektrode des Shunts ein Kontakt zwischen

dem Strahl und der leitfähigen geerdeten Düse hergestellt wurde. Das Ausbleiben bestätigt, dass es sich bei den so mit dem Handcoulombmeter gemessenen übertragenen Ladungen nicht um Gasentladungen handelt, die sicherheitstechnisch zu bewerten sind.

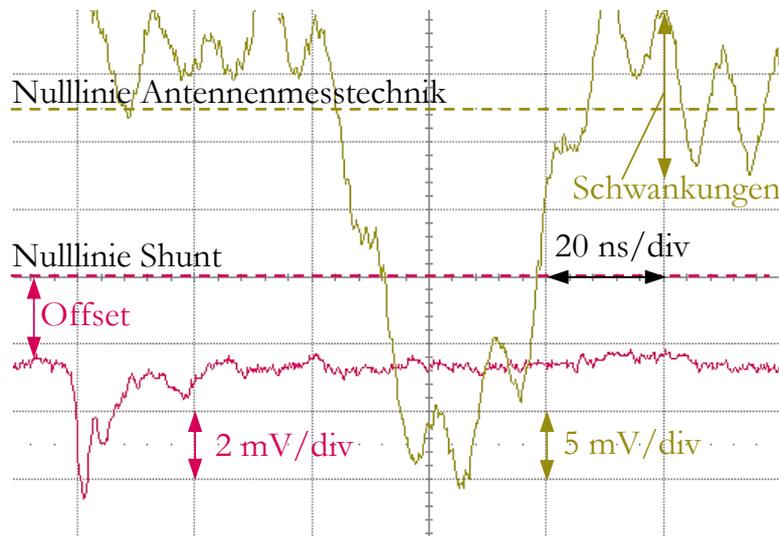


Abbildung 5.9: Negativer Spitzenwert der Messkurve des Shunts (rot) und der Antennenmesstechnik (gold) bei der Messung der übertragenen Ladung mit der Kugelelektrode mit einem Krümmungsradius von 0,0125 m

Durch die Messungen der übertragenen Ladung mit dem Shunt wird die in [46, 69] getroffene Aussage bestätigt, dass sich die übertragene Ladung, ausgehend von Flüssigkeitsoberflächen, mit einem kleiner werdenden Krümmungsradius der Elektrode erhöht. Weiterhin bestätigen die Messungen, dass die übertragenen Ladungen unter 5 nC betragen und eine Messung mit dem Handcoulombmeter nicht möglich ist.

**Antennenmesstechnik:** Bei den Messungen der übertragenen Ladung mit dem Shunt an horizontalen Strahlen aus vollentsalztem Wasser, die mit dem Flüssigkeitsstrahler des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH erzeugt wurden, war zeitgleich am Oszilloskop die Antennenmesstechnik angeschlossen. Der Pumpendruck betrug 1500 bar, bei einem Düsendurchmesser von 0,50 mm. Wie mit dem Shunt war mit der Antennenmesstechnik ein negativer Spitzenwert messbar. Das Signal der Antenne ist in Abbildung 5.9 als goldene Kurve abgebildet. Die Zeit pro Division entsprach 20 ns und die Spannung pro Division 5 mV. Als waagerechte gestrichelte goldene Linie ist die Nulllinie des Signals der Antennenmesstechnik dargestellt. Die Schwankungen um die Nulllinie waren dauerhaft vorhanden. Die Detektion der Gasentladung mit der Antennenmesstechnik erfolgte einige zehn Nanosekunden nach der Detektion der Gasentladung mit dem Shunt. Anhand der Antennenmesstechnik ist das Auftreten von Gasentladungen nachweisbar, die einen Plasmakanal ausbilden (Kapitel 4.4.3). Mit der Antennenmesstechnik konnte ergänzend festgestellt werden, dass neben der Ausbildung der Flüssigkeitsbrücken eine Gasentladung mit Plasmakanal zwischen dem Strahl und der Elektrode des Shunts erfolgte.

## 5.5 Schlussfolgerungen

Die gemessenen Raumpotentiale von bis zu  $\pm 0,5$  kV und Feldstärken von rund  $\pm 1$  kV/m beim Versprühen von Trink- und Meerwasser geben keinen Anlass für das Auftreten von Gas-

entladungen am Strahl und Sprühnebel. Die negativen Raumpotentiale von unter -40 kV und positiven elektrischen Feldstärken von +184,8 kV/m generierten mit -0,160 nC keine zündfähigen übertragenen Ladungen für Gefahrstoffe der Gruppe IIA und IIB [1]. Beim Austritt des Strahls aus der Düse wird dieser in einzelne Tropfen zerrissen. Die einzelnen Tropfen weisen nur eine niedrige Kapazität gegenüber Erdpotential auf. Ein Zusammenschluss ausreichend vieler Tropfen mit ausreichend großer Kapazität gegenüber Erdpotential, die als Quelle einer zündfähigen Gasentladung dienen, war bei den untersuchten auffächernden Strahlen und bewegten Tropfen nicht möglich. Die Messungen der übertragenen Ladung an den untersuchten horizontalen Strahlen aus vollentsalztem Wasser belegen die Aussagen aus [5, 42], dass die Energie der einzelnen Tropfen zu gering ist und dass diese nicht in der Lage sind sich gebündelt in einer zündfähigen Gasentladung zu entladen.

Anhand von Gleichung 3.4 ist die maximale Anzahl Ladungen einer Polarität in einem in Luft befindlichen Tropfen zu berechnen. Für einen Abstand zur Düse von 0,5 m liegt der kumulative Verlauf der Tropfengrößenverteilung für das Versprühen von vollentsalztem Wasser, bei einem Pumpendruck von 500 bar, vor (Anhang G). Der maximal auftretende Tropfendurchmesser entspricht 400  $\mu\text{m}$  und folglich einem Tropfenradius von 200  $\mu\text{m}$ . Die sich daraus ergebende maximale Anzahl Ladungen beträgt 0,057 nC bei einer Temperatur von 20 °C des Tropfens und 0,053 nC bei einer Temperatur des Tropfens von 80 °C. Diese berechnete maximale Anzahl an Ladungen ist in ihrer Größenordnung vergleichbar zu der gemessenen übertragenen Ladung mit dem Shunt (Tabelle 5.4). Die mit dem Shunt gemessene übertragene Ladung übersteigt die berechnete Anzahl maximaler Ladungen teils um den Faktor drei. Die Messung der Tropfendurchmesser erfolgte bei einem Abstand zur Düse von 0,5 m und nicht im Nahbereich, in dem die Entladungen mit dem Shunt gemessen wurden. Weiterhin können vereinzelt größere Tropfen auftreten, deren prozentualer Anteil derart gering ist, dass er in dem kumulativen Verlauf nicht angezeigt wird. Unter Beachtung dieser Punkte erscheint eine Erhöhung der berechneten maximalen Anzahl Ladungen auf einem Tropfen um den Faktor drei plausibel. Die Berechnung bestätigt die gemessenen übertragenen Ladungen.

## 6 Messungen an Strahlen im leitfähigen geerdeten 1 m<sup>3</sup> Behälter

Ziel der Versuche war es, die Ladungstrennung und die daraus resultierende Aufladung der Raumladungswolke beim Auftreffen auf ein Hindernis im räumlich begrenzten Volumen des Behälters zu quantifizieren. Dafür wurden die Parameter empirisch ermittelt, die den Ladungstrennungsprozess maximieren. Die Haupttropfen des Strahls und der Sprühnebel sind entgegengesetzt geladen. Zu der räumlichen Ladungstrennung der entgegengesetzt geladenen Tropfen kommt es durch das Abfließen der Haupttropfen des Strahls am Hindernis und der Verteilung des Sprühnebels im Volumen des Behälters (Abbildung 4.3). Anhand des Vergleichs mit den Versuchen, die ohne die räumliche Begrenzung des Behälters erfolgten, wurde der von der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers abhängige dominierende Ladungstrennungsprozess bestimmt. Bestandteil der Untersuchungen war das Versprühen von Trinkwasser, Meerwasser und vollentsalztem Wasser.

Vergleichende Messungen des Raumpotentials und der elektrischen Feldstärke zeigten, in welchen Anordnungen Feldstärkemessgeräte für sicherheitstechnische Bewertungen Anwendung finden dürfen. Dabei wurde geprüft, ob die Erhöhung der elektrischen Feldstärke mit dem Pumpendruck nur mit der Zunahme der Tropfendichte zusammenhängt oder ob sich der Prozess der Ladungstrennung erhöht. Nach [29] befindet sich beim größten Abstand zur geerdeten Behälterwand das Maximum des Raumpotentials. Diese Behauptung wurde durch die leistungslose und ortsaufgelöste Messung des Raumpotentials geprüft. Angaben der Temperatur des versprühten Wassers erfolgen in Abhängigkeit vom Pumpendruck. Die Versuche erfolgten generell mit der 1,05 mm Rundstrahldüse des Hochdruckreinigers HD 9/50. Auf die Nutzung davon abweichender Düsen und anderer Flüssigkeitsstrahler wird hingewiesen.

### 6.1 Ladungstrennung beim mittigen Sprühen in den 1 m<sup>3</sup> Behälter

**Feldstärkemessung:** Ohne die räumliche Begrenzung des Behälters und ohne die Ladungstrennung beim Aufprall des Strahls ergaben sich elektrische Feldstärken von -1,0 kV/m bis +1,1 kV/m (Kapitel 5.1). Gegenüber diesen Versuchen erhöht sich beim mittigen Sprühen in den Behälter die Tropfendichte. Der Strahl traf nach 1,0 m auf die Behälterwand. Der den Strahl umschließende und beim Aufprall des Strahls erzeugte negativ geladene Sprühnebel im Behälter generiert elektrische Feldstärken von bis zu -12,4 kV/m (Abbildung 6.1).

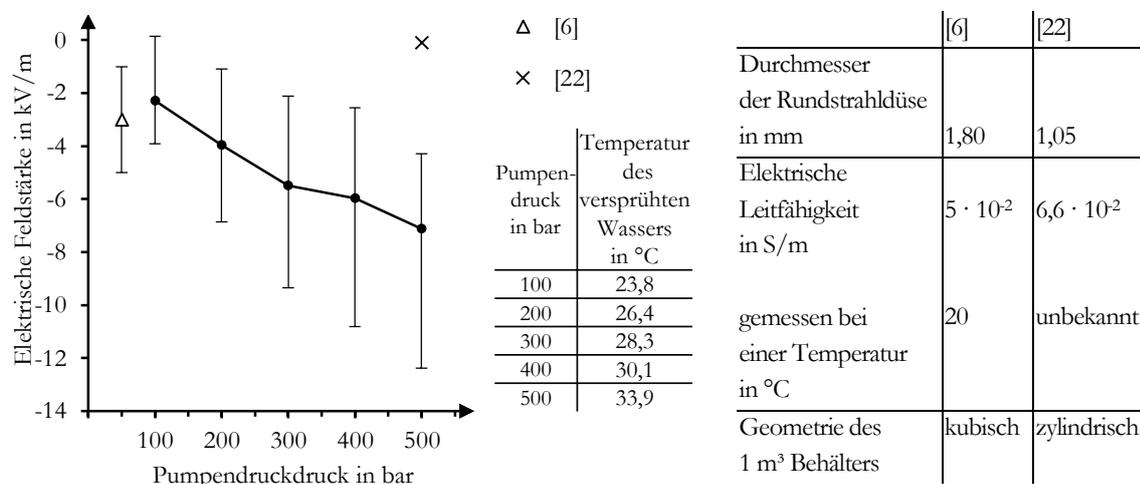


Abbildung 6.1: elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen in den 1 m<sup>3</sup> Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck (links), Angaben der Literaturwerte (rechts)

Die elektrische Feldstärke von -12,4 kV/m übersteigt in ihrem Betrag die elektrischen Feldstärken der Messungen am Strahl, ohne der räumlichen Begrenzung des Behälters, um eine Größenordnung. Allgemein steigt die elektrische Feldstärke mit dem Pumpendruck an. Es bestätigt sich die Aussage aus [3], dass sich mit dem Anstieg des Impulses der Tropfen beim Aufprall die Ladungstrennung erhöht.

Die hohen Abweichungen beim mittigen Sprühen in den Behälter deuten auf eine Mittelung der positiv und negativ geladenen Tropfen innerhalb der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes hin. Um diese Annahme zu bestätigen waren Messungen mit einer im Winkel eingebauten Düse notwendig, bei der sich innerhalb der Messfläche nur Tropfen des Sprühnebels befinden.

Die Versuchsparameter, der im Folgenden zwei beschriebenen Literaturwerte der elektrischen Feldstärke beim Sprühen von Trinkwasser in einen 1 m<sup>3</sup> Behälter, sind in Abbildung 6.1 dargestellt. In [22] wird für einen Pumpendruck von 500 bar eine elektrische Feldstärke von nahezu 0 kV/m angegeben. Bei den Versuchen aus [22] wurde derselbe 1 m<sup>3</sup> Behälter, dasselbe Feldstärkenmessgerät, der baugleiche Hochdruckreiniger und der gleiche Düsendurchmesser von 1,05 mm, wie in dieser Arbeit, verwendet. Der Behälter stand in [22] aufrecht und das Feldstärkenmessgerät war horizontal angeordnet. Es wird vermutet, dass es sich bei den nahezu 0 kV/m um einen Messfehler durch das Eindringen von Wasser in den Messkopf handelt (Kapitel 4.5.2).

Das Feldstärkenmessgerät aus [6] wurde während der Messung dauerhaft mit Stickstoff gespült. Die Öffnung des Messkopfes des Feldstärkenmessgerätes zeigte nach unten und ein Eindringen von Wasser wurde vermieden. Der Pumpendruck betrug 50 bar. Mit einem Düsendurchmesser von 1,8 mm und der kubischen Geometrie des 1 m<sup>3</sup> Behälters ist eine Vergleichbarkeit nur bedingt möglich. Weiterhin ist die Temperatur des versprühten Wassers und der Volumenstrom nicht bekannt. Trotz dieser Vielzahl an variierenden und unbekanntenen Parametern ist die gemessene elektrische Feldstärke mit  $(-3 \pm 2)$  kV/m in ihrer Größenordnung vergleichbar mit den Messwerten dieser Arbeit. Es wird angenommen, dass die gemessene elektrische Feldstärke aus [6] negativ ist.

**Raumpotentialmessung:** Die vom Messbereich abhängige Messunsicherheit der Raumpotentialmessungen betrug  $\pm 0,025$  kV. Bei einem Abstand von 0,54 m zur Behälterwand befand sich die Elektrode im Mittelpunkt des Behälters und im Strahl. Das bei diesem Abstand gemessene Raumpotential betrug bis zu +0,30 kV (Abbildung 6.2) [58]. Es entspricht in Polarität und Höhe den gemessenen Raumpotentialen im Strahl, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters (Kapitel 5.2). Im Strahl war nur die Ladungstrennung an der Düse und die der hydrodynamischen Instabilität wirksam, woraus die Vergleichbarkeit der Messungen mit und ohne die räumliche Begrenzung des Behälters resultiert. Die Prozesse der Ladungstrennung und die sich daraus ergebende Aufladung des Strahls erhöhten sich nicht mit dem Pumpendruck. Diese Erkenntnis deckt sich mit den in [19] durchgeführten Messungen, bei denen die Aufladung des Strahls aus Trinkwasser bei einem Pumpendruck von 100 bar bis 840 bar annähernd konstant blieb (Kapitel 3.3.5).

Durch den Aufprall des Strahls fließen die positiv geladenen Tropfen an der geerdeten Behälterwand ab. Der sich beim Aufprall ablösende Sprühnebel ist negativ geladen und verteilt sich im Volumen des Behälters. An der Elektrode wurde, bei den Abständen zur Behälterwand von 0,15 m, 0,30 m und 0,45 m, das negative Raumpotential des Sprühnebels gemessen. Bis zu einem Pumpendruck von 300 bar erhöhte sich der Betrag des Raumpotentials, da sich mit zunehmenden Pumpendruck die Ladungstrennung beim Aufprall und folglich die Aufladung des Sprühnebels erhöhte. Mit dem Pumpendruck erhöhen sich die Turbulenzintensität im Behälter, die Aufweitung des

Strahls, der Volumenstrom und die Ladungstrennung beim Aufprall. Bis 300 bar erhöhte sich der Betrag des Raumpotentials des Sprühnebels durch die Erhöhung der genannten Größen. Bei über 300 bar hingegen war die Durchmischung der positiv und negativ geladenen Tropfen derart groß, dass es zu einer Reduzierung des Betrags des Raumpotentials des Sprühnebels kam. Diese Beschreibung erklärt den Anstieg der Abweichungen vom Mittelwert (Fehlerbalken) der Raumpotentiale des Sprühnebels mit dem Pumpendruck.

Bei einem Abstand der Elektrode zur Behälterwand von 0,30 m war der Abstand zwischen dem positiv geladenen Strahl und der geerdeten Behälterwand maximal. Es ergaben sich negative Raumpotentiale im Behälter von bis zu -0,47 kV [58]. Der Potentialverlauf beim mittigen Sprühen in den Behälter widerspricht der Aussage aus [1, 29], dass sich im Mittelpunkt des Behälters das betragslich höchste Raumpotential ausbildet.

Die Messungen des Raumpotentials des Strahls und Sprühnebels bestätigen die Aussage aus Kapitel 3.3.5, dass die Ladungstrennung beim Aufprall des Strahls und der daraus resultierende aufgeladene Sprühnebel die Ladungstrennung beim Versprühen von Trinkwasser dominiert.

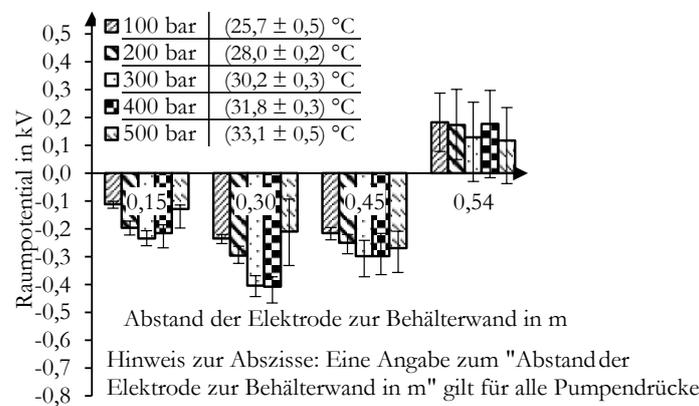


Abbildung 6.2: Raumpotential beim mittigen Sprühen in den Behälter in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand und dem Pumpendruck [58]

## 6.2 Ladungstrennung beim Sprühen im Winkel in den 1 m<sup>3</sup> Behälter

Die elektrischen Feldstärken wiesen beim mittigen Sprühen von Trinkwasser hohe Abweichungen auf (Kapitel 6.1). Liegen beim Sprühen im Winkel deutlich reduzierte Abweichungen vor, ist der Beweis erbracht, dass das Feldstärkenmessgerät die entgegengesetzt geladenen Tropfen des Strahls und Sprühnebels mittelt. Beim mittigen Sprühen von Trinkwasser in den Behälter betrug das Raumpotential des Strahls +0,30 kV. Der Sprühnebel war mit bis zu -0,47 kV negativ (Kapitel 6.1). Es gilt die Annahme zu prüfen, ob ein maximaler Abstand zum positiv geladenen Strahl und zur geerdeten Behälterwand zu negativeren Raumpotentialen des geladenen Sprühnebels im Mittelpunkt des Behälters führt. Ziel dieser Versuche war es, die Ladungstrennung durch das Sprühen im Winkel und variierenden Abständen der Düse zur Behälterwand zu untersuchen.

**Feldstärkenmessung:** Die Düse war bei den Messungen der elektrischen Feldstärke in der Position „oben rechts“ oder „unten rechts“ angeordnet (Kapitel 4.2). Der Abstand der Düse zur Behälterwand betrug 0,19 m. Mit dem Pumpendruck erhöhte sich der Betrag der elektrischen Feldstärke beim Sprühen im Winkel in den Behälter mit abnehmendem Anstieg (Abbildung 6.3). Die elektrische Feldstärke in der Position „unten rechts“ betrug bis zu -12,3 kV/m, bei einem

Pumpendruck von 500 bar. Die Beträge der elektrischen Feldstärken in der Position „oben rechts“ waren im Vergleich um  $(2 \pm 1)$  kV/m reduziert (Abbildung 6.3). Laut [3] weisen die beim Aufprall des Strahls auf die Behälterwand reflektierten größeren Tropfen, die schwerkraftbedingt zu Boden fallen, ein positives Potential auf. Die Erhöhung der elektrischen Feldstärke resultierte folglich aus den Tropfen, die nach dem Aufprall des Strahls durch das Volumen des Behälters fielen. Der Effekt der Koaleszenz bewirkte ein Zusammenfließen der positiv geladenen Tropfen mit den negativ geladenen Tropfen des Sprühnebels. Es kam zum Ladungsausgleich, der den Betrag der elektrischen Feldstärke reduzierte. Der Anteil positiv geladener Tropfen im Volumen des Behälters musste durch den Ladungsausgleich gering sein, da die Abweichungen vom Mittelwert der elektrischen Feldstärke, gegenüber des mittigen Sprühens in den Behälter (Kapitel 6.1), gering waren.

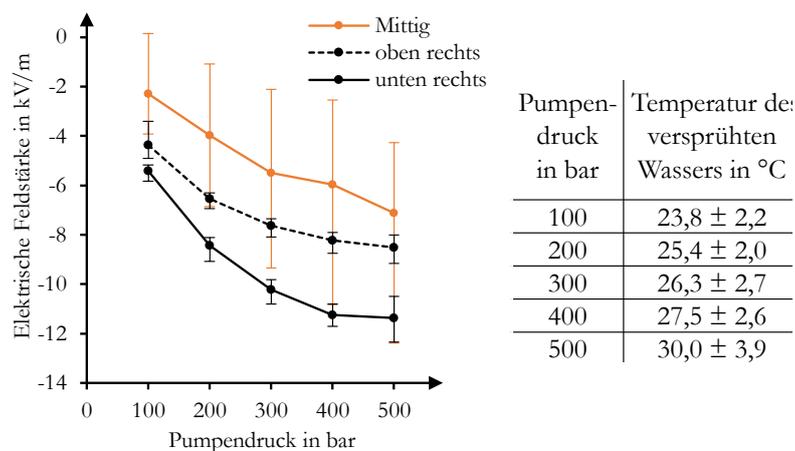


Abbildung 6.3: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel in den Positionen „oben rechts“, „unten rechts“ und beim „mittigen“ Sprühen in den Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck

Die Mittelwerte der gemessenen elektrischen Feldstärke waren in den Positionen „oben rechts“ und „unten rechts“ negativer als beim mittigen Sprühen (Abbildung 6.3). Im Volumen des Behälters dominierte der negativ geladene Sprühnebel. Dadurch unterblieb die Mittelung von positiv und negativ geladenen Tropfen innerhalb der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes. Zu erkennen ist dieser Effekt an den deutlich reduzierten Abweichungen vom Mittelwert beim Sprühen im Winkel in Relation zum mittigen Sprühen. Beim Sprühen im Winkel wurde eine elektrische Feldstärke von bis zu -12,3 kV/m gemessen und ist nahezu identisch mit dem betragsmäßig höchsten Wert der elektrischen Feldstärke von -12,4 kV/m beim mittigen Sprühen. Die elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von -12,4 kV/m entsprach dem Zeitpunkt, an dem der Anteil der positiven Tropfen des Strahls innerhalb der Messfläche minimal war.

**Raumpotentialmessung:** Die vom Messbereich abhängige Messunsicherheit der Raumpotentialmessungen betrug  $\pm 0,1$  kV. Der Abstand der Elektrode zur Behälterwand betrug 0,54 m.

Wie die elektrische Feldstärke, beim Sprühen im Winkel, erhöhte sich der Betrag des Raumpotentials mit dem Pumpendruck (Abbildung 6.4). Das Raumpotential in der Position „unten rechts“ betrug bis zu -1,48 kV. Die Beträge des Raumpotentials in der Position „oben rechts“ waren dem gegenüber um  $(0,45 \pm 0,25)$  kV reduziert und betrugen bis zu -0,99 kV (Abbildung 6.4). Die Reduzierung des Betrags des Raumpotentials resultiert, wie bei den Messungen der elektrischen Feldstärke, aus den positiv geladenen Tropfen, die nach dem Aufprall des Strahls durch das Volumen des Behälters fielen und die Aufladung des negativ geladenen Sprühnebels reduzierten.

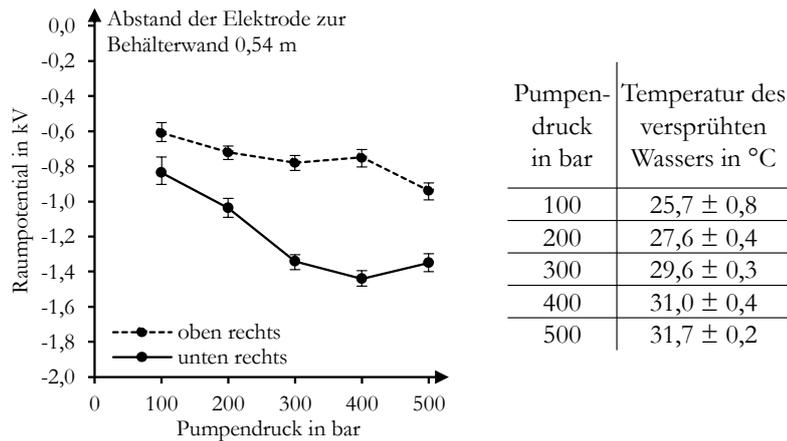


Abbildung 6.4: Raumpotential beim Sprühen im Winkel in den Positionen „oben rechts“ und „unten rechts“ in den Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck

Die Abweichungen der Temperatur des versprühten Wassers in der Position „oben rechts“ oder „unten rechts“ betragen unter 1 K und hatten keinen Einfluss. Die Raumpotentiale bei Abständen der Düse zur Behälterwand von 0,19 m, 0,42 m und 0,65 m wurden bei einem Pumpendruck von 500 bar untersucht (Abbildung 6.5). Die Temperatur des versprühten Wassers war mit  $(32,5 \pm 0,1) \text{ °C}$  in den drei untersuchten Abständen konstant. Angeordnet war die Düse in der Position „unten rechts“. Der Abstand der Elektrode zur Behälterwand betrug 0,54 m. Ist der Abstand der Düse zur Behälterwand mit 0,65 m maximal, ergab sich ein Raumpotential von -0,90 kV. Zum Vergleich ergab sich bei einem Abstand von 0,19 m ein Raumpotential von -1,40 kV. Eine Abstandserhöhung geht mit einer Reduzierung der Geschwindigkeit der Tropfen beim Aufprall des Strahls (Kapitel 2.4) und einer dabei erfolgenden Reduzierung der Ladungstrennung einher.

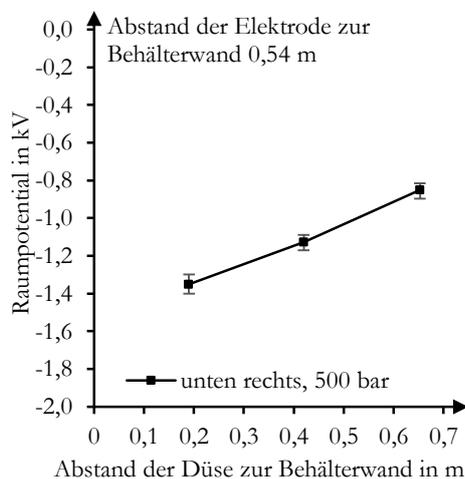
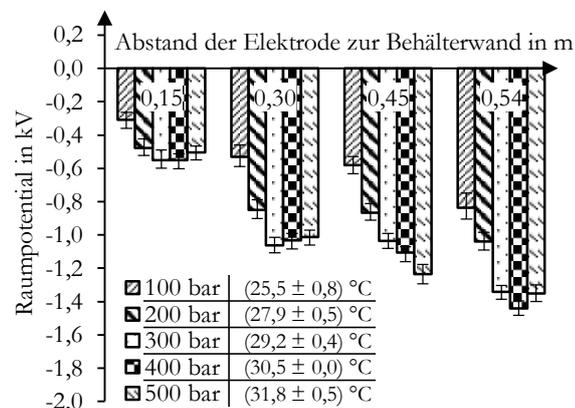


Abbildung 6.5: Raumpotential beim Sprühen in der Position „unten rechts“ in Abhängigkeit vom Abstand der Düse zur Behälterwand



Hinweis zur Abszisse: Eine Angabe zum "Abstand der Elektrode zur Behälterwand in m" gilt für alle Pumpendrucke

Abbildung 6.6: Raumpotential beim Sprühen in der Position „unten rechts“ in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand und dem Pumpendruck

Laut [1, 29] befindet sich das betraglich höchste Raumpotentials im Mittelpunkt des Behälters. Anhand von Raumpotentialmessungen bei den Abständen der Elektrode zur Behälterwand von 0,15 m, 0,30 m, 0,45 m und 0,54 m (Mittelpunkt des Behälters) wurde diese Aussage, anders als beim mittigen Sprühen in den Behälter, verifiziert (Abbildung 6.6). Alle gemessenen Raum-

potentiale waren negativ. Es wurde bestätigt, dass die positiven Tropfen des Strahls an der Behälterwand abfließen und nach dem Aufprall nur der negativ geladene Sprühnebel im Behälter ist. Es wurden Raumpotentiale von bis zu -1,48 kV, bei einem Pumpendruck von 400 bar, gemessen. Das Raumpotential von -1,48 kV übersteigt das betraglich höchste Raumpotential beim mittigen Sprühen in den Behälter von -0,47 kV um das Dreifache, da der Abstand zum positiv geladenen Strahl und zum geerdeten Behälter im Mittelpunkt maximal war. Bis 300 bar ergaben sich durch den Anstieg des Pumpendrucks, höhere Beträge des Raumpotentials. Ein Pumpendruck von über 300 bar ergab nur leicht abweichende Werte. Diese Beobachtung trat in vergleichbarer Weise bei den Raumpotentialmessungen des Sprühnebels beim mittigen Sprühen (Kapitel 6.1) und den Feldstärkenmessungen beim Sprühen im Winkel auf. Ob sich die elektrische Feldstärke und das Raumpotential bei Drücken von über 500 bar weiter erhöhen, wird in Kapitel 6.6 behandelt.

### 6.3 Einfluss der Düsengeometrie und des -durchmessers

Um den Einfluss der Düsengeometrie und des -durchmessers auf die Ladungstrennung beim Prozess des Versprühens von Trinkwasser zu untersuchen, wurden die in Tabelle 4.2 angegebenen Düsen verwendet. Bei der 0°-Ausrichtung des Flachstrahls weitet sich der Strahl in der horizontalen Ebene auf und die Sensorfläche des Feldstärkenmessgerätes ist orthogonal dazu positioniert. Bei der 90°-Ausrichtung des Flachstrahls weitet sich der Strahl in der vertikalen Ebene auf. Der Aufbau der Rotationsdüse verlangt ein Starten des Sprühens mit nach unten gerichteter Düse. Für Messungen beim mittigen Sprühen in den Behälter war die Rotationsdüse somit ungeeignet. Die Messungen der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials erfolgten beim mittigen Sprühen und beim Sprühen im Winkel. Um die Raumpotentialmesstechnik nicht zu beschädigen, wurde beim mittigen Sprühen auf Raumpotentialmessungen mit Düsendurchmesser von über 1,25 mm verzichtet. Die Begrenzung der Rückstoßkraft von 250 N [17, 21] der von Hand gehaltenen Spritzeinrichtungen ließ bei einem Düsendurchmesser von 4,00 mm nur einen maximalen Pumpendruck von 100 bar zu. Bei einem Düsendurchmesser von 1,25 mm und 1,35 mm betrug der einstellbare Pumpendruck des Hochdruckreinigers HD 9/50 maximal 300 bar.

**Feldstärkenmessung:** Beim mittigen Sprühen ergab sich mit der 1,05 mm Rundstrahldüse die negativste elektrische Feldstärke von -12,4 kV/m (Abbildung 6.7). Bei einem Düsendurchmesser der Rundstrahldüse von 1,25 mm waren die Beträge der Mittelwerte der elektrischen Feldstärke gegenüber denen der Rundstrahldüse mit 1,05 mm Durchmesser reduziert. Es bestanden jedoch ähnlich hohe Abweichungen vom Mittelwert. Bei einem Düsendurchmesser von 1,05 mm ergab die Flachstrahldüse bis 400 bar, im Vergleich zur Rundstrahldüse, höhere Mittelwerte des Betrags der elektrischen Feldstärke. Die negativste elektrische Feldstärke der 1,05 mm Flachstrahldüse betrug -7,9 kV/m. Betraglich lag diese etwa ein Drittel unter den -12,4 kV/m der 1,05 mm Rundstrahldüse. Bei der 90°-Ausrichtung des Flachstrahls wurden gegenüber der 0°-Ausrichtung betraglich höhere elektrische Feldstärken gemessen. Gegenüber der 0°-Ausrichtung wurden die Tropfen bei der 90°-Ausrichtung entgegen der Schwerkraft im Volumen des Behälters verteilt und erhöhten die Tropfen- und den Betrag der Raumladungsdichte in der oberen Hälfte des Behälters. Anders als bei den Rundstrahldüsen erhöhte ein größerer Düsendurchmesser der Flachstrahldüse von 1,35 mm die Mittelwerte der Beträge der elektrischen Feldstärke um  $(0,63 \pm 0,14)$  kV/m. Die Abweichungen der Feldstärke für die Strahlen der verschiedenen Flachstrahldüsen waren annähernd gleich und gegenüber den Abweichungen der Rundstrahldüsen reduziert.

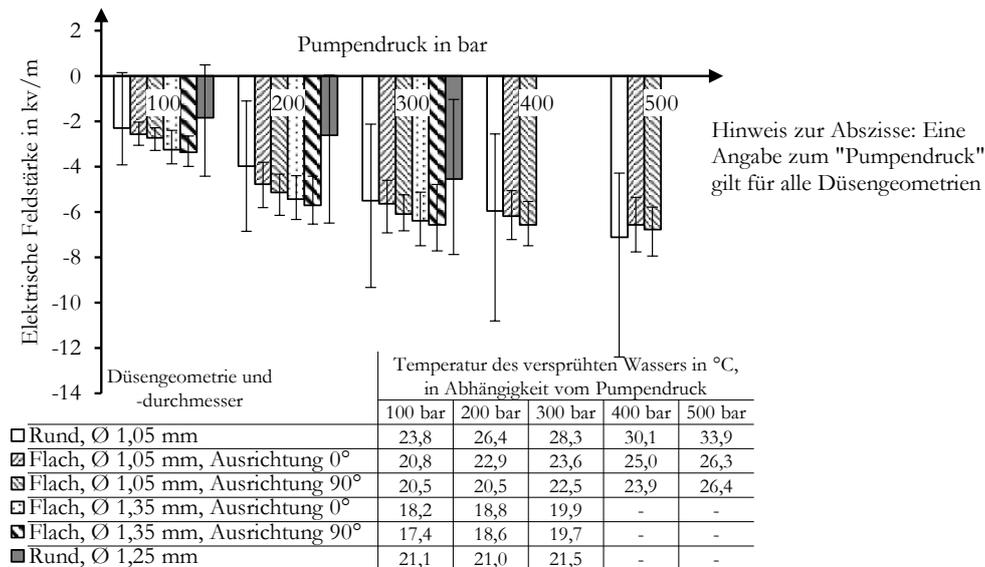


Abbildung 6.7: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen in den Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck, der Düsengeometrie und -durchmesser

Beim Sprühen im Winkel waren die Abweichungen vom Mittelwert gegenüber denen beim mittigen Sprühen reduziert (Abbildung 6.8). Bei einem Düsendurchmesser von 1,05 mm waren die Abweichungen vom Mittelwert der Rundstrahl-, Flachstrahl- und Rotationsdüse vergleichbar. Im Vergleich mit der Rundstrahldüse, ergaben sich mit der Flachstrahl- und Rotationsdüse betragsmäßig niedrigere elektrische Feldstärken. Auffällig ist, dass die Mittelwerte der elektrischen Feldstärke der Flachstrahldüse, anders als beim mittigen Sprühen, unter den Beträgen der elektrischen Feldstärken der Rundstrahldüse liegt. Aus diesen Beobachtungen ist abzuleiten, dass beim Sprühen im Winkel eine Aufweitung des Strahls und höhere Turbulenzintensitäten im Behälter den Betrag der elektrischen Feldstärke und gleichzeitig deren Abweichungen reduzieren. Als Begründung dafür ist die gestörte räumliche Ladungstrennung im Behälter zu nennen. Bei der Rundstrahldüse ist der Strahl positiv geladen, trifft auf die Behälterwand und im Volumen des Behälters verteilt sich der negativ geladene Sprühnebel. Bei der Flachstrahl- und Rotationsdüse hingegen wirkt der Strahl durch seine Aufweitung, Rotation und Turbulenz dieser räumlichen Ladungstrennung entgegen.

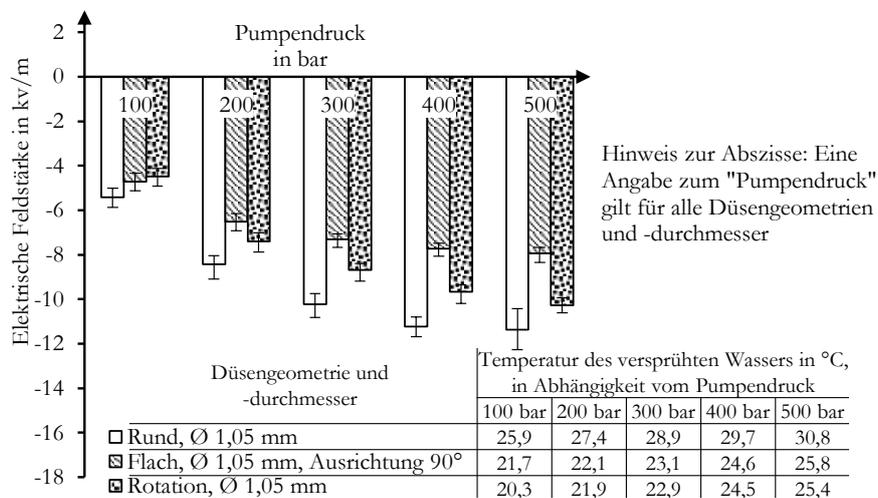


Abbildung 6.8: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel in den Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck und von der Düsengeometrie

Bei einem Pumpendruck von 500 bar erhöhte sich die betraglich höchste elektrische Feldstärke um rund 6 kV/m, wenn der Düsendurchmesser der Rundstrahldüse verdoppelt wurde (Abbildung 6.9). Die betraglich höchste elektrische Feldstärke wurde bei einem Düsendurchmesser von 2,00 mm gemessen und betrug -17,5 kV/m. Eine Verdopplung des Düsendurchmessers erhöhte den Volumenstrom um das Vierfache (Anhang E). Nach Gleichung 2.10 ist die Düsenaustrittsgeschwindigkeit bei den drei Düsendurchmessern konstant. Die Erhöhung des Betrags der elektrischen Feldstärke resultierte aus der Erhöhung des Volumenstroms, der die Anzahl Ladungsträger, die Tropfen- und Raumladungsdichte erhöhte. Ein Düsendurchmesser von 4,00 mm erhöhte den Betrag der elektrischen Feldstärke, gegenüber einem Düsendurchmesser von 1,05 mm, um rund 2 kV/m auf bis zu -7,8 kV/m (Abbildung 6.10).

Zusammengefasst erhöht sich der Betrag der elektrischen Feldstärke, wenn bei der gleichen Düse der Pumpendruck erhöht wird. Mit dem Pumpendruck erhöht sich die Düsenaustrittsgeschwindigkeit (Gleichung 2.9) und dadurch die Ladungstrennung. Weiterhin erhöht sich mit dem Düsendurchmesser der Betrag der elektrischen Feldstärke durch den Anstieg des Volumenstroms.

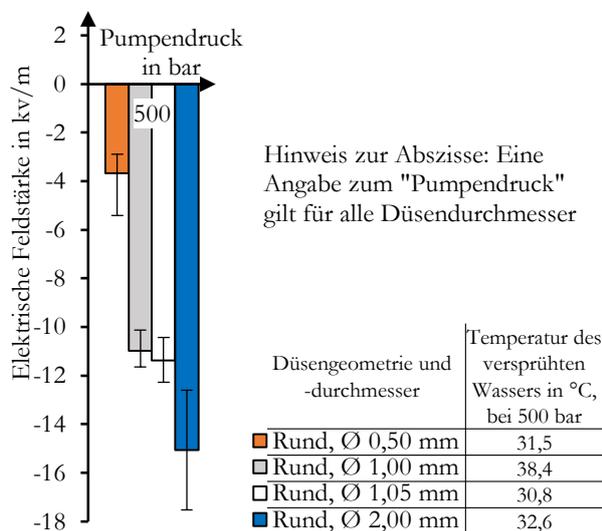


Abbildung 6.9: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel in den Behälter in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser bei einem Pumpendruck von 500 bar

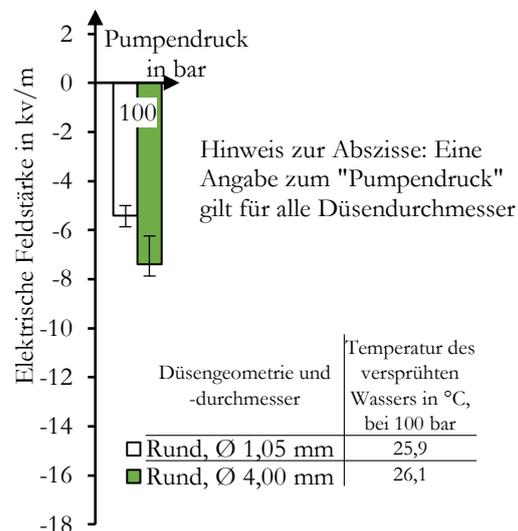


Abbildung 6.10: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel in den Behälter in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser bei einem Pumpendruck von 100 bar

**Raumpotentialmessung:** Die Messunsicherheit betrug  $\pm 0,1$  kV. Der Abstand der Elektrode zur Behälterwand betrug 0,54 m. Beim mittigen Sprühen befand sich die Elektrode durch diesen Abstand im Strahl. Die in Abhängigkeit vom Pumpendruck, der Düsengeometrie und -durchmesser gemessenen Raumpotentiale beim mittigen Sprühen sind in Abbildung 6.11 dargestellt. Eine Erhöhung des Düsendurchmessers der Rundstrahldüse von 1,05 mm auf 1,25 mm erhöhte das positive Raumpotential. Es betrug maximal +0,38 kV. Während sich bei den Rundstrahldüsen positive Raumpotentiale einstellten, waren die Raumpotentiale der Flachstrahldüse, mit einem Düsendurchmesser von 1,05 mm, negativ. Der Flachstrahl weitete sich mit einem Strahlwinkel von 15° auf und war nicht gebündelt wie ein Rundstrahl. Mit der Elektrode wurde, im Gegensatz zu den Messungen mit der Rundstrahldüse, ein geringerer Anteil an Tropfen des Strahls erfasst. Zusätzlich war durch die Aufweitung des Strahls der Anteil des negativ geladenen Sprühnebels an der Elektrode höher und überwog das positive Raumpotential des Strahls.

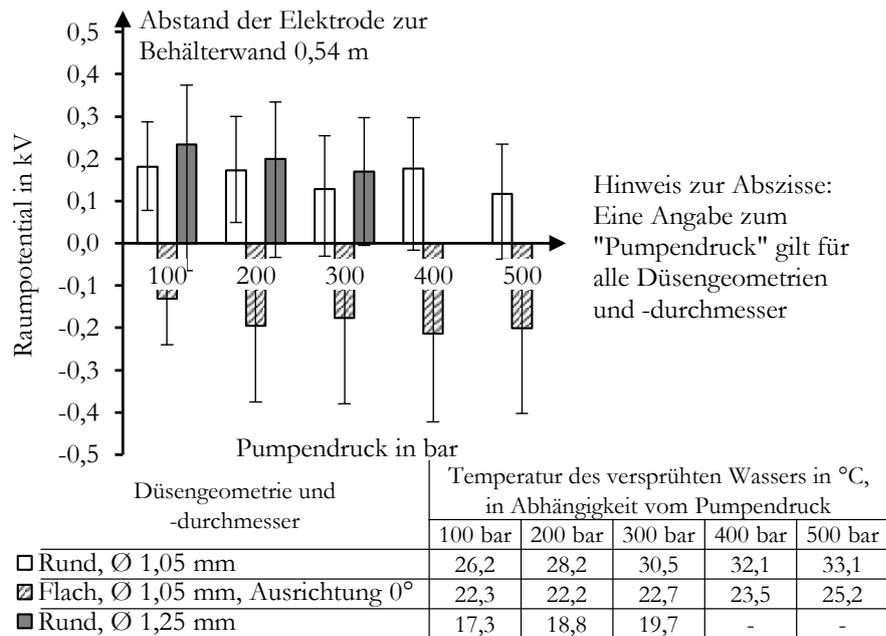


Abbildung 6.11: Raumpotential beim mittigen Sprühen in den Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck, der Düsengeometrie und -durchmesser, bei einem Abstand der Elektrode zur Behälterwand von 0,54 m

Beim Sprühen im Winkel waren die Abweichungen vom Mittelwert des Raumpotentials der untersuchten Düsengeometrien und -durchmesser, gegenüber denen beim mittigen Sprühen, reduziert (Abbildung 6.12). Anders als beim mittigen Sprühen dominierte im Behälter der negativ geladene Sprühnebel und begründet die Reduzierung der Abweichungen vom Mittelwert der Raumpotentiale. Vergleichbar zu den Messungen der elektrischen Feldstärke (Abbildung 6.8) ergaben sich mit der Rundstrahldüse mit bis zu -1,48 kV betraglich höhere Raumpotentiale als mit der Flachstrahl- und Rotationsdüse. Der Düsendurchmesser der drei Düsen betrug 1,05 mm.

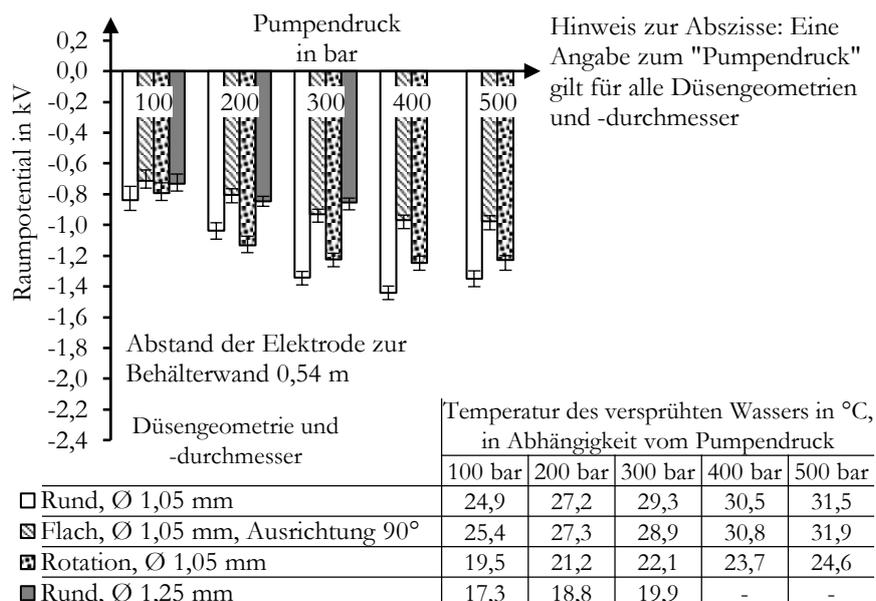


Abbildung 6.12: Raumpotential beim Sprühen im Winkel in den Behälter in Abhängigkeit vom Pumpendruck, der Düsengeometrie und -durchmesser, bei einem Abstand zur Elektrode zur Behälterwand von 0,54 m

Wie bei den Messungen der elektrischen Feldstärke erläutert, führte die gestörte räumliche Ladungstrennung, bei der Verwendung der Flachstrahl- und Rotationsdüse, zu einer Reduzierung des Raumpotentials. Bei einem Düsendurchmesser der Rundstrahldüse von 1,25 mm wurden gegenüber der Rundstrahldüse, mit einem Düsendurchmesser von 1,05 mm, betragslich reduzierte Raumpotentiale gemessen.

Bei einem Pumpendruck von 500 bar erhöhte sich das betragslich höchste Raumpotential um  $(0,90 \pm 0,12)$  kV, wenn der Düsendurchmesser der Rundstrahldüse verdoppelt wurde (Abbildung 6.13). Das betragslich höchste Raumpotential wurde bei einem Düsendurchmesser von 2,00 mm gemessen und betrug -2,29 kV. Die Erhöhung des Raumpotentials resultierte aus der Erhöhung des Volumenstroms, der die Anzahl Ladungsträger, die Tropfen- und Raumladungsdichte erhöhte. Das Raumpotential bei einem Düsendurchmesser von 1,05 mm ist vergleichbar mit dem Raumpotential bei 1,00 mm.

Bei einem Pumpendruck von 100 bar reduzierte sich der Betrag des Raumpotentials, wenn der Düsendurchmesser von 1,05 mm auf 1,25 mm erhöht wurde (Abbildung 6.14). Bei einem Düsendurchmesser von 4,00 mm erhöhte sich der Betrag des Raumpotentials nur geringfügig. Das betragslich höchste Raumpotential bei einem Düsendurchmesser von 4,00 mm betrug -1,03 kV. Die Erhöhung des Raumpotentials ist von einer Kombination der Parameter Pumpendruck und Düsendurchmesser abhängig und wird bei höheren Pumpendrücken weiter untersucht (Kapitel 6.6).

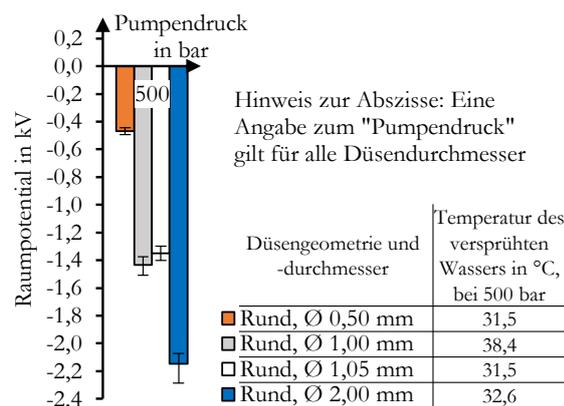


Abbildung 6.13: Raumpotential beim Sprühen im Winkel in den Behälter in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser bei einem Pumpendruck von 500 bar und einem Abstand der Elektrode zur Behälterwand von 0,54 m

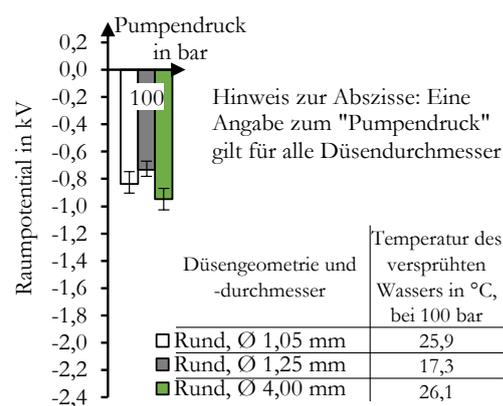


Abbildung 6.14: Raumpotential beim Sprühen im Winkel in den Behälter in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser bei einem Pumpendruck von 100 bar und einem Abstand der Elektrode zur Behälterwand von 0,54 m

Zusammengefasst steigt tendenziell mit dem Düsendurchmesser der Betrag des Raumpotentials und der elektrischen Feldstärke an. Der Anstieg erhöht sich mit dem Pumpendruck. Diese Tendenz bestätigt die bereits in Kapitel 3.3.5 beschriebenen Versuchsergebnisse aus [6]. In [6] wurde Betriebswasser in einen 24 m<sup>3</sup> Behälter, bei einem Pumpendruck von bis 400 bar, versprüht. Der Tankwaschkopf besaß je zwei Düsen. Bei einem Düsendurchmesser von 1,5 mm betrug die elektrische Feldstärke 10 kV/m und verdoppelte sich auf 20 kV/m, wenn der Düsendurchmesser auf 2,5 mm erhöht wurde. Weiterhin reduzieren sich aufweitende oder rotierende Strahlen die elektrische Feldstärke und das Raumpotential im Behälter.

#### 6.4 Einfluss der Temperatur des Wassers

Da die Versuche in einer Halle oder auf dem Versuchsfeld und zu unterschiedlichen Jahreszeiten erfolgten, lag ein Einfluss durch die Umgebungstemperatur vor. Aus den in Kapitel 6.1 bis Kapitel 6.3 aufgezeigten Messwerten der Temperatur des versprühten Wassers geht hervor, dass sich im Laufe einer Messreihe Temperaturdifferenzen von bis zu 10,8 K ergaben. Es galt zu untersuchen, ob die Temperatur des versprühten Wassers einen Einfluss auf die Ladungstrennung und die daraus resultierende Aufladung hat.

**Feldstärkenmessung:** Beim mittigen Sprühen in den Behälter entstanden die Abweichungen vom Mittelwert durch das Mitteln der positiv und negativ geladenen Tropfen innerhalb der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes (Abbildung 6.15). Aufgrund der hohen Abweichungen wurde die Anzahl der Versuche pro eingestelltem Pumpendruck auf drei begrenzt. Bei einem Pumpendruck von 300 bar und 400 bar erhöhte sich der Betrag des Mittelwertes der elektrischen Feldstärke mit dem Anstieg der Temperatur des versprühten Wassers. Bei den betraglich höchsten Werten ist der Anstieg der elektrischen Feldstärke mit der Temperatur bei allen Pumpendrücken erkennbar. Pro eingestelltem Pumpendruck wurde eine Temperaturdifferenz von  $(25,3 \pm 2,2)$  K untersucht. Diese generierte einen prozentualen Anstieg des Betrags der elektrischen Feldstärke von  $(17,5 \pm 8,7)$  % (Mittelwerte) und  $(34,9 \pm 8,1)$  % (betraglich höchsten Werte). Durch die Erwärmung des Wassers war eine elektrische Feldstärke von bis zu -13,3 kV/m messbar.

Beim Sprühen im Winkel befand sich die Düse in der Position „unten rechts“ (Kapitel 4.2). Nach dem Aufprall dominierte der negativ geladene Sprühnebel, der die Abweichungen, im Vergleich zum mittigen Sprühen, um ein Vielfaches reduzierte (Abbildung 6.16). Die pro eingestelltem Pumpendruck untersuchte Temperaturdifferenz von  $(30,4 \pm 4,0)$  K generierte einen prozentualen Anstieg im Betrag der elektrischen Feldstärke von  $(30,9 \pm 4,5)$  % (Mittelwerte) und  $(33,9 \pm 3,3)$  % (betraglich höchste Werte). Die elektrische Feldstärke erreichte Werte von bis zu -13,5 kV/m.

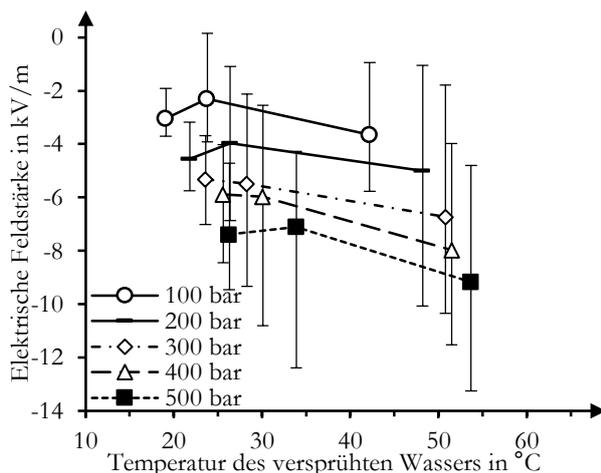


Abbildung 6.15: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen in Abhängigkeit der Temperatur des versprühten Wassers

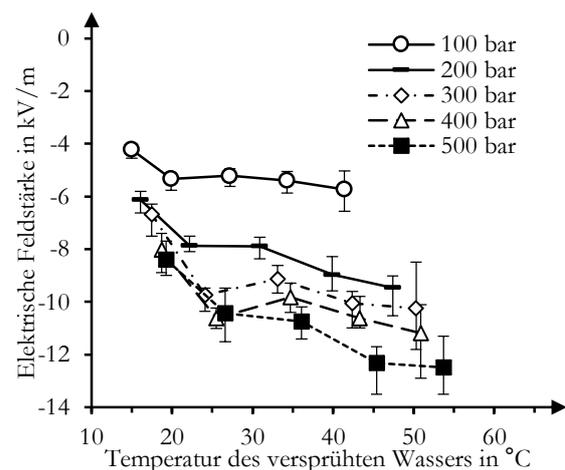


Abbildung 6.16: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel in Abhängigkeit der Temperatur des versprühten Wassers

**Raumpotentialmessung:** Die Messunsicherheit betrug  $\pm 0,1$  kV. Die beim mittigen Sprühen aufgezeigten Messungen (Kapitel 6.1) wurden mit einer Ausgangstemperatur des Wassers von 45 °C wiederholt und verglichen (Abbildung 6.17). Die untersuchte Temperaturdifferenz pro

eingestelltem Pumpendruck betrug  $(18,8 \pm 1,8)$  K. Bei einem Abstand der Elektrode zur Behälterwand von 0,54 m wurden die positiven Tropfen des Strahls gemessen. Das Raumpotential dieser Tropfen erhöhte sich um bis zu  $(50,6 \pm 10,3)$  % (Mittelwerte), bzw.  $(38,3 \pm 12,3)$  % (höchste Werte). Das höchste Raumpotential betrug +0,51 kV. Der Betrag des negativen Raumpotentials des Sprühnebels war um  $(38,5 \pm 32,5)$  % (Mittelwerte), bzw.  $(33,0 \pm 30,2)$  % (betraglich höchste Werte) erhöht. Es wurden Raumpotentiale von bis zu -0,70 kV gemessen. Die Erhöhung der Ausgangstemperatur erhöht den Prozess der Ladungstrennung und die Aufladung der Tropfen des Strahls und Sprühnebels.

Beim Sprühen im Winkel betrug der Abstand der Elektrode zur Behälterwand 0,54 m. In dieser Position ist der Betrag des Raumpotentials maximal (Kapitel 6.2). Die Düse befand sich in der Position „unten rechts“. An der Elektrode wurde der negativ geladene Sprühnebel gemessen. Bei einem Pumpendruck von 500 bar und einer Temperatur von 59,3 °C war am Aufprallort des Strahls ein Loch in der Behälterwand aufgetreten, das zu einer Reduzierung des Raumpotentials führte (Abbildung 6.18). Die untersuchte Temperaturdifferenz pro eingestelltem Pumpendruck betrug  $(38,7 \pm 3,4)$  K. Daraus resultierten um  $(36,5 \pm 5,1)$  % (Mittelwerte), bzw.  $(34,9 \pm 5,6)$  % (betraglich höchste Werte), betragslich höhere Raumpotentiale.

Zusammengefasst erhöhen sich der Prozess der Ladungstrennung und die daraus resultierende Aufladung mit der Temperatur des versprühten Wassers. Beim Sprühen im Winkel, was den realen Prozess der Behälterreinigung widerspiegelt, erhöhen sich die elektrische Feldstärke und das Raumpotential pro 1 K um 1 %. Diese Angabe gilt für die Mittelwerte und betragslich höchsten Werte.

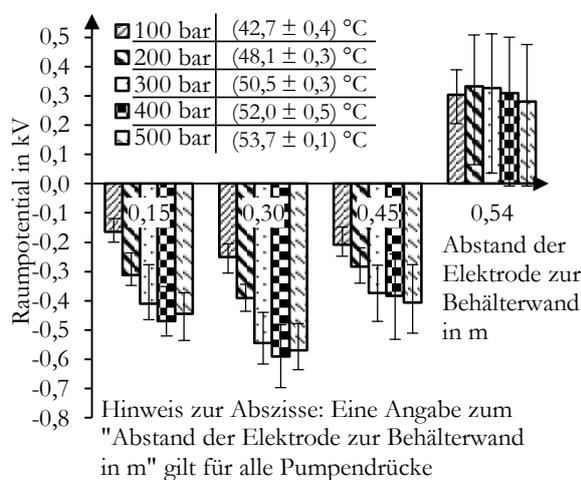


Abbildung 6.17: Raumpotential beim mittigen Sprühen in Abhängigkeit vom Abstand der Elektrode zur Behälterwand und Pumpendruck, bei einer Ausgangstemperatur von 45 °C

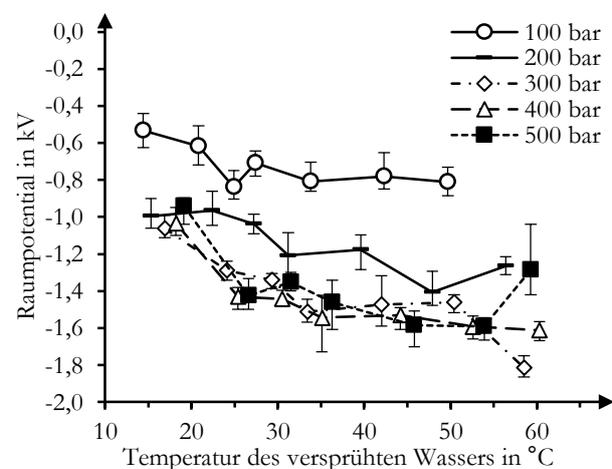


Abbildung 6.18: Potentialmessung, Sprühen im Winkel in Abhängigkeit der Temperatur

Die Messungen bestätigen die in Kapitel 2.3 getroffene Aussage, dass sich durch den Anstieg der Temperatur des versprühten Wassers die Oberflächenspannung und Viskosität des Wassers reduzieren und sich dadurch der Tropfenzerfall und der Prozess der Ladungstrennung erhöhen.

Beim Aufprall von vollentsalztem Wasser auf eine Prallplatte erhöht sich die Aufladung, bei einer Temperaturdifferenz von 80 K, um den Faktor 1,83 (Kapitel 2.3) [30]. Dieser Faktor von 1,83 bei einer Temperaturdifferenz von 80 K bestätigt, dass sich pro 1 K die Aufladung um 1 % erhöht und dass diese Angabe für vollentsalztes Wasser und Trinkwasser anwendbar ist.

## 6.5 Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers

Im Wasser gelöste Ionen ändern die elektrische Leitfähigkeit, den dominierenden Ladungstrennungsprozess und die Höhe der Aufladung (Kapitel 3.3.5). Um den Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit auf die Ladungstrennung zu untersuchen, wurden die mit Trinkwasser beschriebenen Versuche im 1 m<sup>3</sup> Behälter mit vollentsalztem Wasser und Meerwasser wiederholt. Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit sind Tabelle 4.3 in Kapitel 4.6 zu entnehmen. Um einen Vergleich herzustellen, wurden in den folgenden Diagrammen der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials die Messwerte beim Versprühen von Trinkwasser ebenfalls eingetragen. Die Bereiche der Messwerte von Trinkwasser sind in den nachfolgenden Diagrammen blau, die von Meerwasser orange und die von vollentsalztem Wasser grün markiert.

**Feldstärkenmessung:** Beim mittigen Sprühen von Meerwasser ergaben sich positive elektrische Feldstärken, die sich mit dem Pumpendruck erhöhen. Die maximale elektrische Feldstärke betrug +5,1 kV/m (Abbildung 6.19). Beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser war die elektrische Feldstärke abhängig vom Zeitpunkt der Messung (Abbildung 6.20). Bis zwei Minuten waren die elektrischen Feldstärken bei allen Pumpendrücken negativ und betrugen bis zu -18,3 kV/m. Bei über zwei Minuten wurden bei einem Pumpendruck von 100 bar und 200 bar, im Vergleich der elektrischen Feldstärken bis zwei Minuten, betraglich reduzierte elektrische Feldstärken gemessen. Ab einem Pumpendruck von 300 bar änderte sich das Vorzeichen und die elektrischen Feldstärken wurden positiv und betrugen bis zu +27,8 kV/m.

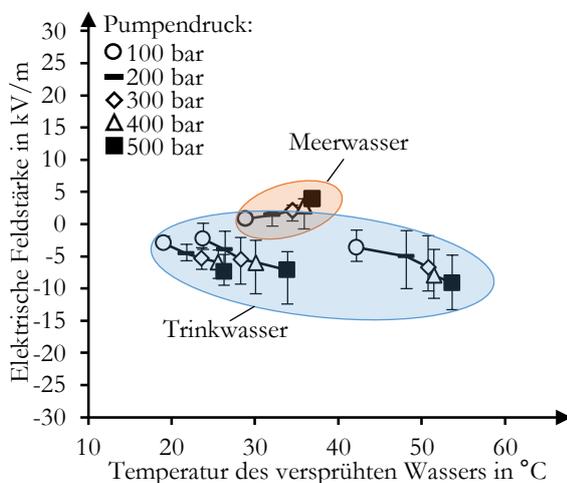


Abbildung 6.19: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von Meer- und Trinkwasser in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck

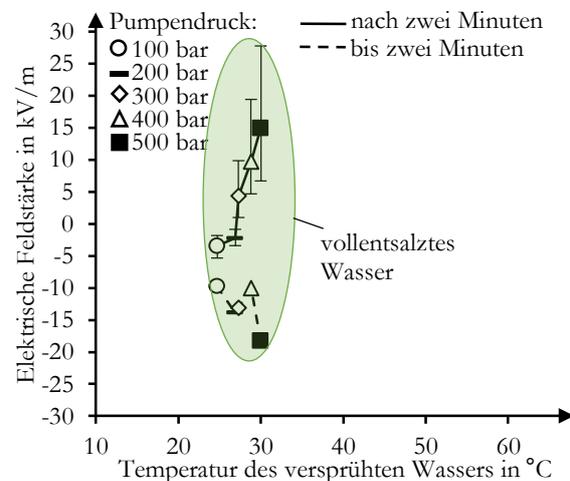


Abbildung 6.20: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck

Beim Sprühen im Winkel von Meerwasser ergaben sich, wie beim mittigen Sprühen, positive elektrische Feldstärken (Abbildung 6.21). Mit der Temperatur des versprühten Wassers erhöhte sich die elektrische Feldstärke und betrug maximal +7,9 kV/m. Bei einer vergleichbaren Temperatur des versprühten Wassers war die elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel, im Vergleich zum mittigen Sprühen, um über 2,0 kV/m erhöht.

Beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser ergab sich, wie beim mittigen Sprühen, eine Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Messung (Abbildung 6.22). Bis zwei Minuten war die

elektrische Feldstärke negativ und erreichte einen betragslich höchsten Wert von -18,9 kV/m. Nach einer Sprühzeit von zwei Minuten reduzierte sich der Betrag der elektrischen Feldstärke mit dem Pumpendruck und blieb negativ. Der betragslich höchste Wert, bei einer Sprühzeit von über zwei Minuten, ergab sich bei einem Pumpendruck von 100 bar und betrug -9,5 kV/m.

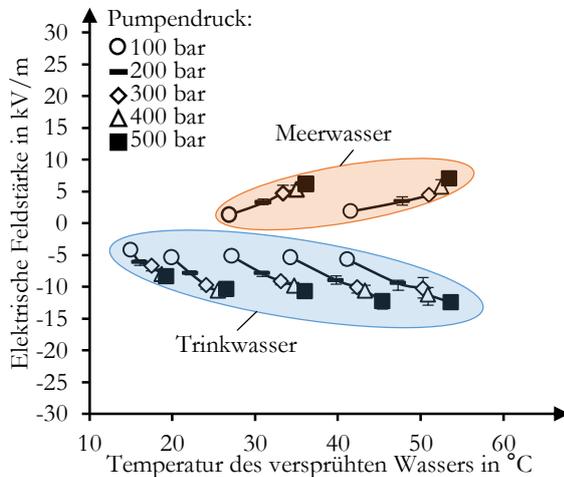


Abbildung 6.21: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von Meer- und Trinkwasser in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck

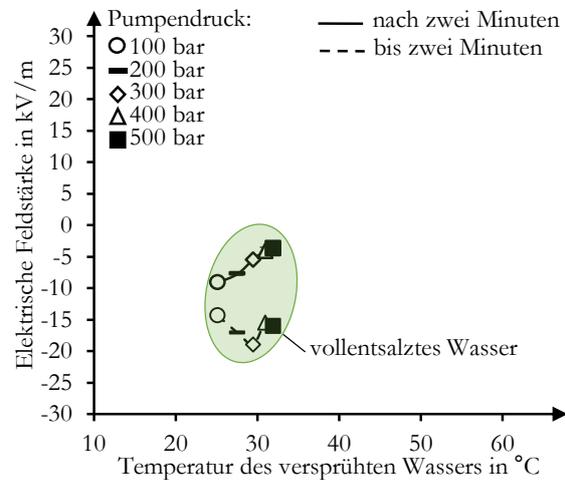


Abbildung 6.22: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck

**Raumpotentialmessung:** Die Messunsicherheit betrug beim Versprühen von Meerwasser  $\pm 0,025$  kV. Beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser betrug die Messunsicherheit  $\pm 1,0$  kV und beim Sprühen im Winkel  $\pm 0,1$  kV. Die Elektrode war in einem Abstand zur Behälterwand von 0,54 m positioniert. Beim mittigen Sprühen befand sich die Elektrode im Strahl.

Beim mittigen Sprühen von Meerwasser waren die Mittelwerte des Raumpotentials überwiegend negativ (Abbildung 6.23) und in ihrer Polarität entgegengesetzt zur elektrischen Feldstärke (Abbildung 6.19). Das Feldstärkenmessgerät war durch die Mittelung innerhalb der Messfläche nicht dazu in der Lage die Polarität und Höhe der Aufladung des Strahls separat bei Messungen im Behälter zu erfassen. Die Abweichungen und Pumpendrucke von 400 bar und 500 bar ergaben teils positive Raumpotentiale. Das betragslich höchste Raumpotential betrug -0,10 kV.

Beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser waren die Raumpotentiale des Strahls negativ und erreichten Werte von bis zu -25,40 kV (Abbildung 6.24). Das betragslich hohe negative Raumpotential des Strahls wurde durch das Feldstärkenmessgerät nur kurzzeitig in den ersten zwei Minuten erkannt, bevor sich eine Mittelung des Strahls und Sprühnebels innerhalb der Messfläche einstellte [58]. Die Erhöhung der Temperatur des versprühten Wassers erhöhte den Prozess der Ladungstrennung an der Düse und den Betrag des Raumpotentials. Ohne die räumliche Begrenzung des Behälters ergaben sich beim gleichen Abstand der Elektrode zur Düse und Pumpendruck von 500 bar Raumpotentiale im Strahl, deren Betrag den Messbereich von -40 kV überschritt (Kapitel 5.3). Aus diesem Vergleich geht hervor, dass die räumliche Begrenzung des Behälters und der sich in dessen Volumen ausbildende Sprühnebel das Raumpotential des Strahls reduziert.

In [58] sind Messungen beschrieben, bei denen sich die Elektrode beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser im Sprühnebel befand. Ab einem Pumpendruck von 300 bar, 400 bar und 500 bar wurden in den ersten zwei Minuten positive Raumpotentiale gemessen. Das maximale

Raumpotential betrug +1,40 kV und wurde bei einem Pumpendruck von 500 bar gemessen. Nach den zwei Minuten wurden die Raumpotentiale negativ. Bei einem Pumpendruck von 100 bar und 200 bar waren sie ab Beginn der Messung negativ. Nach den zwei Minuten wurden nicht bei einem Pumpendruck von 500 bar, sondern bei 100 bar die betraglich höchsten Raumpotentiale von -0,98 kV gemessen. Diese Messungen deuten darauf hin, dass der sich durch die hydrodynamische Instabilität des Strahls ablösende Sprühnebel positiv geladen ist. Diese Aussage wird durch die am Strahl aus vollentsalztem Wasser, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters, gemessenen positiven elektrischen Feldstärken bestätigt (Kapitel 5.3).

Bei der Raumpotentialmessung war zu beachten, ob es zur Ladungstrennung durch das Auftreffen des Sprühstrahls auf die Elektrode kam oder ob das Raumpotential bereits im Strahl vorhanden war. Die in Kapitel 4.5.3 beschriebenen Widerstandsmessungen, bei denen sich die Elektrode im Strahl befand, wiesen nach, dass keine Ladungstrennung und Aufladung an der Elektrode erfolgte. Der Ableitpfad über den Sprühstrahl überwiegt derartige potenzielle Aufladungsvorgänge der Elektrode [58]. Weiterhin bestätigen die betraglich hohen negativen elektrischen Feldstärken in den ersten zwei Minuten, beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser, dass der Strahl ein, im Vergleich zum Sprühnebel, betraglich hohes negatives Raumpotential aufweisen muss.

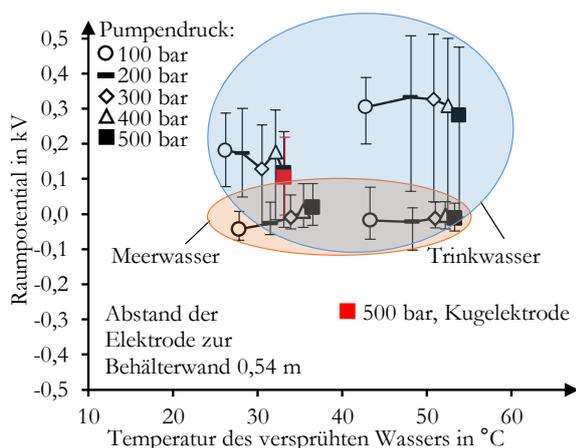


Abbildung 6.23: Raumpotential beim mittigen Sprühen von Meer- und Trinkwasser in den Behälter in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck

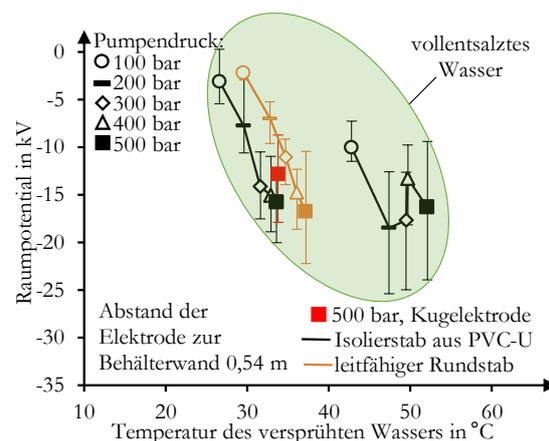


Abbildung 6.24: Raumpotential beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in den Behälter in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck

Wasser besitzt eine hohe Permittivität von 81 [33]. Beim Trennvorgang mit Wasser laden sich Werkstoffe niedrigerer Permittivität vorwiegend negativ auf [23]. Das beim Versprühen von vollentsalztem Wasser betraglich hohe negative Raumpotential konnte folglich durch das Abtrennen des Wasserstrahls von dem aus PVC-U gefertigten Isolierstab (Permittivität 3,8 bis 4,3 [23]), in dem die Elektrode montiert war, entstehen. Zur Klärung erfolgte ein zusätzlicher Versuch beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser. Statt des Isolierstabs mit montierter Elektrode, ragte ein isoliert aufgebauter und über das Hochspannungskabel mit dem Hochspannungsmesskopf des Feldstärkenmessgerätes verbundener leitfähiger Rundstab (Edelstahl) in den Behälter. Der Rundstab hatte einen Durchmesser von 0,020 m. Am in den Behälter ragenden Ende des Rundstabs war die Elektrode montiert und befand sich im Strahl. Die gemessenen Raumpotentiale dieser Konfiguration sind als orangefarbene Kurve in Abbildung 6.24 dargestellt. Die Temperaturdifferenz der Messreihen betrug  $(3,3 \pm 0,3)$  K und ist vernachlässigbar. Die Messungen belegen, dass das PVC-U des

Isolierstabes zu keiner signifikanten Aufladung der Elektrode führte und die Raumpotentialmessung dadurch nicht beeinflusst wurde.

Bei den Raumpotentialmessungen wurde eine Kegelelektrode ( $\varnothing = 0,010$  m,  $L = 0,010$  m) verwendet. Die Kegelelektrode wurde durch eine Kugelelektrode, mit einem Krümmungsradius von 0,013 m, getauscht. Die vergleichenden Messungen erfolgten beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser und Trinkwasser bei einem Pumpendruck von 500 bar. Sie sind als rote Kreise in Abbildung 6.23 und Abbildung 6.24 gekennzeichnet. Mit der Kugelelektrode reduzierten sich die betraglichen Mittelwerte und betraglich höchsten Raumpotentiale. Die Kegelelektrode wurde wegen der geringeren Aufprallfläche und den betraglich höheren Raumpotentialen verwendet.

Beim Sprühen im Winkel von Meerwasser ergaben sich positive Raumpotentiale (Abbildung 6.25). Mit bis zu +0,61 kV war es höher als beim mittigen Sprühen und verifiziert die Messungen der elektrischen Feldstärken. Die Erhöhung der Temperatur des versprühten Wassers hatte keinen Einfluss auf das Raumpotential. Die positive Polarität des Raumpotentials ist entgegengesetzt zu den negativen Raumpotentialen des Strahls. Im Vergleich zum Raumpotential des Strahls war das des Sprühnebels um rund das Sechsfache höher. Beim Versprühen von Meerwasser ist, wie bei Trinkwasser, der Aufprall des Strahls der dominierende Ladungstrennungsprozess.

Beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser ergaben sich negative Raumpotentiale von bis zu -2,84 kV (Abbildung 6.25). Bis zu einem Pumpendruck von 300 bar erhöhte sich der Betrag des Raumpotential, bis er sich bei 400 bar und 500 bar reduzierte. Eine Erhöhung der Temperatur des versprühten Wassers reduzierte den Betrag des Raumpotential. Die Reduzierung des Betrags des negativen Raumpotentials mit dem Anstieg der Temperatur und Pumpendrücken von über 300 bar deuten darauf hin, dass sich der durch die hydrodynamische Instabilität des Strahls ablösende Sprühnebel positiv geladen sein muss und den durch den Aufprall des Strahls gebildeten negativen Sprühnebel reduziert. Im Vergleich zum Raumpotential des Strahls ist das des Sprühnebels um eine Größenordnung kleiner. Beim Versprühen von vollentsalztem Wasser ist die Ladungstrennung an der Düse der dominierende Ladungstrennungsprozess.

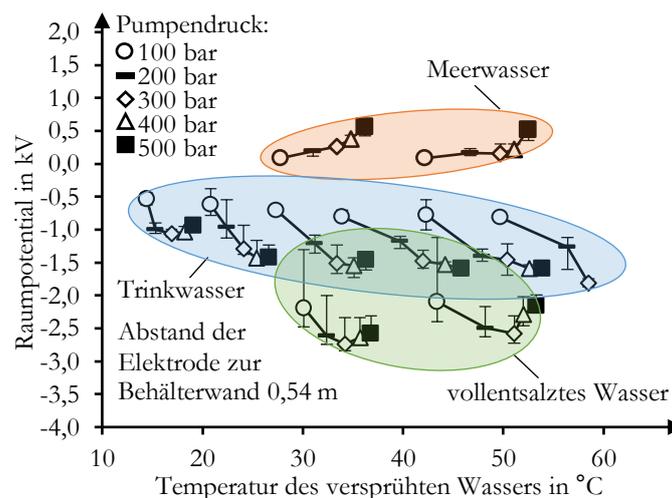


Abbildung 6.25: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von Meerwasser, Trinkwasser und vollentsalztem Wasser in den Behälter in Abhängigkeit von der Temperatur des versprühten Wassers und dem Pumpendruck

## 6.6 Pumpendrucke über 500 bar

Bei den bisherigen Versuchen dieser Arbeit wurde der Grenzwert des Pumpendrucks von 500 bar unterschritten. Es erfolgten Messungen der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials bei Pumpendruck von bis zu 2500 bar. Pumpendrucke von über 500 bar waren nur bei Düsendurchmessern von 1,00 mm oder weniger möglich, da ansonsten die zulässige Rückstoßkraft von 250 N überschritten wird [17, 21]. Der Grenzwert der Rückstoßkraft gilt für die von Hand gehaltenen Spritzeinrichtungen. Genutzt wurden für die Versuche die Flüssigkeitsstrahler des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH. Die in den folgenden Legenden der Diagramme angegebenen Bezeichnungen A und T der Düsen, beschreiben den eingesetzten Düsenträger. Die Messungen erfolgten mit Trinkwasser aus Voerde und vollentsalztem Wasser. Angaben der elektrischen Leitfähigkeiten sind in Tabelle 4.3 angegeben. Der Abstand der Düse zur Behälterwand betrug beim Sprühen im Winkel 0,6 m. Kleinere Abstände führten bei Pumpendruck von über 500 bar bereits nach wenigen Sekunden zu einer Durchtrennung der Behälterwand.

**Feldstärkenmessung:** Beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser erhöhte sich der Betrag der elektrischen Feldstärke mit dem Pumpendruck (Abbildung 6.26). Bei derart hohen Pumpendruck erhöhte sich die Temperatur des versprühten Wassers und dadurch die Ladungstrennung. Wie bereits in Kapitel 6.3 beschrieben, reduzierte sich der Betrag der elektrischen Feldstärke bei einer Reduzierung des Düsendurchmessers, wenn Trinkwasser im Winkel in den Behälter gesprüht wurde. In Abbildung 6.26 ist die elektrische Feldstärke von bis zu -12,3 kV/m, beim Sprühen im Winkel mit dem Hochdruckreiniger HD 9/50, bei einem Pumpendruck von 500 bar und einem Düsendurchmesser von 1,05 mm, angegeben. Die elektrische Feldstärke von bis zu -11,6 kV/m, gemessen bei einem Düsendurchmesser von 1,00 mm (Düsenträger A), reproduzierte die -12,3 kV/m. Im Vergleich zum Düsenträger A führte die Verwendung des Düsenträgers T, bei einem Pumpendruck von 1500 bar, zu betragslich niedrigeren elektrischen Feldstärken. Der Volumenstrom des Düsenträgers T war bei einem Pumpendruck von 1500 bar, gegenüber des Düsenträgers A, um ein Viertel reduziert (Anhang E). Mit dem Volumenstrom reduzierte sich die Anzahl der Ladungsträger, die Tropfen- und Raumladungsdichte. Bei einem Pumpendruck von 2500 bar und einem Düsendurchmesser von 1,00 mm (Düsenträger T) ergaben sich hohe Abweichungen, da kurzzeitig die Druckluftspülung des Feldstärkenmessgerätes ausgefallen war. Der betragslich höchste Wert der elektrischen Feldstärke betrug -26,5 kV/m, gemessen bei 2500 bar.

Zum Vergleich mit den elektrischen Feldstärken beim Versprühen von vollentsalztem Wasser bei über 500 bar, ist in Abbildung 6.27 die elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel und beim mittigen Sprühen (Messwerte nach zwei Minuten, Kapitel 6.5), bei einem Pumpendruck von 500 bar und einem Düsendurchmesser von 1,05 mm des Hochdruckreinigers HD 9/50 angegeben. Beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser erhöhte sich der Betrag der elektrischen Feldstärke bis zu einem Pumpendruck von 1500 bar. Wie beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser reduzierte sich mit dem Volumenstrom des Düsenträgers T, bei einem Pumpendruck von 1500 bar, der Betrag der elektrischen Feldstärke. Die Erhöhung des Pumpendrucks auf 2500 bar erhöhte den Betrag der elektrischen Feldstärke unwesentlich. Die betragslich höchste elektrische Feldstärke betrug -13,3 kV/m, gemessen bei einem Pumpendruck von 1500 bar und einem Düsendurchmesser von 1,00 mm (Düsenträger A). Bei Pumpendruck von über 500 bar ergab sich in den ersten zwei Minuten ein Spitzenwert. Es bestätigte sich die in Kapitel 6.5 beschriebene Reduzierung der

Spitzenwerte mit einem Anstieg des Pumpendrucks. So überschritten die Spitzenwerte nicht die Abweichungen vom Mittelwert der in Abbildung 6.27 aufgeführten elektrischen Feldstärken.

Beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser, mit einem Pumpendruck von 1500 bar, überwog in der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes der positive Sprühnebel, der sich durch die hydrodynamische Instabilität vom Strahl ablöste. Bei einem Pumpendruck von 2500 bar bewirkte die erhöhte Ladungstrennung beim Aufprall und die erhöhte Turbulenz eine Reduzierung des Betrags der elektrischen Feldstärke. In den ersten zwei Minuten traten kurzzeitig negative Spitzenwerte auf, die auf einen negativ geladenen Strahl hinwiesen. Die Beträge der Spitzenwerte reduzierten sich mit dem Anstieg des Pumpendrucks und überschritten nicht die Abweichungen der elektrischen Feldstärken. Die betraglich höchste elektrische Feldstärke betrug +41,8 kV/m.

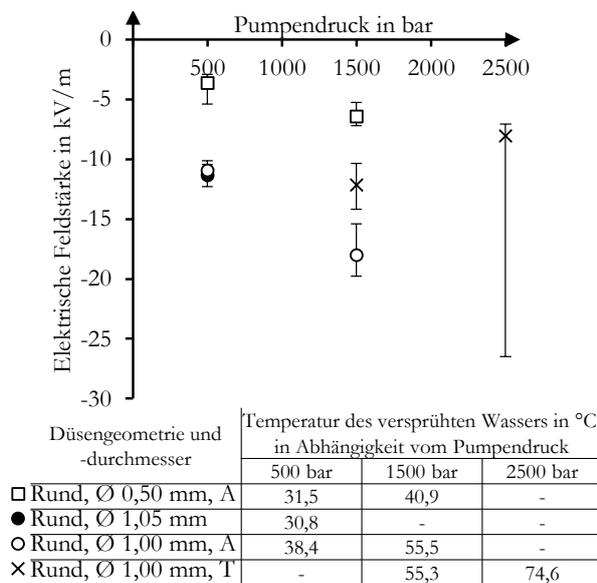


Abbildung 6.26: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser bei Pumpendrücken von über 500 bar

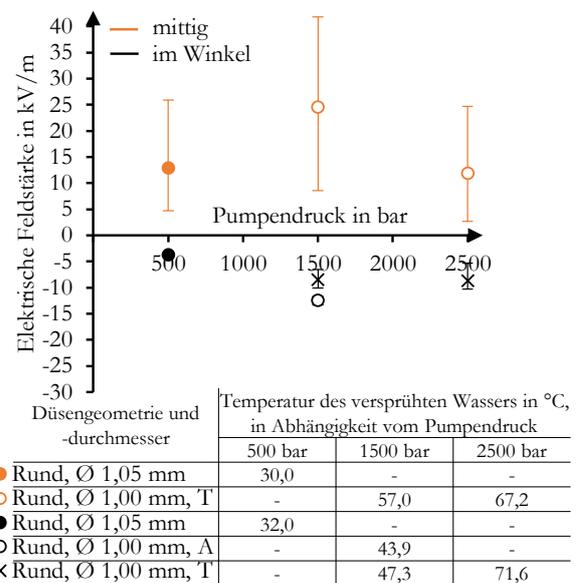


Abbildung 6.27: Elektrische Feldstärke beim mittigen (orange) und Sprühen im Winkel (schwarz) von vollentsalztem Wasser bei Pumpendrücken von über 500 bar

**Raumpotentialmessung:** Die Messunsicherheit betrug  $\pm 0,2$  kV. Eine Ausnahme bildeten die Versuche mit dem Düsenträger A, beim Versprühen im Winkel von Trinkwasser, mit  $\pm 0,05$  kV. Für das mittige Sprühen bei einem Pumpendruck von über 500 bar war die Raumpotentialmesstechnik ungeeignet, da sie dem Aufprall des Strahls nicht standhalten würde.

Beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser erhöhte sich der Betrag des Raumpotentials mit dem Pumpendruck (Abbildung 6.28). Bei derart hohen Pumpendrücken erhöhte sich die Temperatur des versprühten Wassers und dadurch die Ladungstrennung. Das betraglich höchste Raumpotential lag bei  $-2,13$  kV, gemessen bei 1500 bar und dem Düsendurchmesser von 1,00 mm (Düsenträger A). Der Düsendurchmesser von 1,00 mm (Düsenträger T) generierte, wie bei den Messungen der elektrischen Feldstärke, betraglich reduzierte Werte. Das Raumpotential, gemessen beim Versprühen mit dem Hochdruckreiniger HD 9/50, mit einem Pumpendruck von 500 bar und einem Düsendurchmesser von 1,05 mm, war durch die 1,00 mm Düse im Düsenträger A des Flüssigkeitsstrahlers des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH reproduzierbar.

Beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser, mit dem Hochdruckreiniger HD 9/50 und einem Düsendurchmesser von 1,05 mm, erhöhte sich bis zu einem Pumpendruck von 300 bar

der Betrag des Raumpotentials (Abbildung 6.29). Bei über 300 bar bis 500 bar reduzierte sich der Betrag des Raumpotentials (Kapitel 6.5). Pumpendrucke von bis zu 1500 bar (Düsenträger A) reduzierten den Betrag des Raumpotentials weiter auf bis zu -0,86 kV. Die Verwendung des Düsenträgers T und eine Reduzierung des Düsendurchmesser auf 0,50 mm führte zu positiven Raumpotentialen. Bei einem Pumpendruck von 1500 bar und einem Düsendurchmesser von 0,50 mm war das Raumpotential maximal und betrug +4,59 kV. Es wurden die positiven Tropfen gemessen, die durch die Ladungstrennung der hydrodynamischen Instabilität entstanden waren.

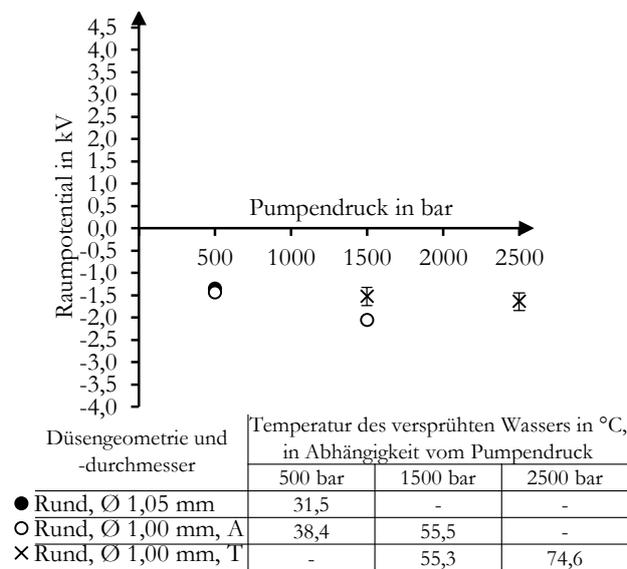


Abbildung 6.28: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser bei Pumpendrücken von über 500 bar

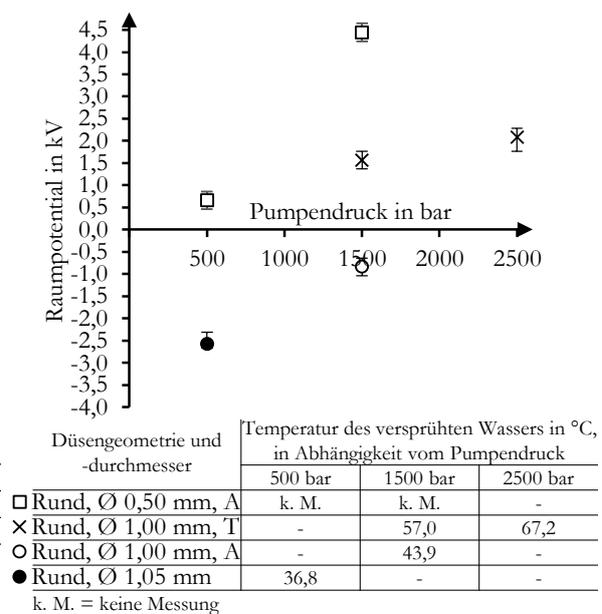


Abbildung 6.29: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser bei Pumpendrücken von über 500 bar

## 6.7 Schlussfolgerungen

Die Messungen haben bewiesen, dass die nach unten ausgerichtete Messkopfföffnung des Feldstärkenmessgerätes und die montierte Druckluftspülung (Kapitel 4.5.2) geeignete Maßnahmen sind, um das Eindringen von Tropfen in den Messkopf deutlich zu reduzieren und dadurch auftretende Messfehler zu vermeiden. Das Feldstärkenmessgerät misst die geladenen Tropfen, die sich innerhalb der Messfläche befinden. Es ist der Nachweis gelungen, dass es bei Messungen der elektrischen Feldstärke zu einer Mittelung entgegengesetzt geladener Tropfen innerhalb der Messfläche kommt. Daraus resultiert der Nachteil, dass die Höhe und Polarität des Strahls und Sprühnebels nicht separat erfasst wird. Als Beispiel sei an dieser Stelle der hoch aufgeladene Strahl beim Versprühen von vollentsalztem Wasser genannt, der durch die alleinige Feldstärkenmessung unerkannt geblieben wäre (Kapitel 6.5). Für genau diesen Einsatz hat sich die entwickelte Raumpotentialmesstechnik als geeignet herausgestellt. Mit ihr ist es gelungen dem Strahl und Sprühnebel eine Höhe der Aufladung und Polarität zuzuordnen. Beim Sprühen im Winkel, in der Position „unten rechts“, verteilt sich im Volumen des Behälters der Sprühnebel einer Polarität. Da sich keine Mittelung bei der Feldstärkenmessung ergab, war sie durch die Raumpotentialmessung verifizierbar. Anhand der durchgeführten Messungen ist es gelungen den dominierenden Ladungstrennungs-

prozess beim Versprühen von Meerwasser, Trinkwasser und vollentsalztem Wasser zu identifizieren und den geladenen Tropfen Polaritäten zuzuordnen (Tabelle 6.1):

Tabelle 6.1: Polarität der durch Ladungstrennung geladenen Tropfen beim Versprühen

Ladungstrennung...	Tropfen des Strahls oder Sprühnebels	Meerwasser	Trinkwasser	Vollentsalztes Wasser
an der leitfähigen geerdete Düse	Strahl	Negativ	Positiv	Negativ, <b>D</b>
durch die Hydrodynamische Instabilität	Strahl	Negativ	Positiv	Negativ, <b>D</b>
	Sprühnebel	Positiv	Negativ	Positiv, <b>D</b>
beim Aufprall auf eine leitfähige geerdete Oberfläche	Sprühnebel	Positiv, <b>D</b>	Negativ, <b>D</b>	Negativ

**D** = dominierender Ladungstrennungsprozess

Im Vergleich zu den Messungen am Strahl, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters (Kapitel 5.3), reduzierte der Behälter die elektrischen Feldstärken und Raumpotentiale beim Versprühen von vollentsalztem Wasser. Beim Versprühen von Meer- und Trinkwasser ist der dominierende Ladungstrennungsprozess der Aufprall auf eine Oberfläche und führte im Behälter zu höheren elektrischen Feldstärken und Raumpotentialen. Die systematischen Untersuchungen der Parameter des Versprühens von Wasser in den 1 m<sup>3</sup> Behälter zeigten, dass sich die Ladungstrennung

- mit dem Pumpendruck
- beim Sprühen in der Position „unten rechts“,
- durch die Abstandsreduzierung zwischen Düse und der Behälterwand,
- mit sich nicht aufweitenden und nicht rotierenden Düsen,
- beim Sprühen von Trinkwasser und beim Aufprall von vollentsalztem Wasser durch einen größeren Düsendurchmesser,
- an der Düse und der hydrodynamischen Instabilität beim Sprühen von vollentsalztem Wasser durch einen kleineren Düsendurchmesser,
- mit der Temperatur des versprühten Wassers pro 1 K um 1 %
- und bei einer niedrigeren elektrischen Leitfähigkeit des Wassers

erhöhte. Mit einem kleineren Düsendurchmesser und einem höheren Pumpendruck erhöhte sich beim Versprühen von vollentsalztem Wasser die Ladungstrennung durch die hydrodynamische Instabilität. Die daraus entstandenen Tropfen waren positiv geladen. Im Behälter trafen diese positiv geladenen auf die negativ geladenen Tropfen des Strahls und auf die durch den Aufprall entstandenen Tropfen. Es kam zum Ladungsausgleich und einer Reduzierung der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials. Überwogen die positiven Tropfen, wurden positive elektrische Feldstärken und Raumpotentiale gemessen. Diese Überlegung erklärt die in den ersten zwei Minuten, beim mittigen Sprühen in den Behälter von vollentsalztem Wasser, positiven Raumpotentiale des Sprühnebels der Messungen aus [58]. Nach zwei Minuten überlagerten die negativ geladenen Tropfen des Aufpralls die positiv geladenen Tropfen der hydrodynamischen Instabilität.

## 7 Messungen an Strahlen im 6,2 m<sup>3</sup>, 16,8 m<sup>3</sup> und 44,0 m<sup>3</sup> Behälter

Das Ziel war es den Einfluss des Behältervolumens und -durchmessers auf die elektrische Feldstärke und das Raumpotential zu untersuchen. Aus diesem Grund erfolgten Messungen im leitfähigen geerdeten 6,2 m<sup>3</sup>, 16,8 m<sup>3</sup> und 44,0 m<sup>3</sup> Behälter. Die Abmessungen der drei mittelgroßen Behälter sind Tabelle 7.1 zu entnehmen. In Anhang I sind die technischen Zeichnungen hinterlegt.

Tabelle 7.1: Abmessungen der mittelgroßen Behälter

Bezeichnung	Position	Volumen in m <sup>3</sup>	Innendurchmesser in m	Innenlänge in m
Tankwagen	Liegend	6,2	1,40	4,19
Eisenbahnkesselwagen	Liegend	16,8	1,79	7,04
Behälter mit zwei Rührwerken (kurz: Mischer)	Stehend	44,0	Oval ca. 4,70 und ca. 4,10	4,00

Die Öffnung der Messgeräte befand sich beim 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter auf der Hälfte der Innenlänge. Messungen des Raumpotentials erfolgten so im Mittelpunkt und Messungen der elektrischen Feldstärke oberhalb des Mittelpunkts des Behälters. Beim 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter wurde entlang der Rotationsachse des Behälters oder in der Position „unten rechts“ gesprüht (Kapitel 4.2). Die vom Hersteller Hammelmann Maschinenfabrik GmbH verwendeten Düsen und bei den Versuchen im 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter, betrug der Abstand der Düse zur Behälterwand (0,675 ± 0,075) m. Kleinere Abstände der Düse zur Behälterwand führten bei Pumpendrücken von 1500 bar oder mehr bereits nach wenigen Sekunden zu einem Materialabtrag und Durchtrennung der Behälterwand. Wegen eines technischen Defektes wurden keine Messungen der elektrischen Feldstärke im 16,8 m<sup>3</sup> Behälter durchgeführt. Für die Messungen mit den Düsen des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH wurde das Trinkwasser aus Voerde und bei den Versuchen mit dem Düsendurchmesser von 1,05 mm das Trinkwasser aus Darmstadt verwendet. Im oberen Bereich des 44,0 m<sup>3</sup> Behälters befand sich eine Plattform, von der durch eine rechteckige Öffnung mittig oder im Winkel in den Behälter gesprüht wurde. Beim Sprühen im Winkel betrug der Abstand der Düse zur Behälterwand 0,40 m. Im 44,0 m<sup>3</sup> Behälter waren zwei Rührwerke montiert. Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, ist für das Raumpotential das kleinste raumbegrenzende Maß entscheidend. Es ist eine Reduzierung des Innendurchmessers auf 2,5 m anzunehmen. Die relative Feuchte der Luft in der Umgebung des 44,0 m<sup>3</sup> Behälters betrug zum Zeitpunkt der Messungen über 70 %. Bei einer derart hohen Feuchte der Luft waren Messungen des Raumpotentials nicht durchführbar (Kapitel 4.4.2). Für die Versuche im 44,0 m<sup>3</sup> Behälter wurde das Brauchwasser der BASF Coatings GmbH Münster verwendet. Angaben der elektrischen Leitfähigkeiten des Trink- und Brauchwassers sind in Kapitel 4.6 zu finden. Die Volumenströme der verwendeten Düsen sind Anhang E zu entnehmen. Die Düsen des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH sind in den nachfolgenden Tabellen mit der Bezeichnung des Düsenträgers A und T in der Spalte „Düsendurchmesser in mm“ gekennzeichnet. Im Folgenden werden die in den Behältern aufgetretenen elektrischen Feldstärken und Raumpotentiale beschrieben. Ergänzend wird auf die Messungen im 1 m<sup>3</sup> Behälter Bezug genommen. Alle Messwerte der elektrischen Feldstärke, des Raumpotentials und die Temperaturen des versprühten Wassers sind in Anhang I hinterlegt.

## 7.1 Feldstärkenmessung

Für einen bündigen Einbau war das Feldstärkenmessgerät in behälterspezifischen Adapterplatten montiert. Die Innenkonturen der Adapterplatten entsprachen dem Radius des jeweiligen Behälters und ermöglichten eine Messung im homogenen Feld. Der Aufbau entsprach dem im 1,0 m<sup>3</sup> Behälter (Kapitel 4.2), mit dem Unterschied der größeren Abmessungen der mittelgroßen Behälter. Die Druckluftspülung war am Messgerät angeschlossen.

Beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser ergaben sich negative elektrische Feldstärken (Tabelle 7.2). Mit dem Anstieg des Behältervolumens und -durchmessers reduzierte sich tendenziell der Betrag der elektrischen Feldstärke. Bei einem Düsendurchmesser von über 0,50 mm betrug die Reduzierung mit der Zunahme des Behältervolumens von 1,0 m<sup>3</sup> auf 6,2 m<sup>3</sup> ein Drittel bis die Hälfte. Beim Düsendurchmesser von 0,50 mm waren die elektrischen Feldstärken und die Reduzierung mit dem Behältervolumen und -durchmesser am geringsten. Der Betrag der elektrischen Feldstärke beim Sprühen im Winkel in den 44,0 m<sup>3</sup> Behälter, mit einem Düsendurchmesser von 1,00 mm (Düsenträger A) und einem Pumpendruck von 500 bar, reduzierte sich gegenüber den Messungen im 1,0 m<sup>3</sup> Behälter auf ein Drittel bis ein Viertel. Im 44,0 m<sup>3</sup> Behälter erhöhte sich mit der Temperatur des versprühten Wassers der Betrag der elektrischen Feldstärke. Betrug diese bei einer Ausgangstemperatur des Wassers von 25 °C noch -3,4 kV/m, wurden bei 50 °C bereits -5,7 kV/m und bei 90 °C Werte von bis zu -7,9 kV/m gemessen. Beim Anstieg der Temperatur von 50 °C auf 90 °C ist die in Kapitel 6.4 formulierte Aussage, dass sich beim Sprühen im Winkel die elektrische Feldstärke pro 1 K um 1 % erhöht, gültig.

Tabelle 7.2: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, Pumpendruck und Behälter

Behältervolumen in m <sup>3</sup>		Elektrische Feldstärke in kV/m							
		1,0		6,2		16,8		44,0	
Düsendurchmesser in mm	Druck in bar	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.
0,50 A	500	-3,7	-5,4	-4,2	-4,6	Technischer Defekt des Feldstärkenmessgerätes	-	-	-
0,50 A	1500	-6,5	-7,2	-5,7	-6,3		-	-	-
1,05	500	-11,4	-12,3	-	-		-	-	-
1,00 A (25 °C)	500	-11,0	-11,6	-	-		-3,1	-3,4	-
1,05 (45 °C)	500	-12,5	-13,5	-	-		-	-	-
1,00 A (50 °C)	500	-	-	-	-		-5,1	-5,7	-
1,00 A (90 °C)	500	-	-	-	-		-6,6	-7,9	-
1,00 A	1500	-18,1	-19,8	-10,2	-12,1		-	-	-
1,00 T	1500	-12,2	-14,2	-9,2	-10,5		-	-	-
1,00 T	2500	-8,1	-26,5	-9,8	-11,9		-	-	-
2,00 A	500	-15,1	-17,5	-10,8	-12,4		-	-	-
4,00 A	100	-7,4	-7,8	-3,4	-3,7		-	-	-

Mittelw. = Mittelwert, B. h. W. = Betraglich höchster Wert

Die gemessenen elektrischen Feldstärken beim mittigen Sprühen von Trinkwasser in die mittelgroßen Behälter sind in Anhang I aufgeführt. Beim mittigen Sprühen in den 6,2 m<sup>3</sup> Behälter sind

die Beträge der Mittelwerte, in Relation zu den Messungen beim Sprühen im Winkel, reduziert. Die Abweichungen sind erhöht, da sich in der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes positive Tropfen des Strahls und negative Tropfen des Sprühnebels befanden. Die betraglich höchsten elektrischen Feldstärken waren bei den untersuchten Konfigurationen aus Düsendurchmesser und Pumpendruck vergleichbar. Eine Ausnahme ergab der Düsendurchmesser von 1,00 mm (Düsenträger T), bei einem Pumpendruck von 1500 bar. Bei dieser Konfiguration überschritt die betraglich höchste elektrische Feldstärke mit -14,1 kV/m die beim Sprühen im Winkel von -10,5 kV/m. Beim mittigen Sprühen in den 44,0 m<sup>3</sup> Behälter ergaben sich bei einer Ausgangstemperatur des Wassers von 25 °C elektrische Feldstärken, die um den Nullpunkt schwankten. Der betraglich höchste Wert betrug -4,7 kV/m und überstieg die elektrische Feldstärke von -3,4 kV/m beim Sprühen im Winkel. Bei den Ausgangstemperaturen des Wassers von 50 °C und 90 °C waren die Abweichungen, gegenüber dem Sprühen im Winkel, ebenfalls erhöht. Beim mittigen Sprühen ergab sich bei 50 °C eine elektrische Feldstärke von -10,0 kV/m und bei 90 °C von -11,0 kV/m.

Anders als beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser ist bei vollentsalztem Wasser keine Reduzierung des Betrags der elektrischen Feldstärke mit dem Behältervolumen und -durchmesser zu beobachten (Tabelle 7.3). Beim 1,0 m<sup>3</sup> Behälter befanden sich im Volumen des Behälters positive Tropfen, die sich durch die hydrodynamische Instabilität vom Strahl ablösten und die negativ geladenen Tropfen, die beim Aufprall entstanden. Es kam zum Ladungsausgleich und einer Mittelung innerhalb der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes. Die Beträge der sich dadurch ergebenden elektrischen Feldstärken gleichen denen im 6,2 m<sup>3</sup> Behälter. In diesem war der Abstand zwischen Aufprallort und Feldstärkenmessgerät größer. Deshalb war, anders als im 1,0 m<sup>3</sup>, der Anteil positiver Tropfen, die sich durch die hydrodynamische Instabilität vom Strahl ablösten, innerhalb der Messfläche geringer. Beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in den 6,2 m<sup>3</sup> Behälter betrug die betraglich höchste elektrische Feldstärke -12,0 kV/m, gemessen bei einem Düsendurchmesser von 1,00 mm (Düsenträger A) und einem Pumpendruck von 1500 bar. Wie beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser, ergaben sich mit der 0,50 mm Düse (Düsenträger A) die betraglich niedrigsten elektrischen Feldstärken.

Tabelle 7.3: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, Pumpendruck und Behälter

Behältervolumen in m <sup>3</sup>		Elektrische Feldstärke in kV/m							
		1,0		6,2		16,8		44,0	
Düsendurchmesser in mm	Druck in bar	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.
0,50 A	500	-	-	-5,3	-6,5	Technischer Defekt des Feldstärkenmessgerätes	Keine Messungen		
0,50 A	1500	-	-	-6,0	-7,2				
1,05	500	-3,7	-16,1	-	-				
1,00 A	500	-	-	-8,3	-9,5				
1,00 A	1500	-12,5	-13,3	-10,5	-12,0				
1,00 T	1500	-8,5	-10,1	-9,3	-10,8				
1,00 T	2500	-8,7	-10,3	-9,2	-11,2				
2,00 A	500	-	-	-7,9	-10,2				

Mittelw. = Mittelwert, B. h. W. = Betraglich höchster Wert

Beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser (Tabelle 7.4) traten betragslich höhere elektrische Feldstärken auf, als beim Sprühen im Winkel (Tabelle 7.3). Der Grund dafür war, dass beim Versprühen von vollentsalztem Wasser der dominierende Ladungstrennungsprozess an der Düse und durch die hydrodynamische Instabilität stattfindet. Ohne die räumliche Begrenzung des Behälters ergaben sich bei einem Düsendurchmesser von 0,50 mm, einem Pumpendruck von 1500 bar und einem Abstand der Elektrode zur Düse von 2,0 m elektrische Feldstärken von bis zu +184,8 kV/m (Kapitel 5.3). Mit der räumlichen Begrenzung des 6,2 m<sup>3</sup> Behälters war die elektrische Feldstärke, bei der ansonsten gleichen Konfiguration aus Düsendurchmesser, Pumpendruck und Abstand zur Düse, mit maximal +79,1 kV/m um über die Hälfte reduziert. Ebenfalls reduzierte sich die elektrische Feldstärke bei einem Düsendurchmesser von 1,00 mm und einem Pumpendruck von 2500 bar durch die räumliche Begrenzung des Behälters. Betrag sie ohne die räumliche Begrenzung des Behälters +46,2 kV/m, war sie im 6,2 m<sup>3</sup> Behälter auf +39,7 kV/m und im 1,0 m<sup>3</sup> Behälter auf +24,7 kV/m reduziert. Beim 1,0 m<sup>3</sup> Behälter betrug der Abstand zur Düse 0,5 m und ist bedingt mit der elektrischen Feldstärke, ohne die Begrenzung des Behälters bei einem Abstand zur Düse von 1,0 m, von +35,4 kV/m zu vergleichen. Neben der Reduzierung der elektrischen Feldstärke durch die räumliche Begrenzung des geerdeten Behälters, führten die nach dem Aufprall auf die Behälterwand negativ geladenen Tropfen zu einer Reduzierung des Betrags der elektrischen Feldstärke.

Tabelle 7.4: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, Pumpendruck und Behälter

Behältervolumen in m <sup>3</sup>		Elektrische Feldstärke in kV/m							
		1,0		6,2		16,8		44,0	
Düsendurchmesser in mm	Druck in bar	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.
0,50 A	500	-	-	+23,0	+44,0	Technischer Defekt des Feldstärkenmessgerätes	Keine Messungen		
0,50 A	1500	-	-	+39,8	+79,1				
1,05	500	+14,9	+27,8	-	-				
1,00 A	500	+0,4	-9,3	-2,6	-9,2				
1,00 A	1500	-	-	+5,6	+20,3				
1,00 T	1500	+24,2	+41,8	+18,7	+46,1				
1,00 T	2500	+11,8	+24,7	+16,7	+39,7				
2,00 A	500	-	-	-5,9	-9,6				

Mittelw. = Mittelwert, B. h. W. = Betraglich höchster Wert

## 7.2 Raumpotentialmessung

Im 6,2 m<sup>3</sup> Behälter ragte der Isolationsstab der Raumpotentialmesstechnik 0,7 m und beim 16,8 m<sup>3</sup> Behälter 0,9 m in den Behälter, damit die Elektrode im Mittelpunkt positioniert war. Der weitere Versuchsaufbau entsprach dem im 1,0 m<sup>3</sup> Behälter und ist Kapitel 4.2 zu entnehmen. Bei den Versuchen mit dem Düsendurchmesser von 1,05 mm und dem Hohlstrahlrohr betrug die Messunsicherheit  $\pm 0,1$  kV. Bei den Düsenträgern A und T und bei einem Raumpotential von über 1,5 kV, betrug sie  $\pm 0,2$  kV. Bei geringeren Raumpotentialen galt bei den Düsenträgern eine Messunsicherheit von  $\pm 0,05$  kV, mit der Ausnahme des Düsendurchmessers von 1,00 mm

(Düsensträger A) beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in den 1,0 m<sup>3</sup> Behälter, bei dem ebenfalls die geringere Messunsicherheit von  $\pm 0,05$  kV galt. Beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser galt, unabhängig vom Düsendurchmesser und -träger, ab einem Raumpotential von über 5,0 kV eine Messunsicherheit von  $\pm 1,0$  kV.

Der Betrag des Raumpotentials war beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in den 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter, gegenüber den Raumpotentialen im 1,0 m<sup>3</sup> Behälter, reduziert (Tabelle 7.5). Der Betrag des Raumpotentials erhöhte sich mit dem Pumpendruck und Düsendurchmesser. Bei den Versuchen mit dem Düsendurchmesser von 1,05 mm im 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter wurde das Trinkwasser vor dem Versprühen auf 25 °C temperiert. Die Temperaturdifferenz von 20 K zu den Versuchen mit 45 °C bewirkte im 6,2 m<sup>3</sup> Behälter, bei einem Pumpendruck von 300 bar und 500 bar, exakt die Erhöhung des Betrags des Raumpotentials von 1 % pro 1 K (Kapitel 6.4). Im 16,8 m<sup>3</sup> Behälter wurde die Erhöhung mit der Temperatur von 1 % pro 1 K unterschritten.

Tabelle 7.5: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, Pumpendruck und Behälter

Behältervolumen in m <sup>3</sup>		Raumpotential in kV							
		1,0		6,2		16,8		44,0	
Düsendurchmesser in mm	Druck in bar	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.
0,50 A	500	-0,47	-0,49	-0,37	-0,41	-	-	Feuchte der Luft über 70 %	
1,05	100	-0,84	-0,90	-0,16	-0,24	-0,27	-0,36		
1,05	300	-1,34	-1,39	-0,36	-0,42	-0,70	-0,80		
1,05	500	-1,35	-1,40	-0,43	-0,55	-0,81	-0,88		
1,05 (45 °C)	100	-0,78	-0,85	-0,43	-0,50	-0,30	-0,38		
1,05 (45 °C)	300	-1,46	-1,52	-0,41	-0,55	-0,65	-0,75		
1,05 (45 °C)	500	-1,59	-1,66	-0,52	-0,64	-0,87	-0,99		
1,00 A	500	-1,43	-2,05	-	-	-	-		
1,00 A	1500	-2,05	-2,13	-1,45	-1,56	-	-		
1,00 T	1500	-1,53	-1,54	-1,26	-1,34	-	-		
1,00 T	2500	-1,64	-1,69	-1,64	-1,77	-	-		
2,00 A	500	-2,15	-2,29	-1,88	-1,92	-	-		
4,00 A	100	-0,95	-1,03	-0,34	-0,40	-	-		

Versuche mit Hohlstrahlrohr der Feuerwehr von 6,67 l/s bis 7,92 l/s

Vollstrahl	6 bis 7	-	-	-	-	0,00	-0,14	
Sprühstrahl	6 bis 7	-	-	-	-	-0,04	-0,26	
Schutzschild	6 bis 7	-	-	-	-	-0,64	-0,75	

Mittelw. = Mittelwert, B. h. W. = Betraglich höchster Wert

Laut TRGS 727 [1] sind bei Reinigungsarbeiten in Behältern mit Wasserstrahlen bei Pumpendrücken von bis zu 12 bar keine gefährlich hohen Aufladungen zu erwarten, wenn der Volumenstrom 7 l/s und das Behältervolumen 10 m<sup>3</sup> nicht übersteigt. Zur Überschreitung des Grenzwertes des Volumenstroms waren Hohlstrahlrohre der Feuerwehr geeignet. Im Düsenaustritt befindet

sich im Hohlstrahlrohr ein Umlenkkörper, durch den eine ringförmige Düsengeometrie entsteht. Durch das Verschieben des Umlenkkörpers nach vorne und hinten war die Aufweitung des Strahls einzustellen. Unterschieden wurde zwischen dem Vollstrahl, dem Sprühstrahl mit einer mittleren Aufweitung von 45° und dem Schutzschild (Mannschutz), das einer maximalen Aufweitung von 120° entsprach [70]. Für die Versuche mit dem Hohlstrahlrohr wurde das Brauchwasser der Merck KGaA Darmstadt verwendet. Bei den Hohlstrahlrohren des Herstellers Rosenbauer International AG handelte es sich um das Modell RB 101 EN SELECT FLOW mit 6,67 l/s und RB 102 NFPA SELECT FLOW mit 7,92 l/s [70]. Betrieben wurden diese Hohlstrahlrohre mit einem Pumpendruck von 6 bar bis 7 bar. Um den Grenzwert des Behältervolumens von 10 m<sup>3</sup> zu überschreiten, wurde in den 16,8 m<sup>3</sup> Behälter gesprüht und das Raumpotential im Mittelpunkt des Behälters gemessen. Mit der Aufweitung des Strahls erhöhte sich der Betrag des Raumpotentials. Das betraglich höchste Raumpotential betrug -0,75 kV (Tabelle 7.5).

Beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in den 6,2 m<sup>3</sup> Behälter zeigte sich erneut, dass sich mit dem Düsendurchmesser die Ladungstrennung beim Aufprall erhöhte (Tabelle 7.6). Das betraglich höchste Raumpotential im 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter wurde bei einem Düsendurchmesser von 2,00 mm (Düsenträger A) und einen Pumpendruck von 500 bar gemessen und betrug -2,99 kV. Im 1,0 m<sup>3</sup> Behälter ergab sich beim Düsendurchmesser von 0,50 mm (Düsenträger A) und beim Düsendurchmesser von 1,00 mm (Düsenträger T) die Besonderheit, dass positive Raumpotentiale von bis zu +4,59 kV gemessen wurden. Bei diesen Düsendurchmessern und Pumpendrücken von bis zu 2500 bar war die Ladungstrennung der hydrodynamischen Instabilität stark ausgeprägt. Deswegen wurden bei diesen Konfigurationen aus Düsendurchmesser und Druck am Strahl, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters, die höchsten positiven elektrischen Feldstärken gemessen (Kapitel 5.3). Da der Abstand der Düse zur Behälterwand ( $0,675 \pm 0,075$ ) m betrug und die Ladungstrennung durch die hydrodynamische Instabilität ermöglichte, waren an der Elektrode die positiven Raumpotentiale messbar. Diese positiven Raumpotentiale beweisen, dass es bei der Messung der elektrischen Feldstärke zu einer Mittelung dieser positiven und den negativen Tropfen, die durch den Aufprall entstehen, kam. Deshalb übersteigen die im 1,0 m<sup>3</sup> Behälter gemessenen elektrischen Feldstärken nicht die im 6,2 m<sup>3</sup> Behälter. Im 6,2 m<sup>3</sup> Behälter war der Abstand der Elektrode zu den positiv geladenen Tropfen, die sich vom Strahl ablösten, größer und begründen, weshalb keine positiven Raumpotentiale gemessen wurden. Wie bspw. in [3] beschrieben, erhöht sich die Ladungstrennung beim Aufprall mit der Reduzierung der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers. Aus diesem Grund sind die gemessenen Raumpotentiale höher als beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser. Bei den Versuchen mit dem Düsendurchmesser von 1,05 mm im 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter wurde das vollentsalzte Wasser vor dem Versprühen auf 25 °C temperiert. Im 6,2 m<sup>3</sup> Behälter bewirkte die Differenz der Ausgangstemperatur des versprühten Wassers von 20 K auf 45 °C exakt dem Anstieg des Betrags des Raumpotentials um 1 % pro 1 K. Im 16,8 m<sup>3</sup> Behälter wurde der Anstieg von 1 % pro 1 K überschritten. Beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser und vollentsalztem Wasser in den 16,8 m<sup>3</sup> wurde, um den Abstand zwischen Düse und Aufprallfläche auf 0,19 m zu reduzieren, eine Prallplatte am Düsenrohr montiert (Anhang I). Die von der Prallplatte prallenden großen Tropfen des Strahls, die sonst im unteren Bereich des Behälters aufkamen, fielen durch das Volumen des Behälters und reduzierten, wie in Kapitel 6.2 beschrieben, das Raumpotential. Es wurde ebenfalls das Sprühen im Winkel in Richtung des Behälterdurchmesser getestet. Der Abstand der Düse zum Behälter blieb gleich. Die Messungen ergaben vergleichbare oder reduzierte Raumpotentiale (Anhang I).

Tabelle 7.6: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, Pumpendruck und Behälter

Behältervolumen in m <sup>3</sup>		Raumpotential in kV							
		1,0		6,2		16,8		44,0	
Düsendurchmesser in mm	Druck in bar	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.
0,50 A	500	+0,66	+0,72	-0,14	-0,34	-	-	Keine Messungen	
0,50 A	1500	+4,45	+4,59	-0,08	-0,40	-	-		
1,05	100	-2,19	-2,48	-0,46	-0,73	-1,00	-1,18		
1,05	300	-2,74	-2,84	-1,65	-1,89	-1,46	-1,60		
1,05	500	-2,58	-2,67	-1,75	-1,90	-1,41	-1,55		
1,05 (45 °C)	100	-2,09	-2,40	-1,03	-1,26	-1,79	-2,01		
1,05 (45 °C)	300	-2,58	-2,72	-1,83	-2,02	-1,83	-2,11		
1,05 (45 °C)	500	-2,15	-2,24	-2,07	-2,28	-1,95	-2,22		
1,00 A	1500	-0,84	-0,86	-2,07	-2,42	-	-		
1,00 T	1500	+1,57	+1,71	-2,70	-2,86	-	-		
1,00 T	2500	+2,08	+2,25	-2,24	-2,49	-	-		
2,00 A	500	-	-	-2,88	-2,99	-	-		
4,00 A	100	-	-	-1,81	-1,89	-	-		

Mittelw. = Mittelwert, B. h. W. = Betraglich höchster Wert

Im Folgenden werden die Messungen des Raumpotentials beim Sprühen von vollentsalztem Wasser ohne (Kapitel 5.3) und mit der räumlichen Begrenzung des Behälters (Tabelle 7.7) verglichen. Der Düsendurchmesser betrug 1,05 mm, bei einem Pumpendruck von 500 bar.

Beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser ergaben sich negative Raumpotentiale im 1,0 m<sup>3</sup> Behälter. Die Elektrode befand sich im Strahl und der Abstand zur Düse betrug 0,5 m. Das betraglich höchste Raumpotential betrug -20,04 kV. Ohne die räumliche Begrenzung des Behälters ergab sich beim gleichen Abstand zur Düse ein negatives Raumpotential von bis zu -48,04 kV (Messbereichsüberschreitung).

Am Strahl, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters, fand bei einem Abstand zur Düse von 2,0 m ein Polaritätswechsel von negativ zu positiv statt. Das bei diesem Abstand zur Düse gemessene Raumpotential schwankte um den Nullpunkt, wobei die Abweichungen zum positiven Raumpotential überwogen und maximal +6,04 kV betrug. Bei einem vergleichbaren Abstand zur Düse von 2,1 m ergab sich im 6,2 m<sup>3</sup> Behälter ebenfalls ein positives Raumpotential, dass mit +2,12 kV um rund zwei Drittel reduziert war.

Am Strahl, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters, war das Raumpotential bei einem Abstand zur Düse von 3,0 m und 4,0 m ausschließlich positiv und betrug maximal +7,32 kV. Bei diesem Abstand zur Düse wurde im 16,8 m<sup>3</sup> Behälter ein vergleichbares Raumpotential von +7,01 kV gemessen. Im Gegensatz zu dem 1,0 m<sup>3</sup> und 6,2 m<sup>3</sup> Behälter reduzierte die räumliche Begrenzung des Behälters beim mittigen Sprühen nicht das Raumpotential. Wie bereits beschrieben, sind die Tropfen aus vollentsalztem Wasser nach dem Aufprall negativ geladen. Je kleiner der Behälter ist, desto höher ist die Reduzierung des Raumpotentials des negativ geladenen Strahls oder des positiv geladenen Sprühnebels, der sich vom Strahl ablöst.

Mit der Temperaturerhöhung des vollentsalzten Wassers von 25 °C auf 45 °C erhöhte sich die Ladungstrennung an der Düse und folglich das Raumpotential. Das betraglich höchste Raumpotential entspricht im 1,0 m<sup>3</sup> Behälter -24,96 kV. Da sich mit der Temperatur die Ladungstrennung an der Düse erhöhte, erfolgte der Polaritätswechsel erst bei einem größeren Abstand zur Düse. Aus diesem Grund wurden im 16,8 m<sup>3</sup> Behälter bei einer Temperatur des vollentsalzten Wassers von 45 °C sowohl positive als auch negative Raumpotentiale gemessen.

Die Reduzierung des Düsendurchmessers erhöhte bei vollentsalztem Wasser die Ladungstrennung an der Düse (Kapitel 3.3.5) [19]. Das positive Raumpotential von +35,72 kV im 6,2 m<sup>3</sup> Behälter, gemessen bei einem Düsendurchmesser von 0,50 mm und einem Pumpendruck von 1500 bar, bestätigt die in Kapitel 3.3.5 getätigte Aussage und die unter gleichen Bedingungen gemessene positive elektrische Feldstärke am Strahl, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters.

Tabelle 7.7: Raumpotential beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, Pumpendruck und Behälter

Behältervolumen in m <sup>3</sup>		Raumpotential in kV							
		1,0		6,2		16,8		44,0	
Düsendurchmesser in mm	Druck in bar	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.	Mittelw.	B. h. W.
0,50 A	500	-	-	+18,12	+25,00	-	-	Keine Messungen	
0,50 A	1500	-	-	+22,43	+35,72	-	-		
1,05	100	-3,16	-5,44	+0,56	+1,04	-0,32	-0,60		
1,05	300	-14,12	-17,56	+2,18	+2,79	+1,17	+2,33		
1,05	500	-15,79	-20,04	+1,56	+2,12	+4,48	+7,01		
1,05 (45 °C)	100	-10,06	-11,47	+0,96	+1,26	-0,39	-0,79		
1,05 (45 °C)	300	-17,65	-24,96	+0,92	+2,34	-0,36	+2,46		
1,05 (45 °C)	500	-16,32	-23,92	+1,21	+2,61	-0,24	-1,42		
1,00 T	1500	-	-	+2,43	+12,64	-	-		
1,00 T	2500	-	-	+5,11	+11,92	-	-		

Mittelw. = Mittelwert, B. h. W. = Betraglich höchster Wert

Bei den vom Hersteller Hammelmann Maschinenfabrik GmbH verwendeten Düsen und bei den Versuchen im 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter, betrug der Abstand der Düse zur Behälterwand ( $0,675 \pm 0,075$ ) m und beim Sprühen im Winkel in den 44,0 m<sup>3</sup> Behälter 0,40 m. Aus den Messungen in Kapitel 6.2 geht hervor, dass sich mit dem Abstand der Düse zur Behälterwand der Betrag des Raumpotentials reduziert. Würde der Abstand zwischen Düse und Behälterwand nur 0,19 m betragen, müssten die Werte der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials bei einem Abstand von ( $0,675 \pm 0,075$ ) m um den Faktor 1,46 und bei einem Abstand von 0,40 m um den Faktor 1,35 erhöht werden. Wie eingangs beschrieben würde eine derartige Abstandsreduzierung jedoch nach wenigen Sekunden zum Materialabtrag und Durchtrennung der Behälterwand führen.

### 7.3 Umrechnung der elektrischen Feldstärke in das Raumpotential

Bei der Eignungsprüfung des Feldstärkenmessgeräts an Strahlen bekannten Potentials (Kapitel 4.5.1) ist die Umrechnung der gemessenen elektrischen Feldstärke  $E(R)$  am Rand in das

Raumpotential  $\Phi(0)$  im Mittelpunkt des Strahls anhand von Gleichung 2.17 möglich. Beim Sprühen in den 1,0 m<sup>3</sup> Behälter mit einem Strahl bekannten Potentials ist eine Umrechnung der gemessenen elektrischen Feldstärke am Rand des Behälters in das maximal gemessene Raumpotential im Behälter ebenfalls möglich [40]. In beiden Fällen liegt eine homogene Raumladungsdichte vor.  $R$  ist der Abstand zwischen der Mittellinie des Strahls und dem orthogonal dazu angeordneten Feldstärkenmessgerätes oder entspricht dem Behälterradius. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sei an dieser Stelle die Gleichung 2.17 aus Kapitel 2.5 erneut genannt:

$$\Phi(0) = R \cdot \frac{E(R)}{2} \quad \text{Entspricht der Gleichung 2.17}$$

Durch die Prozesse der Ladungstrennung beim mittigen Sprühen in den Behälter hat der Strahl ein entgegengesetztes oder in der Größenordnung abweichendes Raumpotential zum Sprühnebel, der sich im Volumen des Behälters verteilt. Es liegt keine homogene Raumladungsdichte vor, die Grundlage für die Anwendung der Gleichung 2.17 ist. Das Sprühen im Winkel in den Behälter erfüllt diese Grundlage, da nur der Sprühnebel einer Polarität vorliegt. Eine Ausnahme ergibt sich beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser, wenn sich durch den Abstand der Düse zur Behälterwand von  $(0,675 \pm 0,075)$  m die positiv geladenen Tropfen, die sich durch die hydrodynamische Instabilität vom Strahl ablösen, im Volumen des Behälters befinden und zu keiner homogenen Raumladungsdichte führen.

Die Widerstandsmessung der isoliert aufgebauten Elektrode der Raumpotentialmesstechnik gegenüber dem geerdeten Behälter haben ergeben, dass sich etwaige Ableitpfade nicht über die Isolationskörper der Messtechnik, sondern über die Tropfen im Volumen des Behälters ergeben (Kapitel 4.5.3). Die niedrigere elektrische Leitfähigkeit von vollentsalztem Wasser bewirkt, im Vergleich zu Trinkwasser, höhere gemessene Widerstände. Es wird angenommen, dass die hohe elektrische Leitfähigkeit von Meerwasser die Widerstände, gegenüber denen von Trinkwasser, weiter reduziert. In Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit der versprühten Wasserarten ergeben sich Korrekturfaktoren  $K_R$ , die für die gemessenen Raumpotentiale im Mittelpunkt des Behälters anzuwenden sind, um auf das tatsächlich vorliegende Raumpotential zu schließen (Tabelle 7.8):

Tabelle 7.8: Korrekturfaktoren  $K_R$  der Raumpotentialmessung in Abhängigkeit der Wasserart

Wasserart	Vollentsalztes Wasser	Trinkwasser	Meerwasser
Korrekturfaktor	$1,0 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,5$	$5,0 \pm 1,5$

Die Berechnung der Korrekturfaktoren ist in Anhang J hinterlegt. Die Korrekturfaktoren sind weitestgehend unabhängig vom Düsendurchmesser, Volumenstrom, Pumpendruck und den untersuchten Behältervolumen von 1,0 m<sup>3</sup> und 6,2 m<sup>3</sup>. Da das Feldstärkenmessgerät keine Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers besitzt, dienen die gemessenen elektrischen Feldstärken als Vergleichswert der Berechnung. Eine derartige Berechnung ist nur bei einer homogenen Raumladungsdichte anwendbar, da es ansonsten zu einer Mittelung der geladenen Tropfen innerhalb der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes kommt und eine Umrechnung in das ortsaufgelöste gemessene Raumpotential nicht mehr gegeben ist. Neben der elektrischen Leitfähigkeit spielen die Anzahl der Ladungsträger eine entscheidende Rolle. Überwiegt die Quelle

(Ladungserzeugung) der Senke (hochohmiger Ableitpfad über Tropfen), ist ein Faktor 1,0 zu erwarten. Aus diesem Grund gelingt die Umrechnung der Messungen im Behälter mit der elektrostatischen Applikationsanlage (Kapitel 4.4.2). Ebenfalls gelingt die Umrechnung bei vollentsalztem Wasser, da hier die höchste Aufladung vorliegt. Hingegen ist die Aufladung bei Trink- und Meerwasser reduziert und die elektrische Leitfähigkeit erhöht, wodurch sich der Widerstand im Ableitpfad zur Erde und das gemessene Raumpotential reduziert.

#### 7.4 Schlussfolgerungen

Beim Sprühen, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters, verteilt sich der aus feinen Tropfen bestehende Sprühnebel in der Umgebung. Die größeren Tropfen des Strahls fallen schwerkraftbedingt zu Boden, wodurch eine räumliche Ladungstrennung erfolgt. Beim Sprühen im räumlich begrenzten Behälter führt der Aufprall des Strahls zu einem zusätzlichen Prozess der Ladungstrennung. Die Verteilung des Sprühnebels ist auf das Volumen des Behälters begrenzt. Aus den Messungen resultieren folgende Schlussfolgerungen:

- Beim mittigen Sprühen in den Behälter beeinflusst die räumliche Begrenzung und der Sprühnebel die geladenen Tropfen des Strahls. Als Beispiel sei das mittige Sprühen von vollentsalztem Wasser in den 1,0 m<sup>3</sup> Behälter genannt. Erreichte das gemessene Raumpotential des Strahls, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters, Werte von bis zu -48,04 kV, reduzierte sich im 1,0 m<sup>3</sup> Behälter der Betrag des Raumpotentials des Strahls auf -20,04 kV.
- Das Versprühen von Wasser bringt geladene Tropfen in den Behälter oder erzeugt diese beim Aufprall und durch die hydrodynamische Instabilität. Die Relaxation des geerdeten Behälters wirkt den Ladungstrennungsprozessen entgegen. Es bildet sich ein Gleichgewichtszustand.
- Beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser bei einem konstanten Pumpendruck erhöht sich der Betrag der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials mit dem Düsendurchmesser. Die verwendeten Düsendurchmesser weisen, bei einem konstanten Pumpendruck, laut Gleichung 2.10 keine Abweichungen in der Düsenaustrittsgeschwindigkeit auf, die den Prozess der Ladungstrennung beim Aufprall beeinflussen. Entscheidend ist der Volumenstrom, der sich mit dem Düsendurchmesser erhöht. Ein höherer Volumenstrom erhöht die Tropfen- sowie die Raumladungsdichte und dadurch die elektrische Feldstärke und das Raumpotential.
- Mit dem Anstieg des Behältervolumen und -durchmesser reduziert sich, bei einer gleichbleibenden Konfiguration aus Düsendurchmesser und Pumpendruck, die elektrische Feldstärke und das Raumpotential. Während das Behältervolumen zunimmt, bleibt die Anzahl der Ladungsträger konstant. Dies führt zu einer Reduzierung der Tropfen- und Raumladungsdichte.
- Beim Sprühen im Winkel liegt im Behälter eine homogene Raumladungsdichte vor. Bei Messungen der elektrischen Feldstärke erfolgt keine Mittelung entgegengesetzt geladener Tropfen innerhalb der Messfläche. Nach Gleichung 2.17 ist bei einer homogenen Raumladungsdichte eine Umrechnung in das Raumpotential möglich. Bei der Raumpotentialmessung ergeben sich hochohmige Ableitpfade über die Tropfen des Sprühnebels. Anders als bei vollentsalztem Wasser bewirken diese Ableitpfade bei Trink- und Meerwasser eine deutliche Reduzierung des Raumpotentials. Es wurden Korrekturfaktoren bestimmt, mit denen das gemessene Raumpotential in das tatsächlich vorliegende zu korrigieren ist (Tabelle 7.8).

## 8 Blaues Leuchten beim Aufprall von Wasser

Laut Berichten vom Bedienpersonal der Flüssigkeitsstrahler tritt unter bestimmten Voraussetzungen beim Aufprall von Wasser auf eine Oberfläche ein blaues Leuchten auf. Die Form entspricht der Geometrie des Strahls. So ist bei einem Flachstrahl ein dünner Streifen und bei einem Rundstrahl ein Punkt zu beobachten. Die Berichte geben Anlass zur Beantwortung der sicherheitstechnischen Fragestellung, ob vom blauen Leuchten eine elektrostatische Zündgefahr ausgeht, wenn es in explosionsgefährdeten Bereichen auftritt. Zur Klärung dieser Fragestellung wurden die Parameter der Reinigungsaufgaben identifiziert, bei denen das blaue Leuchten aufgetreten ist (Tabelle 8.1). Im Folgenden wird auf die Nachstellung der Reinigungsaufgaben, auf die Abhängigkeit der Intensität des blauen Leuchtens vom Werkstoff der Oberfläche des Aufpralls und auf die durchgeführten Messungen der übertragenen Ladung eingegangen.

Tabelle 8.1: Reinigungsaufgaben, bei denen das blaue Leuchten aufgetreten ist<sup>14</sup>

	Reinigungsaufgabe			
	(1)	(2)	(3)	(4)
	Behälterwand	Behälterwand	Stirnseite Wärmetauscher	Fußboden
Beschreibung des blauen Leuchten	Leuchten beim Aufprall des Strahls auf die Oberfläche	Leuchten beim Aufprall des Strahls auf die Oberfläche	Leuchten an den Rändern der Löcher	Leuchtstreifen in Form des auftreffenden Strahls
Flüssigkeitsstrahler	Handgehaltene Spritzeinrichtung	Tankwaschkopf	k. A.	Handgehaltene Spritzeinrichtung
Umgebung	Im Behälter ( $H_B = 2,0\text{ m}$ , $D_R = 1,0\text{ m}$ )	Im Behälter ( $H_B = 35,0\text{ m}$ , $D_R = 3,7\text{ m}$ )	Waschplatz im Freien	Fußboden in Halle
Werkstoff der Oberfläche	Stahl	Stahl	Stahl	Ableitfähiger Fußboden
Wasserart	Trinkwasser	Trinkwasser	Trinkwasser	Vollentsalztes Wasser
Pumpendruck	900 bar	550 bar	k. A.	120 bar
Volumenstrom	0,50 l/s bis 0,67 l/s	k. A.	k. A.	k. A.
Düsengeometrie	Rotierender Rundstrahl	Rotierender Flachstrahl	Rotierender Rundstrahl	Flachstrahl
Düsendurchmesser	1,2 mm bis 2,0 mm	k. A.	k. A.	k. A.
Entladungsmessungen	k. A.	k. A.	k. A.	Handcoulombmeter, keine Entladungen messbar

k. A. = Keine Angabe,  $H_B$  = Behälterhöhe,  $D_R$  = Behälterradius

<sup>14</sup> Berichte über das blaue Leuchten stammen aus der Kommunikation und Befragung während der Besichtigung von Prozessen der Behälterreinigung.

## 8.1 Nachstellung der Reinigungsaufgaben

Die Nachstellung der Reinigungsaufgaben (1), (2) und (3) der Tabelle 8.1 erfolgte zunächst mit einem Hochdruckreiniger, der einen Pumpendruck von bis zu 500 bar und einen Volumenstrom von 0,25 l/s erzeugt. Die Versuche mit diesem Hochdruckreiniger erfolgten vor Sonnenaufgang, um das Leuchten möglichst gut sichtbar zu machen. Getestet wurde eine Flach- und Rundstrahldüse mit einem Düsendurchmesser von 1,05 mm. Der Aufprall des Strahls aus Trinkwasser auf ein leitfähiges geerdetes Edelstahl- und Aluminiumblech führte zu keinem blauen Leuchten. Weitere Untersuchungen mit einer ableitfähigen Fliese, einem leitfähigen geerdeten Aluminiumblech, das mit einer dünnen isolierenden Folie beklebt war und einer isolierenden PVC-U-Platte blieben erfolglos. Das beklebte Aluminiumblech diente der Nachstellung einer Behälterwand, die mit einer isolierenden Schicht des im Behälter verarbeiteten Produktes beschichtet und durch den Prozess der Behälterreinigung zu entfernen ist. Ebenfalls erfolglos war der Aufprall des Strahls aus Trinkwasser auf eine geerdete Behälterwand aus Stahl, wenn der Pumpendruck 1 000 bar, der Volumenstrom 0,33 l/s und der Düsendurchmesser 1,00 mm betrug.

Bei der Nachstellung der in Tabelle 8.1 aufgeführten Reinigungsaufgaben mit Trinkwasser wurde der Volumenstrom der Reinigungsaufgabe (1) nicht erreicht. Bei der Reinigungsaufgabe (2) ist der Volumenstrom und bei der Reinigungsaufgabe (3) der Pumpendruck und der Volumenstrom nicht bekannt. Es ist nicht auszuschließen, dass diese Parameter die der Nachstellung überschreiten und das blaue Leuchten eintritt.

Die Aufmerksamkeit richtete sich nach diesen Versuchen auf die Nachstellung der in Tabelle 8.1 aufgezeigten Reinigungsaufgabe (4) mit vollentsalztem Wasser. Bei dieser Reinigungsaufgabe trat das blaue Leuchten bei deutlich geringeren Pumpendrücken von gerade einmal 120 bar auf. Um die Zündfähigkeit zu bewerten, wurden im Zuge der Reinigungsaufgabe Messungen der übertragenen Ladung mit einem Handcoulombmeter direkt am Strahl, dem Aufprallort und am vom ableitfähigen Fußboden zurückprallenden Strahl durchgeführt. Bei keiner der Messpositionen war eine Gasentladung messbar. Das verwendete Handcoulombmeter war baugleich zu dem in Kapitel 4.4.3 beschriebenen. Daraus lässt sich schließen, dass die übertragene Ladung möglicherweise auftretender Gasentladungen unter 5 nC betrug und diese nicht zündfähig für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA und IIB sind [63]. Zur Nachstellung des blauen Leuchtens der Reinigungsaufgabe (4) und den dabei durchgeführten Messungen der übertragenen Ladung, wurde zunächst der Aufprall eines Strahls aus vollentsalztem Wasser auf einen Fußboden mit ableitfähigen Fliesen, zwischen denen sich leitfähige Fugen befanden, untersucht. Die Versuche fanden tagsüber in einer Halle mit geringem Lichteinfall statt. Verwendet wurde der bereits bei den Versuchen von Trinkwasser verwendete Hochdruckreiniger und die dazugehörigen Düsen. Ab 300 bar war ein blaues Leuchten, deren Form wie bei den Berichten der Reinigungsaufgaben der Geometrie des Strahls entsprach, zu beobachten (Abbildung 8.1, links und rechts).

Bei einem Pumpendruck von 200 bar oder weniger war das blaue Leuchten nicht zu beobachten. Aus dieser Tatsache resultiert eine Abhängigkeit des blauen Leuchtens vom Pumpendruck. Bei der Nachstellung und der Reinigungsaufgabe (4) handelte es sich nicht um den gleichen Fußboden. Die unterschiedlichen Fußböden erklären die Abweichungen des Pumpendrucks, ab dem das blaue Leuchten zu beobachten war.

Der Aufprall auf die leitfähigen Fugen, die sich zwischen den ableitfähigen Fliesen befanden, erzeugte kein blaues Leuchten (Abbildung 8.1 links). Die leitfähige Fuge, auf die der Strahl auftraf,

ist in Abbildung 8.1 (links) durch zwei schwarze gestrichelte Linien gekennzeichnet. Das blaue Leuchten ist folglich davon abhängig, ob es sich um eine leitfähige, ableitfähige oder isolierende Oberfläche handelt, auf die der Strahl aufprallt. Um diese Abhängigkeit näher zu betrachten, wurden Untersuchungen an den bereits bei Trinkwasser verwendeten leitfähigen geerdeten Edelstahl- und Aluminiumblech durchgeführt. Erweitert wurden die Untersuchungen mit der ableitfähigen Fliese, dem leitfähigen geerdeten Aluminiumblech, das mit einer dünnen isolierenden Folie beklebt war und der isolierenden PVC-U-Platte.

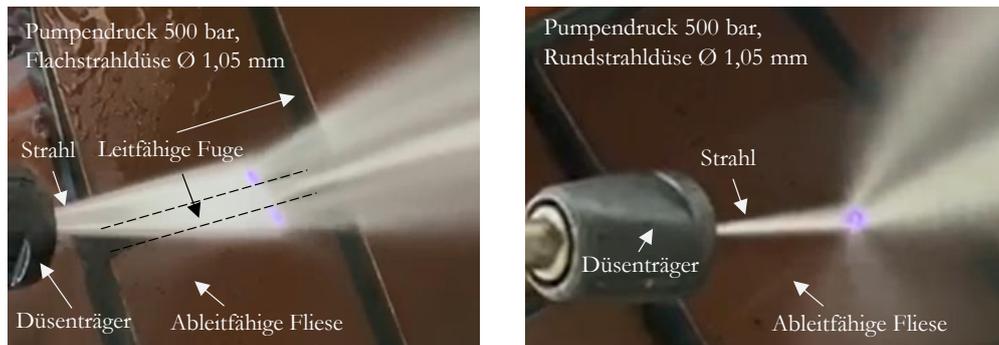


Abbildung 8.1: Leuchten beim Aufprall von vollentsalztem Wasser des Flachstrahls (links) auf eine ableitfähige Fliese und leitfähige Fuge und des Rundstrahls (rechts) auf eine ableitfähige Fliese

Tageslicht kann die Sichtbarkeit des blauen Leuchtens behindern. Aus diesem Grund wurden die folgenden Versuche vor Sonnenaufgang durchgeführt. In den Abbildungen dieser Versuche sind der zylindrische Düsenträger und der sich aufweitende Flachstrahl durch weiße gestrichelte Linien eingezeichnet.

Bei dem leitfähigen geerdeten Edelstahl- und Aluminiumblech war das blaue Leuchten nur sehr schwach ausgebildet und trat nur auf, wenn der Abstand vom Düsensaustritt bis zur Oberfläche unter 0,04 m betrug (Abbildung 8.2, links). Beim Aluminiumblech war das blaue Leuchten kurzzeitig etwas intensiver (Abbildung 8.2, rechts). Vermutet wird, dass der Grund dafür die ca. 0,01  $\mu\text{m}$  dicke Aluminiumoxidschicht ist, die sich bei Kontakt mit Luft bildet und als isolierend gilt [71]. Wurde diese abgetragen, lies die Intensität des blauen Leuchtens nach und war vergleichbar mit der von Edelstahl. Bei Drücken von 400 bar oder weniger trat bei den leitfähigen Werkstoffen das blaue Leuchten nicht auf.

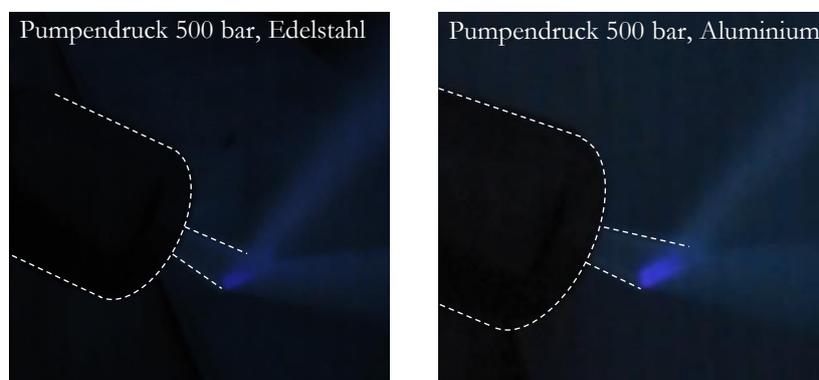


Abbildung 8.2 Leuchten beim Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser auf das Edelstahl- (links) und Aluminiumblech (rechts) bei einem Pumpendruck von 500 bar

Beim Aufprall des Strahls auf die ableitfähige Fliese war das Leuchten, anders als bei den ableitfähigen Fliesen des Hallenfußbodens, violett und nicht blau. Die Intensität des Leuchtens reduzierte sich, wenn der Abstand zwischen Düse und Oberfläche vergrößert wurde. Bei einem Abstand von ca. 0,03 m war ein intensives violettes bis weißes Leuchten zu sehen (Abbildung 8.3). Bei einem Abstand von ca. 0,10 m reduzierte sich die Intensität und ein weißes Leuchten war nicht mehr zu beobachten. Bei Abständen von über 0,10 m nahm die Intensität des violetten Leuchtens weiter ab, da sich durch die Aufweitung des Strahls die Aufprallfläche vergrößerte (Abbildung 8.3).

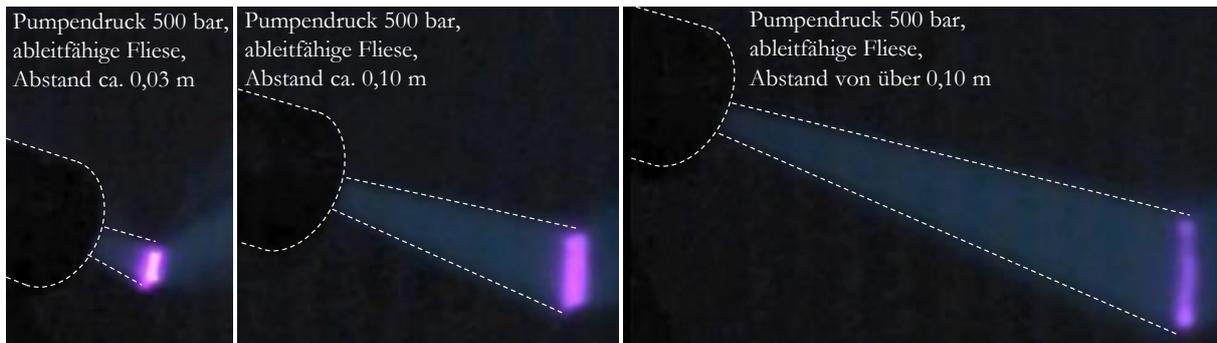


Abbildung 8.3: Leuchten in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Düse und Oberfläche beim Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser auf eine ableitfähige Fliese bei einem Pumpendruck von 500 bar

Beim Aufprall des Strahls auf die isolierende PVC-U-Platte und der ableitfähigen Fliese war die Intensität im Vergleich zu dem leitfähigen geerdeten Edelstahl- und Aluminiumblech um ein Vielfaches höher. Bereits bei einem Pumpendruck von 100 bar war beim Aufprall des Strahls auf die isolierende PVC-U-Platte das blaue Leuchten erkennbar (Abbildung 8.4, links). Dieser Pumpendruck entspricht annähernd dem der Reinigungsaufgabe (4) von 120 bar und bestätigt, dass bei diesen Pumpendrücken ein Leuchten zu beobachten war. Betrug der Pumpendruck 500 bar ging das blaue in ein violettes bis weißes Leuchten über (Abbildung 8.4, rechts). Bei der isolierenden PVC-U-Platte kam es zum Materialabtrag durch den Aufprall. Aus diesem Grund war das Leuchten abweichend von der Geometrie des aufprallenden Strahls. Bei der isolierenden PVC-U-Platte und der ableitfähigen Fliese blieb das Leuchten, anders als beim Aufprall auf das leitfähige geerdete Aluminiumblech, mit einer zunächst noch isolierenden Aluminiumoxidschicht, dauerhaft erhalten.

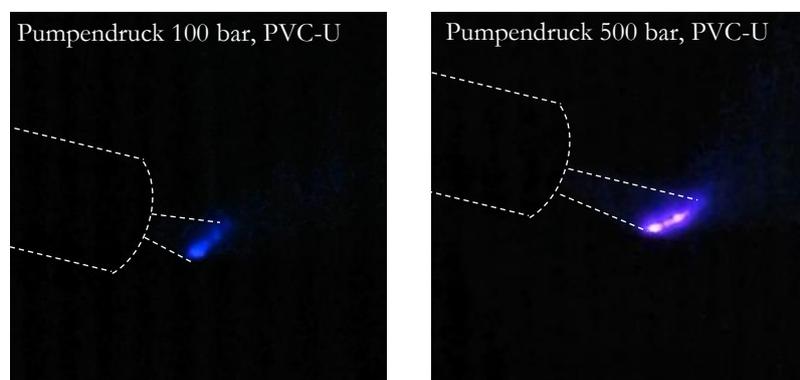


Abbildung 8.4: Leuchten beim Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser auf die PVC-U-Platte bei einem Pumpendruck von 100 bar (links) und 500 bar (rechts)

Traf der Strahl aus vollentsalztem Wasser auf ein leitfähiges geerdetes Aluminiumblech, das mit einer dünnen isolierenden Folie beklebt war, ergab sich ebenfalls ein Leuchten. Die Form des Leuchtens entsprach der Geometrie des aufprallenden Strahls (Abbildung 8.5).

Beim Versprühen von vollentsalztem Wasser dominiert die Ladungstrennung an der Düse die Aufladung der Tropfen (Kapitel 6.7). Der Strahl war folglich vor dem Aufprall bereits aufgeladen. Ladungsträger konnten sich auf der isolierenden Folie ansammeln. Die Ladungsansammlung wurde durch die leitfähige geerdete Aluminiumplatte begünstigt. Durchtrennte der Strahl an dem Punkt, wo der Abstand zwischen Düsenaustritt und der Oberfläche am geringsten war die Folie, ergaben sich Leuchterscheinungen von der aufgeladenen Folie zum Strahl, die in ihrer Gestalt einer Gasentladung ähnelten (Abbildung 8.5). Wurde die Folie entfernt, entsprach das Leuchten dem beim Aufprall auf das leitfähige geerdete Aluminiumblech.

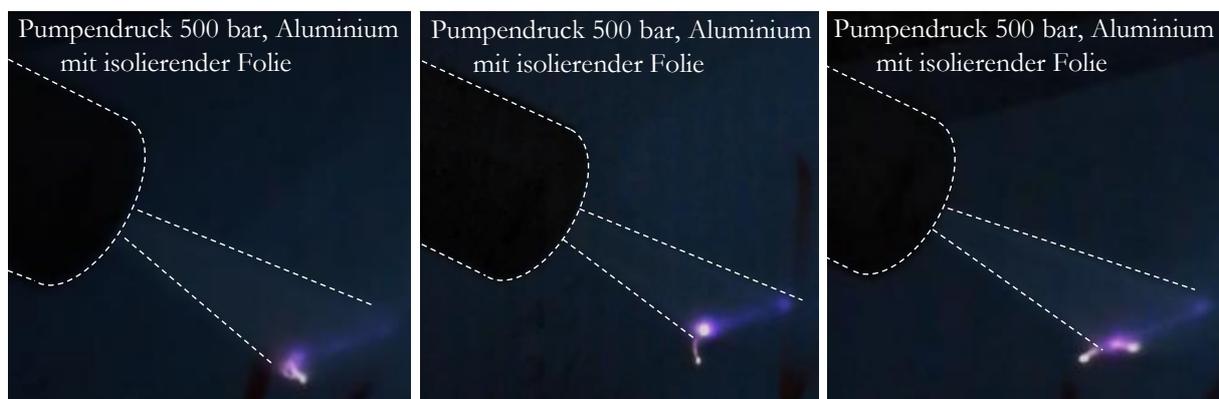


Abbildung 8.5: Leuchten beim Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser auf ein mit isolierender Folie beklebten Aluminiumblech bei einem Pumpendruck von 500 bar

## 8.2 Nachweis der Elektrostatik

Das blaue bis violette Leuchten entspricht den Spektrallinien des sichtbaren Lichts, wie sie bei Gasentladungen in Luft vorkommen [23]. Durch die im Zuge der Reinigungsaufgabe (4) der Tabelle 8.1 durchgeführten Entladungsmessungen mit dem Handcoulombmeter ist bekannt, dass wenn Gasentladungen auftreten, deren übertragene Ladung unter 5 nC beträgt [63]. Um auch diesen Messbereich abzudecken, wurde der mit dem Oszilloskop verbundene Shunt (Kapitel 4.4.3) genutzt.

Für die Detektion von Gasentladungen wurde zuerst das mit isolierender Folie beklebte Aluminiumblech gegen Erde isoliert aufgestellt und definiert über den Shunt geerdet. Da es nicht eindeutig war, ob ggf. auftretende Gasentladungen zum Aluminiumblech und somit zum Shunt oder zwischen der Folie und dem Strahl erfolgten, wurde zusätzlich eine Antenne am Oszilloskop angeschlossen. Die Antenne ist in der Lage Gasentladungen, deren Position nicht bekannt ist, zu detektieren (Kapitel 4.4.3). Gasentladungen wurden in dieser Konfiguration mit der Messtechnik nicht detektiert. Der Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser führte weiterhin an

- einem definiert über den Shunt geerdeten Aluminiumblech, das mit einer ca. 0,005 m dicken Klarlackschicht beschichtet war,
- einer 0,002 m dicken PVC-U-Platte, die mit einem leitfähigen Stahlblech hinterlegt war und nach wenigen Sekunden vom Strahl durchtrennt wurde und

- der ableitfähigen Fliese, die ebenfalls durch ein Stahlblech leitfähig hinterlegt war

zu keiner von der Messtechnik detektierbaren Gasentladung.

Bei dem Leuchten kann es sich um Koronaentladungen handeln, die keinen Plasmakanal ausbilden und vom Handcoulombmeter, Shunt und der Antennenmesstechnik nicht erfasst werden können [23]. Für das Auftreten von Koronaentladungen spricht die Messung der Stromstärke mit dem Multimeters Keysight 34465A 6½ Digit Multimeter Truevolt DMM mit Datenloggerfunktion (100 Samples/Sekunde) beim Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser auf ein isoliert aufgebautes Edelstahlblech. Der Abstand zwischen der Düse und dem Edelstahlblech betrug 0,5 m. Bei einem Pumpendruck von 500 bar ergab sich eine Stromstärke von ca. 8  $\mu\text{A}$ . Eine Durchführung der Messung mit Trinkwasser erzeugte eine Stromstärke von ca. 0,6  $\mu\text{A}$ . Unter der Annahme, dass es sich um eine Koronaentladung handelte, kann die um nahezu eine Zehnerpotenz reduzierte Stromstärke als Erklärung herangezogen werden, weshalb beim Aufprall von Trinkwasser auf das leitfähige geerdete Edelstahl- und Aluminiumblech kein Leuchten beobachtet wurde. Neben der Stromstärke sprechen die

- energieschwachen Gasentladungen zwischen dem Strahl und den Elektroden (Kapitel 5.4),
- die hohen negativen Raumpotentiale des Strahls von unter -40 kV (Kapitel 5.3)
- und die Tatsache, dass beim Versprühen von vollentsalztem Wasser die Ladungstrennung an der Düse die Aufladung der Tropfen dominiert

für das Auftreten von Koronaentladungen beim Aufprall von vollentsalztem Wasser auf eine Oberfläche. Bei Trinkwasser treffen diese drei Aussagen nicht zu und erklären ergänzend zur geringeren Stromstärke das Ausbleiben des Leuchtens.

Bei den ableitfähigen und isolierenden Oberflächen können, neben dem bereits eine Aufladung aufweisenden Strahls aus vollentsalztem Wasser, Effekte der Trennaufladung beim Aufprall die Intensität des Leuchtens steigern.

Ob es sich um Koronaentladungen, einer Verstärkung durch Trennaufladung, einen Effekt der Lumineszenz oder einer Kombination dessen handelt, ist nicht abschließend geklärt und bedarf weiterer Untersuchungen. In Hinsicht auf die Zündquelle der statischen Elektrizität waren keine detektierbaren und zündfähigen Gasentladungen beim Aufprall des Strahls in den beschriebenen Konfigurationen und der verwendeten Messtechnik nachweisbar.

## 9 Sicherheitstechnische Bewertung

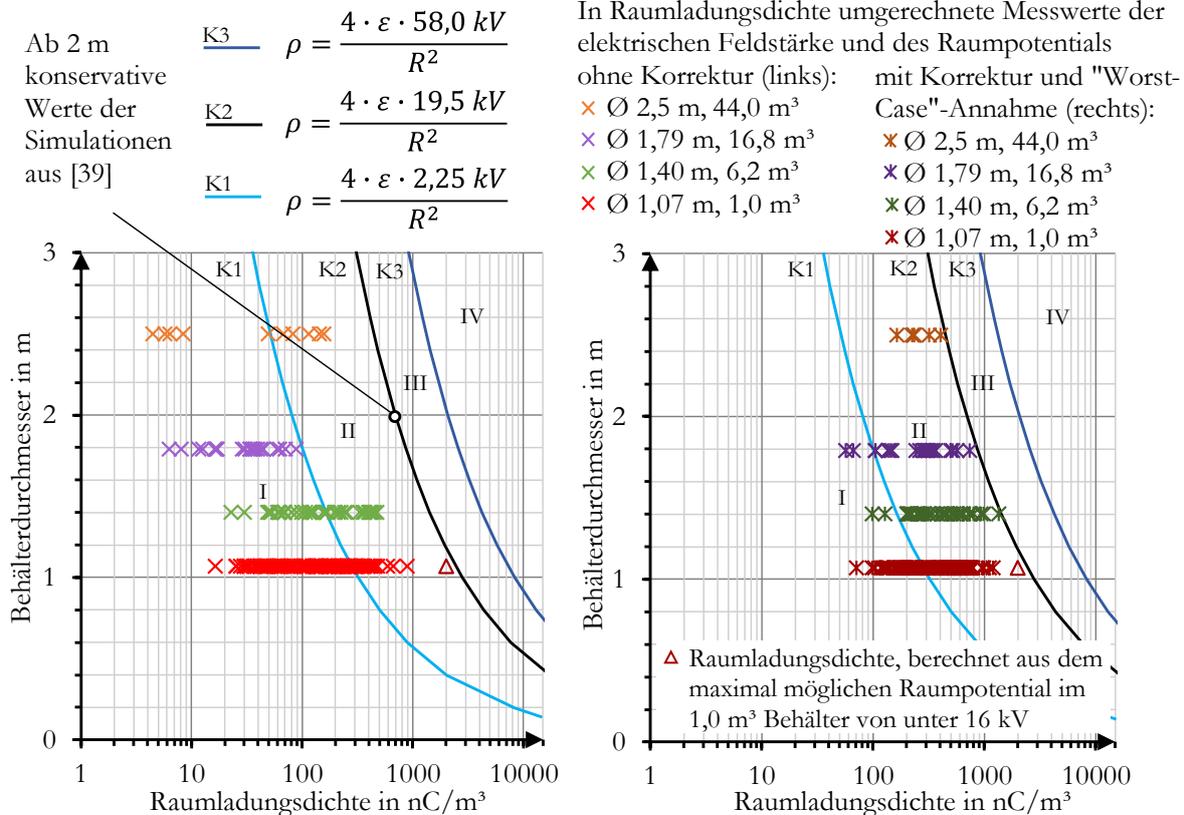
Anhand der Messungen dieser Arbeit wurde bestätigt, dass beim Versprühen von Wasser aufgeladene Strahlen und Sprühnebel auftreten, die in Bezug auf elektrostatische Zündgefahren sicherheitstechnisch zu bewerten sind. Tabelle 9.1 zeigt die Bereiche der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials der Messungen im 1,0 m<sup>3</sup>, 6,2 m<sup>3</sup>, 16,8 m<sup>3</sup> und 44,0 m<sup>3</sup> Behälter und ohne dessen räumlicher Begrenzung. Die sich innerhalb dieser Bereiche befindlichen Messwerte wurden anhand der Gleichungen 2.11 und Gleichung 2.14 in die Raumladungsdichte umgerechnet und sind, in Abhängigkeit vom Behälterdurchmesser, in Abbildung 9.1 (links) eingezeichnet. Die Kurven K1 bis K3 in Abbildung 9.1 stammen aus den sicherheitstechnischen Überlegungen, die in Kapitel 3.3.4 angestellt wurden.

Tabelle 9.1: Bereich der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials der Messungen im 1,0 m<sup>3</sup>, 6,2 m<sup>3</sup>, 16,8 m<sup>3</sup> und 44,0 m<sup>3</sup> Behälter und ohne dessen räumlicher Begrenzung

	Trinkwasser	Vollentsalztes Wasser
Untersuchungen im leitfähigen geerdeten 1,0 m <sup>3</sup> Behälter		
Elektrische Feldstärke in kV/m	-26,5 bis -3,1	-18,9 bis 41,8
Raumpotential in kV	-2,29 bis 0,51	-25,40 bis 4,59
Untersuchungen im leitfähigen geerdeten 6,2 m <sup>3</sup> Behälter		
Elektrische Feldstärke in kV/m	-14,1 bis -3,7	-12,0 bis 79,1
Raumpotential in kV	-2,94 bis 0,94	-2,99 bis 35,72
Untersuchungen im leitfähigen geerdeten 16,8 m <sup>3</sup> Behälter		
Raumpotential in kV	-1,97 bis -0,14	-2,22 bis 7,01
Untersuchungen im leitfähigen geerdeten 44,0 m <sup>3</sup> Behälter		
Elektrische Feldstärke in kV/m	-10,9 bis 0,6	-
Untersuchungen ohne die räumliche Begrenzung des Behälters		
Elektrische Feldstärke in kV/m	-1,0 bis 1,1	-31,4 bis 184,8
Raumpotential in kV	-0,62 bis 0,32	unter -48,04 bis 7,32

Für die sicherheitstechnische Bewertung wird der geltende Grenzwert des Raumpotentials aus [2] von 58 kV genutzt (dunkelblaue Kurve K3 in Abbildung 9.1). Die bei 58 kV auftretenden Büschelentladungen zwischen geerdeten leitfähigen Einbauteilen und der als isolierend geltenden Raumladungswolke gelten als zündfähig für das repräsentative Propan/Luft-Gemisch (MZE 0,24 mJ) der Explosionsgruppe IIA. Für die Explosionsgruppe IIB ist als Grenzwert ein Raumpotential von 19,5 kV als zündfähig für das repräsentative Ethen/Luft-Gemisch (MZE 0,082 mJ) anzunehmen (schwarze Kurve K2 in Abbildung 9.1). Die Kurve K2 korreliert bis zu einem Behälterdurchmesser von 2,0 m mit den Werten der Simulationen aus [39], ab dem mit dem Auftreten von Büschelentladungen an Einbauteilen in Raumladungswolken zu rechnen ist (Kapitel 3.3.3). Ab 2,0 m sind die Werte der Simulationen geringfügig konservativer und werden für die sicherheitstechnische Bewertung genutzt. Das Raumpotential von 19,5 kV wird als geeigneter Grenzwert angesehen, da Entladungsmessungen in kleinen und mittelgroßen Behältern ihn bestätigen (Kapitel 3.3.3). So ergaben sich bei einer Unterschreitung der 19,5 kV keine Entladungen an Einbauteilen. Bei einer Überschreitung der 19,5 kV waren erste energieschwache Entladungen messbar. Bei

einer Unterschreitung der Kurve K1 (hellblaue Kurve K1 in Abbildung 9.1) besteht keine Zündgefahr für Gemische der Explosionsgruppe IIA und IIB.



Kurve oder Bereich im Diagramm	Zündfähigkeit	auf tretende energiereichste Entladungsart
I < K1	nicht zündfähig für Gemische der Explosionsgruppe IIA und IIB <sup>*A</sup>	vorwiegend Koronaentladungen
K1	zündfähig für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIC	Übergangsbereich von Korona- zu Büschelentladungen
K1 ≤ II < K2	zündfähig für Gefahrstoffe, deren MZE unterhalb der des repräsentativen Gemisches der Explosionsgruppe IIB liegt	
K2	zündfähig für das repräsentative Gemisch der Explosionsgruppe IIB (Ethen/Luft-Gemisch MZE 0,082 mJ) und für Gefahrstoffe niedrigerer MZE	vorwiegend Büschelentladungen
K2 ≤ III < K3	zündfähig für Gefahrstoffe, deren MZE gleich der des repräsentativen Gemisches der Explosionsgruppe IIB ist oder diese unterhalb der MZE des repräsentativen Gemisches der Explosionsgruppe IIA liegt	
K3	zündfähig für das repräsentative Gemisch der Explosionsgruppe IIA (Propan/Luft-Gemisch MZE 0,24 mJ) und für Gefahrstoffe niedrigerer MZE	
K3 < IV	zündfähig für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe II	Büschelentladungen

<sup>\*A</sup>Zündfähigkeit gegenüber Gefahrstoffen der Explosionsgruppe IIC steht in Diskussion

Abbildung 9.1: Vom Behälterdurchmesser abhängige Raumladungsdichten der Messungen mit Trinkwasser in Behältern (links), Korrektur und „Worst-Case“-Annahmen der Raumladungsdichten (rechts) und begrenzende Kurven, bzw. Bereiche, für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe II

Gegenüber den Grenzwerten der elektrischen Feldstärke von 100 kV/m oder mehr (Kapitel 3.3.2) ist der aktuelle Grenzwert des Raumpotentials von 58 kV und die 19,5 kV als konservativ anzusehen. Ergänzend bildet die von [35] aufgestellte Beziehung (Kapitel 3.3.2) eine Möglichkeit der Bewertung elektrostatischer Zündgefahren durch Büschelentladungen der Raumladungswolken. Die umgestellte Beziehung wird hier erneut aufgeführt (Gleichung 9.1).  $E(R)$  ist die am Rand des Behälters gemessene elektrische Feldstärke und  $D_R$  der Behälterdurchmesser.

$$E(R) < \frac{100 \text{ kVm}}{D_R^2} \quad 9.1$$

Diese Beziehung wird ebenfalls als konservativ gegenüber den Grenzwerten der elektrischen Feldstärke von 100 kV/m oder mehr (Kapitel 3.3.2) angesehen und wurde für die sicherheitstechnische Bewertung herangezogen. Die Begründung für die Nutzung der konservativen Bewertungsgrundlagen ist, dass bei einer Unterschreitung elektrostatische Zündgefahren mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden können.

Für die von Hand gehaltenen Spritzeinrichtungen gilt eine Begrenzung der Rückstoßkraft von 250 N [17, 21]. Die Rückstoßkraft von 250 N definiert die maximal mögliche Konfiguration aus Düsendurchmesser und Pumpendruck. So muss zur Einhaltung der Rückstoßkraft von 250 N bei einer Erhöhung des Düsendurchmessers der Pumpendruck reduziert werden. Eine Erhöhung des Düsendurchmessers erhöht die Anzahl Ladungsträger, die in den Behälter gebracht werden. Der reduzierte Pumpendruck bewirkt jedoch eine Reduzierung der Prozesse der Ladungstrennung. Anhand der Messungen bei den Konfigurationen aus Düsendurchmesser und Pumpendruck (Kapitel 5 bis Kapitel 7) wurde diese Rückstoßkraft von 250 N erreicht und untersucht. Die Messungen erlauben den Bezug auf den Grenzwert der Rückstoßkraft von 250 N, der bereits in der Industrie etabliert ist.

Neben dem Prozess der Ladungstrennung beim Aufprall des Strahls auf eine Oberfläche, ist beim Versprühen von Wasser der Prozess der Ladungstrennung an der Düse und der hydrodynamischen Instabilität zu beachten. Der dominierende Prozess der Ladungstrennung ist abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit der Wasserart (Kapitel 6.7). Aus diesem Grund erfolgt bei der im Folgenden beschriebenen sicherheitstechnischen Bewertung eine Unterscheidung zwischen **Trinkwasser** und **vollentsalztem Wasser**.

**Trinkwasser:** Beim Versprühen von Trinkwasser findet der dominierende Prozess der Ladungstrennung beim Aufprall des Strahls auf eine Oberfläche statt (Tabelle 6.1). Der entstehende Sprühnebel verteilt sich im Volumen des geerdeten leitfähigen Behälters. Die Höhe der Aufladung der Raumladungswolke und folglich die sich ergebende elektrische Feldstärke und das Raumpotential sind abhängig von der Anzahl der Ladungsträger, die durch das Versprühen in den Behälter eingebracht werden. Mit dem Volumenstrom steigt die Anzahl Ladungsträger und die Tropfen- und Raumladungsdichte an. Den Beweis für diesen Zusammenhang liefern die Messungen mit unterschiedlichen Düsendurchmessern bei ansonsten gleichbleibenden Sprühbedingungen, wie Behälter, Pumpendruck und Sprühwinkel (Kapitel 6.3). Durch den konstanten Pumpendruck ergeben sich laut Gleichung 2.10 keine Abweichungen in der Düsenaustrittsgeschwindigkeit, die den Prozess der Ladungstrennung beim Aufprall beeinflusst. Lediglich der erhöhte Volumenstrom erhöht die Anzahl an Ladungsträgern. So führt ein erhöhter Düsendurchmesser zu einem Anstieg

der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials. Die Relaxation wirkt der Ausbildung der Raumladungswolke entgegen, wodurch sich ein Gleichgewichtszustand ergibt. Eine logische Schlussfolgerung wäre es, dass sich in einem größeren Behältervolumen und -durchmesser höhere elektrische Feldstärken und Raumpotentiale messen lassen. Dem ist nicht so, da ein weiterer entscheidender Effekt zum Tragen kommt. Bleiben die Parameter des Flüssigkeitsstrahlers konstant, verteilt sich die identische Anzahl Ladungsträger auf ein größeres Volumen und besitzt daher eine geringere Tropfen- und Raumladungsdichte. Den Beweis dafür liefern die in Kapitel 7 beschriebenen Messungen in Behältern bis  $44 \text{ m}^3$ . Die Schlussfolgerung ist, dass sich bei einem gleichbleibenden Flüssigkeitsstrahler und einer Erhöhung des Behältervolumens das Raumpotential und die elektrische Feldstärke reduziert. Bestätigt wird diese Aussagen durch die in [7] beschriebenen Messungen in Schiffstanks, bei denen sich ebenfalls eine Reduzierung der Raumladungsdichte mit einer Erhöhung des Behältervolumens einstellte. Eine weitere Bestätigung ergibt sich durch die Messungen von [6] in einem  $24 \text{ m}^3$  Behälter. Erhöhte sich der Düsendurchmesser von  $1,5 \text{ mm}$  auf  $2,5 \text{ mm}$  und folglich der Volumenstrom, erhöhte sich die gemessene elektrische Feldstärke von  $10 \text{ kV/m}$  auf  $20 \text{ kV/m}$ .

**Sicherheitstechnische Bewertung  $1,0 \text{ m}^3$  Behälter:** Im  $1,0 \text{ m}^3$  Behälter ergab sich beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser ein Raumpotential von bis zu  $-2,29 \text{ kV}$  (Tabelle 9.1). Dieser Wert wurde bei einem Düsendurchmesser von  $2,00 \text{ mm}$  und einem Pumpendruck von  $500 \text{ bar}$  gemessen. Der Grenzwert der Rückstoßkraft von  $250 \text{ N}$  [17, 21] wurde bei den Versuchen stets eingehalten. Unter Beachtung des in Kapitel 7.3 angegebenen Korrekturfaktors von  $2,0 \pm 0,5$  der Raumpotentialmessung, sind Raumpotentiale von bis zu  $-5,73 \text{ kV}$  anzunehmen. Die Temperatur des versprühten Wassers betrug  $32,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Eine Erhöhung der Temperatur des versprühten Wassers auf bis zu  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  (ohne Verdampfen) kann den Betrag des Raumpotentials um den Faktor  $1,67$  erhöhen (Erhöhung der Aufladung beim Aufprall von Wasser pro  $1 \text{ K}$  um  $1 \%$ , siehe Kapitel 2.3). Daraus ergibt sich ein Raumpotential von  $-9,57 \text{ kV}$ . Diese und alle anderen Raumpotentiale wurden auf diese Art betrachtet, durch die Gleichung 2.11 in die Raumladungsdichte umgerechnet und sind in Abbildung 9.1 (rechts) eingezeichnet. Die Kurve K2 (Abbildung 9.1) wird unterschritten.

Durch die Messungen der elektrischen Feldstärke werden die getroffenen Aussagen in Bezug auf das Raumpotential bestätigt. Es ergaben sich elektrische Feldstärke von bis zu  $-26,5 \text{ kV/m}$ , die bei einem Düsendurchmesser von  $1,00 \text{ mm}$  und einem Pumpendruck von  $2500 \text{ bar}$  im  $1,0 \text{ m}^3$  Behälter gemessen wurden. Da bei dieser Messung der elektrischen Feldstärke kurzzeitig die Druckluftspülung ausgefallen war, kann sich dadurch dieser betraglich hohe Messwert ergeben haben. Die beiden darunterliegenden betraglich höchsten Werte wurden mit einem Düsendurchmesser von  $1,00 \text{ mm}$ , bei einem Pumpendruck von  $1500 \text{ bar}$  und mit einem Düsendurchmesser von  $2,00 \text{ mm}$ , bei einem Pumpendruck von  $500 \text{ bar}$ , gemessen. Es wurde, trotz des Verdachts auf einen Messfehler, die elektrische Feldstärke von  $-26,5 \text{ kV/m}$  für die sicherheitstechnische Bewertung verwendet. Die Temperatur des versprühten Wassers betrug bereits  $74,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ein Anstieg auf  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  (ohne Verdampfen) erhöht den Wert um den Faktor  $1,25$  auf  $-33,2 \text{ kV/m}$ . Eine Erhöhung der Temperatur auf  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  (ohne Verdampfen) der anderen beiden elektrischen Feldstärken ergibt unkritischere Werte. Wie bei den Messwerten des Raumpotentials wurden der betraglich höchste Wert und alle anderen elektrischen Feldstärken auf diese Art betrachtet, nach Gleichung 2.14 in die Raumladungsdichte umgerechnet und sind in Abbildung 9.1 (rechts) eingezeichnet. Die sich aus den Messwerten ergebenden Raumladungsdichten unterschreiten die Kurve K2.

Auftretende Entladungen, zwischen der Raumladungswolke und leitfähigen geerdeten Einbauteilen, gelten nur für Gefahrstoffe, deren MZE unterhalb der des repräsentativen Gemisches der Explosionsgruppe IIB (MZE 0,082 mJ) liegt, als zündfähig. Bestätigend ist laut der von [35] aufgestellten Beziehung (Gleichung 9.1) nicht mit dem Auftreten von Büschelentladungen zu rechnen.

Das maximal mögliche Raumpotential des Sprühnebels beim Versprühen von Wasser in den 1,0 m<sup>3</sup> Behälter beträgt unter 16 kV [6, 40]. Ein Raumpotential von 16 kV unterschreitet die Kurve K2 (rotes Dreieck in Abbildung 9.1). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass beim Versprühen von Trinkwasser in den 1 m<sup>3</sup> Behälter selbst bei einer Überschreitung der Rückstoßkraft von 250 N nicht mit elektrostatischen Zündgefahren für Gefahrstoffe, deren MZE 0,082 mJ beträgt oder übersteigt, zu rechnen ist.

**Sicherheitstechnische Bewertung 6,2 m<sup>3</sup> Behälter:** Beim Versprühen von Trinkwasser in den 6,2 m<sup>3</sup> ergaben sich Raumpotentiale von bis zu -2,94 kV (Tabelle 9.1). Durch den in Kapitel 7.3 angegebenen Korrekturfaktor von  $2,0 \pm 0,5$  und der Annahme, dass die Temperatur des versprühten Wassers 100 °C (ohne Verdampfen) beträgt, ergibt sich ein Raumpotential von -10,7 kV. Durch die Gleichung 2.11 resultiert aus dem Raumpotential eine Raumladungsdichte von -1342,0 nC/m<sup>3</sup>. Diese Raumladungsdichte unterschreitet die Kurve K2 (Abbildung 9.1).

Im 6,2 m<sup>3</sup> Behälter wurden elektrische Feldstärke von bis zu -14,1 kV/m gemessen. Wird ebenfalls als „Worst-Case“-Betrachtung die Annahme getroffen, dass die Temperatur des versprühten Wasser 100 °C (ohne Verdampfen) beträgt, ergibt sich eine elektrische Feldstärke von -22,1 kV/m. Nach Gleichung 2.14 ergibt sich eine Raumladungsdichte von -739,8 nC/m<sup>3</sup> und unterschreitet die Kurve K2 (Abbildung 9.1).

Aus der Betrachtung der Messwerte des Raumpotentials und der elektrischen Feldstärke resultiert, dass auftretende Entladungen zwischen der Raumladungswolke und leitfähigen geerdeten Einbauteilen nur für Gefahrstoffe, deren MZE unterhalb der des repräsentativen Gemisches der Explosionsgruppe IIB (MZE 0,082 mJ) liegt, als zündfähig gelten. Bestätigend wird mit einer elektrischen Feldstärke von bis zu -22,1 kV/m die von [35] aufgestellten Beziehung (Gleichung 9.1) unterschritten. Daraus folgt, dass nicht mit dem Auftreten von Büschelentladungen zu rechnen ist. Zusammengefasst sind beim Versprühen von Trinkwasser in Behälter bis 6,2 m<sup>3</sup> und einem Behälterdurchmesser von 1,4 m elektrostatische Zündgefahren durch Büschelentladungen der Raumladungswolke für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA und IIB, dessen MZE 0,082 mJ beträgt oder übersteigt, unwahrscheinlich, wenn die Rückstoßkraft von 250 N eingehalten wird.

**Sicherheitstechnische Bewertung 16,8 m<sup>3</sup> Behälter:** Beim Versprühen von Trinkwasser in den 16,8 m<sup>3</sup> Behälter betrug das Raumpotential bis zu -1,97 kV (Tabelle 9.1). Wie bei den sicherheitstechnischen Bewertungen der kleineren Behälter erfolgt eine Korrektur mit dem Faktor  $2,0 \pm 0,5$ . Weiterhin wird ebenfalls von einer Temperatur des versprühten Wassers von 100 °C (ohne Verdampfen) ausgegangen. Daraus folgt ein Raumpotential von -8,26 kV.

Im 16,8 m<sup>3</sup> Behälter erfolgten lediglich Messungen mit einem Düsendurchmesser von 1,05 mm und einem maximalen Pumpendruck von 500 bar. Aus den in Kapitel 6.3 beschriebenen Messungen im 1,0 m<sup>3</sup> mit unterschiedlichen Düsendurchmesser geht hervor, dass eine Verdopplung des Düsendurchmessers auf 2,00 mm den Betrag des Raumpotentials und der elektrischen Feldstärke erhöht. Um den Grenzwert der Rückstoßkraft von 250 N einzuhalten, ist bei Düsendurchmessern von über 2,00 mm der Pumpendruck zu reduzieren. Wie die Messungen mit dem Düsendurch-

messer von 4,00 mm zeigten, reduzierte sich der Betrag des Raumpotentials und der elektrischen Feldstärke dadurch. Für eine „Worst-Case“-Annahme ist davon auszugehen, dass sich durch eine Vergrößerung des Düsendurchmessers von 1,05 mm im 16,8 m<sup>3</sup> Behälter der Betrag des Raumpotentials um den Faktor 2 erhöhen kann. Diese Annahme wird durch die Messungen von [6] im 24 m<sup>3</sup> Behälter gestützt, bei denen eine Erhöhung des Düsendurchmessers von 1,5 mm auf 2,5 mm den Betrag der elektrischen Feldstärke verdoppelte. Aus der „Worst-Case“-Annahme resultiert ein Raumpotential von -16,52 kV. Eine derartige sicherheitstechnische Betrachtung erfolgt für alle Raumpotentiale, die im 16,8 m<sup>3</sup> gemessen wurden. Eine Umrechnung in die Raumladungsdichte erfolgt anhand von Gleichung 2.11. Trotz der Anwendung des Korrekturfaktors, der theoretischen Erhöhung der Temperatur des versprühten Wassers auf 100 °C (ohne Verdampfen) und dem Faktor 2, der sich durch größere Düsendurchmesser ergeben könnte, unterschreiten die Raumladungsdichten die Kurve K2 (Abbildung 9.1). Da es sich um eine Abschätzung handelt und keine Messungen mit unterschiedlichen Düsendurchmessern durchgeführt werden konnten, ist das Versprühen von Trinkwasser bei Unterschreitung der Rückstoßkraft von 250 N in den 16,8 m<sup>3</sup> Behälter nur für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA, deren MZE 0,24 mJ beträgt oder übersteigt, als sicher einzustufen.

Bei den Messungen mit den Hohlstrahlrohren der Feuerwehr im 16,8 m<sup>3</sup> Behälter wurden, für Pumpendrucke von unter 12 bar, die Grenzwerte des Volumenstroms von 7 l/s und der Grenzwert des Behältervolumen von 10 m<sup>3</sup> [1] überschritten. Es wurden Raumpotentiale von bis zu -0,75 kV gemessen (Kapitel 7.2). Mit dem Korrekturfaktor für Trinkwasser (Kapitel 7.3) ergibt sich ein Raumpotential von -1,88 kV. Durch Gleichung 2.11 wird eine Raumladungsdichte von -83,7 nC/m<sup>3</sup> berechnet. Es besteht keine elektrostatische Zündgefahr durch Büschelentladungen der Raumladungswolken für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA und IIB, deren MZE 0,082 mJ beträgt oder übersteigt.

**Sicherheitstechnische Bewertung 44,0 m<sup>3</sup> Behälter:** Im 44,0 m<sup>3</sup> Behälter wurden bei einem Düsendurchmesser von 1,00 mm und einem Pumpendruck von 500 bar elektrische Feldstärken von bis zu -10,9 kV/m gemessen (Tabelle 9.1). Die Temperatur des Wassers betrug bereits vor dem Versprühen 90 °C. Der zweithöchste Betrag der elektrischen Feldstärke wurde bei einer Temperatur von 50 °C gemessen und betrug -9,97 kV/m. Durch die Annahme einer Temperatur des versprühten Wassers von 100 °C (ohne Verdampfen) sind elektrische Feldstärken von bis zu -14,2 kV/m zu erwarten. Beim 44,0 m<sup>3</sup> Behälter ist die Reduzierung des Durchmessers auf 2,5 m durch die eingebauten Rührwerke zu beachten. Die Messungen im 1,0 m<sup>3</sup> Behälter haben ergeben, dass sich bei einem Anstieg des Düsendurchmessers von 1,05 mm auf 2,00 mm, bei einem gleichbleibenden Pumpendruck, der Betrag der elektrischen Feldstärke um rund ein Drittel erhöht. Um vom „Worst-Case“ auszugehen, wird ein Anstieg um den Faktor zwei angesetzt, wie die Messungen von [6] im 24 m<sup>3</sup> Behälter, bei einer Erhöhung des Düsendurchmessers von 1,5 mm auf 2,5 mm, ergaben. Daraus resultiert eine elektrische Feldstärke von -28,4 kV/m und überschreitet die von [35] aufgestellte Beziehung (Gleichung 9.1), ab der Büschelentladungen zu erwarten sind. Nach Gleichung 2.14 ist die elektrische Feldstärke von -28,4 kV/m in eine Raumladungsdichte umzurechnen, um sie mit der Kurve K2 zu vergleichen. Die errechnete Raumladungsdichte von -406,56 nC/m<sup>3</sup> unterschreitet die Kurve K2. Da es sich es um eine Abschätzung handelt, in den Behältervolumen von über 6,2 m<sup>3</sup> keine Messungen bei unterschiedlichen Düsendurchmesser erfolgten und die von [35] aufgestellte Beziehung (Gleichung 9.1) überschritten wird, ist das

Versprühen von Trinkwasser bei Behältervolumen von über  $6,2 \text{ m}^3$  bis  $44,0 \text{ m}^3$  bei Spritzeinrichtungen, die eine Rückstoßkraft von  $250 \text{ N}$  unterschreiten, nur für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA, deren MZE  $0,24 \text{ MJ}$  beträgt oder übersteigt, als sicher einzustufen.

**Sicherheitstechnische Bewertung beim Versprühen von Trinkwasser ohne die räumliche Begrenzung des Behälters:** Da der dominierende Prozess beim Aufprall erfolgt, ist das mittige Sprühen und das Sprühen ohne die räumliche Begrenzung des Behälters unkritischer als das Sprühen im Winkel, bei dem der Strahl in einem definierten Abstand auf die Behälterwand trifft.

**Vollentsalztes Wasser:** Beim Versprühen von vollentsalztem Wasser findet der dominierende Prozess der Ladungstrennung an der Düse und durch die hydrodynamische Instabilität des Strahls statt (Tabelle 6.1). Ohne die räumliche Begrenzung des Behälters weisen die Strahlen messbare Raumpotentiale von bis zu  $-48 \text{ kV}$  auf und überschreiten den Messbereich der Raumpotentialmesstechnik (Kapitel 5.3). Gemessen wurde dieses Raumpotential bereits bei einem Düsendurchmesser von  $1,05 \text{ mm}$  und einem Pumpendruck von  $500 \text{ bar}$ . Nach den in Kapitel 2.2 beschriebenen Grundlagen der Ladungstrennungsprozesse, ist bei einem Anstieg des Pumpendrucks mit höheren Raumpotentialen zu rechnen. Anders als beim Aufprall führte ein kleinerer Düsendurchmesser zu einer Erhöhung der Aufladung an der Düse und durch die hydrodynamische Instabilität [19]. Der sich durch die hydrodynamische Instabilität ablösende Sprühnebel ist positiv geladen. Bei einem Düsendurchmesser von  $1,00 \text{ mm}$  und einem Pumpendruck von  $2500 \text{ bar}$  betrug die elektrische Feldstärke  $+65,0 \text{ kV/m}$ . Die Reduzierung des Düsendurchmesser auf  $0,50 \text{ mm}$  führte bereits bei einem Pumpendruck von  $1500 \text{ bar}$  zu einer elektrischen Feldstärke von  $+184,8 \text{ kV/m}$ . Messungen der übertragenen Ladung (Kapitel 5.4) ergaben, dass selbst bei diesen hohen Raumpotentialen und elektrischen Feldstärken keine elektrostatische Zündgefahr für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA und IIB zu erwarten ist, da die übertragenen Ladungen weit unter dem Grenzwert von  $10 \text{ nC}$  und  $25 \text{ nC}$  [1] und den MZQ-Werten der Gefahrstoffe liegen.

Beim Versprühen von vollentsalztem Wasser limitiert der Effekt der Relaxation des leitfähigen geerdeten Behälters die maximal mögliche elektrische Feldstärke und das maximal mögliche Raumpotential. Mit dem Behältervolumen und -durchmesser erhöht sich die elektrische Feldstärke und das Raumpotential, wie die beschriebenen Messungen ohne die räumliche Begrenzung des Behälters belegen.

Versuche aus [6, 40] ergaben, dass das maximal mögliche Raumpotential des Sprühnebels beim Versprühen von Wasser in den  $1,0 \text{ m}^3$  Behälter unter  $16 \text{ kV}$  beträgt. Die Problematik bei vollentsalztem Wasser besteht darin, dass der Strahl lokal ein hohes Raumpotential aufweist und den Wert des Raumpotentials von  $16 \text{ kV}$  übersteigt. Weiterhin ergaben die Messungen bei unterschiedlichen Abständen der Elektrode der Raumpotentialmesstechnik zur Behälterwand [58] und die Messungen im  $6,2 \text{ m}^3$  und  $16,8 \text{ m}^3$  Behälter (Kapitel 7), dass der Sprühnebel im Behälter entgegengesetzt geladen sein kann. Daraus folgt, dass die Potentialdifferenz zwischen dem Strahl und dem Sprühnebel und nicht nur die des Strahls oder Sprühnebels gegenüber Erdpotential zu betrachten ist. Ferner haben die Messungen des Raumpotentials beim mittigen Sprühen in den  $1,0 \text{ m}^3$  Behälter ergeben, dass sich mit der Temperatur des Wassers der Prozess der Ladungstrennung an der Düse weiter erhöht (Kapitel 6.4). Untersucht wurden Ausgangstemperaturen von bis zu  $45 \text{ °C}$ . Eine weitere Erhöhung der Temperatur kann zu höheren, bisher nicht gemessenen Raumpotentialen führen. Bei einem Pumpendruck von  $300 \text{ bar}$  und der Verwendung einer rotierenden Rundstrahldüse,

mit einem Düsendurchmesser von 1,05 mm, wurden in [22] elektrische Feldstärken von bis zu +400 kV/m gemessen. Diese elektrische Feldstärke ist mehr als doppelt so hoch wie die maximale elektrische Feldstärke der Messungen dieser Arbeit von +184,8 kV/m.

Erfolgt der dominierende Ladungstrennungsprozess an der Düse, wie beim Versprühen von vollentsalztem Wasser, sind zum aktuellen Zeitpunkt Entladungen zwischen dem Strahl und leitfähigen geerdeten Einbauteilen, der Behälterwand oder zwischen entgegengesetzt geladenen Raumladungswolken nicht sicher auszuschließen. Zusätzlich konnte nicht abschließend geklärt werden, ob durch das blaue Leuchten beim Aufprall von vollentsalztem Wasser auf eine Oberfläche eine Zündgefahr besteht (Kapitel 8.2). Um die sicherheitstechnische Bewertung beim Versprühen von vollentsalztem Wasser abzuschließen, sind weitere Untersuchungen notwendig und Überlegungen anzustellen.

Zum jetzigen Zeitpunkt sind die aktuell geltenden Grenzwerte für das Versprühen von Wasser aus [1, 2] einzuhalten. Zu empfehlen ist der Einsatz von Düsendurchmessern von 1,00 mm oder größer. Weiterhin ist die Bildung der hoch aufgeladenen Raumladungswolken, wie sie beim mittigen Sprühen in den Behälter entstehen, zu vermeiden.

**Isolierte Leiter:** Als Maßnahme gilt, dass alle leitfähigen und ableitfähigen Gegenstände und Personen zu erden oder mit maximal 1 M $\Omega$  mit Erde zu verbinden sind [1, 2, 6], um eine elektrostatische Zündgefahr durch isolierte Leiter auszuschließen. Technisch nicht umsetzbar ist diese Maßnahme bei isolierten Leitern in Form von Wassermassen, die prozessbedingt auftreten. Ist mit dem Auftreten von isolierten Leitern in Form von zusammenhängenden Wassermassen oder Segmenten der sich zerteilenden Strahlen zu rechnen, muss eine sicherheitstechnische Bewertung anhand von Kapitel 3.4.2 bis Kapitel 3.4.4 durchgeführt werden. Als präventive Maßnahme gilt es Düsendurchmesser, Vorsprünge, Vertiefungen und Einbauteile im Behälter zu vermeiden, die zu einer Bildung von zusammenhängenden herabstürzenden Wassermassen führen können. Sind Vorsprünge und Vertiefungen konstruktiv unvermeidbar, gilt als präventive Maßnahme die Empfehlung, diese so auszulegen, dass Wassermassen sich abseits der Bereiche mit maximalen Raumpotential ansammeln und herabfallen [42].

Im Rahmen der sicherheitstechnischen Bewertung wurden ausschließlich elektrostatische Effekte, wie sie beim Versprühen von Wasser auftreten, untersucht. Es werden keine Aussagen zu anderen potenziellen Zündgefahren getroffen.

## 10 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit thematisiert die Ladungstrennung beim Versprühen von Wasser und die sicherheitstechnische Bewertung der elektrostatischen Zündgefahren, wenn diese in explosionsgefährdeten Bereichen auftreten. Die geltenden Grenzwerte der Flüssigkeitsstrahler und der Behälterabmessungen, angegeben in der technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 727 [1] und der technischen Spezifikation IEC TS 60079-32-1 [2], beruhen auf den Leistungsgrenzen der Flüssigkeitsstrahler und den Behältern der Versuche aus [6]. Eine Zusammenfassung der in [1, 2] angegebenen Grenzwerte und der sich ergebenden Wissenslücken zeigt Abbildung 10.1.

	Pumpendruck $\leq 12$ bar		12 bar < Pumpendruck < 500 bar (In IEC TS 60079-32-1 [2] ist ein Pumpendruck bis 500 bar zulässig)	
	TRGS 727 [1]	IEC TS 60079-32-1 [2]	TRGS 727 [1]	IEC TS 60079-32-1 [2]
<b>Flüssigkeitsstrahler</b>				
Volumenstrom	7 l/s	-	5 l/s	5 l/s
<b>Behälter</b>				
Durchmesser	-	-	3 m	3 m
Volumen	10 m <sup>3</sup>	sehr niedrige Gefahrenstufe bei < 100 m <sup>3</sup>	-	-

Abbildung 10.1: Grenzwerte der Flüssigkeitsstrahler und der Behälterabmessungen aus [1, 2] und die sich ergebenden Wissenslücken

Ob bei einer Überschreitung der Grenzwerte eine elektrostatische Zündgefahr entsteht, war ungeklärt. Ziel dieser Arbeit war es eine sicherheitstechnische Bewertung bei grenzwertüberschreitenden Parametern der Flüssigkeitsstrahler und der Behälterabmessungen anzustellen und die Wissenslücken zu schließen. Um dieses Ziel zu erreichen waren drei Forschungsfragen zu beantworten:

1. Welche Parameter der Flüssigkeitsstrahler und des Wassers maximieren den Prozess der Ladungstrennung und welchen Einfluss hat die räumliche Begrenzung des Behälters?
2. Ist das in der Literatur primär eingesetzte Verfahren der Feldstärkenmessung für Messungen an Wasserstrahlen und -sprühnebeln geeignet und gelingt die Verifizierung durch die Raumpotentialmessung?
3. Wie sind die Messwerte der elektrischen Feldstärke, des Raumpotentials und der übertragenen Ladung, bei grenzwertüberschreitenden Parametern der Flüssigkeitsstrahler beim Versprühen von Wasser, sicherheitstechnisch zu bewerten?

Zu Beginn der Arbeit wurde auf die Grundlagen der Ladungstrennungsprozesse beim Versprühen von Wasser eingegangen (Kapitel 2). Aus der Recherche, Zusammenfassung und kritischen Hinterfragung der Literatur resultieren drei Prozesse der Ladungstrennung:

- Die Ablösung des Strahls von der Düse
- Die hydrodynamische Instabilität im Strahl
- Der Aufprall des Strahls auf eine Oberfläche

Aus der Literatur und ersten Untersuchungen wurden Parameter des Wassers und der Flüssigkeitsstrahler erarbeitet, die eine Ladungstrennung beim Versprühen begünstigen:

- Die Abnahme der dynamischen Viskosität mit der Temperatur, die den Tropfenzerfall und Ladungstrennungsprozess erhöht [30, 31].
- Die elektrische Leitfähigkeit des Wassers kann die Polarität der Aufladung des Strahls und Sprühnebels ändern. Weiterhin führt eine Reduzierung der elektrischen Leitfähigkeit zu einer Erhöhung der Aufladung durch die Prozesse der Ladungstrennung.
- Der Pumpendruck und Düsendurchmesser haben direkten Einfluss auf die kinetische Energie und Geschwindigkeit der versprühten Tropfen. Es steigert sich der Tropfenzerfall und die Aufladung durch die Prozesse der Ladungstrennung.

Am Ende des Kapitels 2 wurde beschrieben, wie die am Rand einer Raumladungswolke gemessene elektrische Feldstärke und das im Mittelpunkt der Raumladungswolke gemessene Raumpotential in eine Raumladungsdichte umzurechnen ist. Die Umrechnung war notwendig, um Messwerte der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials miteinander zu vergleichen.

In Kapitel 3 wurden die Grenzwerte und Bewertungsgrundlagen für das Versprühen von Wasser beschrieben. Dazu gehörten die der Flüssigkeitsstrahler, der Behälterabmessungen und im Sinne der elektrostatischen Größen die der elektrischen Feldstärke, des Raumpotentials und der Raumladungsdichte. Der Vergleich der Grenzwerte mit den Messwerten, Simulationen, Erkenntnissen der Literatur und die angestellten Überlegungen erlaubten die Formulierung eines neuen Ansatzes der sicherheitstechnischen Bewertung. In Abhängigkeit vom Behälterdurchmesser und der Raumladungsdichte sind durch den Ansatz Aussagen möglich, ab wann für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe II mit einer Entzündung durch Büschelentladungen zwischen der Raumladungswolke und geerdeten leitfähigen Einbauteilen oder der Behälterwand zu rechnen ist. Zusätzlich wurden Ansätze der Literatur zur sicherheitstechnischen Bewertung von isolierten Leitern, in Form von gegen Erde isolierten Wassermassen, Strahlsegmenten und einzelnen Tropfen erläutert.

Es folgte eine Beschreibung der Versuchsaufbauten und Messtechniken (Kapitel 4). Um an die Werte der Literatur anzuschließen, erfolgten Messungen der elektrischen Feldstärke. Die Kalibrierung des Feldstärkenmessgerätes gilt für feste aufgeladene Oberflächen und nicht für aufgeladene Strahlen und Sprühnebel. Die Eignung des Feldstärkenmessgerätes wurde am Strahl mit bekanntem Raumpotential untersucht. Aus dem Raumpotential wurde die theoretisch vorliegende mit der gemessenen elektrischen Feldstärke verglichen. Aus dem Vergleich ging hervor, dass das Feldstärkenmessgerät für Messungen an aufgeladenen Strahlen und Sprühnebeln geeignet ist, wenn

- die Aufweitung des Strahls der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes entspricht oder nur leicht davon abweicht und
- die Tropfen- und Raumladungsdichte hoch genug ist.

Bei Nichterfüllung der Voraussetzungen werden Teile der Umgebung gemessen und reduzieren den Messwert. Es war davon auszugehen, dass eine Mittelung der Ladungen der Tropfen in der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes erfolgt. Um dieser Theorie nachzugehen, wurde die für Messungen an Strahlen und Sprühnebeln entwickelte Raumpotentialmesstechnik genutzt.

Messungen der übertragenen Ladung erfolgten mit den bekannten und teils für Messungen an Strahlen und Sprühnebeln modifizierten Messtechniken Shunt, Handcoulombmeter und der Antennenmesstechnik.

Mit den Messtechniken erfolgten Messungen an Strahlen, ohne der räumlichen Begrenzung des Behälters, um den Ladungstrennungsprozess an der Düse und der hydrodynamischen Instabilität zu untersuchen (Kapitel 5). Bei den Messungen im 1 m<sup>3</sup> Behälter, der als Modellanordnung diente, wurde der Einfluss der räumlichen Begrenzung und des Aufpralls des Strahls untersucht (Kapitel 6). Auf Grundlage der gesammelten Erkenntnisse zu den Parametern, die den Prozess der Ladungstrennung maximieren, erfolgten die Messungen in mittelgroßen Behältern von bis zu 44,0 m<sup>3</sup> (Kapitel 7). Die untersuchten Parameter und welchen Einfluss diese auf die Raumladungsdichte haben ist in Abbildung 10.2 dargestellt und beantwortet die Forschungsfrage Nr. 1. Wie in Abbildung 10.2 zu erkennen, ist bei der Betrachtung der Parameter zwischen Trinkwasser und vollentsalztem Wasser zu unterscheiden.

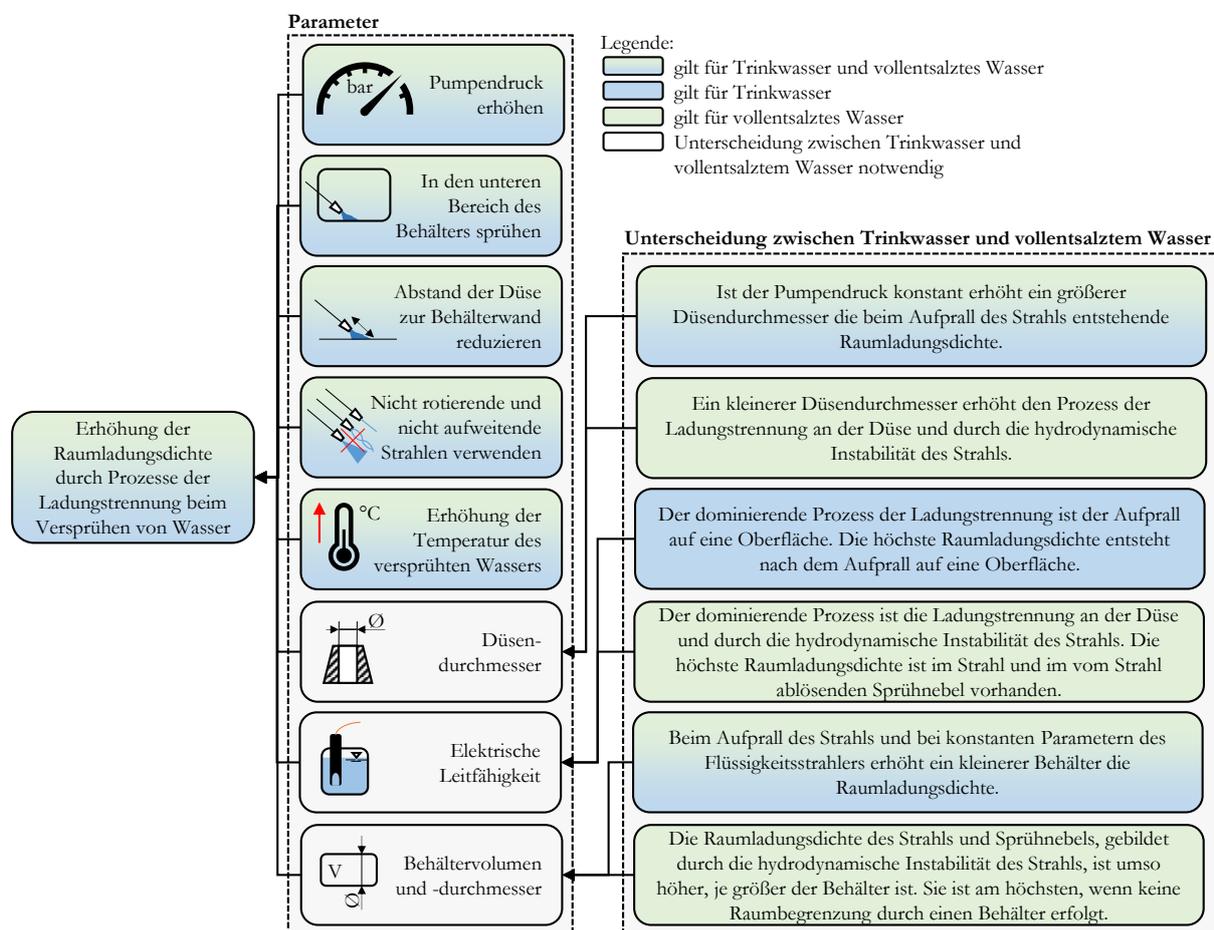


Abbildung 10.2: Parameter, die die Raumladungsdichte beim Versprühen von Wasser erhöhen

Ergänzend haben sich durch die Messungen die im Folgenden zusammengefassten Erkenntnisse ergeben und beantwortet die Forschungsfrage Nr. 2:

- Am Feldstärkenmessgerät ist eine Druckluftspülung zu montieren, um das Eindringen von Tropfen in das Messgerät zu minimieren. Geeignet ist eine Druckluftspülung mit einem Druck von 3,0 bar. Die Öffnung des Messkopfes des Feldstärkenmessgerätes ist nach unten auszurichten, damit Wasser schwerkraftbedingt abläuft.

- Bei Messungen der elektrischen Feldstärke findet eine Mittelung entgegengesetzt geladener Tropfen innerhalb der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes statt. Daraus resultiert der Nachteil, dass die Raumladungsdichte und Polarität des Strahls und Sprühnebels nicht separat erfasst wird und Strahlen hoher Raumladungsdichte unerkannt bleiben. Für genau diesen Einsatz hat sich die entwickelte Raumpotentialmesstechnik als geeignet herausgestellt. Mit ihr ist es gelungen dem Strahl und Sprühnebel eine Höhe der Aufladung und Polarität zuzuordnen.
- Trifft der Strahl unmittelbar auf die Behälterwand verteilt sich im Behältervolumen der Sprühnebel einer Polarität. In diesem Fall ist eine homogene Raumladungsdichte anzunehmen und es erfolgt keine Mittelung bei der Feldstärkenmessung. Unter diesen Umständen war eine Umrechnung der elektrischen Feldstärke in das Raumpotential und eine gegenseitige Verifizierung der Messtechniken gegeben. In Abhängigkeit der Wasserart ergaben sich Korrekturfaktoren, die für die gemessenen Raumpotentiale im Mittelpunkt des Behälters anzuwenden waren.
- Für das Versprühen von Meerwasser, Trinkwasser und vollentsalztem Wasser gelingt es nun den dominierenden Prozess der Ladungstrennung zu benennen und den geladenen Tropfen des Strahls und Sprühnebels eine Polarität zuzuordnen.

Beim Aufprall von vollentsalztem Wasser auf eine Oberfläche ist ein blaues Leuchten zu beobachten (Kapitel 8). Es wurden die Parameter erarbeitet, die zu diesem Effekt führen und Entladungsmessungen durchgeführt. In Hinsicht auf elektrostatische Zündgefahren waren keine detektierbaren und zündfähigen Gasentladungen am Strahl und beim Aufprall nachweisbar.

In Kapitel 9 erfolgte die sicherheitstechnische Bewertung elektrostatischer Zündgefahren für das Versprühen von Wasser in leitfähige geerdete Behälter. Abbildung 10.3 zeigt das Ablaufdiagramm, in dem die Ergebnisse der sicherheitstechnischen Bewertung zusammengefasst sind.

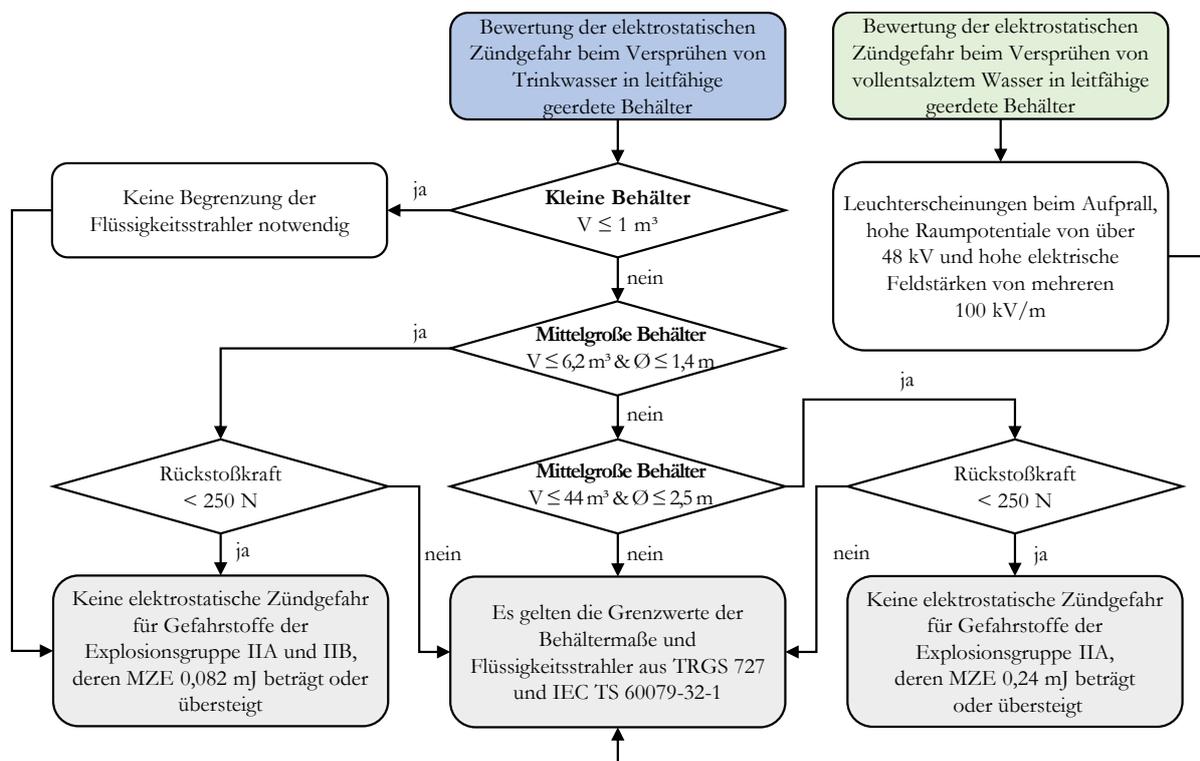


Abbildung 10.3: Sicherheitstechnische Bewertung elektrostatischer Zündgefahren beim Versprühen von Trinkwasser und vollentsalztem Wasser in leitfähige geerdete Behälter

Die sicherheitstechnische Bewertung gilt für Büschelentladungen, die zwischen der Raumladungswolke und leitfähigen geerdeten Einbauteilen oder der Behälterwand auftreten und ausschließlich für die untersuchten Parameter dieser Arbeit (Kapitel 4.6). Die Ergebnisse erlauben eine Neubewertung und Erweiterung der in Abbildung 10.1 aufgeführten geltenden Grenzwerte für das Versprühen von Trinkwasser. Dies entspricht der Beantwortung der Forschungsfrage Nr. 3. Aufgrund des blauen Leuchtens beim Aufprall, den hohen Raumpotentialen und hohen elektrischen Feldstärken sind beim Versprühen von vollentsalztem Wasser Büschelentladungen zwischen dem Strahl und leitfähigen geerdeten Einbauteilen, der Behälterwand oder zwischen entgegengesetzt geladenen Raumladungswolken nicht sicher auszuschließen. Beim Versprühen von vollentsalztem Wasser sind die geltenden Grenzwerte aus [1, 2] (Abbildung 10.1) einzuhalten.

Wie in der Wissenschaft üblich ergeben sich neue Wissenslücken und Ideen, wenn Untersuchungen zu einer Thematik erfolgen. So konnte die Herkunft des blauen Leuchtens, wenn vollentsalztes Wasser auf eine Oberfläche trifft, nicht abschließend geklärt werden. Es kann sich um Koronaentladungen, einer Verstärkung durch Trennaufladung, einen Effekt der Lumineszenz oder einer Kombination dessen handeln. Ob eine Zündgefahr durch andere Effekte als der Elektrostatik vorliegt, ist zu untersuchen. Im Zuge der sicherheitstechnischen Überlegungen ergab sich die Idee, anhand des Versprühens von Wasser mit elektrostatischen Applikationsanlagen in mittelgroßen Behältern das maximal mögliche Raumpotential zu bestimmen. Sind Raumpotentiale von unter 58 kV messbar, ist für das Versprühen von Wasser in mittelgroßen Behältern bis 50 m<sup>3</sup> nicht mit dem Auftreten von Büschelentladungen zwischen leitfähigen geerdeten Einbauteilen und der als isolierend geltenden Raumladungswolke zu erwarten, die zündfähig für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA sind. Diese Aussage gilt jedoch nur, wenn der dominierende Prozess der Ladungstrennung beim Aufprall erfolgt, da ansonsten lokal höhere Raumpotentiale auftreten können. Im Zuge der Untersuchungen sind Messungen der übertragenen Ladungen und als Bestätigung der Raumpotentialmessungen die Durchführung von Simulationsrechnungen anzustreben. Beim Prozess der Behälterreinigung werden dem Wasser Reinigungsmittel hinzugefügt. Es gilt zu untersuchen, welchen Einfluss die Reinigungsmittel auf die Prozesse der Ladungstrennung haben und welche elektrostatischen Zündgefahren entstehen.

## Literaturangaben

- [1] TECHNISCHE REGEL FÜR GEFÄHRSTOFFE: *Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen* (TRGS 727). Ausgabe 8/2016, (2016), (GMBI 2016 S. 256-314 [Nr. 12-17] (v. 26.04.2016); Berichtigt: GMBI 2016 S. 623 [Nr. 31] (v. 29.07.2016))
- [2] TECHNICAL SPECIFICATION IEC TS 60079-32-1:2013+AMD1:2017 CSV: *Explosive atmospheres - Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance*. Edition 1.1 2017-03. Berlin : VDE-Verlag
- [3] LENARD, P.: *Ueber die Electricität der Wasserfälle*. In: *Annalen der Physik und Chemie* 282 (1892), Nr. 8, S. 584–636
- [4] LENARD, P.: *Über Wasserfallelektrizität und über die Oberflächenbeschaffenheit der Flüssigkeiten*. In: *Annalen der Physik und Chemie* 352 (1915), Nr. 12, S. 463–524
- [5] BUSTIN, W. M. ; DUKEK, W. G.: *Electrostatic Hazards in the Petroleum Industry*. Letchworth : Research Studies Press LTD., 1983 (Electrostatics and electrostatic applications series 2)
- [6] POST, L. ; LÜTTGENS G. ; MAURER, B. ; GLOR, M.: *Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen beim Versprühen von Flüssigkeiten unter hohem Druck*. In: *Sonderdruck aus "Die BG" Heft 7/83* (1983)
- [7] STEEN, H. (Hrsg.): *Handbuch des Explosionsschutzes*. Weinheim : Wiley-VCH, 2000
- [8] AUKE VISSER'S INTERNATIONAL SUPER TANKERS: "*Maetra (2)*", *after the gas-explosion in 1969 : (Photo collection Julian Lelliot) and (Photo by Henry van den Heever)*. VLCC-Tankers-Index. URL <https://www.aukevisser.nl/supertankers/VLCC%20L-M/id90.htm> – Überprüfungsdatum 2021-09-16
- [9] AUKE VISSER'S INTERNATIONAL SUPER TANKERS: *Kong Haakon VII*. VLCC-Tankers-Index. URL <https://www.aukevisser.nl/supertankers/VLCC%20I-K/id1027.htm> – Überprüfungsdatum 2021-09-16
- [10] AUKE VISSER'S INTERNATIONAL SUPER TANKERS: "*Marpessa*". *Sunk 14/12/1969 on his second voyage. : (Photo collection Anne Niemantsverdriet)*. VLCC-Tankers-Index. URL <https://www.aukevisser.nl/supertankers/VLCC%20L-M/id91.htm> – Überprüfungsdatum 2021-09-16
- [11] PIERCE, E. T.: *WATERFALLS, BATHROOMS AND--PERHAPS--SUPERTANKER EXPLOSIONS*. In: *SAE technical papers* (1970), Nr. 700922, S. 89–96
- [12] VAN DE WEERD, J. M.: *Electrostatic charge generation during the washing of tanks with water sprays-II: Measurements and interpretation*. In: *static electrification: invited and contributed papers from the Inst London [u.a]* (1971), paper 15 (II), S. 158–177
- [13] LINDBAUER, R. L.: *Electrostatic charge generation during tank washing: Reducing hazardous space potentials in tankers: A theoretical and experimental approach*. In: *Journal of Electrostatics* 1 (1975), Nr. 3, S. 273–294
- [14] HUGHES, J. F. ; BRIGHT, A. W. ; MAKIN, B. ; PARKER, I. F.: *A study of electrical discharges in a charged water aerosol*. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 6 (1973), S. 966–975

- [15] ZENTRAALKOMMISSION FÜR DIE RHEINSCHIFFFAHRT ; OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM: *ISGINTT : Internationaler Sicherheitsleitfaden für die Binnenschifffahrt und Binnentankterminals*. erste Auflage. Strasbourg : Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, 2010
- [16] INTERNATIONAL CHAMBER OF SHIPPING; OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM: *ISGOTT International safety guide for oil tankers and terminals*. 5. ed. London : Witherby's, 2006
- [17] HAMMELMANN MASCHINENFABRIK GMBH: *Düsentabellen A bis T*. Auflage 1/05. Oelde, 2005
- [18] ALFRED KÄRCHER SE & CO. KG: *Bedienungsanleitung HD 13/35 GE; HD 9/50 Ge*. Nr.: 59651540, Winnenden, Aufl. Jan. 2021
- [19] OHSAWA, A.: *Measurement of space charge density during high-pressure water jet spraying*. In: *The author provides this English translated version of the article published in the Journal of Institute of Electrostatics Japan* 33 (2009), Nr. 1, S. 49–50
- [20] POST, L. ; GLOR, M. ; LÜTTGENS, G. ; MAURER, B.: *The avoidance of ignition hazards due to electrostatic charges occuring during the spraying of liquids under high pressure*. In: *Journal of Electrostatics* 23 (1989), S. 99–109
- [21] DGUV REGEL 100-500: *Betreiben von Arbeitsmitteln, Kapitel 2.36 Arbeiten mit Flüssigkeitsstrahlern*. Ausgabe 3/2017. Berlin : Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), 2017
- [22] BLUM, C.: *Forschungsbericht, Aufladung beim Versprühen von Flüssigkeiten - Voruntersuchungen zur Bestimmung relevanter Parameter*. Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) Projekt Nr. 617.0 - FP290. 2015
- [23] LÜTTGENS, G. ; SCHUBERT, W. ; LÜTTGENS, S. ; PIDOLL, U. von ; EMDE, S.: *Statische Elektrizität : Durchschauen - Kontrollieren - Einsetzen*. Weinheim : Wiley-VCH, 2020
- [24] WOZNIAK, G.: *Zerstäubungstechnik : Prinzipien, Verfahren, Geräte*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2003
- [25] KURZWEIL, P.: *Chemie : Grundlagen, technische Anwendungen, Rohstoffe, Analytik und Experimente*. 11., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2020
- [26] VOS, B.: *Electric charge generation during tank washing influence of contaminants and electric field strength on charge generation*. In: *Journal of Electrostatics* 1 (1975), Nr. 2, S. 165–171
- [27] WORCH, E.: *Wasser und Wasserinhaltsstoffe : Eine Einführung in die Hydrochemie*. Wiesbaden : Springer Fachmedien (Teubner-Reihe Umwelt), 1997
- [28] BRITTON, L. G.: *Avoiding static ignition hazards in chemical operations*. New York : Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1999 (A CCPS concept book)
- [29] KRÄMER, H.: *Kriterien zur Beurteilung der Zündgefahren infolge elektrostatisch aufgeladener Flüssigkeiten : Übersichtsbeiträge*. In: *Chemie Ingenieur Technik* 55 (1983), Nr. 6, S. 419–428
- [30] THOMSON, J. J.: *On the Electricity of Drops*. In: *THE LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN PHILOSOPHICAL MAGAZINE AND JOURNAL OF SCIENCE* ,FIFTH SERIES, Vol. 37 (1894), No. 227, S. 341–358

- [31] ZELENY, J.: *Variation with Temperature of the Electrification Produced in Air by the Disruption of Water Drops and Its Bearing on the Prevalence of Lightning*. In: *Physical Review* 44 (1933), Nr. 10, S. 837–842
- [32] LECHLER GMBH: *Technische Aspekte von Flachstrahldüsen : Worauf Sie bei Ihrer Planung achten sollten*. URL <https://www.lechler.com/de/technologie/grundlagen-duesentechnik/spruehcharakter/flachstrahlduesen/aaa>, o. J., – Überprüfungsdatum 2021-09-06
- [33] KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik : Mit Tabellen*. 20., aktualisierte Auflage. München : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2011
- [34] VOS, B.: *Electrostatic charge generation during the washing of tanks with water sprays-IV: Mechanism studies*. In: *STAT. ELECT.* (1971), S. 184–192
- [35] FREYTAG, H. H. (Hrsg.): *Handbuch der Raumexplosionen*. Weinheim : Verlag Chemie, 1965
- [36] R. T. JONES ; T. J. WILLIAMS ; S. ABU SHARKH: *Assessment of industrial electrostatic hazards using finite-element electric field analysis*. In: *Journal of Electrostatics* (1997), 40 & 41, S. 449–454
- [37] ARCHER, D. G. ; WANG, P.: *The Dielectric Constant of Water and Debye-Hückel Limiting Law Slopes*. In: *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 19 (1990), Nr. 2, S. 371–411
- [38] BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG: *Gutachtliche Stellungnahme zur Verwendung eines WASS-Verfahrens (Wasser-Abrasive-Suspension-Strahl-Verfahren) in explosionsgefährdeten Bereichen*. BAM Prüfbereich mit dem BAM-Aktenzeichen.: II-2408/2001. Berlin, 2001
- [39] OHSAWA, A.: *Prevention criteria of electrostatic ignition by a charged cloud in grounded tanks*. In: *Journal of Electrostatics* 67 (2009), 2-3, S. 280–284
- [40] BAUMANN, F. ; ESSLINGER, J. ; MÖCKEL, D. ; THEDENS, M. ; LOSERT, O.: *Measurement of electric fields of charged spray clouds of conductive liquids in free space and in a conductive vessel*. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1322 (2019), 012019 (S. 1–5)
- [41] BRIGHT, A. W. ; HUGHES, J. F. ; MAKIN, B.: *Research on Electrostatic Hazards Associated with Tank Washing in Very Large Crude carriers (Supertankers) : I. Introduction and Experiment Modelling*. In: *Journal of Electrostatics* 1 (1975), S. 37–46
- [42] HEARN, G. L. ; JONES, R. T.: *Electrostatic Hazards Associated with Water Deluge and Explosion Suppression Systems Offshore : OFFSHORE TECHNOLOGY REPORT - OTO 95 026 der Health and Safety Executive*. 1995 (OTO series)
- [43] VAN DE WEERD, J. M.: *Can Probe-to-Cloud Discharges be an Ignition Source for Tanker Explosions?* In: *Shell Research NV, The Hague*, (1972), Report No. AMSR.0016.72.
- [44] KIND, D. ; KÄRNER, H.: *Hochspannungs-Isoliertechnik für Elektrotechniker*. Braunschweig, Wiesbaden : Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, 1982
- [45] SMIT, W.: *Electrostatic charge generation during the washing of tanks with water sprays - III: Mathematical methods*. In: *Static Electrification* (1971), Conference Series Number 11, S. 178–183
- [46] BAUMANN, F. ; HIMSTEDT, M. ; MÖCKEL, D. ; RENKEN, M. ; THEDENS, M.: *Zündgefahren bei Annäherung elektrostatisch aufgeladener Flüssigkeitsoberflächen an metallische geerdete Einbauten im*

- leitfähigen Behälter* (2019), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), DOI: <https://doi.org/10.7795/210.20190521O>
- [47] BARRETO, E. ; REYNOLDS, S. I. ; JURENKA, H.: *Ignition of hydrocarbons and the thermalization of electrical discharges*. In: *Journal of Applied Physics* 45 (1974), Nr. 8, S. 3317–3327
- [48] LANGER, T. ; MÖCKEL, D. ; BEYER, M.: *Transferred charge of brush discharges in explosive gas atmospheres – A verification of the ignition threshold limits*. In: *Journal of Electrostatics* 69 (2011), Nr. 3, S. 200–205
- [49] CHUBB, J. N.: *Electrostatic Ignition Risk And Tank Washing Operations*. In: *Article in Toftejorg On-line magazine* (2004)
- [50] RICHTER, T.: *Zerstäuben von Flüssigkeiten : Düsen und Zerstäuber in Theorie und Praxis*. 4. Auflage. Renningen : expert verlag, 2017 (Kontakt & Studium Band 660)
- [51] VAN DE WEERD, J. M.: *Electrostatic charge generation during tank washing. Spark mechanisms in tanks filled with charged mist*. In: *Journal of Electrostatics* 1 (1975), Nr. 3, S. 295–309
- [52] WALMSLEY, H. L.: *Electrostatic hazards from water slugs formed during the washing of ships tanks: spark energy calculations*. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 20 (1987), Nr. 3, S. 329–339
- [53] CHEMSAFE: *Datenbank für sicherheitstechnische Kenngrößen im Explosionsschutz : Propan, CAS-Nummer: 74-98-6*. URL <https://www.chemsafe.ptb.de/> – Überprüfungsdatum 2022-04-19
- [54] SCHIERDING, C. ; MÖCKEL, D. ; THEDENS, M. ; BEYER, M.: *Neueste Erkenntnisse bei der Charakterisierung der berührungslosen Messung elektrostatischer Aufladung mittels Feldmühlen* (2019), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), DOI: <https://doi.org/10.7795/210.20190521C>
- [55] SCHIERDING, C.: *Eignung von Feldmühlen als rückführbares Messmittel im elektrostatischen Feld*. Technische Universität Braunschweig; Verlag Dr. Hut. Dissertation. 2021
- [56] SCHNAITER, M.: *IBC 1000 Ltr. Merck-Ausführung : Dimension: 1100 x 1200 x 1660 mm*. THIELMANN THE CONTAINER COMPANY, 2017
- [57] CHILWORTH TECHNOLOGY LIMITED: *USER MANUAL: JCI 131 / JCI 131F Adverse Conditions Electrostatic Fieldmeter*. o. J.
- [58] BAUMANN, F. ; HIMSTEDT, M. ; MÖCKEL, D. ; THEDENS, M.: *Charge-separating processes by spraying water under high pressure*. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 72 (2021), 104527 (S. 1–11)
- [59] CHUBB, J. N.: *Two New Designs of "Field Mill" Type Fieldmeters not Requiring Earthing of Rotating Chopper*. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* vol. 26, no. 6 (Nov.-Dec. 1990), S. 1178–1181
- [60] SCHIERDING, C. ; MÖCKEL, D. ; THEDENS, M. ; BEYER, M. ; KURRAT, M.: *Further Developments of Metrological and Simulation-Based Characterization of the Non-contact Measurement of Electrostatic Charge by Means of Electric Field Meters*. In: *Part of the Lecture Notes in Electrical Engineering book series (LNEE)* 598 (2019), S. 55–66
- [61] BEYER, M. ; BOECK, W. ; MÖLLER, K. ; ZAENGL W.: *Hochspannungstechnik : Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1986

- [62] PIDOLL, U. von: *Physikalische Zündvorgänge : Bewertung der Zündwirksamkeit elektrostatischer Entladungen ohne Zündversuche mit brennbaren Gasen oder Stäuben*. In: *Ex-Zeitschrift der R. STAHL Schaltgeräte GmbH* 39 (2007), S. 14–19
- [63] SCHNIER ELEKTROSTATIK GMBH: *Betriebsanleitung Handcoulombmeter : Typ: HMG 11/02 Art.Nr.: 810276. 810276-BAL-DE/EN-090120*. Reutlingen, 2008
- [64] LANGER, T. ; BEYER, M. ; PIDOLL, U. von: *Messtechnische Charakterisierung elektrostatischer Entladungen*. In: *Technisches Messen* 75 (2008), Nr. 9, S. 516–524
- [65] SCHWABE, K.: *Physikalische Chemie : Band 2: Elektrochemie*. Berlin : Akademie-Verlag, 1974
- [66] REINING, R. ; SCHWAB, U.: *Leitfähigkeits-Fibel : Theorie der Messtechnik und Tipps für die Praxis*. Auflage: 999205D. Weilheim : Xylem Analytics Germany Sales GmbH & Co. KG., 2019
- [67] WISSENSCHAFTLICH - TECHNISCHE WERKSTÄTTEN G.M.B.H., DR.RER.NAT. K. SLEVOGT: *Bedienungsanleitung Mikroprozessor-PräzisionsLeitfähigkeitsmeßgerät LF 3000 mit Standard-Meßzelle TetraCon 96,.* Auflage: 12/92/1/Ma/Deg. ,Weilheim, o. J.
- [68] MEGGER INSTRUMENTS LIMITED: *Bedienungsanleitung MIT515 / MIT525 / MIT1025 / MIT1525 : 5 kV, 10 kV und 15 kV Isolationsprüfgeräte*. Auflage 12/2020. Dover, 2020
- [69] KRÄMER, H. ; ASANO, K.: *Incendivity of sparks from surfaces of electrostatically charged liquids*. In: *Journal of Electrostatics* 6 (1979), S. 361–371
- [70] ROSENBAUER INTERNATIONAL AG: *SELECT FLOW / PRO JET, Verwenderinformation*. Auflage: VI0913/SELECT FLOW / PRO JET\_DE\_EN\_FR\_IT\_ES\_NL\_NO\_HU\_PL\_-2020\_09\_158890. Leonding, 2020
- [71] BOZENA, A.: *Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2013
- [72] NORM DIN EN 13237: 2012-01: *Explosionsgefährdete Bereiche – Begriffe für Geräte und Schutzsysteme zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen*. Berlin : Beuth Verlag
- [73] TECHNISCHE REGEL FÜR GEFAHRSTOFFE: *Gefährliche explosionsfähige Gemische - Allgemeines (TRGS 720)*. Ausgabe 7/2020, (2020), (GMBI 2020 S. 419-426 [Nr. 21] (v. 24.07.2020); Berichtigt: GMBI 2021 S.399 [Nr. 17-19] (v. 16.03.2021))
- [74] BARTKNECHT, W.: *Explosionen : Ablauf und Schutzmaßnahmen*. Zweite, überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1980
- [75] HANKE-ROOS, M.: *Grundlagen des Explosionsschutzes : Ursachen-Beurteilung-Prävention*. In: *BG RCLmagazin, Zeitschrift für Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie* 12 (2021), S. 8–12
- [76] EXPLOSIONSSCHUTZRICHTLINIE (Atex): *Richtlinie 2014/ 34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (Neufassung)*. 2014. – *Amtsblatt L 96* ,2014-03-29, S. 309–356
- [77] TECHNISCHE REGEL FÜR GEFAHRSTOFFE: *Lagern von flüssigen und festen Gefahrstoffen in ortsfesten Behältern sowie Füll- und Entleerstellen für ortsbewegliche Behälter (TRGS 509)*. Ausgabe 9/2014,

(2014), (GMBI 2014 S. 1346-1400 [Nr. 66-67] (vom 19.11.2014); zuletzt berichtigt, geändert und ergänzt: GMBI 2020, S. 817 [Nr. 38] (vom 02.10.2020))

- [78] LÜTTGENS, G.: *Expert-Praxislexikon statische Elektrizität : 1700 Begriffe zu Gefahren, Störungen und Anwendungen*. 2. neu bearbeitete Auflage. Renningen : expert-Verlag, 2008
- [79] VERORDNUNG ZUM SCHUTZ VOR GEFAHRSTOFFEN: (*Gefahrstoffverordnung - GefStoffV*), Vom 26. November 2010 (BGBl. I S 1643), geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 28. Juli 2011 (BGBl. I S 1622), durch Artikel 2 der Verordnung vom 24. April 2013 (BGBl. I S 944), durch Artikel 2 der Verordnung vom 15. Juli 2013 (BGBl. I S 2514), durch Artikel 2 der Verordnung vom 03. Februar 2015 (BGBl. I S 49), durch Artikel 1 der Verordnung vom 15. November 2016 (BGBl. I S 2549), durch Artikel 148 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S 626) und durch Artikel 2 der Verordnung vom 21. Juli 2021 (BGBl. I S 3115)

## Anhang

Anhang A: Glossar.....	132
Anhang B: Berechnung der Messfläche des Feldstärkenmessgerätes JCI 131 .....	137
Anhang C: Bündiger Einbau des Feldstärkenmessgerätes in Metallplatte .....	138
Anhang D: Einfluss 10 m Koaxialkabel auf Messtechnik Shunt .....	139
Anhang E: Volumenströme der verwendeten Flüssigkeitsstrahler .....	140
Anhang F: Offset durch Koronaentladungen.....	142
Anhang G: Kumulativer Verlauf des Volumens der Tropfendurchmesser.....	143
Anhang H: Aufheizrate der Warmwasseraufbereitung.....	144
Anhang I: Messungen im 6,2 m <sup>3</sup> , 16,8 m <sup>3</sup> und 44,0 m <sup>3</sup> Behälter .....	145
Anhang J: Berechnung der Korrekturfaktoren der Raumpotentialmessung.....	151

## Anhang A: Glossar

**Brennbarer Stoff:** „Stoff in Form von Gas, Dampf, Flüssigkeit, Feststoff oder Gemischen davon, der bei Entzündung eine exotherme Reaktion mit Luft eingehen kann“ [72].

**Büschelentladung:** Büschelentladungen zählen zu den Ein-Elektroden-Entladungen. Der Krümmungsradius der Elektrode muss über 0,005 m betragen. Büschelentladungen treten auf, wenn die Elektrode einer aufgeladenen isolierenden Oberfläche angenähert wird [1, 23]. Sie können ebenfalls auftreten, wenn sich die Elektrode innerhalb einer Raumladungswolke befindet [42]. Büschelentladungen bilden teilweise einen Plasmakanal an der Elektrode aus und emittieren eine elektromagnetische Welle [23]. Büschelentladungen gelten als nicht zündfähig für Staub/Luft-Gemische [23]. Für Gas- und Dampf/Luft-Gemische besteht eine Zündgefahr [1, 23].

**Elektrische Leitfähigkeit:** Die elektrische Leitfähigkeit gibt an, wie gut eine Flüssigkeit den elektrischen Strom leitet [66]. Gegenüber dem Ladungstransport durch Elektronen metallischer Leiter, erfolgt dieser bei Flüssigkeiten durch Ionen [65]. Die elektrische Leitfähigkeit steigt mit der Anzahl dieser freien Ladungsträger. Bei einer zu hohen Anzahl treten wiederum Mobilitätsprobleme auf, die zu einer Reduzierung der elektrischen Leitfähigkeit führen können. Eine Abhängigkeit besteht durch die Ladung, der Konzentration und Art der Ionen [65]. Mit der Temperatur erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit der Flüssigkeit durch die Abnahme der Viskosität [65]. Um die Messwerte der elektrischen Leitfähigkeit zu vergleichen, ist die Messung bei einer Temperatur der Flüssigkeit von 25 °C durchzuführen. Messungen bei abweichenden Temperaturen müssen auf die Referenztemperatur von 25 °C umgerechnet werden [66]. Als elektrostatische Eigenschaft ist die elektrische Leitfähigkeit in Flüssigkeiten hoher, mittlerer und niedriger elektrischer Leitfähigkeit einzuteilen (Tabelle A.1) [1].

Tabelle A.1: Einteilung der elektrischen Leitfähigkeit  $\gamma$  [1]

	hoch	mittel	niedrig
Keine Kohlenwasserstoffe	$\gamma > 10^{-8} \text{ S/m}$	$10^{-8} \text{ S/m} > \gamma > 10^{-10} \text{ S/m}$	$\gamma < 10^{-10} \text{ S/m}$
Kohlenwasserstoffe	$\gamma > 10^{-8} \text{ S/m}$	$10^{-8} \text{ S/m} > \gamma > 5 \cdot 10^{-11} \text{ S/m}$	$\gamma < 5 \cdot 10^{-11} \text{ S/m}$

Beim Prozess der Behälterreinigung wird primär Wasser als Reinigungsflüssigkeit verwendet. Das natürlich vorkommende Meerwasser, das am häufigsten eingesetzte Trinkwasser und das vollentsalztes Wasser unterscheiden sich in der elektrischen Leitfähigkeit. Typische elektrische Leitfähigkeiten dieser Wasserarten unterschiedlicher Salinität sind in Tabelle A.2 aufgeführt [66].

Tabelle A.2: Elektrische Leitfähigkeit von Wasser unterschiedlicher Salinität [66]

Wasserart	Elektrische Leitfähigkeit in S/m bei 25 °C
Meerwasser	5
Trinkwasser	$5 \cdot 10^{-2}$
Vollentsalztes Wasser	$1 \cdot 10^{-4}$

Eine Recherche der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) zur elektrischen Leitfähigkeit von Trinkwasser ergab einen Bereich von  $0,68 \cdot 10^{-2} \text{ S/m}$  bis  $14 \cdot 10^{-2} \text{ S/m}$ . Die Daten stammen aus über 290 Landkreisen und kreisfreien Städten Deutschlands.

**Elektrisches Feld:** Das elektrische Feld beschreibt einen Raum, in dem Coulombkräfte durch elektrische Ladungen wirksam werden [23]. Voraussetzung für die Ausbildung eines elektrischen Feldes ist eine Potentialdifferenz zwischen zwei Orten. Die Feldlinien (ugs. elektrische Kraftlinien) beginnen beim Ort positiver Polarität und enden beim Ort negativer Polarität. Die Feldlinien treffen immer orthogonal auf eine Oberfläche, die fest oder flüssig sein kann [33]. Es gibt homogene, inhomogene und radiale elektrische Felder. Bei homogenen elektrischen Feldern verlaufen die Feldlinien parallel und ergeben eine konstante Feldstärke [23, 33]. Sie entstehen innerhalb eines Plattenkondensators, unter Nichtbeachtung des Randbereichs [23]. In inhomogenen elektrischen Feldern bündeln sich die Feldlinien bspw. an kleinen Krümmungsradien, wodurch sich die elektrische Feldstärke an dieser Stelle erhöht [23]. Bei radialen Feldern stehen die Feldlinien orthogonal auf einer Punktladung. Radiale Felder treten innerhalb von Behältern auf, die eine Raumladungswolke beinhalten.

**Explosion:** „Plötzliche Oxidations- oder Zerfallsreaktion mit Anstieg der Temperatur, des Druckes oder beider gleichzeitig“ [72, 73].

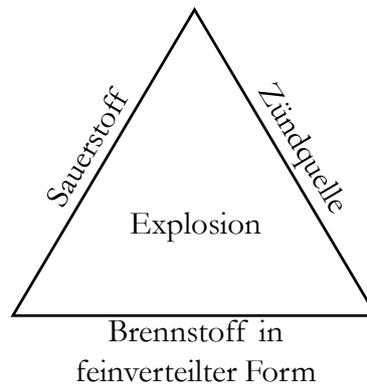


Abbildung A.1: Gefahrendreieck [74]

Für das Auftreten einer Explosion müssen die drei Bedingungen des Gefahrendreiecks gleichzeitig erfüllt sein (Abbildung A.1). Ein explosionsfähiges Gemisch aus Brennstoff in feinverteilter Form mit Luft bzw. Sauerstoff führt, innerhalb der Explosionsgrenzen, durch eine wirksame Zündquelle zu einer Explosion [74]. Bei einer elektrostatischen Gasentladung erfolgt eine Zündung, wenn die Mindestzündenergie, bzw. die Mindestzündladung des explosionsfähigen Gemisches überschritten wird. Das Ausbleiben einer der drei Bedingungen durch geeignete Maßnahmen verhindert bereits die Explosion [74]. Neuerdings wird das Gefahrstoffdreieck zum Gefahrstofftetraeder erweitert. Beim Gefahrstofftetraeder unterteilt sich die Bedingung „Brennstoff in feinverteilter Form“ in „Brennstoff“ und dem richtigen „Mischungsverhältnis der Durchmischung“ des Brennstoffs mit Luft bzw. Sauerstoff [75].

**Explosionsgefährdeter Bereich:** „Ein Bereich, in dem die Atmosphäre aufgrund der örtlichen und betrieblichen Verhältnisse explosionsfähig werden kann“ [76].

**Explosionsgruppe II:** Explosionsgruppen dienen der Einteilung von Gefahrstoffen in Abhängigkeit ihrer Zündempfindlichkeit. Die Explosionsgruppe II gilt für Gase und Dämpfe, die über Tage auftreten und werden in die Explosionsgruppen IIA, IIB und IIC eingeteilt. Für diese Explosionsgruppen gelten die in Tabelle A.3 aufgeführten Grenzwerte der übertragenen Ladung [1].

Tabelle A.3: Grenzwerte der übertragenen Ladung [1]

Explosionsgruppe	Grenzwert der übertragenen Ladung in Zone 0 in nC	Grenzwert der übertragenen Ladung in Zone 1 und Zone 2 in nC
IIA	25	60
IIB	10	25
IIC	Es dürfen keine Entladungen detektierbar sein	10

**Explosionsfähige Atmosphäre:** „Ein Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben unter atmosphärischen Bedingungen, in dem sich der Verbrennungsvorgang nach erfolgter Entzündung auf das gesamte unverbrannte Gemisch überträgt“ [76]. Atmosphärische Bedingungen liegen vor, wenn die Umgebungstemperatur  $-20\text{ °C}$  bis  $+60\text{ °C}$  und der Druck  $0,8\text{ bar}$  bis  $1,1\text{ bar}$  beträgt [1, 73].

**Explosionsfähiges Gemisch:** „Ein explosionsfähiges Gemisch ist ein Gemisch aus brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder aufgewirbelten Stäuben und Luft oder einem anderen Oxidationsmittel, das nach Wirksamwerden einer Zündquelle in einer sich selbsttätig fortpflanzenden Flammenausbreitung reagiert, sodass im Allgemeinen ein sprunghafter Temperatur- und Druckanstieg hervorgerufen wird. Je näher die Konzentration der brennbaren Komponente an den Grenzen des Explosionsbereiches liegt, desto geringer fällt der Temperatur- und Druckanstieg aus“ [73].

Innerhalb eines Behälters ist die Bildung eines explosionsfähigen Gemisches durch geringe Rückstände brennbarer Stoffe möglich. Bereits  $5\text{ ml}$  Benzol reichen aus, um im gesamten Behälter mit einem Volumen von ca.  $0,2\text{ m}^3$  mit Luft ein explosionsfähiges Gemisch zu bilden [23].

**Flammpunkt:** „Niedrigste Temperatur einer Flüssigkeit, bei der sich unter bestimmten genormten Bedingungen aus der Flüssigkeit Dämpfe in solcher Menge entwickeln, dass sie fähig sind, ein entflammbares Dampf/Luft-Gemisch zu bilden“ [72]. Beträgt der Flammpunkt  $55\text{ °C}$  oder weniger ist üblicherweise im Behälter eine Zone 0 einzuteilen [77]. Eine Zoneneinteilung ist nicht vorzunehmen, wenn durch Maßnahmen der Flammpunkt bei reinen Flüssigkeiten um  $5\text{ K}$  und bei Gemischen um  $15\text{ K}$  dauerhaft unterschritten wird. Beim Prozess der Behälterreinigung ist die Erwärmung des Behälters und darin befindlichen Rückständen durch die versprühte Reinigungsflüssigkeit zu beachten. Gleiches gilt für Sonneneinstrahlung oder eine im Fehlerfall defekte Kühlung [77]. Das Vernebeln der brennbaren Flüssigkeit kann ungeachtet des Flammpunktes zu der Bildung eines explosionsfähigen Gemisches führen.

**Funkenentladung:** Funkenentladungen treten nur zwischen zwei Leitern (Elektroden) auf, die eine Potentialdifferenz aufweisen. Sie beginnen am Ort der höchsten Feldstärke [23]. Zwischen dem gesamten Abstand der Elektroden bildet sich ein Plasmakanal aus, der eine elektromagnetische

Welle emittiert [23]. Funkenentladungen gelten als zündfähig für Staub-, Gas- und Dampf/Luft-Gemische [1]. Bei der Reinigung von Behältern können Funkenentladungen zwischen aufgeladenen gegen Erde isolierten Leitern und geerdeten leitfähigen Einbauteilen oder der Behälterwand entstehen [42].

**Gasentladung:** Im elektrischen Feld werden die im Gas vorhandenen Elektronen und Ionen entsprechend ihrer Polarität beschleunigt. Die Beschleunigung ist abhängig von der Höhe der elektrischen Feldstärke. Kollidieren die freien Ladungsträger bei ausreichend hohen Beschleunigungen mit Gasatomen oder -molekülen erfolgt eine Stoßionisation. Dabei werden die zwischen dem positiv geladenen Atomkern und den negativ geladenen Elektronen der Atomhülle wirkenden Anziehungskräfte, die aufgrund ihrer gegenläufigen Polarität wirken, durch die kinetische Energie überwunden und Elektronen freigesetzt. Die notwendige Energie wird als Ionisationsenergie bezeichnet und ist abhängig vom Atom bzw. Molekül. Der Vorgang der Stoßionisation setzt sich lawinenartig fort und erhöht die Anzahl der freien Ladungsträger. Es entsteht ein Stromfluss und schlussendlich die Gasentladung [7, 23].

**Influenz:** Die Influenz beschreibt die Ladungsverschiebung innerhalb eines Körpers im elektrischen Feld. Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab und ungleichnamige Ladungen ziehen sich an [33]. Aus diesem Grund verschieben sich im elektrischen Feld die negativen Ladungen innerhalb des Körpers zum Ort positiver Polarität und die positiven Ladungen innerhalb des Körpers zum Ort negativer Polarität. Diese Beschreibung gilt für Flüssigkeiten, bei denen Ionen als Ladungsträger fungieren. Bei Festkörpern entspricht dies einem Elektronenüberschuss (negative Aufladung) und einem Elektronenmangel (positive Aufladung). Die verschobenen Ladungen gleichen sich beim Austritt aus dem elektrischen Feld aus und der Körper ist ungeladen. Erfolgt innerhalb des elektrischen Feldes ein Abfließen der verschobenen Ladungen einer Polarität des Körpers, ist er aufgeladen [23].

**Isolierter Leiter:** Ein Isolierter Leiter ist ein leitfähiger und gegen Erde isolierter Körper, der fest oder flüssig sein kann [1, 5].

**Koronaentladung:** Koronaentladungen entstehen an leitfähigen geerdeten Gegenständen, deren Krümmungsradius unter 0,0005 m beträgt [1]. Typische Beispiele sind Spitzen und Ecken. Bei Flüssigkeitsoberflächen können sich Taylor-Kegel ausbilden, die Koronaentladungen erzeugen [29]. Sie gehören zu den Ein-Elektroden Entladungen, bilden keinen Plasmakanal aus, sind die energieschwächste Entladungsart und emittieren keine elektromagnetische Welle [23]. Sie sind nicht zündfähig für Staub/Luft-Gemische [1]. Für Gas- und Dampf/Luft-Gemische, gebildet aus Gefahrstoffen der Explosionsgruppe IIA und IIB besteht keine Zündgefahr [23]. Für Gas- und Dampf/Luft-Gemische, gebildet aus Gefahrstoffen der Explosionsgruppe IIC mit einer MZE von 0,02 mJ oder weniger, ist eine Zündgefahr nicht sicher auszuschließen [7, 23, 42].

**Mindestzündenergie (MZE):** „In einem Kondensator gespeicherte niedrigste Energie, die bei einer Entladung ausreichend ist, um unter festgelegten Prüfbedingungen die Zündung der zündfähigsten explosionsfähigen Atmosphäre auszulösen“ [72].

**Mindestzündladung (MZQ):** „Ist die unter festgelegten Versuchsbedingungen kleinste in einer elektrostatischen Entladung übertragene elektrische Ladungsmenge, die das zündwilligste Gemisch einer explosionsfähigen Atmosphäre entzünden kann“ [1].

**Raumladungswolke:** „Vorwiegend unipolar aufgeladene Aerosole können eine R. bilden, an deren Rand eine elektr. Feldstärke auftritt (→ Wolkendipol). Das kann zur →Influenz auf benachbarten leitfähigen Teilen führen, woraus bei entsprechenden Krümmungsradien →Corona- bzw. →Büschelentladungen resultieren. R. können elektrost. Zündgefahren hervorrufen, z.B. beim Einfüllen feinverteilter Schüttgüter in Reaktoren bzw. Silos, bei der →Hochdruckreinigung großer Behälter oder Erzeugung von →Wasserschleiern“ [78].

**Sprühnebel:** Als Sprühnebel ist ein meist heterogenes Gemisch aus Gas und grobdispersen in Schwebelage befindlichen Tropfen zu bezeichnen [25]. Beim Prozess der Behälterreinigung erfolgt die Bildung von Sprühnebeln durch das Ablösen der äußeren Schicht der Tropfen des Strahls.

**Stark ladungserzeugend:** „Stark ladungserzeugender Prozess ist ein Vorgang, bei dem im Vergleich zur Ladungsableitung hohe Ladungsmengen pro Zeit erzeugt werden und sich ansammeln können“ [1]. Innerhalb der TRGS 727 [1] wird das Versprühen von Flüssigkeiten als ein stark ladungserzeugender Prozess definiert.

**Strahl:** Der Düsengeometrie entsprechendes Tropfenkollektiv, das sich mit zunehmendem Abstand zur Düse aufweitend kann. Der aus feinsten in Schwebelage befindlichen Tropfen bestehende Sprühnebel löst sich durch die hydrodynamische Instabilität oder beim Aufprall des Strahls ab. Die beim Austritt aus einer Düse oder Rohröffnung beschleunigte, gebündelte und sich nicht zerteilende Flüssigkeit wird als Vollstrahl bezeichnet. Vollstrahlen sind besonders gut geeignet, wenn die Düse einen großen Abstand zur verunreinigten Oberfläche aufweist.

**Versprühen:** Der Vorgang des Versprühens, ugs. Zerstäuben genannt, beschreibt das Ausbringen einer meist über Atmosphärendruck befindlichen Flüssigkeit aus einer Düse. Die Druckenergie wird in kinetische Energie umgewandelt [24]. Bei ausreichend hohen Düsenaustrittsgeschwindigkeiten erfolgt nach Düsenaustritt ein Zerteilen der Flüssigkeit in einzelne Tropfen. Das gesamte Tropfenkollektiv, bestehend aus Strahl und Sprühnebel, ist als Sprüh zu bezeichnen [24].

**Zone:** „Explosionsgefährdete Bereiche, in denen Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung oder zur Auswirkungsbegrenzung erforderlich sind, können nach Häufigkeit und Dauer des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in Zonen unterteilt werden“ [73]. Zone 0: „Ist ein Bereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist“ [79]. Zone 1: „Ist ein Bereich, in dem sich im Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln bilden kann“ [79]. Zone 2: „Ist ein Bereich, in dem im Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln normalerweise nicht auftritt, und wenn doch, dann nur selten und für kurze Zeit“ [79].

## Anhang B: Berechnung der Messfläche des Feldstärkemessgerätes JCI 131

Die Berechnung der Messfläche und dessen Durchmesser in [40] ist anhand der nachfolgend veröffentlichten Erkenntnisse bzgl. der Feldstärkenmesstechnik [54, 55, 60] zu korrigieren. So ist in der korrigierten Berechnung der Durchmesser des Messkopfes des Feldstärkemessgerätes zu beachten. Der korrigierte geometrische Zusammenhang für das in [40] verwendete Feldstärkemessgerät JCI 131 ist in Abbildung B.1 skizziert:

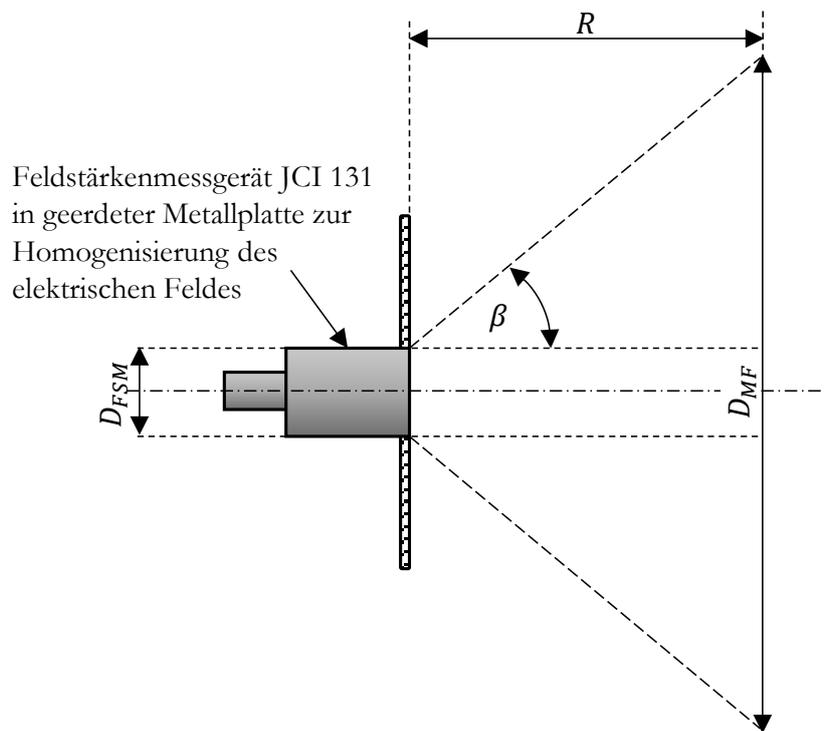


Abbildung B.1: Geometrischer Zusammenhang zur Bestimmung der Messfläche und dessen Durchmesser des Feldstärkemessgerätes JCI 131 nach [60]

Der Durchmesser der Messfläche  $D_{MF}$  ist abhängig vom Durchmesser des Feldstärkemessgerätes JCI 131  $D_{FSM}$  von 0,101 m, dem Messwinkel des Feldstärkemessgerätes JCI 131  $\beta$  von  $(40 \pm 5)^\circ$  und vom Abstand zum Messobjekt  $R$  von 0,4 m. Die Berechnung des Durchmessers der Messfläche erfolgt nach Gleichung B.1:

$$D_{MF} = 2 \cdot \tan(\beta) \cdot R + D_{FSM} \quad \text{B.1}$$

Die Messfläche  $A_{MF}$  ist nach Gleichung B.2 der Kreisfläche zu berechnen:

$$A_{MF} = \frac{\pi \cdot D_{MF}^2}{4} \quad \text{B.2}$$

Für den Durchmesser der Messfläche resultiert aus der Berechnung ein Wert von 0,77 m und für die Messfläche ein Wert von 0,47 m<sup>2</sup>. Diese korrigierten Werte wurden in Kapitel 4.5.1 genutzt.

## Anhang C: Bündiger Einbau des Feldstärkenmessgerätes in Metallplatte

Das Feldstärkenmessgerät war für Messungen am Strahl und Sprühnebel ohne Behälter in eine 0,01 m dicke Metallplatte, die einen Durchmesser von 0,40 m besaß, eingefasst. Die Messöffnung des Feldstärkenmessgerätes schloss bündig mit der Metallplatte ab. Durch diese Konstruktion ergab sich ein homogenes elektrisches Feld [23, 54]. Die Höhe vom Boden bis zur Rotationsachse des an dem Stativ befestigten Feldstärkenmessgerätes betrug 1,3 m. Für die in Kapitel 4.5.1 beschriebenen Messungen mit der elektrostatischen Applikationsanlage war eine Höhe von 1,7 m notwendig. Der übrige Aufbau in Abbildung C.1 entspricht dem Aufbau für Feldstärkenmessungen im Behälter (Kapitel 4.4.1).



Abbildung C.1: Aufbau der Feldstärkenmessung an Strahlen und Sprühnebeln ohne Behälter

## Anhang D: Einfluss 10 m Koaxialkabel auf Messtechnik Shunt

Der Messwiderstand des Shunts betrug  $(0,250 \pm 0,001) \Omega$  und war über ein Koaxialkabel mit dem Channel 1 des kalibrierten Oszilloskops LeCroy WaveRunner 62 Xi des Herstellers Teledyne LeCroy verbunden. Es galt zu untersuchen, ob die notwendige Länge des Koaxialkabels für Versuche am Strahl von 10 m einen Einfluss auf die Messung hat. Zum Vergleich wurden Messungen mit einer typischen Länge des Koaxialkabels von 2 m durchgeführt. Bei den Messungen am Strahl kam es durch Bewegungen des Isolierstabes zur Schlaufenbildung des 10 m langen Koaxialkabels. Um diesen Fall zu simulieren, wurde das 10 m lange Koaxialkabel aufgerollt und die Messungen wiederholt. Durch Annäherung der 0,025 m Kugelelektrode des Shunts an den Plattenrand der montierten Fakirelektrode des Gleichspannungsgenerators (-70 kV) wurden die Entladungen provoziert. Pro Konfiguration wurden über 2 000 Entladungen messtechnisch erfasst. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle D.1 aufgeführt.

Tabelle D.1: Übertragene Ladungen in Abhängigkeit der Länge des Koaxialkabels

Länge Koaxialkabel in m	Anzahl Messwerte	Übertragene Ladung in nC	
		Mittelwert	Minimum- Wert
2	2 052	-201,2	-351,6
10	2 046	-208,2	-360,6
10, aufgerollt	2 049	-192,3	-351,4
Max. Abweichung zwischen dem 2 m und 10 m langen Koaxialkabel in %		3,4	2,5
Max. Abweichung zwischen dem 2 m und aufgerollten 10 m Koaxialkabel in %		4,4	0,1

Für eine Angabe der prozentualen Abweichung sind die Mittelwerte der drei Messungen zu vergleichen. Die bei diesen Messungen festgestellte Abweichung beträgt unter 5,0 %. Für eine Zündgefahrenbewertung ist der betragsmäßig höchste Wert zu nutzen. Bei den in Tabelle D.1 aufgeführten Messungen entspricht dies den Minimum-Werten der übertragenen Ladung, die eine maximale Abweichung von 2,5 % besitzen. Der Einfluss der Längen der Koaxialkabel und die Schlaufenbildung sind mit unter 5 % bei sicherheitstechnischen Bewertungen zu beachten.

## Anhang E: Volumenströme der verwendeten Flüssigkeitsstrahler

In diesem Anhang werden die Volumenströme der in Kapitel 5.1 beschriebenen Flüssigkeitsstrahler aus [6] und die für Messungen dieser Arbeit verwendeten Flüssigkeitsstrahler aufgezeigt.

### Abschätzung des Volumenstroms der Messungen aus [6]:

In [6] betrug der Pumpendruck 100 bar bis 400 bar bei einem Düsendurchmesser von 1,20 mm. Der Volumenstrom des Flüssigkeitsstrahler ist nicht bekannt und wurde anhand des Düsenkatalogs des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH [17] abgeschätzt (Tabelle E.1):

Tabelle E.1: Nach [17] abgeschätzter Volumenstrom der in [6] verwendeten Flüssigkeitsstrahler

Düsendurchmesser in mm	Pumpendruck in bar	Volumenstrom in l/s
1,20	100	0,150
1,20	200	0,212
1,20	300	0,260
1,20	400	0,300

### Volumenstrombestimmung des Hochdruckreinigers HD 9/50 des Herstellers Alfred Kärcher SE & Co. KG:

Der Volumenstrom des Hochdruckreinigers HD 9/50 des Herstellers Alfred Kärcher SE & Co. KG ist abhängig vom Pumpendruck und Düsendurchmesser (Tabelle E.2). Für die Volumenstrombestimmung wurde für eine Dauer von 30 s in den geschlossen leitfähigen geerdeten 1 m<sup>3</sup> Behälter gesprüht. Das angesammelte Wasser wurde nach dem Sprühvorgang durch den Auslass des Behälters in 10 l Behälter mit Literskala umgefüllt und der Wert abgelesen. Aus der bekannten Dauer des Sprühvorgangs  $t$  und dem gemessenen Volumen  $V_{FL}$  (in Liter) war nach Gleichung E.1 der Volumenstrom  $\dot{V}$  zu berechnen [33]:

$$\dot{V} = \frac{V_{FL}}{t} \quad \text{E.1}$$

Diese Durchführung wurde dreimal für jede Konfiguration aus Düsendurchmesser und Pumpendruck wiederholt und der Mittelwert berechnet. Die bei den Versuchen festgestellte maximale Abweichung des Volumenstroms beträgt 0,007 l/s.

Die Kreiselpumpe zum Aufbau des Vordrucks des Hochdruckreinigers musste im Laufe der Versuche durch eine Membranpumpe getauscht werden, die für Meerwasser geeignet war. Die Volumenstrommessung des Düsendurchmesser von 1,05 mm wurde wiederholt. Es ergibt sich keine Abhängigkeit von der verwendeten Pumpe.

Tabelle E.2: Volumenströme des Hochdruckreinigers HD 9/50

Pumpenart	Düsendurchmesser in mm	Pumpendruck in bar	Volumenstrom in l/s
Membranpumpe	1,05	100	0,098
	1,05	200	0,149
	1,05	300	0,183
	1,05	400	0,220
	1,05	500	0,250
Kreiselpumpe	1,05	100	0,093
	1,05	200	0,146
	1,05	300	0,178
	1,05	400	0,218
	1,05	500	0,250
	1,25	100	0,124
	1,25	200	0,201
	1,25	300	0,253
	1,35	100	0,150
	1,35	200	0,223
	1,35	300	0,281

### Volumenstrom der Flüssigkeitsstrahler der Hammelmann Maschinenfabrik GmbH:

Der Volumenstrom der Flüssigkeitsstrahler des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH [17] ist abhängig vom Düsendurchmesser, Düsenträger und Pumpendruck (Tabelle E.3):

Tabelle E.3: Volumenströme der Flüssigkeitsstrahler des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH [17]

Düsendurchmesser in mm	Bezeichnung Düsenträger	Pumpendruck in bar	Volumenstrom in l/s
0,50	A	500	0,058
0,50	A	1 000	0,082
0,50	A	1 500	0,102
0,50	A	2 000	0,117
1,00	A	300	0,180
1,00	A	500	0,233
1,00	A	1 000	0,330
1,00	A	1 500	0,403
1,00	T	1 500	0,307
1,00	T	2 500	0,395
2,00	A	500	0,933
4,00	A	100	1,670

## Anhang F: Offset durch Koronaentladungen

Bei den Messungen der übertragenen Ladung am horizontalen Strahl aus vollentsalztem Wasser des Flüssigkeitsstrahlers des Herstellers Hammelmann Maschinenfabrik GmbH, mit einem Pumpendruck von 1500 bar und einem Düsendurchmesser von 0,50 mm wies die Messkurve des Shunts einen negativen Spitzenwert auf (Kapitel 5.4, Abbildung 5.9). Vor und nach dem Spitzenwert ergab sich ein Offset von über 2 mV. Zum Nachweis, dass es sich bei dem Offset um Koronaentladungen handelte, die bedingt durch die sich zu Taylor-Kegeln ausformenden Wassertropfen auftraten, wurden Messungen der übertragenen Ladung an der trockenen und mit Wasser benetzten Kugelelektrode des Shunts, mit einem Krümmungsradius von 0,0125 m, durchgeführt. Die Messungen erfolgten mit dem Oszilloskop WaveRunner 62 Xi des Herstellers Teledyne LeCroy. Die provozierten Gasentladungen wurden am Plattenrand der am Gleichspannungsgenerator (-70 kV Leerlaufspannung) montierten Fakirelektrode erzeugt. War die Kugelelektrode trocken ergab sich kein Offset (Abbildung F.1). War die Kugelelektrode mit Wasser benetzt, ergab sich ein messbarer Offset (Abbildung F.2). Der Offset betrug, wie bei den Messungen am Strahl, über 2 mV. Die so nachgestellten Messbedingungen bei Messungen der übertragenen Ladung am Strahl beweisen das Auftreten des Offsets durch Koronaentladungen.

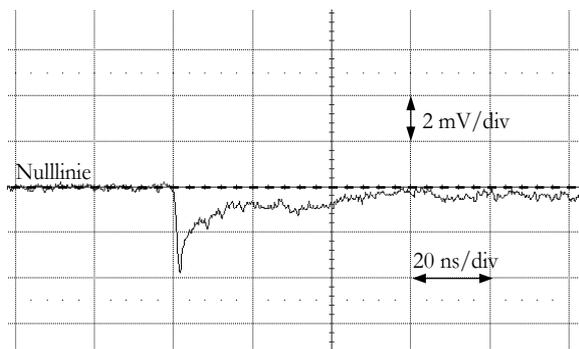


Abbildung F.1: Messung der übertragenen Ladung mit der trockenen Kugelelektrode

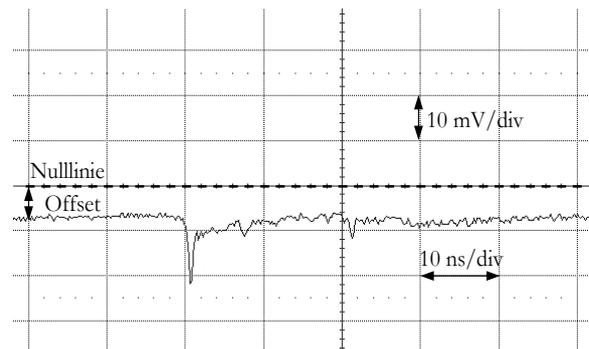


Abbildung F.2: Messung der übertragenen Ladung an der mit Wasser benetzten Kugelelektrode

## Anhang G: Kumulativer Verlauf des Volumens der Tropfendurchmesser

Für einen Abstand zur Düse von 0,5 m liegt der kumulative Verlauf des Volumens der Tropfendurchmesser für das horizontale Versprühen von vollentsalztem Wasser bei einem Pumpendruck von 500 bar vor (Abbildung G.1). Der Düsendurchmesser des verwendeten Hochdruckreinigers HD 9/50 des Herstellers Alfred Kärcher SE & Co. KG betrug 1,05 mm. Der Volumenstrom ist Anhang E zu entnehmen. Der kumulative Verlauf des Volumens der Tropfendurchmesser wurde durch Messungen mit dem Phasen-Doppler-Anemometer (PDA) des Düsenherstellers Lechler GmbH erzeugt. 100 % des kumulativen Volumens der Tropfendurchmesser ist bei einem maximalen Tropfendurchmesser von 400  $\mu\text{m}$  erreicht. Dieser Tropfendurchmesser wurde in Kapitel 5.5 für die Berechnung der maximalen Anzahl Ladungen einer Polarität in einem in Luft befindlichen Tropfen genutzt.

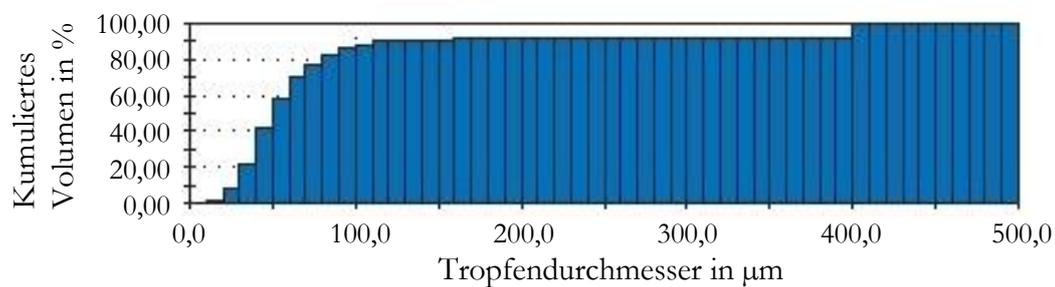


Abbildung G.1: Tropfengrößenverteilung beim Versprühen von vollentsalztem Wasser, bei einem Pumpendruck von 500 bar, einem Düsendurchmesser von 1,05 mm und einem Abstand zur Düse von 0,5 m

## Anhang H: Aufheizrate der Warmwasseraufbereitung

Die in Kapitel 4.3 beschriebene Warmwasseraufbereitung besaß eine Aufheizrate von  $(7,5 \pm 0,1)$  K/h. Erwärmt wurden 1 000 l Wasser. Die Bestimmung der Aufheizrate erfolgte durch Messungen bei einer Ausgangstemperatur von rund 10 °C, 20 °C und 30 °C (Abbildung H.1). Die Zeit betrug je Messung 60 min (1 h).

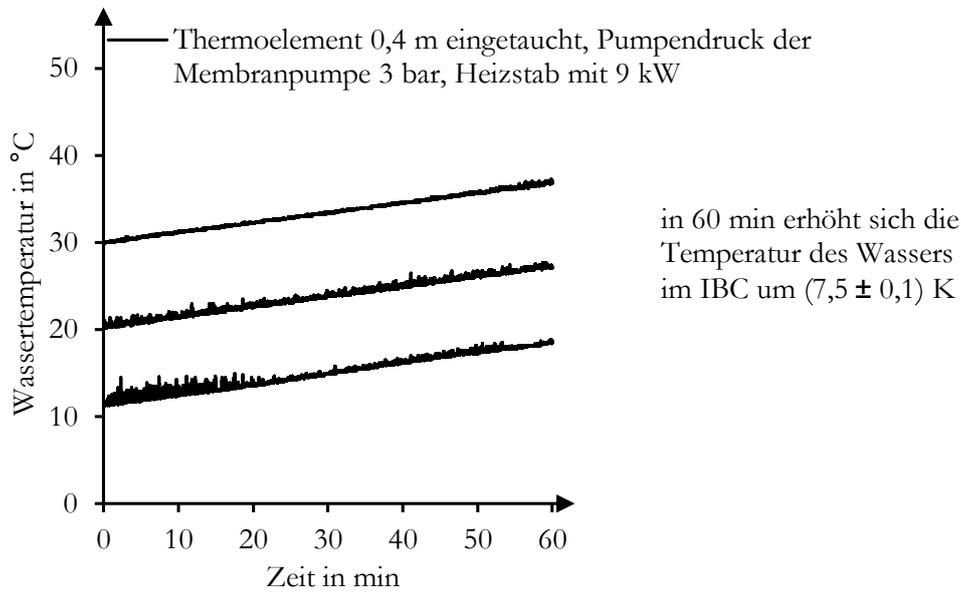


Abbildung H.1: Anstieg der Wassertemperatur im IBC in Abhängigkeit von der Zeit

## Anhang I: Messungen im 6,2 m<sup>3</sup>, 16,8 m<sup>3</sup> und 44,0 m<sup>3</sup> Behälter

In Abbildung I.1, Abbildung I.2 und Abbildung I.3 sind die technischen Zeichnungen der mittelgroßen Behälter dargestellt. Die vorgesehenen Öffnungen der Messtechnik und Spritzeinrichtungen sind beschriftet.

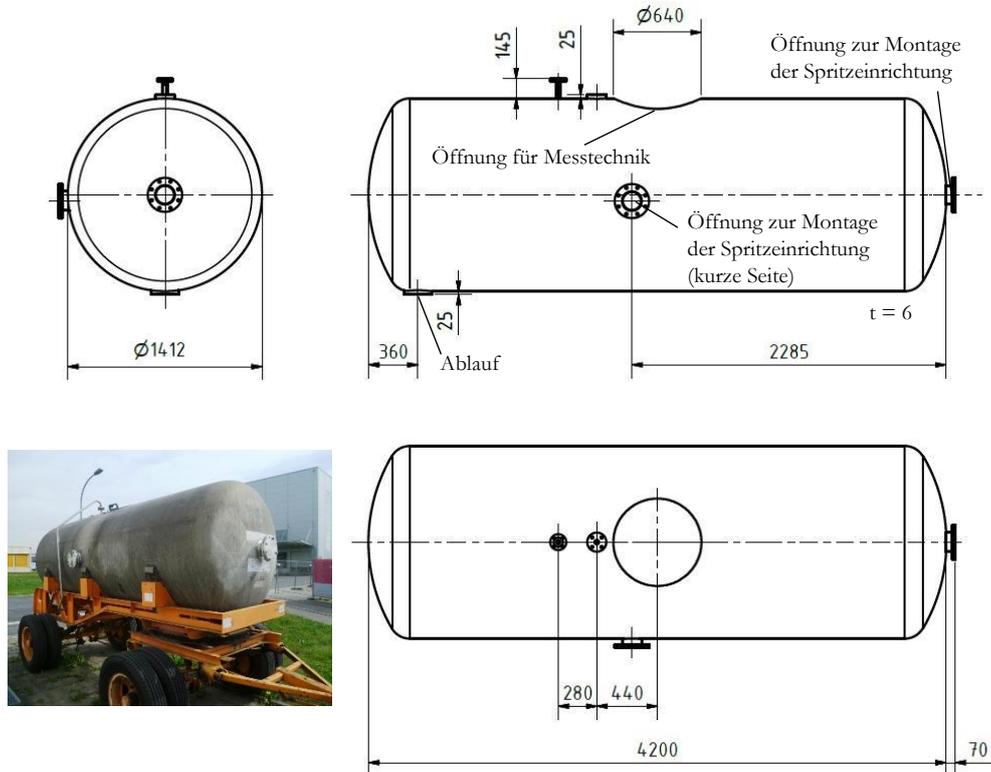


Abbildung I.1: Technische Zeichnung und Lichtbild des 6,2 m<sup>3</sup> Behälters

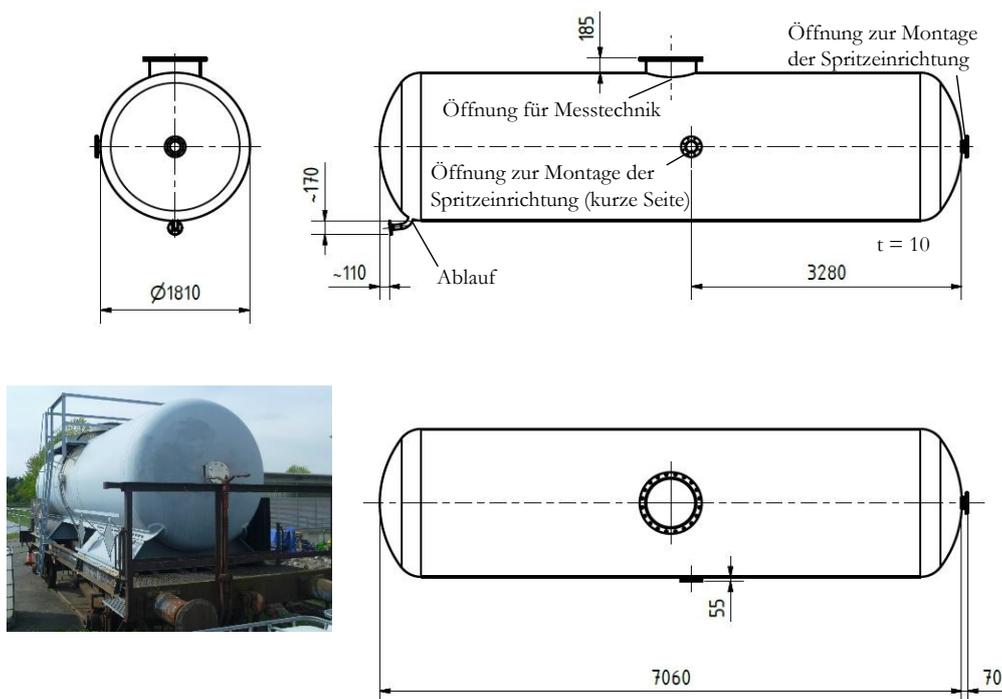


Abbildung I.2: Technische Zeichnung und Lichtbild des 16,8 m<sup>3</sup> Behälters

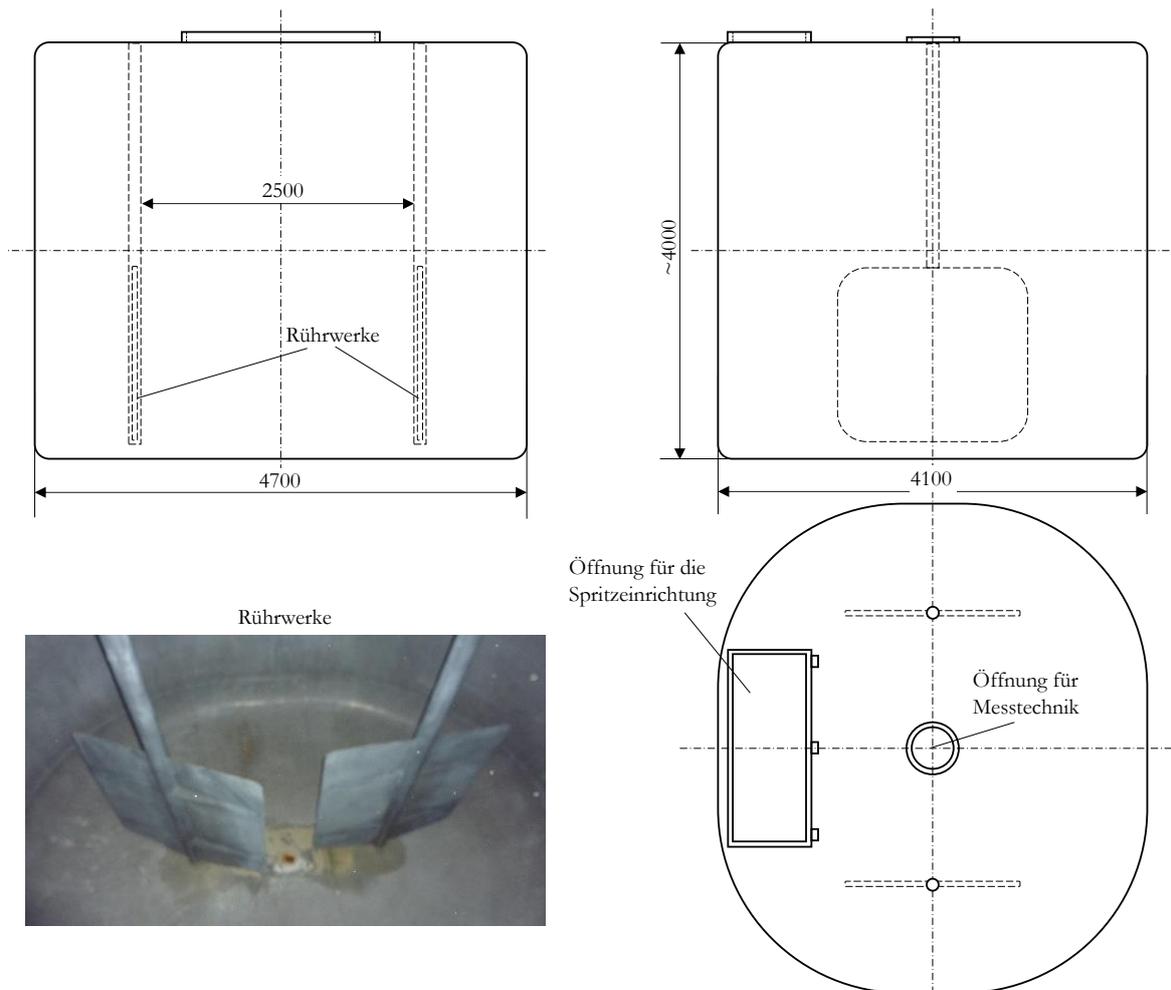


Abbildung I.3: Technische Zeichnung und Lichtbild der Rührwerke des 44,0 m<sup>3</sup> Behälters

Um beim Sprühen im Winkel in den 16,8 m<sup>3</sup> Behälter den Abstand der Düse zur Oberfläche des Aufpralls auf 0,19 m zu reduzieren, wurde an dem Düsenrohr eine Prallplatte montiert (Abbildung I.4).



Abbildung I.4: Am Düsenrohr montierte Prallplatte für Versuche im 16,8 m<sup>3</sup> Behälter

Im Folgenden ist die Gesamtheit der in den mittelgroßen Behältern durchgeführten Messungen der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials aufgeführt. Auf der Abszisse ist der Behälterdurchmesser angegeben. Dieser eine Wert des Behälterdurchmessers gilt für alle im Diagramm aufgeführten Messwerte.

## Elektrische Feldstärke:

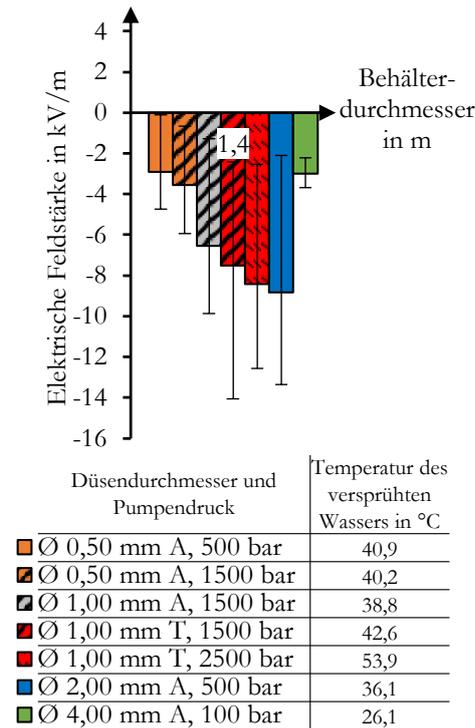


Abbildung I.5: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von Trinkwasser in den 6,2 m<sup>3</sup> Behälter

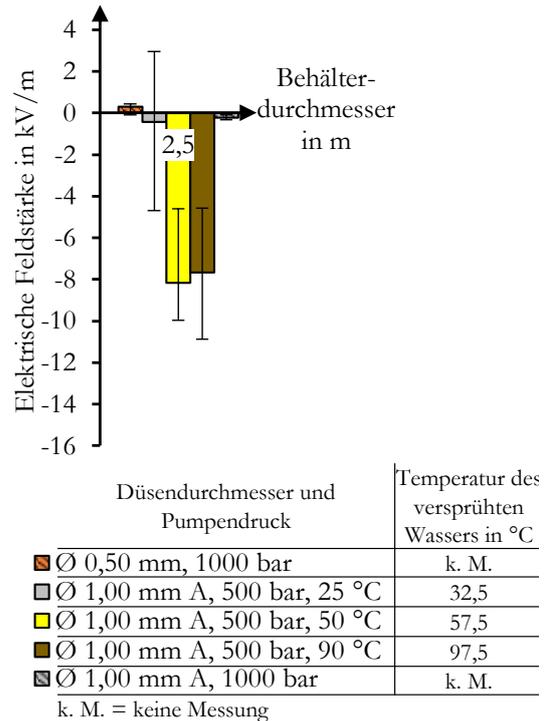


Abbildung I.6: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von Trinkwasser in den 44,0 m<sup>3</sup> Behälter

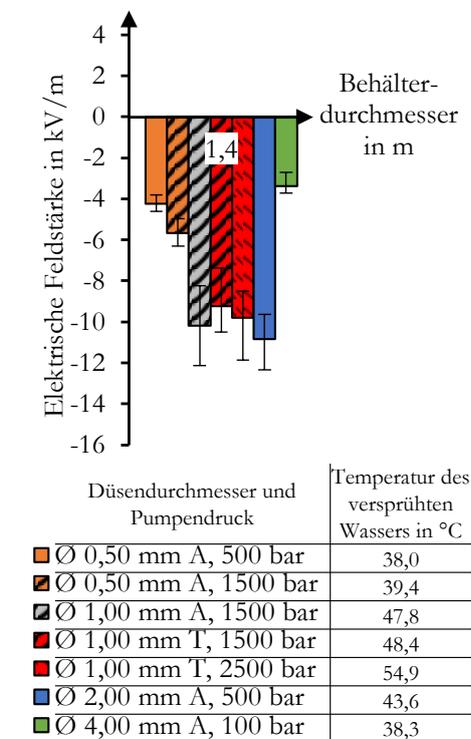


Abbildung I.7: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in den 6,2 m<sup>3</sup> Behälter

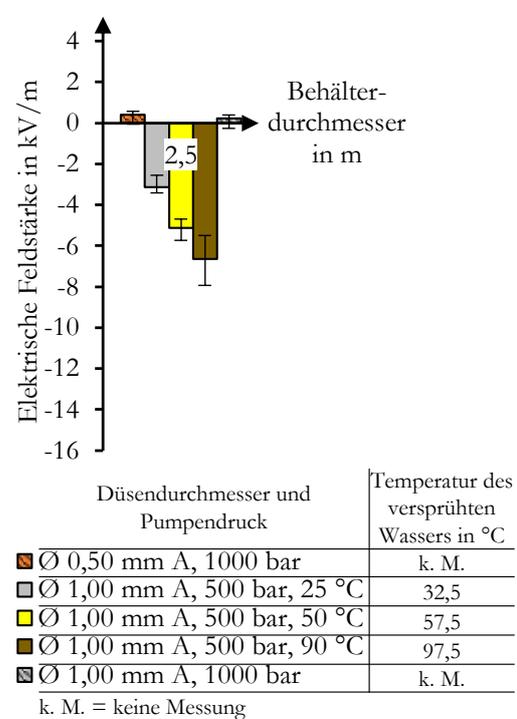
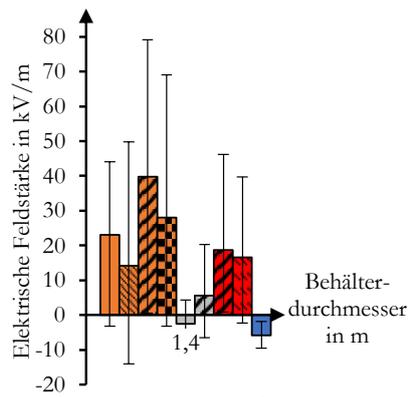
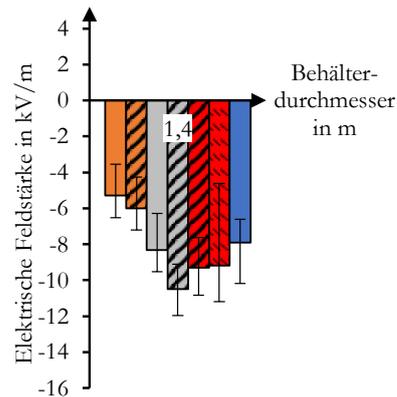


Abbildung I.8: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in den 44,0 m<sup>3</sup> Behälter



Düsendurchmesser und Pumpendruck	Temperatur des versprühten Wassers in °C
Ø 0,50 mm A, 500 bar	44,6
Ø 0,50 mm A, 1000 bar	47,4
Ø 0,50 mm A, 1500 bar	46,1
Ø 0,50 mm A, 2000 bar	47,9
Ø 1,00 mm A, 500 bar	29,5
Ø 1,00 mm A, 1500 bar	43,8
Ø 1,00 mm T, 1500 bar	46,7
Ø 1,00 mm T, 2500 bar	56,8
Ø 2,00 mm A, 500 bar	36,7

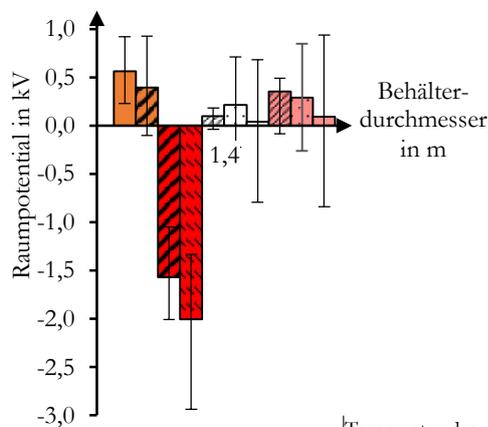
Abbildung I.9: Elektrische Feldstärke beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in den 6,2 m<sup>3</sup> Behälter



Düsendurchmesser und Pumpendruck	Temperatur des versprühten Wassers in °C
Ø 0,50 mm A, 500 bar	36,1
Ø 0,50 mm A, 1500 bar	41,4
Ø 1,00 mm A, 500 bar	40,9
Ø 1,00 mm A, 1500 bar	50,5
Ø 1,00 mm T, 1500 bar	50,8
Ø 1,00 mm T, 2500 bar	60,0
Ø 2,00 mm A, 500 bar	37,1

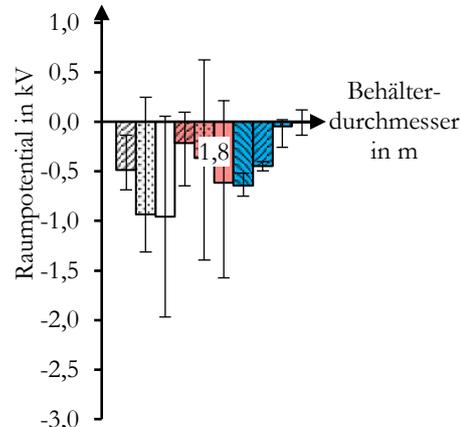
Abbildung I.10: Elektrische Feldstärke beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in den 6,2 m<sup>3</sup> Behälter

**Raumpotential:**



Düsendurchmesser und Pumpendruck	Temperatur des versprühten Wassers in °C
Ø 0,50 mm A, 500 bar	40,9
Ø 0,50 mm A, 1500 bar	40,2
Ø 1,00 mm T, 1500 bar	42,6
Ø 1,00 mm T, 2500 bar	53,9
Ø 1,05 mm, 100 bar, 25 °C	25,7
Ø 1,05 mm, 300 bar, 25 °C	29,6
Ø 1,05 mm, 500 bar, 25 °C	32,7
Ø 1,05 mm, 100 bar, 45 °C	34,4
Ø 1,05 mm, 300 bar, 45 °C	40,0
Ø 1,05 mm, 500 bar, 45 °C	44,7

Abbildung I.11: Raumpotential beim mittigen Sprühen von Trinkwasser in den 6,2 m<sup>3</sup> Behälter



Düsendurchmesser und Pumpendruck	Temperatur des versprühten Wassers in °C
Ø 1,05 mm, 100 bar, 25 °C	28,2
Ø 1,05 mm, 300 bar, 25 °C	29,9
Ø 1,05 mm, 500 bar, 25 °C	32,3
Ø 1,05 mm, 100 bar, 45 °C	29,4
Ø 1,05 mm, 300 bar, 45 °C	33,3
Ø 1,05 mm, 500 bar, 45 °C	37,1
Hohlstrahlrohr, 6,67 l/s, 6 bar, Max. Zerstäubung	24,6
Hohlstrahlrohr, 7,92 l/s, 6 bar, Max. Zerstäubung	20,1
Hohlstrahlrohr, 6,67 l/s, 6 bar, Mittl. Zerstäubung	18,5
Hohlstrahlrohr, 7,92 l/s, 6 bar, Vollstrahl	18,8

Abbildung I.12: Raumpotential beim mittigen Sprühen von Trinkwasser in den 16,8 m<sup>3</sup> Behälter

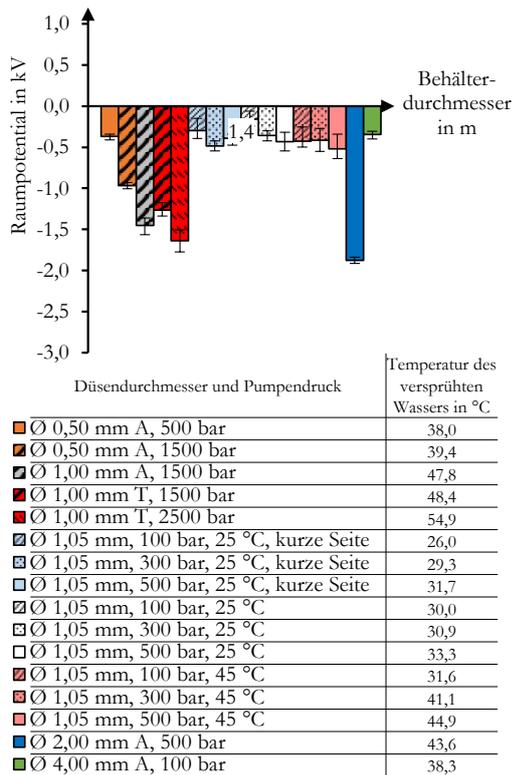


Abbildung I.13: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in den 6,2 m³ Behälter

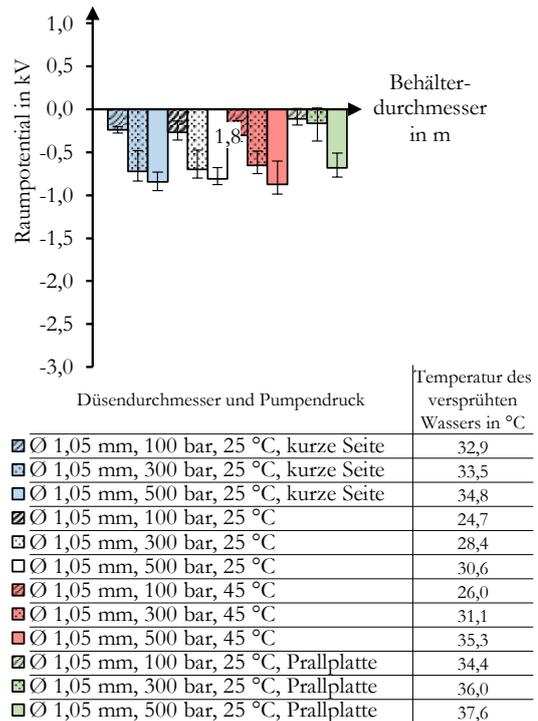


Abbildung I.14: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von Trinkwasser in den 16,8 m³ Behälter

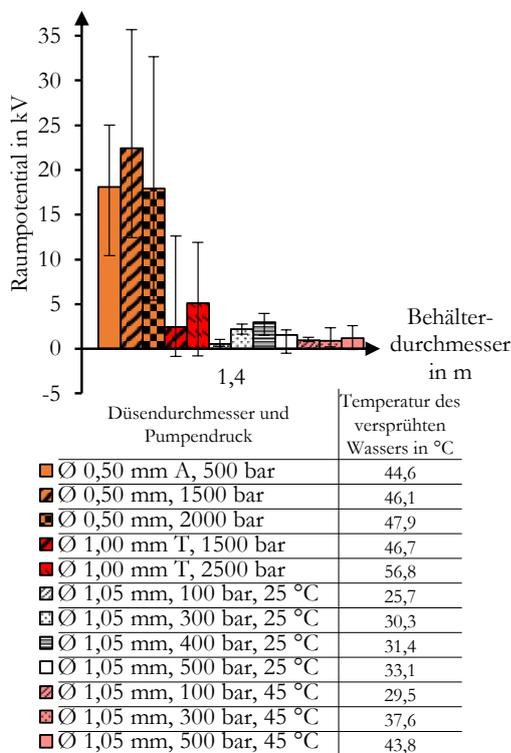


Abbildung I.15: Raumpotential beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in den 6,2 m³ Behälter

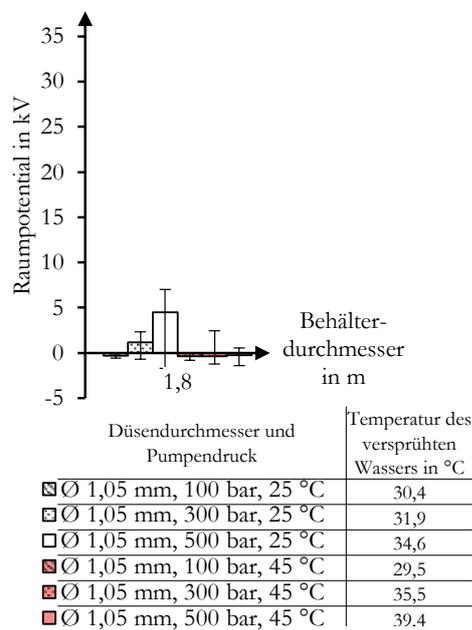


Abbildung I.16: Raumpotential beim mittigen Sprühen von vollentsalztem Wasser in den 16,8 m³ Behälter

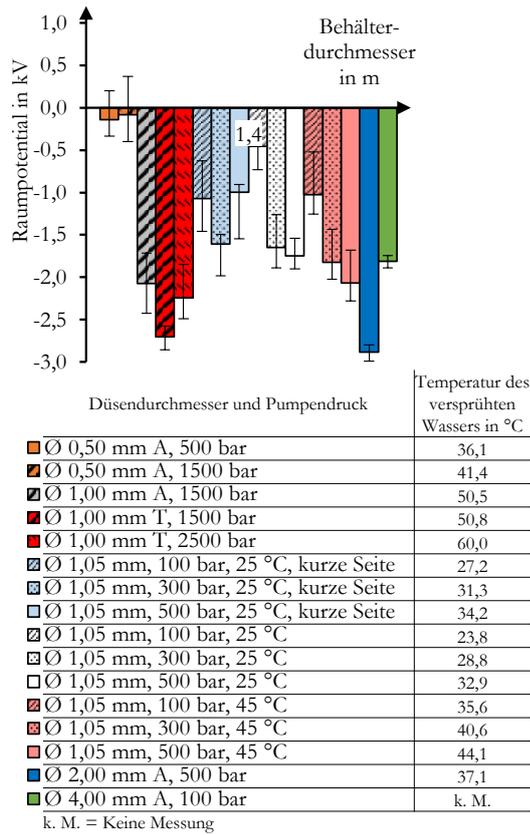


Abbildung I.17: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in den 6,2 m<sup>3</sup> Behälter

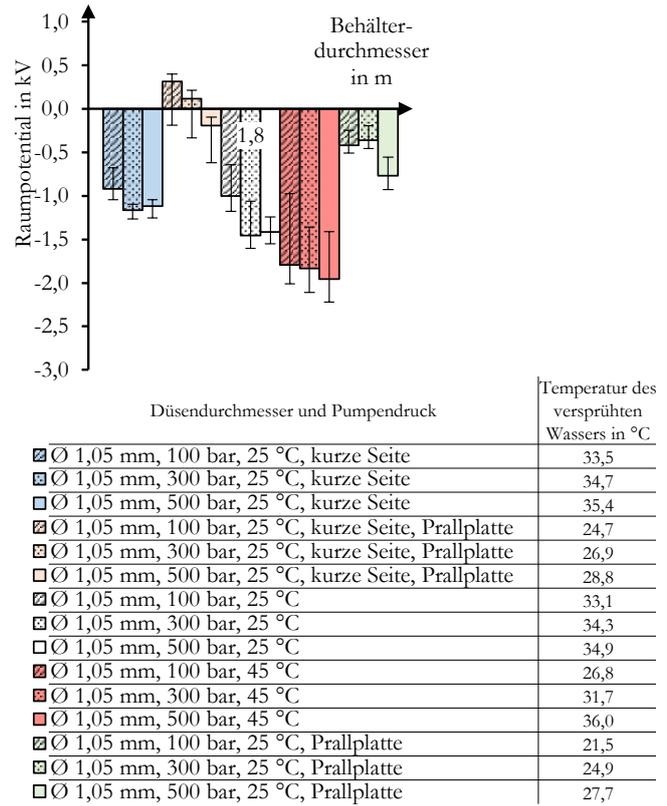


Abbildung I.18: Raumpotential beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser in den 16,8 m<sup>3</sup> Behälter

## Anhang J: Berechnung der Korrekturfaktoren der Raumpotentialmessung

In Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit der Wasserart ergeben sich Korrekturfaktoren  $K_R$  der Raumpotentialmessung, die für die gemessenen Mittelwerte und betraglich höchsten Werte bestimmt wurden (Tabelle J.1):

Tabelle J.1: Korrekturfaktor von vollentsalztem Wasser, Trinkwasser und Meerwasser

		Korrekturfaktoren $K_R$									
Düsen- durchmesser in mm	Druck in bar	Vollentsalztes Wasser				Trinkwasser				Meerwasser	
		1,0 m <sup>3</sup>		6,2 m <sup>3</sup>		1,0 m <sup>3</sup>		6,2 m <sup>3</sup>		1,0 m <sup>3</sup>	
		Mit- telw.	B. h. W.	Mit- telw.	B. h. W.	Mit- telw.	B. h. W.	Mit- telw.	B. h. W.	Mit- telw.	B. h. W.
1,05	100	1,11	1,02	-	-	1,72	1,74	-	-	4,20	3,79
1,05	200	0,94	0,86	-	-	2,17	2,23	-	-	4,39	4,54
1,05	300	0,53	0,54	-	-	2,04	2,08	-	-	4,85	5,57
1,05	400	0,41	0,44	-	-	2,09	2,11	-	-	3,80	3,70
1,05	500	0,39	0,41	-	-	2,25	2,34	-	-	2,90	3,13
1,00 A	500	-	-	-	-	2,05	1,52	-	-	-	-
1,05 (45 °C)	100	-	-	-	-	1,97	2,07	-	-	5,73	3,75
1,05 (45 °C)	200	-	-	-	-	1,80	1,90	-	-	5,46	4,85
1,05 (45 °C)	300	-	-	-	-	1,88	2,08	-	-	7,63	4,32
1,05 (45 °C)	400	-	-	-	-	1,88	2,08	-	-	6,90	6,12
1,05 (45 °C)	500	-	-	-	-	2,10	2,18	-	-	3,61	3,44
1,00 A	1500	<del>3,98</del>	<del>4,14</del>	1,77	1,73	2,36	2,48	2,46	2,72	-	-
1,00 T	1500	<del>-1,44</del>	<del>-1,57</del>	1,21	1,33	2,13	2,46	2,56	2,74	-	-
1,00 T	2500	<del>-1,12</del>	<del>-1,23</del>	1,43	1,57	1,32	4,19	2,09	2,35	-	-
2,00 A	500	-	-	0,96	1,19	1,87	2,05	2,02	2,25	-	-
4,00 A	100	-	-	-	-	2,08	2,02	3,47	3,26	-	-
Korrekturfaktor $K_R$ mit Unsicherheit		<u>1,0 ± 0,5</u>				<u>2,0 ± 0,5</u>				<u>5,0 ± 1,5</u>	

Mittelw. = Mittelwert, B. h. W. = Betraglich höchster Wert

<span style="background-color: #d9ead3; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Vollentsalztes Wasser	<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Abweichend vom	<span style="background-color: #f2dede; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Keine homogene
<span style="background-color: #d9ead3; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Trinkwasser	überwiegend bestimmten	Raumladungsdichte
<span style="background-color: #f2dede; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Meerwasser	Korrekturfaktor der	
	Wasserart	

Der Korrekturfaktor ist nach Gleichung J.1 zu berechnen:

$$K_R = \frac{R \cdot E(R)}{2 \cdot \Phi(0)} \quad \text{J.1}$$

Die Gleichung J.1 resultiert grundlegend aus der Gleichung 2.17, mit der aus der gemessenen elektrischen Feldstärke  $E(R)$  am Rand des Behälters das theoretisch vorliegende Raumpotential im Mittelpunkt des Behälters zu berechnen ist. Aus der Division der Gleichung 2.17 durch das gemessene Raumpotential  $\Phi(0)$  im Mittelpunkt des Behälters ergibt sich der Korrekturfaktor. Die Berechnung der Korrekturfaktoren erfolgt für die in Tabelle J.1 aufgeführten Konfigurationen aus Düsendurchmesser und Pumpendruck, für die Messwerte der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials vorliegen. Grundlage der Berechnung ist eine homogene Raumladungsdichte, wie sie beim Sprühen im Winkel auftritt, da nur Tropfen einer Polarität im Behälter vorhanden sind. Diese Grundlage erfüllt das Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser nicht, wenn sich durch den Abstand der Düse zur Behälterwand von  $(0,675 \pm 0,075)$  m die positiv geladenen Tropfen, die sich durch die hydrodynamische Instabilität vom Strahl ablösen, im Volumen des Behälters befinden und zu keiner homogenen Raumladungsdichte führen. Das ist beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser der Düsenträgers A und T der Fall und führt zu abweichenden Werten des Korrekturfaktors (Tabelle J.1, durchgestrichene Werte).

Aus den berechneten Korrekturfaktoren der Konfigurationen sind die zu erwartenden Abweichungen abzuleiten. Es erfolgt eine Angabe des Korrekturfaktors mit den zu erwartenden Abweichungen am Ende der Tabelle J.1. Die gemessenen Raumpotentiale sind mit den Korrekturfaktoren, im Sinne einer sicherheitstechnischen Bewertung, zu multiplizieren, um den tatsächlichen Wert des Raumpotentials zu erhalten.

## Publikationsliste

### Konferenzbeiträge:

- BAUMANN, F. ; MÖCKEL, D. ; THEDENS, M.: *Personengefährdung in elektrostatischen Applikationsanlagen – Vermeidung von Herzkammerflimmern* (2017), 13. Fachtagung Anlagen, Arbeits- und Umweltsicherheit in Köthen, 10 Seiten
- BAUMANN, F. ; HIMSTEDT, M. ; MÖCKEL, D. ; RENKEN, M. ; THEDENS, M.: *Zündgefahren bei Annäherung elektrostatisch aufgeladener Flüssigkeitsoberflächen an metallische geerdete Einbauten im leitfähigen Behälter* (2019), 15. BAM-PTB-Kolloquium zur chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik bei der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig, DOI: <https://doi.org/10.7795/210.201905210>
- BAUMANN, F. ; ESSLINGER, J. ; MÖCKEL, D. ; THEDENS, M. ; LOSERT, O.: *Measurement of electric fields of charged spray clouds of conductive liquids in free space and in a conductive vessel*. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1322 (2019), 012019 (S. 1–5). DOI: 10.1088/1742-6596/1322/1/012019
- BAUMANN, F. ; HIMSTEDT, M. ; MÖCKEL, D. ; THEDENS, M.: *Charge-separating processes by spraying water under high pressure*. Proceedings of the 13th Symposium International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Braunschweig, Germany (2020), S. 550–560, DOI: 10.7795/810.20200724

### Zeitschriftenartikel:

- HIMSTEDT, M. ; BAUMANN, F. ; MÖCKEL, D.: *Explosionsschutz an Membranpumpen*. In: *Technische Sicherheit* Bd. 8 (2018), Nr.: 3 – März, S. 20–23
- BAUMANN, F. ; HIMSTEDT, M. ; MÖCKEL, D. ; THEDENS, M.: *Charge-separating processes by spraying water under high pressure*. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 72 (2021), 104527 (S. 1–11), DOI: [doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104527](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104527)

### Vorträge ohne schriftliche Veröffentlichung:

- Baumann, Florian (2018): Forschungsprojekt zu Explosionsgefahren bei der Behälterreinigung. Aufladung beim Versprühen von Flüssigkeiten – Untersuchung praxisrelevanter Prozesse bei der Reinigung kleiner und mittlerer Behälter. Sitzung des SG „Explosionsschutz“ der DGUV am 27.11.2018 in Heidelberg
- Baumann, Florian (2019): Aufladung von Flüssigkeiten mit niedriger Leitfähigkeit beim Befüllen von 1 m<sup>3</sup> Edelstahl IBC´s. Sitzung des ProcessNet-Arbeitsausschusses Elektrostatische Aufladung (AA-ESA) am 30.01.2019, Dechema-Haus, Frankfurt am Main

- Baumann, Florian (2019): Aufladung beim Versprühen von Flüssigkeiten – Untersuchung praxisrelevanter Prozesse bei der Reinigung kleiner und mittlerer Behälter. Sitzung des ProcessNet-Arbeitsausschusses Elektrostatische Aufladung (AA-ESA) am 30.01.2019, Dechema-Haus, Frankfurt am Main
- Baumann, Florian (2019): Messung elektrostatischer Effekte beim prozessbedingten Versprühen von Flüssigkeiten. Erfahrungsaustausch „Erstellung des Explosionsschutz-Dokumentes“ am 10.05.2019, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig
- Baumann, Florian; Möckel, Dieter; Thedens, Dr. Martin (2019): Messung elektrischer Feldstärken von unter Hochdruck versprühten Wasserstrahlen. 14. Fachtagung Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit vom 07. bis 08.11.2019, Köthen
- Baumann, Florian (2020): Wasser und Elektrostatik? Elektrostatik beim prozessbedingten Reinigen von Behältern. 6. Doktoranden-Symposium der Abteilung 3 vom 13. bis 14.01.2020, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig
- Baumann, Florian (2021): Zündgefahren bei Annäherung elektrostatisch aufgeladener Flüssigkeitsoberflächen an metallische Einbauten im Behälter. Sitzung des ProcessNet-Arbeitsausschusses Elektrostatische Aufladung (AA-ESA) am 27.01.2021, als Webkonferenz

#### Projektbericht:

- BAUMANN, F. ; HIMSTEDT, M. ; MÖCKEL, D. ; THEDENS, M., BEYER : *Projektbericht: Aufladung beim Versprühen von Wasser – Untersuchung praxisrelevanter Prozesse bei der Reinigung kleiner und mittelgroßer Behälter* (im Druck, 2022), DGUV Projekt Nr.: 617 – FP417, PTB FV-Nr.: 37046

#### Betreute studentische Arbeiten:

- Esslinger, Jonas (2019): Messung elektrostatischer Effekte beim prozessbedingten Versprühen von Flüssigkeiten. Bachelor-Thesis der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und der Hochschule Osnabrück (Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik). Erstprüfer: Herr Prof. Dr.-Ing. Reiner Kreßmann, Zweitprüfer: Herr Florian Baumann M.Eng.
- Renken, Malte (2019): Elektrostatische Vorgänge beim Befüllen von Stahlbehältern mit isolierenden Flüssigkeiten. Bachelor-Thesis der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und der Hochschule Ostfalia (Fakultät Automatisierung und Energiesysteme). Erstprüfer: Herr Prof. Dr. Hampe, Zweitprüfer: Herr Florian Baumann M.Eng.
- González, Jose Ferriz (2020): Einfluss der Temperatur und Salinität auf die Ladungstrennung beim Hochdruckversprühen von Wasser. Bachelor-Thesis der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und der Hochschule Ostfalia (Fakultät Maschinenbau). Erstprüfer: Herr Dr.-Ing. Dragos Balan, Zweitprüfer: Herr Dr. Imad Ahmed.

## Danksagung

Die Dissertation ist für mich der Inbegriff des selbständigen Arbeitens.  
Klar ist am Anfang nur das Ziel. Der Weg dahin ist selbst zu beschreiten.

Die Beschreitung des Weges und das Erreichen des Ziels ist ohne die Unterstützung anderer unmöglich. Aus diesem Grund möchte ich mich im Folgenden bei den Mitwirkenden bedanken.

Meinen Betreuern Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Herrn Dr.-Ing, Dir. u. Prof. Michael Beyer von der PTB in Braunschweig möchte ich ganz besonders für das entgegengebrachte Vertrauen in meine Fähigkeiten und der Ermöglichung dieser Arbeit danken. Für die Übernahme des Koreferats möchte ich mich bei Dr.-Ing Carsten Blum vom TÜV NORD InfraChem GmbH & Co. KG in Marl bedanken.

Für die finanzielle Förderung danke ich der DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung), der BG ETEM (Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse), der BGHM (Berufsgenossenschaft Holz und Metall), der BGHW (Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik), der BG RCI (Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie) und der BG Verkehr (Berufsgenossenschaft Verkehrswirtschaft Post-Logistik Telekommunikation).

Ein weiterer großer Dank geht an die Projektpartner, die mir mit „Rat“ und viel bedeutender mit „Tat“ zur Seite standen. Hochdruckreiniger sind Geräte, die im schlimmsten Fall lebensgefährlich sind. Als Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) sind wir deshalb dankbar dafür, dass durch die Hilfe der Projektpartner eine zielgerichtete und sichere Bedienung dieser Maschinen ermöglicht wurde.

Neu in dem Arbeitsumfeld der Behälterreinigung musste ich zunächst in die Thematik finden. Dafür möchte ich mich besonders bei der Firma BUCHEN UmweltService GmbH in Voerde bedanken, die mir die Teilnahme an einer Schulung zum Umgang mit Hochdrucktechnik ermöglichten. Weiterhin durfte ich durch die Firma BUCHEN UmweltService GmbH sogenannte „Stillstandsarbeiten“ bei der Firma Ruhr Öl GmbH - BP in Gelsenkirchen besichtigen. Es gab dabei Reinigungsarbeiten an Behältern, Wärmetauschern und Rohrleitungen zu bestaunen.

Ergänzend hatte ich die Möglichkeit eine Vielzahl von automatisierten, halbautomatisierten und manuellen Behälterreinigungsprozessen in Teilen Deutschlands zu besichtigen. Netterweise haben mich die Firmen BASF Coatings GmbH in Münster, Cotac Tankwagenreinigung in Dormagen, Rhein-Fass GmbH & Co. KG in Ludwigshafen am Rhein und Mankiewicz Gebr. & Co. (GmbH & Co. KG) in Hamburg dafür zu sich eingeladen. Einen spannenden Vortrag zur Düsenteknik und eine Führung durch das Technikum realisierte die Firma Lechler GmbH in Metzingen.

Weiterhin seien an dieser Stelle eine Vielzahl von Leihgaben und unterstützenden Leistungen erwähnt. Um erste Versuchsreihen in der PTB Braunschweig durchzuführen, stellte uns die Firma Alfred Kärcher SE & Co. KG aus Winnenden dankenderweise einen ihrer Hochdruckreiniger zur Verfügung. Das eingesetzte Feldstärkenmessgerät wurde von der BG RCI als Leihgabe und später als Schenkung der PTB übergeben. Für die Auswertung war es notwendig die Tropfengrößenverteilung und Geschwindigkeit der Tropfen des zur Verfügung gestellten Hochdruckreinigers zu kennen. Ein großer Dank geht an die Firma Lechler GmbH in Metzingen, die in ihrem Technikum die notwendigen Messungen durchführten. Die Umsetzung einer transportablen Warmwasseraufbereitung bis 1 000 l konnte durch die Unterstützung der Firma Rhein-Fass GmbH & Co. KG aus

Ludwigshafen am Rhein verwirklicht werden, die uns einen leistungsstarken Heizstab als Leihgabe zugesandt hat. Für die Versuche waren mehrere 1 000 l vollentsalztes Wasser notwendig. Die Herstellung und ein großer Teil der Logistik konnte unterstützenderweise durch die Firma Merck KGaA in Darmstadt umgesetzt werden. Ebenfalls stellte die Firma Merck KGaA einen 1,0 m<sup>3</sup>, 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter für die Versuche zur Verfügung.

Messungen wurden durch die Firmen BUCHEN UmweltService GmbH in Voerde, BASF Coatings GmbH in Münster (in Kooperation mit der Firma BUCHEN UmweltService GmbH an einem 44,0 m<sup>3</sup> Behälter) und Merck KGaA in Darmstadt verwirklicht. In Voerde stellte uns die Firma Hammelmann Maschinenfabrik GmbH aus Oelde eine fabrikneue Hochdruckpumpe für die Messungen zur Verfügung. Vor Ort standen mir immer sehr fähige, kompetente und freundliche Mitarbeiter zur Seite. Gemeinsam schafften wir es eine Vielzahl interessanter und wissenschaftlich nutzbarer Ergebnisse zu generieren. Mit unserem Ideenreichtum brachten wir nicht nur die Maschinen, sondern auch uns selbst das ein oder andere Mal an das persönliche Limit.

Es ist bemerkenswert, mit welchem Engagement all diese Firmen dieses Projekt unterstützten. Ich freue mich sehr darauf, wenn in Zukunft weitere Projekte dieser Art mit den beteiligten Firmen folgen. Die Zusammenarbeit der Firmen, der DGUV und den Berufsgenossenschaften, in Gestalt eines Forschungsbegleitkreises „Behälterreinigung“, ist lobend zu erwähnen und für den regen Austausch und die Diskussionen zu danken.

Ein weiterer großer Dank geht an den Fachbereich 3.7 und speziell an die sehr herzliche Arbeitsgruppe 3.73 der PTB. Zunächst seien an dieser Stelle Uwe Block, Michael Hau, Jürgen Hübner und Mario Rösler genannt, die mir bei meinen Versuchsaufbauten immer schnell, zuverlässig und unglaublich technikaffin zur Seite standen. Ganz besonders möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Dieter Möckel, Dipl.-Ing. Matthias Himstedt, Dr.-Ing. Martin Thedens, Dr.-Ing. Carola Schierding, Patrick Walkemeyer M.Sc. und Prof. u. Dir. Dr.-Ing. Michael Beyer für die teils stundenlangen und nervenaufreibenden Diskussionen bedanken, die das Projekt und mich enorm gefordert und gefördert haben. Ein weiterer Dank geht an unsere Studenten, wobei die herausragende Leistung und das Engagement von Jonas Esslinger für das Projekt besonders zu betonen ist. An dieser Stelle möchte ich mich weiterhin für die unterstützenden Leistungen unserer Auszubildenden und besonders bei Martina Drangmeister und Paul Bieneck bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie, Freunden und Partnerin bedanken. Ihr wart stets motivierend und ich bin sehr froh darüber, dass ihr mir zur Seite steht.

## Lebenslauf

### Persönliche Daten

Name, Vorname	Baumann, Florian
Geburtsdatum, -ort	26.05.1991, Celle
Staatsangehörigkeit	deutsch

### Beruflicher und wissenschaftlicher Werdegang


11/2017 bis heute	Wissenschaftlicher Mitarbeiter Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig Fachbereich Grundlagen des Explosionsschutzes
03/2017 bis 10/2017	Werkstudent Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig Fachbereich Grundlagen des Explosionsschutzes
08/2016 bis 11/2016	Werkstudent Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig Fachbereich Grundlagen des Explosionsschutzes
02/2015 bis 06/2015	Werkstudent Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig Fachbereich Grundlagen des Explosionsschutzes
02/2011 bis 07/2011	Mechatroniker im Prüf- und Automatisierungsbau MOTORTECH GmbH Celle

### Schule und Studium

09/2015 bis 10/2017	Masterstudiengang Maschinenbau Fachhochschule Kiel
09/2012 bis 07/2015	Bachelorstudiengang Maschinenbau Fachhochschule Kiel
08/2011 bis 07/2012	Fachoberschule Technik Axel-Bruns-Schule/BBS II Celle
08/2007 bis 01/2011	Berufsausbildung zum Industriemechatroniker MOTORTECH GmbH Celle Georg-Sonnin-Schule/BBS II Lüneburg
08/2003 bis 07/2007	Sekundarabschluss I Realschule Lachendorf







**Herausgeber:**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21  
Telefax: (05 31) 592-92 92  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)