

Florian Baumann, Matthias Himstedt, Dieter Möckel, Martin Thedens,  
Michael Beyer

## Elektrostatische Aufladung beim Versprühen von Wasser – Untersuchung praxisrelevanter Prozesse bei der Reinigung kleiner und mittelgroßer Behälter

ISSN 2751-6598  
ISBN 978-3-944659-20-6

DOI 10.7795/110.20220629



# Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Metrologie

PTB-M-1

Braunschweig, Juli 2022

Florian Baumann, Matthias Himstedt, Dieter Möckel, Martin Thedens,  
Michael Beyer

**Elektrostatische Aufladung beim Versprühen von  
Wasser – Untersuchung praxisrelevanter Prozesse  
bei der Reinigung kleiner und mittelgroßer Behälter**

ISSN 2751-6598

ISBN 978-3-944659-20-6

DOI 10.7795/110.20220629

**Empfohlene Zitierweise/recommended citation**

Baumann, F., M. Himstedt, D. Möckel,  
M. Thedens und M. Beyer, 2022. *Elektrostatistische  
Aufladung beim Versprühen von Wasser –  
Untersuchung praxisrelevanter Prozesse bei der  
Reinigung kleiner und mittelgroßer Behälter.*  
Braunschweig: PTB Open Access Repository.  
PTB-Bericht M-1. ISBN 978-3-944659-20-6.  
Verfügbar unter:  
<https://doi.org/10.7795/110.20220629>

**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)

## Elektrostatische Aufladung beim Versprühen von Wasser – Untersuchung praxisrelevanter Prozesse bei der Reinigung kleiner und mittelgroßer Behälter

Florian Baumann, Matthias Himstedt, Dieter Möckel, Martin Thedens,  
Michael Beyer

Abschlussbericht

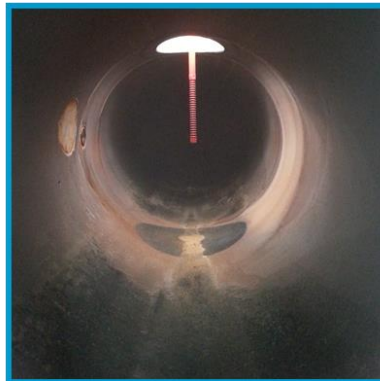
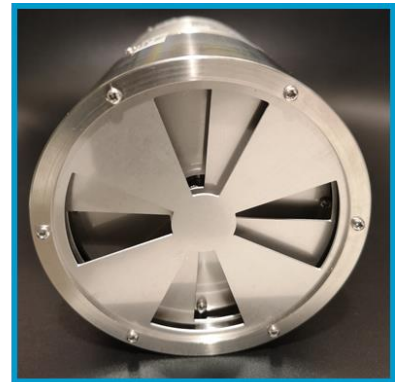
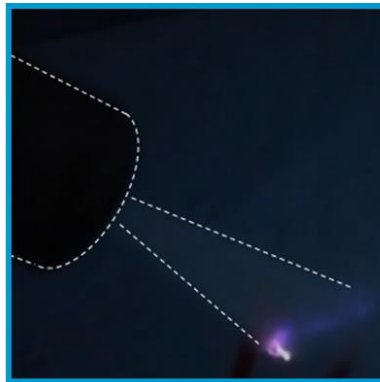
DGUV Projekt-Nr.: FF-FP 0417

PTB FV-Nr.: 37046

Laufzeit: 01.11.2017 bis 29.04.2022

Projektleiter: Dr.-Ing. Martin Thedens

Projektbearbeiter: Florian Baumann M.Eng.



## Kooperationspartner

Kooperationspartner:

Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM)

Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BG HM)

Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik (BG HW)

Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI)

Verkehrswirtschaft Post-Logistik Telekommunikation (BG Verkehr)

Alfred Kärcher SE & Co. KG

BUCHEN UmweltService GmbH

Cotac europe GmbH

INBUREX Consulting GmbH

Lechler GmbH

Mankiewicz Gebr. & Co. (GmbH & Co. KG)

Merck KGaA

REMONDIS SE & Co. KG

Rhein-Fass GmbH & Co. KG

Swiss Process Safety Consulting GmbH

Syngenta Group Co., Ltd.

TÜV NORD InfraChem GmbH & Co. KG

Unterstützende Projektpartner:

BASF Coatings GmbH

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)

Hammelman Maschinenfabrik GmbH

Otto von Guericke Universität Magdeburg, Institut für Apparate- und Umwelttechnik

**Forschungsbegleitkreis**

Dr. Hermann	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)
Dr. Stahmer	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)
Dr. Neumeister	Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM)
Herr Knopp	Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BG HM)
Dr. Fröhlich	Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik (BG HW)
Dr. Losert	Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI)
Herr Schramen	Verkehrswirtschaft Post-Logistik Telekommunikation (BG Verkehr)
Herr Thomas	Alfred Kärcher SE & Co. KG
Herr Scheide	Cotac europe GmbH
Herr Gosewinkel	INBUREX Consulting GmbH
Herr Lutz	Lechler GmbH
Herr Gusenbauer	Lechler GmbH
Herr Wichelmann	Mankiewicz Gebr. & Co. (GmbH & Co. KG)
Herr Moritz	Merck KGaA
Dr. Röhrig	REMONDIS SE & Co. KG
Herr Kolbe	Rhein-Fass GmbH & Co. KG
Dr. Glor	Swiss Process Safety Consulting GmbH
Dr. Scheidt	Syngenta Group Co., Ltd.
Dr. Blum	TÜV NORD InfraChem GmbH & Co. KG
Herr Meyknecht	BASF Coatings GmbH
Prof. Krause	Otto von Guericke Universität Magdeburg, Institut für Apparate- und Umwelttechnik
Dr. Beyer	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
Dr. Schierding	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
Dr. Thedens	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
Herr Baumann	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

## Kurzfassung

Der Prozess des Versprühens der hoch leitfähigen Flüssigkeit Wasser gilt als stark ladungserzeugend. In explosionsgefährdeten Bereichen ist die von Wasserstrahlen und -sprühnebeln ausgehende elektrostatische Zündgefahr sicherheitstechnisch zu bewerten. Grenzwerte der Flüssigkeitsstrahler und Behältermaße sind in der TRGS 727 und der IEC TS 60079-32-1 angegeben und dienen der Prävention elektrostatischer Zündgefahren. Die Grenzwerte stammen primär aus den im Jahre 1983 von L. Post et al. angestellten Messungen und entsprechen den damaligen Leistungsgrenzen der Flüssigkeitsstrahler und den verwendeten Behältern. Es ist ungeklärt, ob die Überschreitung der Grenzwerte eine elektrostatische Zündgefahr darstellt. Um dem technischen Fortschritt zu genügen, ist eine Klärung der Wissenslücke notwendig.

Ziel des Projektes ist es, die Parameter zu identifizieren, die den Prozess der Ladungstrennung maximieren und zu ermitteln, welchen Einfluss die räumliche Begrenzung des Behälters aufweist. Dafür potenziell geeignete Messtechniken sind auf ihre Eignung in Wassersprühnebeln hin zu prüfen und deren Einsatzbeschränkungen zu bestimmen. Anhand der Messungen elektrostatischer Größen ist die folgende Fragestellung zu beantworten:

Ergeben sich elektrostatische Zündgefahren beim Versprühen von Wasser in explosionsgefährdeten Bereichen, wenn die dafür aktuell geltenden Grenzwerte der Flüssigkeitsstrahler und Behältermaße überschritten werden?

Zunächst erfolgten Messungen in einem 1 m<sup>3</sup> Behälter, der als Modellanordnung diente. In Absprache mit den Kooperationspartnern konnten die Messungen auf mittelgroße Behälter mit einem Volumen von bis zu 44 m<sup>3</sup> ausgeweitet werden. Auf Grundlage der durchgeführten Messungen wurde die sicherheitstechnische Bewertung durchgeführt. Aus dieser sicherheitstechnischen Bewertung resultiert, dass der aktuell geltende Grenzwert des Pumpendruckes der Flüssigkeitsstrahler überschritten werden darf, ohne dass direkt eine elektrostatische Zündgefahr besteht.



## Abstract

The process of spraying the highly conductive liquid water is considered to generate a strong charge. In explosion protection hazardous areas, the electrostatic ignition hazards emanating from water jets and water sprays must be evaluated by a thorough risk assessment. Thresholds of the liquid jets and the container dimensions are specified in the TRGS 727 and the IEC TS 60079-32-1 and are intended for the prevention of electrostatic ignition hazards. The thresholds are based on measurements made in the 1980s by L. Post et al. and correspond with the performance limits of the liquid jets and the containers used at that time. It is unclear whether exceeding the thresholds represents an electrostatic ignition hazard. To keep up with technical development, the gap of knowledge needs to be clarified.

The aim of the project is to identify the parameters that maximize the process of charge separation and to determine the influence of the spatial limitation of the container. Measurement techniques that are potentially suitable for this must be checked for their suitability in water sprays and their limitations of use must be determined. The following question is to be answered on the basis of the measurements of electrostatic quantities:

Are there electrostatic ignition hazards when spraying water in explosion protection hazardous areas if the currently applicable thresholds for liquid jets and container dimensions are exceeded?

Initially, measurements were carried out in a 1 m<sup>3</sup> container, which was intended as a model arrangement. In consultation with the cooperation partners, the measurements could be extended to medium-sized containers with a volume of up to 44 m<sup>3</sup>. The safety-related evaluation was carried out on the basis of the measurements performed. The result of this safety-related evaluation is that the currently valid thresholds for pump pressure of the liquid jets may be exceeded without a direct electrostatic ignition hazard.

## Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung.....	8
2	Projektziele.....	8
3	Methodisches Vorgehen und Projektplan.....	8
4	Ergebnisse des Forschungsprojektes .....	11
4.1	AP 1 Vorbereitende Arbeiten.....	11
4.1.1	Parameter, die den Prozess der Ladungstrennung maximieren .....	11
4.1.2	Parameterfestlegung.....	14
4.1.3	Zu erwartende Gasentladungsarten.....	15
4.1.4	Recherche zu Grenzwerten .....	15
4.2	AP 2: Theoretische Vorbetrachtungen.....	17
4.2.1	Notwendige Messtechnik, Aufbauten, Wasserlogistik und Flüssigkeitsstrahler .....	17
4.2.2	Zusammenhang elektrische Feldstärke, Raumpotential und -ladungsdichte .....	20
4.2.3	Gefährdungsbeurteilung und Betriebsanweisung.....	20
4.3	AP 3: Versuchseinrichtungen und Messtechnik .....	21
4.3.1	Feldstärkenmessung.....	21
4.3.2	Raumpotentialmessung .....	24
4.3.3	Messung der übertragenen Ladung .....	26
4.3.4	Messung der elektrischen Leitfähigkeit.....	28
4.3.5	Meilenstein 1: Messtechniken einsetzbar? .....	29
4.4	AP 4: Untersuchungen an Modellanordnungen.....	30
4.4.1	Modellanordnung und Durchführung von Messungen .....	30
4.4.2	Ergebnisse .....	34
4.4.3	Meilenstein 2: „Worst-Case“-Parameter und Szenarien festgelegt?.....	35
4.5	AP 5: Untersuchungen an realen Behältern.....	36
4.5.1	Versuchsanordnung und -durchführung .....	36
4.5.2	Ergebnisse .....	36
4.6	AP 6: Sicherheitstechnische Schlussfolgerungen.....	39
5	Veröffentlichungen von Dritten zur Forschungsthematik .....	41
6	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse.....	42
7	Umsetzungs- und Verwertungsplan.....	43
8	Danksagung .....	44
9	Literaturangaben .....	44
10	Veröffentlichungen aus dem Projekt .....	47
11	Anhang .....	49

## Abbildungsverzeichnis

3.1: Projektablaufplan .....	10
4.1: Grenzwerte der Flüssigkeitsstrahler und Behältermaße beim Versprühen von Wasser .....	15
4.2: Prüfmethode zur Eignung des Feldstärkenmessgerätes an Wasserstrahlen und -sprühnebeln .....	21
4.3: Aufbau der Feldstärkenmessung für Messungen an Wand des Behälters .....	23
4.4: Aufbau der Feldstärkenmessung für Messungen an Strahlen und Sprühnebeln, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters .....	23
4.5: Messtechnischer Aufbau der Raumpotentialmessung; Ersatzschaltbild Hochspannungsmesskopf.....	24
4.6: Für den Einbau im Isolationsstab vorbereiteter Shunt; Ersatzschaltbild .....	27
4.7: Isolationsstab mit eingebautem Shunt .....	27
4.8: Schematische Darstellung der Antennenmesstechnik .....	28
4.9: Modellanordnung mit montiertem Feldstärkenmessgerät .....	30
4.10: Modellanordnung mit montierter Potentialmesstechnik .....	31
4.11: Modellanordnung mit Kugelblende zum Sprühen im Winkel .....	32
4.12: 1 m <sup>3</sup> Kunststoff IBC als Warmwasseraufbereitung.....	33
4.13: Feldstärkenmessung am Wasserstrahl und -sprühnebel, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters.....	33
4.14: Leuchterscheinungen beim Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser auf Aluminium (oben links), ableitfähige Fliese (oben rechts), PVC-U (unten links) und Aluminium, beschichtet mit einer dünnen isolierenden Folie (unten rechts).....	40
6.1: Übersicht, wie die Parameter beim Versprühen von Wasser die Prozesse der Ladungstrennung und die Raumladung erhöhen.....	42
6.2: Sicherheitstechnische Bewertung elektrostatischer Zündgefahren beim Versprühen von Trinkwasser in leitfähige geerdete Behälter.....	43
11.1: Prallplatte zur Reduzierung des Abstands zwischen Düse und dem Aufprallort .....	70

## Tabellenverzeichnis

4.1: Die Raumladungswolke und Ladungstrennung beeinflussende Parameter .....	11
4.2: In Absprache mit den Kooperations- und Projektpartnern festgelegte Parameter .....	14
4.3: Grenzwerte der übertragenen Ladung für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe II in Abhängigkeit von der Zone .....	16
4.4: Zu erfassende Messgrößen und die dafür notwendige Messtechnik.....	17
4.5: Parameter der Flüssigkeitsstrahler der Kooperationspartner .....	19
4.6: Berechnungsgrundlagen der elektrischen Feldstärke, des Raumpotentials und -ladungsdichte, in Abhängigkeit von der Behältergeometrie.....	20
4.7: Übersicht der für Messungen der übertragenen Ladung mit dem Shunt verwendeten Elektrodengeometrien und deren Krümmungsradien .....	27
4.8: Wasserarten der Untersuchungen und deren elektrische Leitfähigkeit.....	28
4.9: Polaritäten der durch Prozesse der Ladungstrennung aufgeladenen Wasserstrahlen und -sprühnebeln, in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit der Wasserart.....	34

4.10: Bereiche der elektrischen Feldstärke, des Raumpotentials und der übertragenen Ladung der Untersuchungen im 1 m <sup>3</sup> Behälter und ohne die räumliche Begrenzung des Behälters.....	35
4.11: Bereiche der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials der Untersuchungen 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.....	37
4.12: Korrekturfaktor in Abhängigkeit von der Wasserart.....	38
11.1: Übersicht Parameter Besichtigungen Behälterreinigung.....	50
11.2: Elektrische Feldstärken beim horizontalen Versprühen von Trinkwasser, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters .....	59
11.3: Elektrische Feldstärken beim horizontalen Versprühen von vollentsalztem Wasser, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters .....	59
11.4: Raumpotentiale des Strahls beim horizontalen Versprühen von Trinkwasser, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters .....	60
11.5: Raumpotentiale beim horizontalen Versprühen von Meerwasser, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters.....	60
11.6: Raumpotentiale beim horizontalen Versprühen von vollentsalztem Wasser, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters .....	61
11.7: Übertragene Ladungen, gemessen mit dem Handcoulombmeter, beim Versprühen von vollentsalztem Wasser .....	61
11.8: Übertragene Ladungen, gemessen mit dem Shunt, beim Versprühen von vollentsalztem Wasser .....	61
11.9: Elektrische Feldstärken beim Versprühen von Trinkwasser in den 1 m <sup>3</sup> Behälter .....	62
11.10: Elektrische Feldstärken beim Versprühen von Meerwasser in den 1 m <sup>3</sup> Behälter.....	64
11.11: Elektrische Feldstärken beim Versprühen von vollentsalztem Wasser in den 1 m <sup>3</sup> Behälter.....	64
11.12: Raumpotentiale beim Versprühen von Trinkwasser in den 1 m <sup>3</sup> Behälter.....	65
11.13: Raumpotentiale beim Versprühen von Meerwasser in den 1 m <sup>3</sup> Behälter.....	67
11.14: Raumpotentiale beim Versprühen von vollentsalztem Wasser in den 1 m <sup>3</sup> Behälter .....	68
11.15: Elektrische Feldstärken beim Versprühen von Trinkwasser in reale Behälter .....	70
11.16: Elektrische Feldstärken beim Versprühen von vollentsalztem Wasser in reale Behälter ....	71
11.17: Raumpotentiale beim Versprühen von Trinkwasser in reale Behälter .....	72
11.18: Raumpotentiale beim Versprühen von vollentsalztem Wasser in reale Behälter.....	73

## 1 Problemstellung

Beim Versprühen von Wasser stellt sich bei vielen industriellen Anwendungen die Frage, ob durch eine prozessbedingte elektrostatische Aufladung eine Zündgefahr für ein vorhandenes explosionsfähiges Gemisch besteht. Eine derartige Gefährdung muss zum Beispiel beim Reinigen von Behältern betrachtet werden, wenn diese von Rückständen leicht entzündbarer Flüssigkeiten gereinigt werden, die im Behälter zu einem explosionsfähigen Dampf/Luft-Gemisch führen.

Nachdem in einem vorbereitenden Projekt der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) durch Voruntersuchungen relevante Parameter ermittelt und eine Messmethodik etabliert wurde [1], sollen jetzt praxisrelevante Fragestellungen unter realistischen Bedingungen hinsichtlich der auftretenden elektrostatischen Aufladungen untersucht werden.

Hierbei sind die bei der Reinigung kleiner und mittelgroßer Behälter auftretenden Aufladungsprozesse zu untersuchen, um so die Festlegungen in der technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 727 [2] und der technischen Spezifikation IEC 60079-32-1 [3] hinsichtlich des erforderlichen sicherheitstechnischen Niveaus durch experimentelle Daten abzusichern, zu präzisieren und erweitern zu können. Die Unterteilung in kleine und mittelgroße Behälter erfolgt nach [2].

## 2 Projektziele

Ziel des Projektes ist es, eine belastbare Aussage zu Grenzwerten für zulässige elektrostatische Aufladungsprozesse beim Versprühen von Wasser zu erhalten, die auf die Verhältnisse bei ausgewählten industriellen Anwendungen übertragbar sind. Dazu sind im Einzelnen folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Unter welchen Bedingungen lässt sich eine gefährliche Aufladung bei der Reinigung von kleinen und mittelgroßen Behältern erzeugen?
- Welche Zündgefahren treten unter welchen Randbedingungen auf?
- Welche Bewertungskriterien und Grenzbedingungen gelten?

Des Weiteren ist zu betrachten, dass aus den wissenschaftlichen Untersuchungen und Resultaten eine sicherheitstechnische Empfehlung für die Praxis folgt. Hierfür ist eine wissenschaftlich korrekte sicherheitstechnische Bewertung der elektrostatischen Zündgefahren erforderlich. Dafür sind folgende Aspekte zu betrachten:

- Können grundsätzlich Gasentladungen auftreten?
- Welche Zündwirksamkeit weisen die Gasentladungen auf?

## 3 Methodisches Vorgehen und Projektplan

Das Projekt ist in sechs Arbeitspakete gegliedert. Die Bearbeitungszeit der Arbeitspakete (AP), die zu erreichenden Meilensteine und Treffen des Forschungsbegleitkreises sind in einem Projektlaufplan visualisiert (Abbildung 3.1). Aus der Reihenfolge der Arbeitspakete des Projektlaufplans resultiert die methodische Bearbeitung des Projektes. Die nachfolgende Gliederung dieses Projektberichtes erfolgt in Anlehnung an die Arbeitspakete.

AP 1 beinhaltet die vorbereitenden Arbeiten. Zu diesen zählen die Literaturrecherche von Reinigungsmethoden und -geräten. Im Zuge des AP 1 wurden in Deutschland Behälterreinigungen beachtet. Daraus ergeben sich Parameter, die es zu untersuchen gilt. Weiterhin sind die geltenden Grenzwerte der elektrostatischen Größen, die für eine spätere sicherheitstechnische Bewertung notwendig sind, zu recherchieren. Auf Grundlage der Literaturrecherche sind die Parameter festzulegen, die den Prozess der Ladungstrennung beim Versprühen von Wasser maximieren.

In AP 2 werden, aufbauend auf den in AP 1 identifizierten Parametern, die Überlegungen der dafür notwendigen Messtechnik, Aufbauten, Wasserlogistik und Flüssigkeitsstrahler beschrieben. Zusätzlich sind die theoretischen Berechnungsgrundlagen der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials, in Abhängigkeit von der Behältergeometrie, zu erarbeiten. Dadurch ist eine gegenseitige Verifizierung der Messtechniken der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials anzustreben. Ferner ist Bestandteil des AP 2 die Ausarbeitung der Gefährdungsbeurteilung und Betriebsanweisung.

Der Aufbau, die Adaption und die Erprobung der Messtechnik an Strahlen ohne und mit der räumlichen Begrenzung eines Behälters ist Inhalt des AP 3. Es werden die Eignung und Einsatzbeschränkung der Messtechniken erarbeitet. Die Messungen erfolgen teilweise bereits im 1 m<sup>3</sup> Behälter, der als Modellanordnung dient. Am Ende der Bearbeitung des AP 3 ist als Meilenstein die Frage zu beantworten, ob die gewählten Messtechniken einsetzbar sind.

AP 4 beinhaltet die Untersuchungen mit den Flüssigkeitsstrahlern ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters und derer am 1 m<sup>3</sup> Behälter. Die in der Literatur angegebenen Messwerte und Abhängigkeiten von Parametern, die den Prozess der Ladungstrennung maximieren, sind anhand der Untersuchungen zu reproduzieren. Infolge der Untersuchungen im 1 m<sup>3</sup> Behälter sind die „Worst-Case“-Parameter festzulegen. Die Festlegung der „Worst-Case“-Parameter und Szenarien ist der zweite Meilenstein, den es zu erreichen gilt.

Die Festlegung der „Worst-Case“-Parameter in AP 4 dient als Vorbereitung für die aufwendigen und kostenintensiven Untersuchungen in den realen Behältern, die Inhalt von AP 5 sind. Das Volumen der zur Verfügung stehenden leitfähigen geerdeten Behälter umfasst 6,2 m<sup>3</sup>, 16,8 m<sup>3</sup> und 44,0 m<sup>3</sup>. Es ist, durch das Anknüpfen an die Untersuchungen ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters und derer am 1 m<sup>3</sup> Behälter, die Abhängigkeit vom Behältervolumen und -durchmesser zu untersuchen.

AP 6 beinhaltet die sicherheitstechnischen Schlussfolgerungen der durchgeführten Untersuchungen. Es gilt die Messergebnisse mit den Erkenntnissen und Messwerten der Literatur in Einklang zu bringen und physikalisch zu interpretieren. Durch die in AP 2 recherchierten Grenzwerte zu elektrostatischen Größen und Messwerten der Literatur hat eine sicherheitstechnische Bewertung zu erfolgen. Schlussendlich ergeben sich Aussagen, unter welchen Bedingungen beim Versprühen von Wasser eine elektrostatische Zündgefahr in explosionsgefährdeten Bereichen zu erwarten ist. Änderungen des Projektablaufplans erfolgten in Absprache mit den Kooperationspartnern. Der Fortschritt und das weitere Vorgehen des Projektes wurde bei regelmäßigen Treffen des Forschungsbegleitkreises „Behälterreinigung“ abgestimmt. Nach jedem Treffen wurde eine Ergebnispräsentation verteilt. Die Ergebnispräsentationen dienen als Protokoll und beinhalten etwaige Fragen und deren Beantwortung, die während der Sitzung des Forschungsbegleitkreises aufgekommen sind. Zusätzlich wurde im Juli 2020 ein Sachstandsbericht ausgehändigt, der die Erkenntnisse der Untersuchungen im geerdeten leitfähigen 1 m<sup>3</sup> Behälter (Modellanordnung) zusammenfasst.



## 4 Ergebnisse des Forschungsprojektes

### 4.1 AP 1 Vorbereitende Arbeiten

Es wird auf die Parameter, die den Prozess der Ladungstrennung maximieren, eingegangen. Weiterer Bestandteil des Kapitels ist die Festlegung der Parameter, die es zu untersuchen gilt. Ferner werden die zu erwartenden Gasentladungsarten benannt und die geltenden Grenzwerte der Regelwerke beschrieben.

#### 4.1.1 Parameter, die den Prozess der Ladungstrennung maximieren

Anhand der Literaturrecherche wurden drei Prozesse der Ladungstrennung beim Versprühen von Wasser identifiziert:

1. Ablösung des Strahls an der Düse (Grenzschicht zwischen Düse und Wasser) [4]
2. Hydrodynamische Instabilität des Strahls (Grenzschicht im Tropfen) [5]
3. Aufprall auf eine Oberfläche (Grenzschicht im Tropfen; Grenzschicht zwischen Oberfläche und Wasser) [5–7]

Findet durch die hydrodynamische Instabilität und beim Aufprall ein Aufreißen der Tropfen statt, ist der sich ablösende Sprühnebel entgegengesetzt zum verbleibenden Tropfen geladen [8]. In Abhängigkeit von der Salinität (Salzgehalt im Wasser) und folglich der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers ändert sich die Polarität des Sprühnebels und des verbleibenden Tropfens [8]. Grundsätzlich nimmt der Prozess der Ladungstrennung zu, wenn

- sich die Anzahl und Flächen der Grenzschichten,
- die Verhinderung des Ladungsrückflusses bei der Ladungstrennung
- und sich die sprühnebefördernden Eigenschaften des Wassers und der Flüssigkeitsstrahler

erhöhen. Aus den Erkenntnissen lassen sich Parameter der Pumpen-, Düsentechnik und des Wassers als Reinigungsmedium ableiten. Als Orientierung dienen die in Tabelle 4.1 eingetragenen Parameter, zu deren Einfluss auf den Prozess der Ladungstrennung Hinweise aus der Literatur bekannt sind. Die in hellgelb (■) markierten Parameter werden während der Untersuchungen des Projektes variiert und deren Einfluss auf die Höhe der Raumladungswolke und dem Prozess der Ladungstrennung bestimmt. Bei den hellorangenen (■) markierten Feldern handelt es sich um widersprüchliche Aussagen der Literatur.

Tabelle 4.1: Die Raumladungswolke und Ladungstrennung beeinflussende Parameter

Parameter	Einfluss auf Raumladungswolke	Verweis
<b>Behälter</b>		
↑ Volumen	↑ In größeren Schiffstanks wurden höhere Raumpotentiale bestimmt	[9, 10]
↑ Volumen	↓ Ein größeres Volumen reduziert die Raumladungsdichte und folglich das Raumpotential.	[11]



↑	Durchmesser	↑	Das kleinste raumbegrenzende Maß ist entscheidend	[9, 12]
↑	Anzahl Einbauten, die das kleinste raumbegrenzende Maß reduzieren	↓	Leitfähige geerdete Einbauten können das kleinste raumbegrenzende Maß und das Raumpotential reduzieren	[2, 4, 12, 13]
Parameter		Einfluss auf Ladungstrennung		Verweis
Pumpentechnik				
↑	Volumenstrom	↑	Keine direkten Aussagen, meist in Zusammenhang mit dem Düsendurchmesser und Pumpendruck. Da Grenzwerte für den Volumenstrom beschrieben werden, wird angenommen, dass ein höherer Volumenstrom den Prozess der Ladungstrennung und die Raumladungsdichte erhöht.	[2, 3, 9]
↑	Pumpendruck	↑	Mit dem Pumpendruck erhöht sich die Tropfengeschwindigkeit und kinetische Energie; Die Aufladung des Strahls beim Versprühen von vollentsalztem Wasser erhöht sich, wenn der Pumpendruck von 100 bar auf 840 bar erhöht wird.	[14, 15]
↑	Pumpendruck	→	Im 23 m <sup>3</sup> Behälter erhöht sich die elektrische Feldstärke nicht, wenn der Pumpendruck von 100 bar auf 400 bar erhöht wird. Untersucht wurden Düsendurchmesser von 1,5 mm und 2,5 mm. Versprüht wurde Betriebswasser; Die Aufladung des Strahls bleibt beim Versprühen von Trinkwasser konstant, wenn der Pumpendruck von 100 bar bis 840 bar erhöht wird.	[15, 16]
Düsentechnik				
↓	Durchmesser	↑	Eine Reduzierung des Düsendurchmessers führt, bei ansonsten konst. Bedingungen, zu einem Anstieg der Tropfengeschwindigkeit und einem Anstieg der kinetischen Energie; Beim Versprühen von vollentsalztem Wasser erhöht sich die Aufladung des Strahls, wenn der Düsendurchmesser reduziert wird. Im Vergleich zum Düsendurchmesser von 0,6 mm, reduziert sich bei einem Düsendurchmesser von 0,8 mm die Aufladung um rund die Hälfte und bei einem Düsendurchmesser von 1,00 mm um rund das Drei- bis Vierfache.	[14, 15]

↓ Durchmesser	↓	Im 23 m <sup>3</sup> Behälter reduziert sich die gemessene elektrische Feldstärke, bei einem Pumpendruck von 400 bar, von 20 kV/m auf 10 kV/m, wenn der Düsendurchmesser von 2,5 mm auf 1,5 mm reduziert wird	[16]
Auffächernde Geometrie (Flach, Rotation)		Für Trinkwasser keine Aussage. Bei vollentsalztem Wasser wird, im Vergleich zur Rund- und Flachstrahldüse, mit der Rotationsdüse die höchste elektrische Feldstärke gemessen. Der Pumpendruck beträgt 500 bar und der Düsendurchmesser 1,05 mm.	[1]
- Positionierung (Mittig, im Winkel)	-	Bisher keine Unterscheidung	-
<b>Reinigungsmedium</b>			
↑ Elektrische Leitfähigkeit	↓	Vollentsalztes Wasser höchste Aufladung; Trinkwasser reduziert; Kochsalzlösung bei 5,0 Gewichts-% vergleichbar zu vollentsalztem Wasser, jedoch umgekehrte Polarität; Kochsalzlösung über 5,0 Gewichts-% erneute Reduzierung der Aufladung; Das Versprühen von vollentsalztem Wasser in einen 1 m <sup>3</sup> Behälter, bei einem Pumpendruck von 50 bar und einem Düsendurchmesser von 1,8 mm, führt zu einer elektrischen Feldstärke von 10 kV/m und überschreitet die bei Betriebswasser von 5 kV/m; Das Versprühen von vollentsalztem Wasser in einen 1 m <sup>3</sup> Behälter, bei einem Pumpendruck von 500 bar und einem Düsendurchmesser von 1,05 mm, führt zu einer elektrischen Feldstärke von 12 kV/m und überschreitet die bei Trinkwasser von 4 kV/m	[1, 7, 16]
↑ Wassertiefe, in die der Wasserstrahl eindringt	↓	Vergleich mit schrägem Aufprall auf geerdete Metalloberfläche; Wassertiefe 2,7 cm → Reduzierung der Aufladung um das Zehnfache; Wassertiefe 11 cm → Reduzierung der Aufladung um das Zwanzigfache	[7]
↑ Temperatur des Wassers vor dem Versprühen	↑	Reduzierung der dynamischen Viskosität begünstigt das Aufreißen der Tropfen. Faustformel: Anstieg der Aufladung um 1 % pro 1 K	[17–19]
↑ Anzahl und/oder Anteil Phasen	↑	Vergrößerung der Grenzflächen, die getrennt werden. Beispiel: Emulsion aus Rohöl und Wasser	[3, 13, 16]

**Sonstiges**

↑ Luftstrom auf Aufprallort, der den Sprühnebel davonträgt und kein Aufreißen der Tropfen bewirkt	↑	Räumliche Ladungstrennung des Strahls und Sprühnebels wird begünstigt	[7]
↑ Luftstrom auf Strahl, so dass dieser ein Aufreißen der Tropfen bewirkt	↑	Bei einem Luftstrom unter 10,8 m/s keine oder nur geringe Ladungstrennung. Bei über 16,0 m/s deutlicher Anstieg	[18]

## 4.1.2 Parameterfestlegung

Aus den Besichtigungen der Behälterreinigungen und der dabei erfolgten Kommunikation und Befragung des Bedienpersonal wurden die in Anhang A beschriebenen Parameterbereiche ermittelt. In Absprache mit den Kooperations- und Projektpartnern ergeben sich die in Tabelle 4.2 aufgeführten Parameterbereiche, die Gegenstand der Untersuchungen dieses Projektes sind.

Tabelle 4.2: In Absprache mit den Kooperations- und Projektpartnern festgelegte Parameter

Parameter	Einheit	Beschreibung, Wert
<b>Behälter</b>		
Werkstoff	-	Leitfähig 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 geerdet (Metall)
Position	-	Mittiges oder Sprühen im Winkel
Anzahl Düse/n	Anzahl	1
Geometrie	-	Rund-, Flach- und Rotationsdüse
Durchmesser	mm	0,50 bis 4,00
<b>Reinigungsmedium</b>		
Bezeichnung	-	Meer-, Betriebs-, Trinkwasser und vollentsalztes Wasser
Leitfähigkeit	S/m	Hohe elektrische Leitfähigkeit
Anzahl Phasen	-	1
Temperatur vor Versprühen	°C	bis 90 (kein Verdampfen)
Kreislauf	-	nein

Um Schäden an der Messtechnik zu vermeiden und eine konstante Ausrichtung der Düse zu gewährleisten, beschränkt sich das Projekt auf manuelle, handgehaltene Flüssigkeitsstrahler. Bei derartigen Flüssigkeitsstrahlern muss die Rückstoßkraft 250 N unterschreiten [20, 21]. Die Ergebnisse und sicherheitstechnischen Aussagen sind übertragbar auf Tankwaschköpfe, wenn deren Parameter vergleichbar sind.

#### 4.1.3 Zu erwartende Gasentladungsarten

Beim Versprühen von Wasser ergeben sich zwei Gasentladungsarten, die sicherheitstechnisch zu bewerten sind:

- Ein-Elektroden-Entladung: Büschelentladungen, die zwischen leitfähigen geerdeten Einbauten oder der leitfähigen geerdeten Behälterwand und dem als isolierend geltenden Wassersprühnebel auftreten [11, 16, 22, 23].
- Zwei-Elektroden-Entladung: Funkenentladungen, die zwischen geerdeten Einbauten oder der Behälterwand und isolierten Leitern, die durch den Effekt der Influenz oder durch Akkumulation von Ladungen aufgeladen sind, auftreten [11, 22].

#### 4.1.4 Recherche zu Grenzwerten

Dieses Kapitel beinhaltet die in der TRGS 727 [2] und IEC TS 60079-32-1 [3] angegebenen und aktuell geltenden Grenzwerte.

**Flüssigkeitsstrahler und Behältermaße:** Für das Versprühen von Wasser gelten die in der TRGS 727 [2] und der IEC TS 60079-32-1 [3] angegebenen Grenzwerte der Flüssigkeitsstrahler und der Behältermaße (Abbildung 4.1).

	Pumpendruck $p \leq 12$ bar		Pumpendruck $12 \text{ bar} < p < 500$ bar (In IEC TS 60079-32-1 [3] ist ein Pumpendruck bis 500 bar zulässig)	
	TRGS 727 [2]	IEC TS 60079-32-1 [3]	TRGS 727 [2]	IEC TS 60079-32-1 [3]
<b>Flüssigkeitsstrahler</b>				
Volumenstrom	7 l/s	-	5 l/s	5 l/s
Anzahl Düsen	20	-	-	-
Zweite nicht mischbare Phase	-	-	-	0,5 %
<b>Behältermaße</b>				
Durchmesser	-	-	3 m	3 m
Volumen	10 m <sup>3</sup>	sehr niedrige Gefahrenstufe bei < 100 m <sup>3</sup>	-	-
Querschnittsfläche	-	-	-	-

*Einschränkung der Grenzwerte der Kohlenwasserstoffe auf Behältern mit bereitzem Kohlenwasserstoff*  
*Einschränkung der Grenzwerte der Kohlenwasserstoffe auf Luft-Atmosphäre*

Abbildung 4.1: Grenzwerte der Flüssigkeitsstrahler und Behältermaße beim Versprühen von Wasser aus [2, 3]

Ziel ist es eine sicherheitstechnische Bewertung bei Überschreitung der Grenzwerte des Pumpendrucks von 500 bar durchzuführen. Deshalb sind die Grenzwerte aus [2, 3] nur bedingt für eine sicherheitstechnische Bewertung in diesem Projektbericht anzuwenden.

**Raumpotential:** Zündfähig für ein Kohlenwasserstoff/Luft-Gemisch gilt eine Büschelentladung, die sich zwischen der als isolierend geltenden Raumladungswolke und leitfähigen geerdeten Einbauten ausbildet, wenn das Raumpotential 58 kV beträgt oder übersteigt [3]. Die damaligen Untersuchungen erfolgten mit dem zündempfindlichsten Propan/Luft-Gemisch (Referenzgasgemisch der Explosionsgruppe IIA), wie z. B. in [10, 11]. Folglich ist das Raumpotential von 58 kV dem Referenzgasgemisch der Explosionsgruppe IIA zuzuordnen.

Falls isolierte Leiter zu erwarten sind, gelten die Grenzwerte des Raumpotentials aus [3], auf die im Folgenden eingegangen wird. Funkenentladungen zwischen isolierten Leitern und leitfähigen geerdeten Einbauten oder der Behälterwand sind zündfähig für Kohlenwasserstoff/Luft-Gemische, wenn das Raumpotential 5 kV bis 20 kV beträgt. Laut [2, 3] sind Personen und alle leitfähigen und ableitfähigen Gegenstände zu erden oder mit maximal 1 M $\Omega$  mit Erde zu verbinden. Bei der Einhaltung dieser Maßnahmen ist ausschließlich mit dem Auftreten von isolierten Leitern in Form von Wassermassen zu rechnen. Für isolierte Leiter in Form von Wassermassen gilt ein Raumpotential von 15 kV als zündfähig. Die Bildung derartiger Wassermassen ist durch Segmente von sich zerteilenden Wasserstrahlen möglich, wenn die Düsendurchmesser ausreichend groß sind. Beispielhafte Angaben dafür sind [11, 22] zu entnehmen. Weiterhin können sich, in Abhängigkeit von der Konstruktion des Behälters, den Einbauten und dem Reinigungsprozess, Wassermassen ansammeln und plötzlich herabstürzen. Aus den Besichtigungen der Behälterreinigung (Anhang A) geht hervor, dass nicht mit dem Auftreten von isolierten Leitern in Form von herabfallenden Wassermassen auszugehen ist. Bei den Wassermassen handelt es sich um Rückstände im Behälter oder um geringe Ansammlungen an einer Stufe. Weiterhin weisen die typischen Strahlen von Hochdruckreinigern keine Bildung von ausreichend großen Strahlsegmenten auf.

**Elektrische Feldstärke:** Beträgt die elektrische Feldstärke in einem homogenen elektrischen Feld unter 100 kV/m, ist das Auftreten von Büschelentladungen unwahrscheinlich. Diese Aussage behält ihre Gültigkeit, selbst wenn feldverzerrende Einbauten in das elektrische Feld eingebracht werden [2].

**Übertragene Ladung:** Für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe II gelten die Grenzwerte der übertragenen Ladung aus [2, 3], angegeben in Tabelle 4.3:

Tabelle 4.3: Grenzwerte der übertragenen Ladung für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe II in Abhängigkeit von der Zone [2, 3]

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

## 4.2 AP 2: Theoretische Vorbetrachtungen

Dieses Kapitel behandelt die Beschreibung der notwendigen Messtechnik, Aufbauten, Wasserlogistik und Flüssigkeitsstrahler der Untersuchungen. Zusätzlich wird der theoretische Zusammenhang der elektrischen Feldstärke, des Raumpotentials und der Raumladungsdichte beschrieben. Zuletzt wird auf die Gefährdungsbeurteilung und der sich daraus ergebenden Betriebsanweisung für die Messungen eingegangen.

### 4.2.1 Notwendige Messtechnik, Aufbauten, Wasserlogistik und Flüssigkeitsstrahler

**Messtechnik und Aufbauten:** Aufbauend auf den in AP 1 identifizierten Parametern und Grenzwerten ergeben sich die zu erfassenden Messgrößen. Ergänzend zu den Messungen des Projektes sind Angaben der Hersteller zu den Flüssigkeitsstrahlern notwendig. In Tabelle 4.4 wird aufgeführt, ob die Messgrößen messtechnisch in diesem Projekt erfasst oder vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden. Weiterhin wird die zu verwendende Messtechnik benannt und die Anforderungen an diese beschrieben. Angaben zum Volumen, Innendurchmesser und Innenlängen der Behälter sind Tabelle 4.2 zu entnehmen und wurden von den Kooperations- oder Projektpartner zur Verfügung gestellt.

Tabelle 4.4: Zu erfassende Messgrößen und die dafür notwendige Messtechnik

Messgröße	Messung oder Herstellerangabe	Messtechnik	Anforderungen an die Messtechnik
Elektrische Leitfähigkeit des Wassers	Messung	Leitfähigkeitsmessgerät	Kalibriert für wässrige Lösungen im Bereich von $1 \cdot 10^{-4}$ S/m bis 5 S/m
Temperatur des Wassers	Messung	Thermoelement	Dauerhafter Einsatz in Wasser
Pumpendruck	Messung	Manometer	Für den Pumpendruckbereich geeignet. Direkt am Hochdruckreiniger montiert
Volumenstrom	Messung, Hersteller [21, 24]	Volumenmessung des in 30 s versprühten Wassers	In Bezug auf die Wasserstrahlen und -sprühnebeln ergeben sich keine besonderen Anforderungen
Düsendurchmesser	Messung, Hersteller	Düsenlehren	Abstufung von 0,05 mm
Raumpotential	Messung	Statisches Voltmeter, bestehend aus Feldstärkenmessgerät mit Hochspannungsmesskopf	Geeignet für sprühnebelbelastete Atmosphäre. Dem Aufprall des Strahls standhaltend. Isolierter Aufbau der Elektrode gegenüber dem geerdeten Behälter
Elektrische Feldstärke	Messung	Feldstärkenmessgerät	Geeignet für sprühnebelbelastete Atmosphäre. Bündiger Einbau in Behälterwand für homogenes elektrische Feld. Prüfung, welchen Einfluss eindringende Tropfen besitzen.

			Druckluftspülung notwendig? Kalibrierung nur für feste ebene Oberflächen. Eignung für Strahlen und Sprühnebel prüfen
Übertragene Ladung	Messung	Handcoulombmeter, Shunt, Antenne	Geeignet für sprühnebelbelastete Atmosphäre. Dem Aufprall des Strahls standhaltend

Ein gegenüber dem geerdeten Behälter isolierter Aufbau der Elektrode der Raumpotentialmesstechnik ist zu konstruieren. Die Elektrode, an der das Raumpotential durch Kontakt mit den Tropfen ortstauengelöst erfasst wird, ist im Mittelpunkt des Behälters zu montieren, da dort das maximale Raumpotential vorliegt [2]. Der isolierte Aufbau der Raumpotentialmesstechnik ist so zu konstruieren, dass er den verschiedenen Behälterdurchmessern angepasst werden kann und Messungen zwischen dem Mittelpunkt des Behälters und der Behälterwand erfolgen können. Zusätzlich sind Messungen am Strahl einzuplanen.

Um einen bündigen Einbau des Feldstärkenmessgerätes zu ermöglichen, sind Adapterplatten anzufertigen, deren Innenkontur dem Radius des Behälters entspricht. Die Kalibrierung von Feldstärkenmessgeräten erfolgt im homogenen elektrischen Feld eines Plattenkondensators [25]. Es ist unbekannt, ob das Feldstärkenmessgerät für Messungen an Wasserstrahlen und -sprühnebeln geeignet ist. Es ist eine dafür notwendige Prüfung durchzuführen. Es ist zu prüfen, ob das Eindringen von Tropfen in den Messkopf des Feldstärkenmessgerätes durch eine Druckluftspülung verhindert werden muss, wenn es den Wasserstrahlen und -sprühnebeln der Hochdruckreinigern ausgesetzt ist. Ist eine Druckluftspülung notwendig, ist deren Einfluss auf das Feldstärkenmessgerät und auf die Messung zu bestimmen.

Die Messungen der übertragenen Ladung erfolgen mit dem Shunt [26]. Für diesen ist ein wasserfester Aufbau zu konstruieren, der gleichzeitig dem Aufprall des Strahls standhält oder eine Sollbruchstelle aufweist.

Der Abstand der Düse zur Behälterwand muss veränderbar sein. Weiterhin ist eine Unterscheidung zwischen dem mittigen Sprühen und dem Sprühen im Winkel einzuplanen, um den realen Prozess der Behälterreinigung nachzustellen. Dafür ist eine einstellbare Positionierung der Düse notwendig. Um das Wasser zu temperieren, ist eine Warmwasseraufbereitung aufzubauen.

**Wasserlogistik:** Für die Versuche wurden mehrere 1000 l Wasser benötigt. Die Logistik erfolgte in 1000 l Kunststoff IBC's. Das Meerwasser wurde mit Meersalz aus dem toten Meer angesetzt. Als Basis diente das aus Braunschweig stammende Trinkwasser. Das Trinkwasser wurde vor Ort vom örtlichen Versorger entnommen. Das vollentsalzte Wasser wurde von der Firma Merck KGaA Darmstadt zur Verfügung gestellt und die Logistik größtenteils gemanagt.

**Flüssigkeitsstrahler:** Die PTB Braunschweig besitzt keine für die Untersuchungen geeigneten Flüssigkeitsstrahler. Tabelle 4.5 zeigt die Parameter der Flüssigkeitsstrahler, die von den Kooperationspartnern Alfred Kärcher SE & Co. KG, BUCHEN UmweltService GmbH und der Hammelmann Maschinenfabrik GmbH zur Verfügung gestellt wurden. Ergänzend gibt Tabelle 4.5 eine Übersicht, welche der Flüssigkeitsstrahler in welchem Behälter eingesetzt werden konnten. Die Behälter bis zu einem Volumen von 16,8 m<sup>3</sup> wurden von der Firma Merck KGaA und der 44,0 m<sup>3</sup>

von der Firma BASF Coatings GmbH bereitgestellt. Im 16,8 m<sup>3</sup> Behälter konnten weiterhin Versuche mit der Feuerwehr der Merck KGaA in Darmstadt durchgeführt werden, um bei niedrigen Pumpendrücken grenzwertüberschreitende Volumenströme zu untersuchen. Neben den Untersuchungen im Behälter erfolgten Messungen ohne dessen räumliche Begrenzung. Die dafür verwendeten Parameter der Flüssigkeitsstrahler sind in Tabelle 4.5 hellgelb (■) gekennzeichnet.

Tabelle 4.5: Parameter der Flüssigkeitsstrahler der Kooperationspartner

Düsendurchmesser in mm	Düsen-träger	Düsengeometrie	Pumpen-druck in bar	Volumen-strom in l/s	Behälter-volumen in m <sup>3</sup>
Hochdruckreiniger HD 9/50 vom Hersteller Alfred Kärcher SE & Co. KG					
1,05	-	Rund, Flach, Rotation <sup>*1</sup>	100	0,093	1,0; 6,2; 16,8
1,05	-	Rund, Flach, Rotation <sup>*1</sup>	200	0,146	1,0; 6,2; 16,8
1,05	-	Rund, Flach, Rotation <sup>*1</sup>	300	0,178	1,0; 6,2; 16,8
1,05	-	Rund, Flach, Rotation <sup>*1</sup>	400	0,218	1,0; 6,2; 16,8
1,05	-	Rund, Flach, Rotation <sup>*1</sup>	500	0,250	1,0; 6,2; 16,8
1,25	-	Rund	100	0,124	1,0
1,25	-	Rund	200	0,201	1,0
1,25	-	Rund	300	0,253	1,0
1,35	-	Flach	100	0,150	1,0
1,35	-	Flach	200	0,223	1,0
1,35	-	Flach	300	0,281	1,0
Flüssigkeitsstrahler BUCHEN UmweltService und Hammelmann Maschinenfabrik GmbH					
0,50	A	Rund	500	0,058	1,0; 6,2
0,50	A	Rund	1000	0,082	44,0
0,50	A	Rund	1500	0,102	1,0; 6,2
0,50	A	Rund	2000	0,117	6,2
1,00	A	Rund	300	0,180	-
1,00	A	Rund	500	0,233	1,0; 6,2; 44,0
1,00	A	Rund	1000	0,330	44,0
1,00	A	Rund	1500	0,403	1,0; 6,2
1,00	T	Rund	1500	0,307	1,0; 6,2
1,00	T	Rund	2500	0,395	1,0; 6,2
2,00	A	Rund	500	0,933	1,0; 6,2
4,00	A	Rund	100	1,670	1,0; 6,2
Hohlstrahlrohr RB 101 EN und RB 102 NFPA SELECT FLOW der Feuerwehr Merck KGaA					
Hohlstrahlrohr	Vollstrahl		6 bis 7	6,67 bis 7,92	16,8
Hohlstrahlrohr	Mittlere Aufweitung von 45° (Sprühstrahl)		6 bis 7	6,67 bis 7,92	16,8
Hohlstrahlrohr	Maximale Aufweitung von 120° (Schutzschild)		6 bis 7	6,67 bis 7,92	16,8

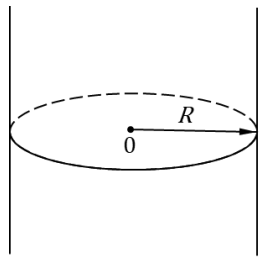
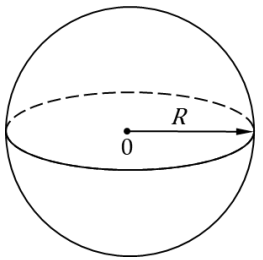
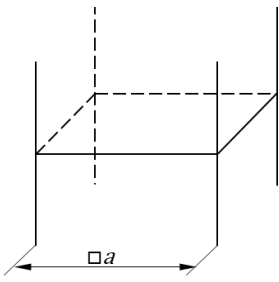
<sup>\*1</sup> Flach und Rotation nur im 1 m<sup>3</sup> Behälter



## 4.2.2 Zusammenhang elektrische Feldstärke, Raumpotential und -ladungsdichte

Die Berechnungsgrundlagen (Gleichung 4.1 bis Gleichung 4.6) der elektrischen Feldstärke  $E(R)$ , des Raumpotentials  $\Phi(0)$  und der -ladungsdichte  $\rho$ , in Abhängigkeit von der Behältergeometrie und dem Behälterradius  $R$ , sind in Tabelle 4.6 zusammengefasst. Anhand der Messung des Raumpotentials im Mittelpunkt und der elektrischen Feldstärke am Rand des Behälters ist eine gegenseitige Verifizierung der Messtechniken möglich (Gleichung 4.7). Dadurch können etwaige Messfehler und ggf. notwendige Korrekturen erkannt werden.

Tabelle 4.6: Berechnungsgrundlagen der elektrischen Feldstärke, des Raumpotentials und -ladungsdichte, in Abhängigkeit von der Behältergeometrie

	Zylinder	Kugel	Behälter mit quadratischer Querschnittsfläche
			
Maximales Raumpotential	$\Phi(0) = \frac{\rho \cdot R^2}{4 \cdot \varepsilon}$ [5] 4.1	$\Phi(0) = \frac{\rho \cdot R^2}{6 \cdot \varepsilon}$ [5] 4.2	$\Phi(0) = \frac{0,056 \cdot \rho \cdot a^2}{\varepsilon}$ [27] 4.3
El. Feldstärke an der Wand	$E(R) = \frac{\rho \cdot R}{2 \cdot \varepsilon}$ [5] 4.4	$E(R) = \frac{\rho \cdot R}{3 \cdot \varepsilon}$ [5] 4.5	$E_a = \frac{27 \cdot \rho \cdot a}{\pi^4 \cdot \varepsilon}$ [8] 4.6
	$\Phi(0) = R \cdot \frac{E(R)}{2}$ [5] 4.7		

Um die Permittivität  $\varepsilon$  zu berechnen, ist die Permittivitätszahl  $\varepsilon_r$  mit der elektrischen Feldkonstante  $\varepsilon_0$  zu multiplizieren (Gleichung 4.8):

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad 4.8$$

In [12, 16, 27] wird die Permittivitätszahl des Wassersprühnebels mit 1,00 angenommen, da die feinen Tropfen Dampf nicht unähnlich sind. Bei einem Druck von 1,0 bar besitzt Dampf maximal eine Permittivitätszahl von 1,01 [28]. In diesem Projektbericht wird die Permittivitätszahl von 1,01 für etwaige Berechnungen genutzt.

## 4.2.3 Gefährdungsbeurteilung und Betriebsanweisung

Ferner ist Bestandteil des AP 2 die Ausarbeitung der Gefährdungsbeurteilung und Betriebsanweisung. Die exemplarisch für Messungen bei der Firma BUCHEN UmweltService GmbH ausgefüllte Gefährdungsbeurteilung befindet sich in Anhang B. Die sich daraus ergebende Betriebsanweisung ist in Anhang C hinterlegt.

### 4.3 AP 3: Versuchseinrichtungen und Messtechnik

Beschrieben werden die Messtechniken der elektrostatischen Größen. Bei den weiteren Messtechniken der Tabelle 4.4 handelt es sich um kommerziell erwerbliche Messtechniken, die keiner Anpassung und Eignungsprüfung unterzogen werden müssen.

#### 4.3.1 Feldstärkenmessung

Für Messungen der elektrischen Feldstärke wird in diesem Projekt das für sprühnebelbelastete Umgebungen geeignete Feldstärkenmessgerät vom Typ JCI 131 vom Hersteller John Chubb Instrumentation Ltd. genutzt [25]. Das elektrische Feld bewirkt eine Ladungsverschiebung auf definierte Komponenten des Feldstärkenmessgerätes. Der sich ergebende Verschiebstrom ist proportional zur elektrischen Feldstärke. Die Kalibrierung des Feldstärkenmessgerätes erfolgte vom Hersteller in genereller Übereinstimmung mit dem BS 7506: Part 2: 1996 Annex A2. Die Messunsicherheit beträgt  $\pm 1,5\%$  vom Messbereichsendwert [25]. Beim Kalibrieraufbau handelt es sich um einen Plattenkondensator. Die dem Feldstärkenmessgerät gegenüberliegende Platte steht unter Hochspannung. In der anderen Platte ist das Feldstärkenmessgerät bündig eingelassen, um ein nahezu homogenes elektrisches Feld zu erzeugen, das gemessen und für die Kalibrierung genutzt wird. Die festen Oberflächen des Kalibrieraufbaus sind ungleich zu Wasserstrahlen und -sprühnebeln. Das wirft die Frage auf, ob das Feldstärkenmessgerät geeignet für Messungen an Wasserstrahlen und -sprühnebeln ist.

Um dieser Fragestellung nachzugehen, wurde die in Abbildung 4.2 gezeigte Prüfmethode zur Eignung des Feldstärkenmessgerätes entwickelt. Die verwendete elektrostatische Applikationsanlage erzeugt einen Wasserflachstrahl, dessen Raumpotential gemessen und folglich bekannt ist. Daraus lässt sich die elektrische Feldstärke berechnen. Die mit dem Feldstärkenmessgerät gemessenen elektrischen Feldstärken werden mit den berechneten elektrischen Feldstärken verglichen. Nähere Informationen dazu befinden sich in der den Kooperations- und Projektpartnern zur Verfügung gestellten Veröffentlichung [29].

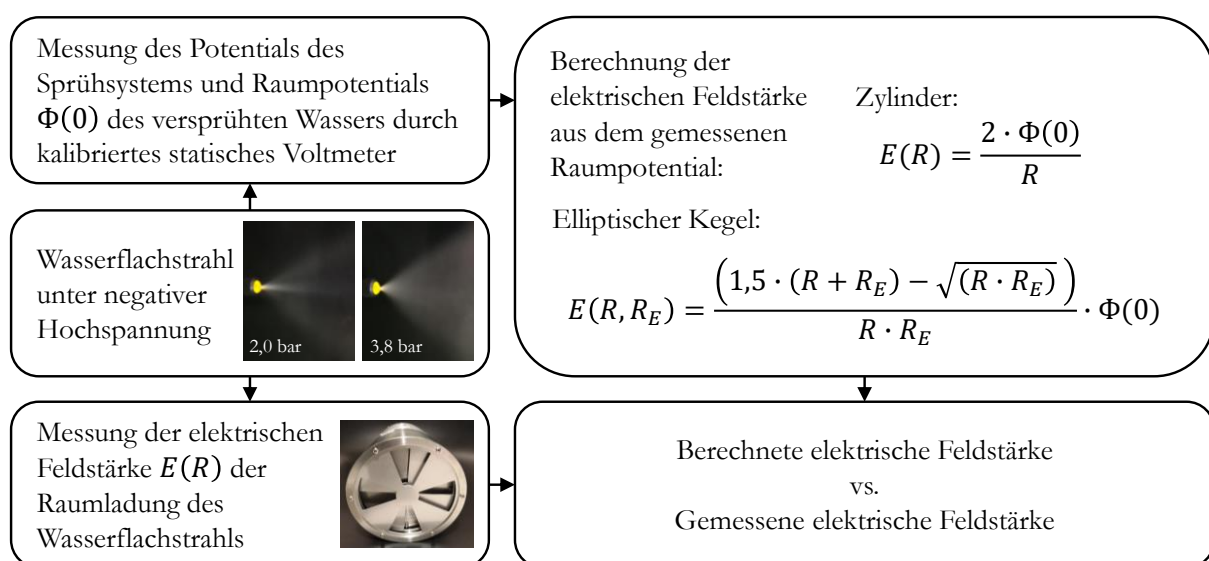


Abbildung 4.2: Prüfmethode zur Eignung des Feldstärkenmessgerätes an Wasserstrahlen und -sprühnebeln

Wie aus [30, 31] bekannt, besitzen Feldstärkenmessgeräte einen Messwinkel. Vergleichbar zum Lichtkegelstumpf einer Taschenlampe ergibt sich bei Feldstärkenmessgeräten ein Messkegelstumpf. Der ermittelte und in [30] veröffentlichte Messwinkel des verwendeten Feldstärkenmessgerätes JCI 131 beträgt  $(40 \pm 5)^\circ$ . In Abhängigkeit vom Abstand zum Messkopf des Feldstärkenmessgerätes ergibt sich eine kreisrunde Messfläche. Anhand der Messungen am Aufbau der Prüfmethode wurde bestätigt, dass sich innerhalb der Messfläche die Ladungen der vorhandenen Oberflächen mitteln. So ergeben sich hohe Abweichungen zwischen der berechneten und gemessenen elektrischen Feldstärke von mehreren 10 %, wenn

- die Aufweitung des Strahls kleiner als die Messfläche ist und/oder
- die Tropfendichte nicht hoch genug ist.

Bei diesen Fällen werden Teile der ungeladenen Umgebung gemessen und reduzieren die gemessene elektrische Feldstärke. Bei der Vermeidung der aufgezählten Punkte ist das Feldstärkenmessgerät für Messungen an Wasserstrahlen und -sprühnebeln geeignet.

Bei der Erprobung des Feldstärkenmessgerätes hat sich gezeigt, dass das in den Messkopf eindringende Wasser zu einem kurzzeitigen und unrealistischen An- und Abstieg des Betrags der elektrischen Feldstärke oder gravierender zu einem kompletten Zusammenbruch des Messwertes führt. Diese Messfehler treten auf, wenn die leitfähigen Bauteile im Inneren des Messkopfes des Feldstärkenmessgerätes durch das Wasser mit dem geerdeten Gehäuse des Messgerätes verbunden werden. Entgegen der Aussage des Herstellers reichen die acht 4 mm Bohrungen in der Mantelfläche des Feldstärkenmessgerätes nicht aus, um das in den Messkopf eingedrungene Wasser ablaufen zu lassen. So wurden nach der Messung Wasseransammlungen im Messgerät identifiziert.

Folgende Maßnahmen reduzieren das Eindringen von Tropfen und das Ansammeln von Wasser im Messkopf des Feldstärkenmessgerätes:

- Die Öffnung des Messkopfes des Feldstärkenmessgerätes ist nach unten auszurichten, damit Wasser schwerkraftbedingt abläuft.
- An den acht 4 mm Bohrungen ist die Druckluftspülung zu montieren, um das Eindringen von Tropfen zu minimieren. Die Druckluftspülung besitzt einen Druck von 3,0 bar.

Messungen der elektrischen Feldstärke im Plattenkondensator, wie er für Kalibrierungen von Feldstärkenmessgeräten genutzt wird [25, 30], ohne und mit eingeschalteter Druckluftspülung haben ergeben, dass die Druckluftspülung keinen Einfluss auf das Messsignal des Feldstärkenmessgerätes aufweist. Für die Feldstärkenmessungen an der Wand der Behälter wird der in Abbildung 4.3 dargestellte Aufbau genutzt. Beim Aufbau werden die bei der Erprobung der Messtechnik gewonnenen Erkenntnisse umgesetzt. Um ein möglichst homogenes elektrisches Feld zu erzeugen, ist das Feldstärkenmessgerät in Adapterplatten montiert. In Abbildung 4.3 ist das Feldstärkenmessgerät in der Adapterplatte des 1 m<sup>3</sup> Behälters montiert, die wiederum in die Adapterplatte der größeren Behälter eingelassen wird. Beispielhaft ist in Abbildung 4.3 die Adapterplatte des 6,2 m<sup>3</sup> Behälters abgebildet. Um das Eindringen der Tropfen in den Messkopf zu vermeiden ist die Druckluftspülung angeschlossen. Die Ansteuerung der Druckluftspülung erfolgt über ein elektrisch schaltbares Magnetventil. Der Druck wird am Druckregelventil mit Manometer eingestellt. Über das 19-polige

Messkabel, das zur Spannungsversorgung und Datenübertragung dient, ist das Feldstärkenmessgerät mit der zum Messsystem gehörenden Basiseinheit verbunden. Um die elektrische Feldstärke mit 100 Samples/s zu erfassen, ist die Basiseinheit über einen dafür angefertigten Adapter mit dem Spannungseingangsmodul NI-9215 des CompactDAQ-Chassis des Herstellers National Instruments Corp. verbunden. Die Messunsicherheit des kalibrierten Spannungseingangsmoduls NI-9215 beträgt  $\pm 0,01$  V. Im CompactDAQ-Chassis befindet sich weiterhin ein Temperatureingangsmodul NI-9212, an dem bis zu acht Thermoelemente angeschlossen werden können. Für die Messungen der Temperatur des Wassers vor und nach dem Versprühen wird das beispielhaft in Abbildung 4.3 gezeigte Mantelthermoelement vom Typ K (NiCr-Ni) eingesetzt. Die Kombination aus den Thermoelementen mit dem Temperatureingangsmodul NI-9212 besitzen eine Messunsicherheit von  $\pm 2$  K. Zusätzlich ist im CompactDAQ-Chassis ein Relaisausgangsmodul NI-9482 installiert, über das ein 230 V Schaltgerät geschaltet und die Druckluft ein- und ausgeschaltet wird. Die Datenübertragung der Messung der elektrischen Feldstärke, des Range-Bereichs der Feldstärkenmessung, der Temperaturen und der Zeit, erfolgt an ein Notebook, auf dem die Software „Behälterreinigung 1.1“ installiert ist. Die Datensätze werden im Dateiformat txt. gespeichert. Über die Potentialausgleichschiene werden die Gehäuse der Messgeräte, die Adapterplatten und der Behälter geerdet.

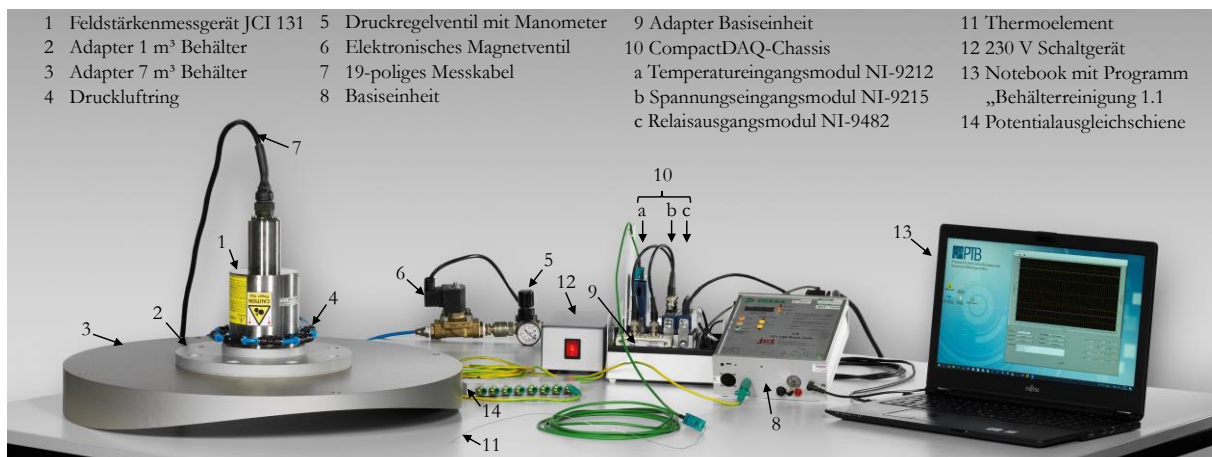


Abbildung 4.3: Aufbau der Feldstärkenmessung für Messungen an Wand des Behälters



Abbildung 4.4: Aufbau der Feldstärkenmessung für Messungen an Strahlen und Sprühnebeln, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters

Für Messungen an Strahlen und Sprühnebeln, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters, ist das Feldstärkenmessgerät im Stativ montiert (Abbildung 4.4). Der Abstand vom Boden bis zur Rotationsachse des Feldstärkenmessgerätes beträgt 1,3 m. Das Feldstärkenmessgerät ist in einer 0,01 m dicken Metallplatte so montiert, dass der Messkopf bündig mit dieser abschließt. Durch die Metallplatte ergibt sich ein homogenes elektrisches Feld [4, 31]. Der Durchmesser der Metallplatte beträgt 0,4 m. Der weitere Aufbau entspricht dem im Behälter.

#### 4.3.2 Raumpotentialmessung

Die Messung des Raumpotentials erfolgt gegenüber dem geerdeten Behälter. Der Aufbau besteht aus Komponenten, die aus isolierenden rotem PVC-U (Hart-Polyvinylchlorid) gefertigt sind (Abbildung 4.5). Gelagert wird der Aufbau pro Auflagerpunkt auf zwei Isolationsscheiben. Die Auflagerpunkte befinden sich außerhalb des Behälters. Dafür geeignet sind Trittgitter, die außenliegende Mantelfläche oder Rahmenteile des Behälters. Mit den Isolationsscheiben fest verschraubt ist der Träger. Im Träger befindet sich ein Klemmring, in den der Isolationsstab gesteckt wird. Das Anziehen der drei Stiftschrauben im Träger bewirkt eine Kraft auf den Klemmring, wodurch der Isolationsstab in der gewünschten Position gehalten wird. Der Isolationsstab hat eine Länge von 2 m und ist innen hohl. Der untere, in den Behälter ragende Teil des Isolationsstabs besitzt, vergleichbar zu Freiluftisolatoren, eine gerippte Form, um die Kriechwegstrecken zu maximieren und einen Ableitpfad zu vermeiden. Zusätzlich ist am Träger ein Druckluftring mit acht 4 mm großen Düsen montiert (Druck bis 4 bar), der den Sprühnebel im Bereich der Messöffnung des Behälters verdrängt und den Isolationsstab trocken hält. Die Komponenten des isolierten Aufbaus werden regelmäßig poliert, um eine hydrophobe Oberfläche zu erlangen.

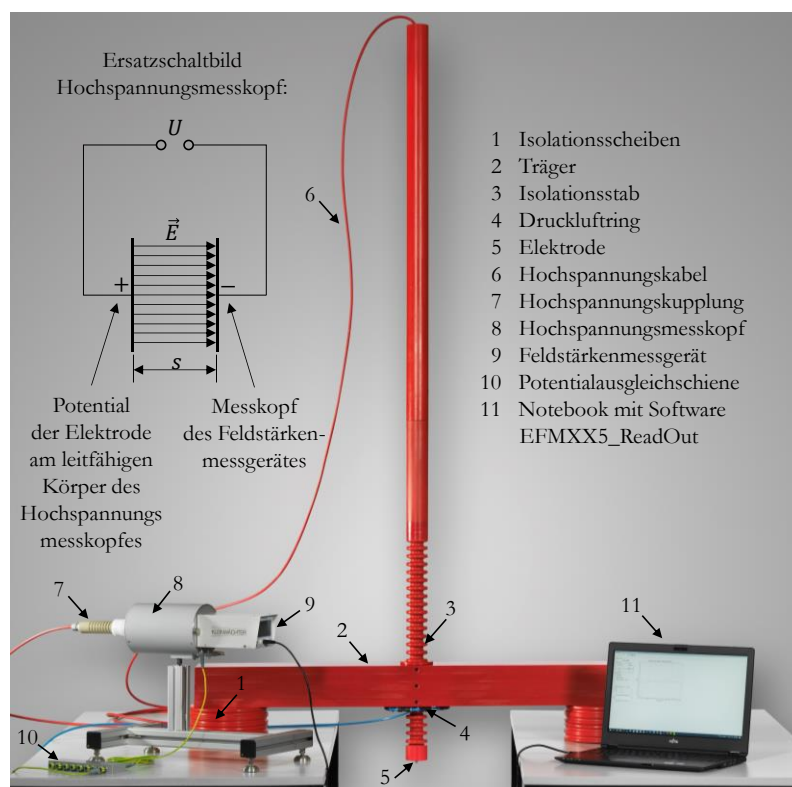


Abbildung 4.5: Messtechnischer Aufbau der Raumpotentialmessung; Ersatzschaltbild Hochspannungsmesskopf

In der unteren Öffnung des Isolationstabs ist die leitfähige kegelförmige Elektrode ( $\varnothing = 0,010$  m,  $L = 0,010$  m) eingelassen und wird durch zwei Stiftschrauben fixiert. Die Stiftschrauben sind durch eine Schutzkappe verdeckt. In Abhängigkeit von der Messposition nimmt die Elektrode durch Kontakt das Raumpotential des Wasserstrahls oder -sprühnebels an. Das an der Elektrode angeschlossene Hochspannungskabel wird durch den Isolationstab geführt und am anderen Ende über ein aus PEEK (Polyetheretherketon) gefertigten Hochspannungsanschluss am Hochspannungsmesskopf angeschlossen. In Abhängigkeit von der Höhe des Raumpotentials wird der  $\pm 2$  kV oder  $\pm 40$  kV Hochspannungsmesskopf des Herstellers Kleinwächter GmbH verwendet. Im Messkopf ist ein mit  $10^{15} \Omega$  gegen Erde isolierter, leitfähiger Körper montiert [4]. Der Körper nimmt das Potential der Elektrode an. Dem Körper gegenüberliegend befindet sich der Messkopf des Feldstärkenmessgerätes EMF 58 des Herstellers Eltex GmbH oder dem Nachfolger EFM 235 des Herstellers Kleinwächter GmbH, durch den die elektrische Feldstärke des sich ausbildenden elektrischen Feldes gemessen wird. Aus dem bekannten Abstand  $s$  zwischen dem Körper und dem Messkopf und der gemessenen elektrischen Feldstärke  $E$  ist nach Gleichung 4.9 auf das Potential  $U$  des Körpers und folglich auf das Raumpotential  $\Phi$  zu schließen [4].

$$\Phi = U = E \cdot s \quad 4.9$$

Dieses Messsystem erfasst das Raumpotential leistungslos und entspricht der Definition eines statischen Voltmeters [4]. Über eine USB-Schnittstelle werden die über die Zeit erfassten Messdaten an das Notebook mit der Software EFMXX5\_ReadOut übertragen und im Dateiformat txt. abgespeichert. Das Gehäuse des Feldstärkenmessgerätes und des Hochspannungsmesskopfes ist, gemeinsam mit dem Behälter, an der Potentialausgleichschiene zu erden.

Gemäß dem GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) wurde für die Messung des Raumpotentials eine erweiterte Messunsicherheit von  $\pm 2,5$  % des Messbereichsendwertes ermittelt. Die Messtechnik ist ungeeignet, wenn die Luftfeuchtigkeit außerhalb des Wasserstrahls und -sprühnebels eine relative Luftfeuchte von über 50 % erreicht.

Vor, während und nach dem Versprühen von Trinkwasser und vollentsalztem Wasser wurden Widerstandsmessungen der isoliert aufgebauten Elektrode der Raumpotentialmesstechnik gegenüber dem geerdeten Behälter durchgeführt. Die Raumpotentialmesstechnik war im leitfähigen geerdeten  $1 \text{ m}^3$  Behälter montiert, der einen Durchmesser von  $1,07$  m besitzt. Die Elektrode befand sich im Mittelpunkt des Behälters oder bei einem Abstand der Elektrode zur Behälterwand von  $0,30$  m oder  $0,15$  m. Genutzt wurde für die Widerstandsmessung das Teraohmmeter Megger MIT 1025, das eine Prüfspannung von bis zu  $10$  kV erzeugt [32]. Vor dem Versprühen (trockener Behälter) werden überwiegend die Messbereichsendwerte des Widerstands von mehreren  $10^{12} \Omega$  erreicht. Nach dem Sprühen werden ebenfalls nahezu die Messbereichsendwerte von mehreren  $10^{12} \Omega$  erreicht. Eine Reduzierung des Widerstands ergab sich beim Versprühen. Befindet sich die Elektrode im Mittelpunkt des Behälters, ist sie unmittelbar im Strahl, da mittig in den Behälter gesprüht wurde. Im Strahl wurden Widerstände im Bereich von  $10^9 \Omega$  gemessen. Beträgt der Abstand der Elektrode zur Behälterwand  $0,30$  m oder  $0,15$  m, werden Widerstände von  $5 \cdot 10^{10} \Omega$  bis rund  $3 \cdot 10^{11} \Omega$  gemessen. Die Oberflächen sind während und nach dem Versprühen mit Wasser benetzt. Die Reduzierung des Widerstands um bis zu zwei (Messung im Sprühnebel) bis drei (Messung im Strahl) Größenordnungen erfolgt jedoch erst beim Versprühen von Wasser. Weiterhin erhöht sich der Widerstand, wenn der Abstand der Elektrode zur Behälterwand reduziert wird und die

Elektrode näher an der geerdeten Behälterwand ist. Daraus folgt, dass etwaige Ableitpfade über den Wasserstrahl und -sprühnebel und nicht über den isolierten Aufbau der Raumpotentialmesstechnik stattfinden. Die sich beim Versprühen ergebenden Ableitpfade über den Wasserstrahl und -sprühnebel entsprechen den realen Bedingungen. Zusammengefasst ist die Isolation der Raumpotentialmesstechnik ausreichend, da sich Ableitpfade beim prozessbedingten Versprühen und den sich bildenden Wasserstrahlen und -sprühnebeln ausbilden.

Die Erprobung der Raumpotentialmesstechnik und eine erste Verifizierung mit der Feldstärkemessung erfolgte bereits in der ersten Veröffentlichung zu diesem Projekt [29]. Obwohl Tropfen unter einer negativen Hochspannung von bis zu -90 kV in den Behälter gesprüht wurden, ergab sich ein Raumpotential von nur -15,2 kV. Es konnte, mit einer Abweichung von unter 8 %, die am Rand des Behälters gemessene elektrische Feldstärke in das im Mittelpunkt des Behälters gemessene Raumpotential nach Gleichung 4.7 umgerechnet werden und bestätigt die gegenseitige Verifizierung und Einsetzbarkeit der Messtechniken.

#### 4.3.3 Messung der übertragenen Ladung

**Handcoulombmeter:** Für Messungen der übertragenen Ladung wird ein kommerzielles Handcoulombmeter vom TYP HMG 11/02 des Herstellers Schnier Elektrostatik GmbH verwendet [33]. Übertragene Ladungen ab 5 nC bis maximal 200 nC sind messbar [33]. Es gilt eine Messunsicherheit von  $\pm 5,9$  nC [26]. Um den Sicherheitsabstand zum Strahl einzuhalten, ist das Handcoulombmeter an einem Stab befestigt. Der Krümmungsradius der Kugelelektrode des Handcoulombmeters, zu der die Gasentladungen erfolgen, beträgt 0,010 m [26].

**Shunt:** Neben dem Handcoulombmeter wird der Shunt für Messungen der übertragenen Ladung eingesetzt [26]. Es sind übertragene Ladungen von unter 5 nC detektierbar. Die Gasentladung zur Elektrode des Shunts erzeugt einen Stromimpuls  $I(t)$ . Gegenüber dem Oszilloskop hat der Shuntwiderstand  $R_{Shunt}$  einen geringen Widerstand von  $(0,250 \pm 0,001) \Omega$ , so dass nach dem Kirchhoffschen Gesetz (Knotenpunktsatz) der Parallelschaltung (Abbildung 4.6) der Hauptteil des Stromimpulses über den Shuntwiderstand erfolgt. Der zeitliche Verlauf der Spannung  $U(t)$  am Shuntwiderstand wird mit dem kalibrierten Oszilloskop gemessen. Um auf die übertragene Ladung zu schließen, ist der zeitliche Verlauf der Spannung über die Zeit zu integrieren und durch den bekannten Shuntwiderstand zu teilen (Gleichung 4.10) [26]:

$$Q = \int I(t) \cdot dt = \frac{1}{R_{Shunt}} \cdot \int U(t) \cdot dt \quad 4.10$$

Mit der kalibrierten LCR-Messbrücke 6440B des Herstellers WAYNE KERR wird der Shuntwiderstand vor und nach jeder Messkampagne geprüft. Für die Widerstandsmessung mit der LCR-Messbrücke gilt eine, gemäß dem GUM bestimmte (Erweiterungsfaktor  $k = 2$ ) maximale Abweichung von  $0,26 \cdot 10^{-3} \Omega$ .

Trifft der Wasserstrahl auf die Elektrode des Shunts, würde der Aufprall die Lötstellen der Messtechnik beschädigen. Um den Impuls des Aufpralls aufzunehmen ist zwischen der Elektrode und dem Shunt ein Zylinder montiert (Abbildung 4.6). Der Zylinder wird durch zwei Stiftschrauben im Isolationsstab verklemmt. Die Schutzkappe dient dazu, die Stiftschrauben abzudecken und ist



austauschbar, so dass Beschädigungen am Isolationsstab vermieden werden. Um das Eindringen von Wasser in das Innere des Isolationsstabs zu verhindern, ist zwischen Elektrode und Zylinder ein Dichtring montiert. Das am Shunt angeschlossene Erdungskabel wird, zusammen mit dem Oszilloskop, an der Potentialausgleichschiene angeschlossen. Das BNC-Kabel ist am Oszilloskop anzuschließen. Abbildung 4.7 zeigt den im Isolationsstab eingebauten Shunt. Durch den 2 m langen Isolationsstab, der in der Hand gehalten wird, ergibt sich ein Sicherheitsabstand zum Strahl.

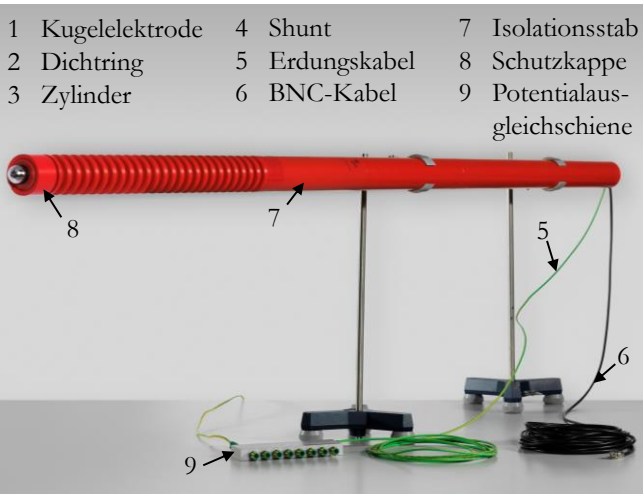
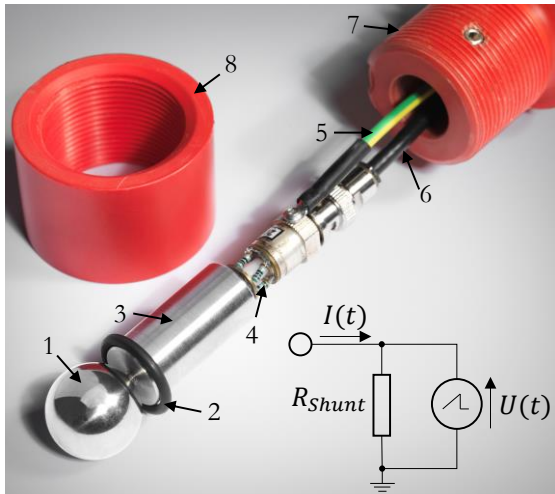
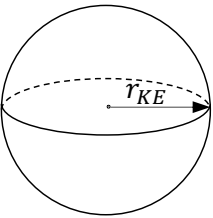
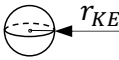
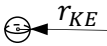
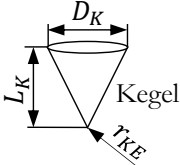
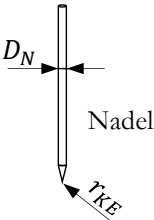
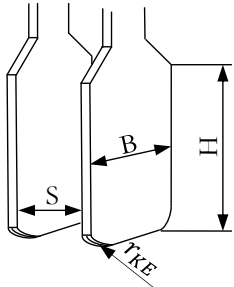


Abbildung 4.6: Für den Einbau im Isolationsstab vorbereiteter Shunt; Ersatzschaltbild Shunt

Abbildung 4.7: Isolationsstab mit eingebautem Shunt

Die in Abbildung 4.6 abgebildete Kugelelektrode, mit einem Krümmungsradius von 0,0125 m, ist gegen andere Elektrodengeometrien und Krümmungsradien austauschbar. Eine Übersicht der verwendeten Elektroden gibt Tabelle 4.7:

Tabelle 4.7: Übersicht der für Messungen der übertragenen Ladung mit dem Shunt verwendeten Elektrodengeometrien und deren Krümmungsradien

Kugelelektroden	Spitzenelektroden	Füllstandssensor
 <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>Kegel</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>Nadel</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>



**Antennenmesstechnik:** Der Plasmakanal der Gasentladung emittiert eine hochfrequente elektromagnetische Strahlung, die mittels der Antennenmesstechnik erfassbar ist [4]. Anders als beim Handcoulombmeter und Shunt muss der Ort des Auftretens der Gasentladungen nicht bekannt sein. Für die Antennenmesstechnik besteht kein standardisiertes Kalibrierverfahren. Die Messtechnik dient lediglich zum Nachweis des Auftretens von Gasentladungen.

Der kreisförmige Dipol der Antennenmesstechnik besteht aus einer leitfähigen und isoliert ummantelten Kupferlitze. Der Innenleiter des am Oszilloskop angeschlossenen Koaxialkabels und die Schirmung des Koaxialkabels ist mit jeweils einem Ende des Dipols zu verbinden (Abbildung 4.8) [4]. Der gesamte Aufbau besitzt eine Wellenimpedanz von  $50 \Omega$ .

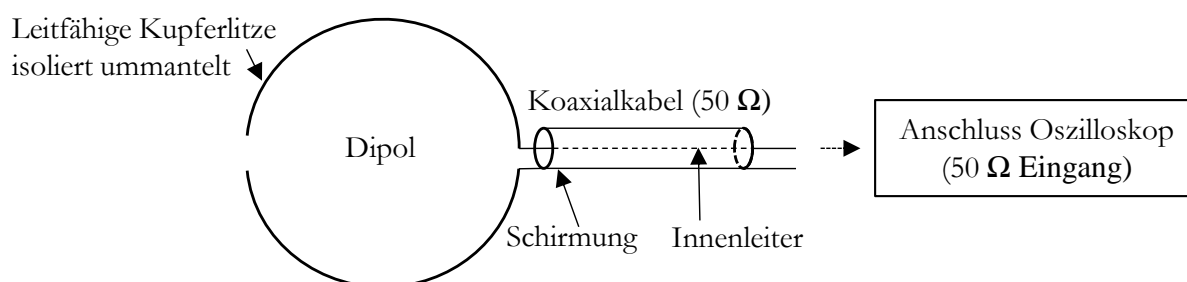


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung der Antennenmesstechnik

#### 4.3.4 Messung der elektrischen Leitfähigkeit

In Tabelle 4.8 sind die Wasserarten aufgeführt, die bei den Untersuchungen mit den Flüssigkeitsstrahlern versprüht wurden.

Tabelle 4.8: Wasserarten der Untersuchungen und deren elektrische Leitfähigkeit

Entnahmeort	Wasserart	Gemessene elektrische Leitfähigkeit in S/m bei 25 °C	Elektrische Leitfähigkeit in S/m bei 25 °C aus [34]
1000 l Trinkwasser aus Braunschweig mit 33,5 kg Meersalz	Meerwasser	$5,01 \pm 0,05$	5
BUCHEN Umweltservice 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	$(3,30 \pm 0,02) \cdot 10^{-2}$	-
Hersteller Merck KGaA, Darmstadt	Vollentsalztes Wasser	$(3,14 \pm 2,67) \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Die Messungen der elektrischen Leitfähigkeiten der Wasserarten erfolgten mit dem kalibrierten Messgerät Multi 3510 IDS in Kombination mit der Vier-Elektroden-Leitfähigkeitsmesszelle

TetraCon 925 des Herstellers Xylem Analytics Germany GmbH. Im Bereich der elektrischen Leitfähigkeit von  $5 \cdot 10^{-5}$  S/m bis  $5 \cdot 10^{-4}$  S/m beträgt die Messunsicherheit laut Kalibrierprotokoll bis zu 14,6 % vom Messwert. Bei  $1 \cdot 10^{-3}$  S/m bis  $5 \cdot 10^{-2}$  S/m liegt sie bei 1,0 % vom Messwert. Für die hohe elektrische Leitfähigkeit des Meerwassers von rund 5 S/m wurde das Mikroprozessor-Präzisions-Leitfähigkeitsmessgerät LF 3000 in Kombination mit der Leitfähigkeitsmesszelle TetraCon 96 genutzt. Im Messbereich von  $3 \cdot 10^{-3}$  S/m bis 200 S/m besitzt es eine Messunsicherheit von 0,5 % vom Messwert [35]. Zum Vergleich sind Angaben der elektrischen Leitfähigkeiten der Wasserarten aus [34] aufgeführt. Die Größenordnungen der Messwerte stimmen mit den Angaben in der Literatur überein. Die Unsicherheiten der gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten resultieren aus den Messwerten der einzelnen Proben, die während der Untersuchungen genommen wurden.

#### 4.3.5 Meilenstein 1: Messtechniken einsetzbar?

Die Messtechniken und deren Einbauten wurden den Bedingungen bei Messungen an Wasserstrahlen und -sprühnebeln angepasst. Die Prüfung der Wirksamkeit der Anpassungen und die Eignung der Messtechnik in sprühnebelbelasteter Umgebung ist erfolgt. Um die in Tabelle 4.4 festgelegten Messgrößen zu erfassen, stehen die notwendigen Messtechniken zur Verfügung und sind einsatzbereit. Der Meilenstein 1 wurde erreicht.

#### 4.4 AP 4: Untersuchungen an Modellanordnungen

Es wird auf die Versuchsanordnungen, den Einbau der Messtechnik, die Durchführung der Messungen und auf die Messergebnisse der Modellanordnungen eingegangen.

##### 4.4.1 Modellanordnung und Durchführung von Messungen

Als Modellanordnung dient der leitfähige, geerdete 1 m<sup>3</sup> Behälter aus Edelstahl (Abbildung 4.9). Er hat einen Innendurchmesser von 1,07 m. Der Behälter wurde von der Firma Merck KGaA mit zusätzlichen Öffnungen in der Mantelfläche versehen und bereits in dem vorangegangenen Forschungsprojekt [1] genutzt. Er befindet sich in einer liegenden Position, um das schwerkraftbedingte Ablaufen der Tropfen von und aus der Messtechnik zu begünstigen und um die Sprüheinrichtungen leichter bedienen zu können. Die Öffnung der Messtechnik befindet sich auf der halben Höhe (0,50 m) des Behälters. Der 1 m<sup>3</sup> Behälter ist durch einen für die Aufnahme der Spritzeinrichtung der Flüssigkeitsstrahler konstruierten Deckel aus PVC-U versehen. Beim mittigen Sprühen in den Behälter (Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10) schließt die Düse bündig mit der Deckelöffnung des 1 m<sup>3</sup> Behälters ab. Die Flüssigkeitsstrahler und der Behälter werden mit der Potentialausgleichsschiene der Messtechniken (Kapitel 4.3) verbunden und geerdet. Ein Befüllen des Behälters wird durch den montierten Ablauf verhindert. Im Ablauf ist ein Thermoelement montiert, um die Temperatur des versprühten Wassers zu messen.

Das Feldstärkenmessgerät (Kapitel 4.3.1) ist in der konstruierten Adapterplatte des 1 m<sup>3</sup> Behälters montiert und schließt bündig mit der inneren Mantelfläche des Behälters ab (Abbildung 4.9). Das nach unten ausgerichtete Feldstärkenmessgerät und die montierte Druckluftspülung reduzieren das Eindringen von Tropfen in den Messkopf.

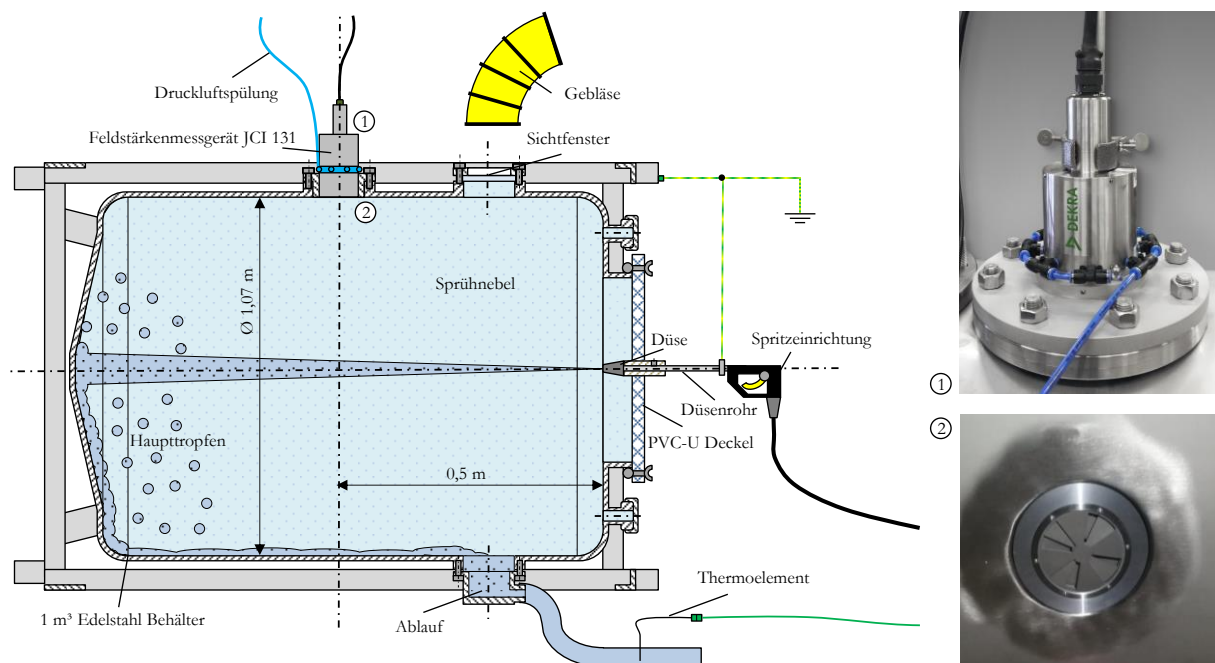


Abbildung 4.9: Modellanordnung mit montiertem Feldstärkenmessgerät

Der Träger der Raumpotentialmesstechnik (Kapitel 4.3.2) ist auf dem Rahmengestell des 1 m<sup>3</sup> Behälters montiert (Abbildung 4.10). Der Isolationsstab, an dessen unterem Ende sich die Elektrode zur Messung des Raumpotentials befindet, ragt durch die Messöffnung in das Volumen des

Behälters. Zur zusätzlichen Isolation ist in der Messöffnung des Behälters ein Isolationskörper mit Abtropfkante montiert, der zusammen mit der Druckluftspülung (4 bar) das Austreten des Sprühnebels aus dem Behälter größtenteils verhindert. Die Druckluftspülung dient ebenfalls zur Trocknung des Isolationsstabes, speziell im Bereich der Öffnung der Messgeräte des Behälters. Der Abstand der Elektrode zur Behälterwand wird zwischen 0,15 m, 0,30 m, 0,45 m und 0,54 m (Mittelpunkt) variiert. Beim mittigen Sprühen misst die Raumpotentialmesstechnik bei 0,54 m das Raumpotential des Strahls und bei den kleineren Abständen der Elektrode zur Behälterwand das des Sprühnebels im Volumen des Behälters.

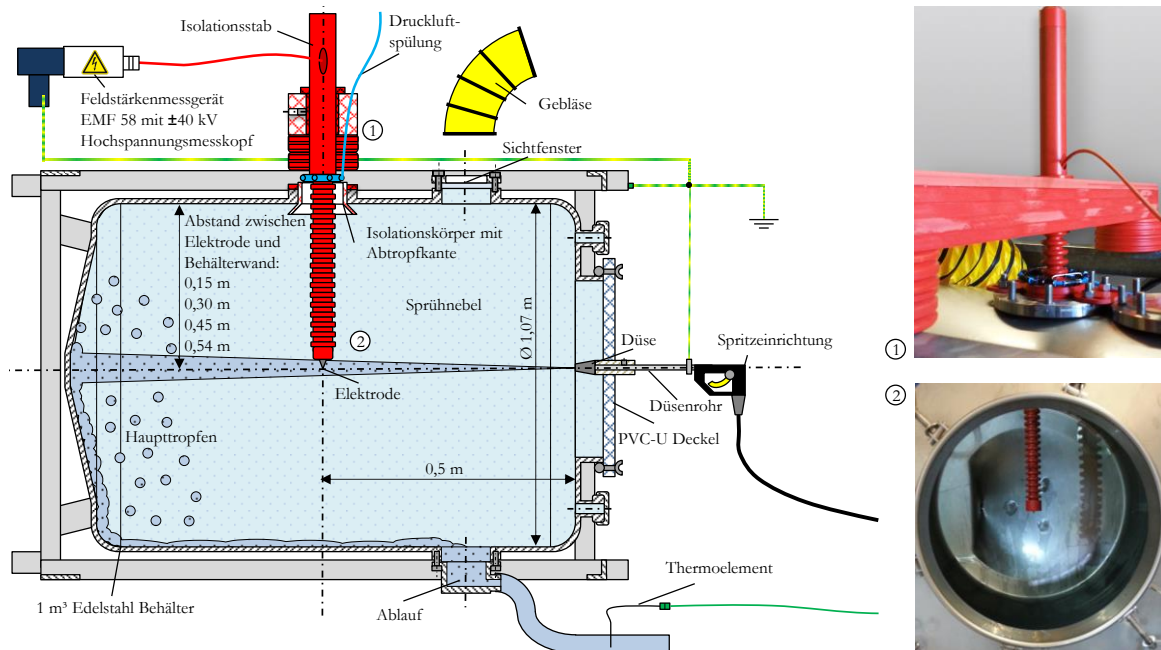


Abbildung 4.10: Modellanordnung mit montierter Potentialmesstechnik

Anhand von Erfahrungswerten wurde eine maximale Messdauer von sieben Minuten festgelegt, um zu garantieren, dass Messdaten vom Start des Versprühens bis zum Gleichgewichtszustand messtechnisch erfasst werden. Der Gleichgewichtszustand beschreibt den Zeitpunkt, ab dem der Betrag der Messgröße über die weitere Messdauer konstant bleibt. Wird der Gleichgewichtszustand bereits nach kurzer Zeit erreicht, kann die Messdauer von sieben Minuten verkürzt werden. Nach dem Versprühen ist das Sichtfenster und der PVC-U Deckel zu demontieren. An der Öffnung des Sichtfensters ist das Gebläse anzuschließen, um den Sprühnebel zu verdrängen und den Behälter zu trocknen. Dadurch wird eine gleichbleibende Ausgangssituation geschaffen.

Um den realen Prozess der Behälterreinigung nachzubilden, kann die Düse in unterschiedlichen Winkeln ausgerichtet werden. Per Hand dauerhaft einen gleichbleibenden Winkel zu gewährleisten ist nicht umsetzbar. Aus diesem Grund wurde ein zweiter Deckel aus PVC-U konstruiert, in dem sich eine Kugelblende befindet (Abbildung 4.11). In der Kugel der Kugelblende ist das Düsensrohr der Spritzeinrichtung eingespannt. Die Kugel ist in zwei konkaven Halbschalen gelagert und weist eine hohe Bewegungsfreiheit auf. Durch das Anziehen der Schrauben der Halbschalen, wird die ausgerichtete Kugel mit eingebauter Spritzeinrichtung verspannt und in Position gehalten. Der Abstand vom Mittelpunkt der Kugelblende zum Mittelpunkt des Deckels beträgt 0,14 m. Durch die exzentrische Anordnung der Kugelblende kann durch das Drehen des Deckels dessen Position zusätzlich geändert werden. Der Abstand der Düse zur Behälterwand wurde mit 0,19 m, 0,42 m

und 0,65 m variiert. Für das Versprühen im Winkel wurden die Positionen „Oben rechts“ und „Unten rechts“ festgelegt. In Abbildung 4.11 (Skizze links) ist die Position „Unten rechts“ dargestellt. Bei den Positionen wird eine direkte Beaufschlagung der Messtechnik und des Ablaufs mit dem Sprühstrahl ausgeschlossen. Die Ausrichtung der Positionen erfolgt folgendermaßen:

**Oben rechts:** Als „Oben rechts“ wird die Position bezeichnet, bei der die Kugelblende oberhalb der Mittelachse des Deckels und Behälters angeordnet ist (Abbildung 4.11, oben rechts). Für die Ausrichtung der Düse ist die Spritzeinrichtung nach unten zu drücken, bis ein Anschlag spürbar ist. Im Anschluss erfolgt eine Drehung der Spritzeinrichtung im Uhrzeigersinn entlang des Lochkreises der Kugelblende, bis die 60° Markierung erreicht ist.

**Unten rechts:** Als „Unten rechts“ wird die Position bezeichnet, bei der die Kugelblende unterhalb der Mittelachse des Deckels und Behälters angeordnet ist (Abbildung 4.11, unten rechts). Für die Ausrichtung der Düse ist die Spritzeinrichtung nach oben zu drücken, bis ein Anschlag spürbar ist. Im Anschluss erfolgt eine Drehung der Spritzeinrichtung entgegen dem Uhrzeigersinn entlang des Lochkreises der Kugelblende, bis die 300° Markierung erreicht ist.

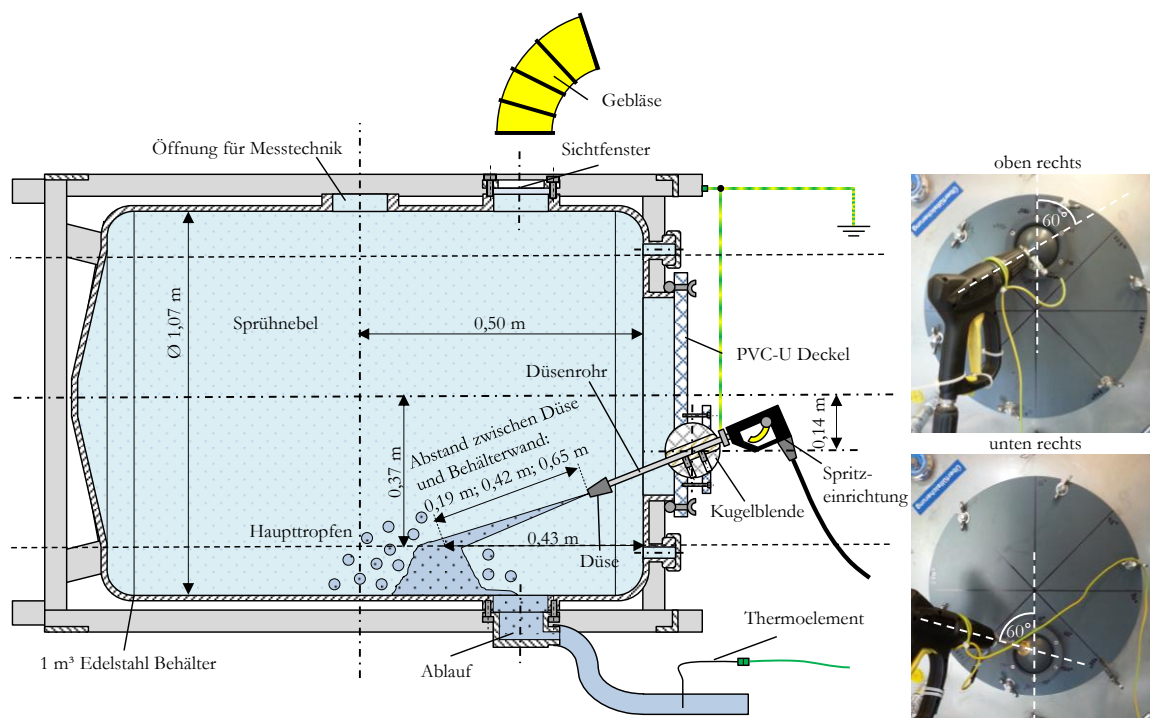


Abbildung 4.11: Modellanordnung mit Kugelblende zum Sprühen im Winkel

Um das Wasser vor dem Versprühen auf eine definierte Temperatur zu temperieren, wurde ein 1 m<sup>3</sup> Kunststoff IBC genutzt, um eine Warmwasseraufbereitung aufzubauen (Abbildung 4.12). Durch die Deckelöffnung des 1 m<sup>3</sup> Kunststoff IBC's ragt der 9 kW Heizstab in das Wasser hinein. Zur Reduzierung der Abwärme über die Behälterwände, sind diese thermisch isoliert. Eine konstante Temperaturverteilung des Wassers wird durch das Umwälzen während der Erwärmung erreicht. Das sich im Wasser befindende Mantelthermolement misst dessen Temperatur. Die Eintauchtiefe ist zu variieren, um sicherzustellen, dass eine konstante Wassertemperatur vorliegt. Mit diesem Aufbau ist eine Aufheizrate von 1000 l Wasser von (7,5 ± 0,1) K/h umsetzbar. Die Aufheizrate wurde in einem Temperaturbereich von 10 °C bis 40 °C bestimmt.

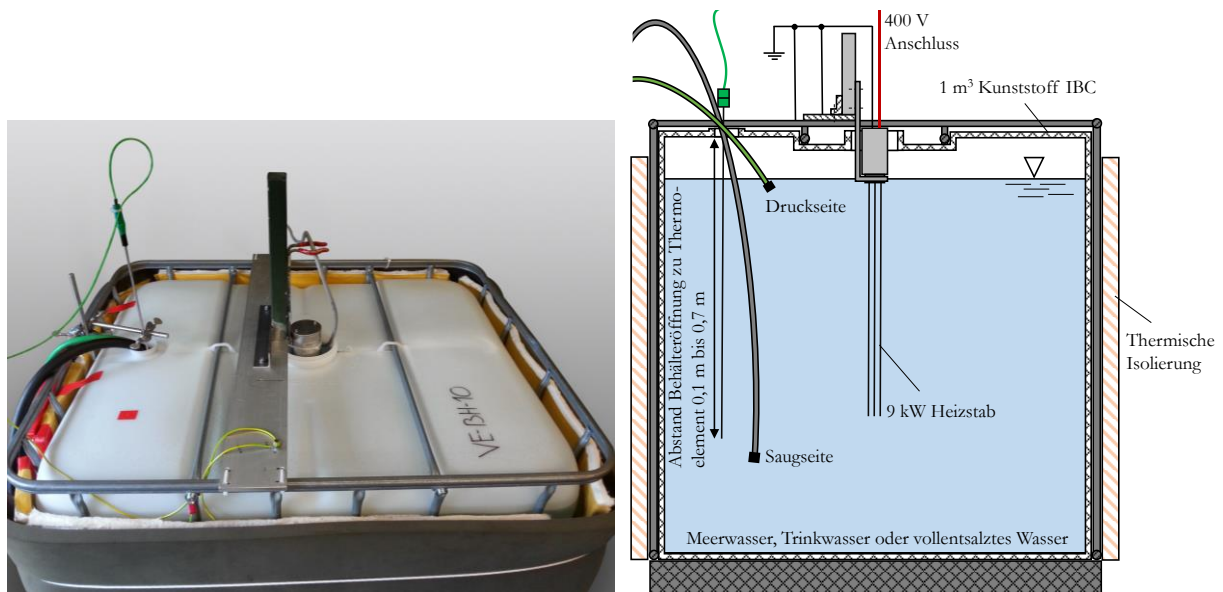


Abbildung 4.12: 1 m<sup>3</sup> Kunststoff IBC als Warmwasseraufbereitung

Zusätzlich zu den Messungen im 1 m<sup>3</sup> Behälter erfolgten Messungen am Wasserstrahl und -sprühnebel ohne die räumliche Begrenzung des Behälters. Es werden Messungen der elektrischen Feldstärke, des Raumpotentials und der übertragenen Ladung durchgeführt. Den Aufbau der Feldstärkenmessung am Wasserstrahl und -sprühnebel, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters, ist in Abbildung 4.13 gezeigt. Bei den Messungen mit Trinkwasser ist das Feldstärkenmessgerät oberhalb vom Strahl angeordnet, um ein schwerkraftbedingtes Abfließen von Wasser aus dem Messkopf des Feldstärkenmessgerätes herbeizuführen. Das hatte den Hintergrund, dass bei diesen ersten Versuchen Düsengeometrien getestet wurden, die den Strahl gegenüber einer Rundstrahldüse stark aufweiten und zu hohen Turbulenzen führen, die das Feldstärkenmessgerät stark mit Wasser beaufschlagen. Bei den Messungen mit der Rundstrahldüse hat sich gezeigt, dass eine derartig aufwändige Positionierung oberhalb des Strahls nicht notwendig ist, da nur wenig Wasser in den Messkopf eindringt. Aus diesem Grund wurden für die nachfolgenden Messungen mit vollentsalztem Wasser das in Kapitel 4.3.1 (Abbildung 4.4) gezeigte Stativ verwendet. Die Rotationsachse des Feldstärkenmessgerätes befindet sich auf der Höhe der Mittellinie des Strahls von 1,3 m. Der Abstand zwischen der Mittellinie des Strahls und dem Feldstärkenmessgerät beträgt 0,5 m.

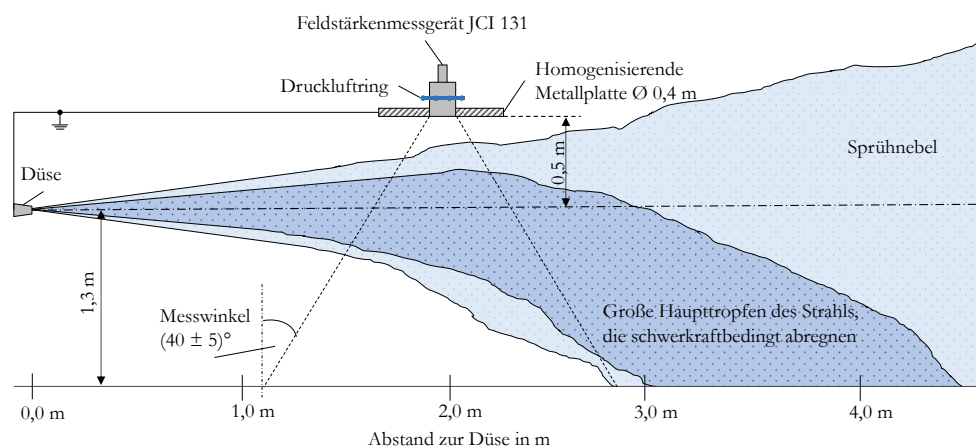


Abbildung 4.13: Feldstärkenmessung am Wasserstrahl und -sprühnebel, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters



Für die Messungen des Raumpotentials wird der Isolationsstab der Raumpotentialmessung in der Hand gehalten oder an einem Stativ befestigt und die Elektrode an den Wasserstrahl oder -sprühnebel herangeführt. Der weitere messtechnische Aufbau ist Kapitel 4.3.2 zu entnehmen. Bei den Messungen der übertragenen Ladungen am Wasserstrahl werden die in Kapitel 4.3.3 beschriebenen messtechnischen Aufbauten verwendet.

#### 4.4.2 Ergebnisse

Die Gesamtheit der durchgeführten Messungen an der Modellanordnung des 1 m<sup>3</sup> Behälters und der Messungen am Strahl, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters, ist Anhang D und Anhang E zu entnehmen.

Anhand der Messungen sind den Wasserstrahlen und -sprühnebeln Polaritäten zuzuordnen (Tabelle 4.9). Ebenfalls geht aus den Untersuchungen der dominierende Ladungstrennungsprozess hervor, der abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit der Wasserart ist.

Tabelle 4.9: Polaritäten der durch Prozesse der Ladungstrennung aufgeladenen Wasserstrahlen und -sprühnebeln, in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit der Wasserart

Ladungstrennung...	Tropfen des Strahls oder Sprühnebels	Wasserart		
		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

Beim Versprühen von **Meer-** und **Trinkwasser** findet der dominierende Ladungstrennungsprozess beim Aufprall des Strahls auf eine leitfähige geerdete Oberfläche statt. Aus diesem Grund werden bei den Untersuchungen im 1 m<sup>3</sup> Behälter höhere Raumpotentiale und elektrische Feldstärken gemessen als bei den Versuchen ohne die räumliche Begrenzung des Behälters.

Anders ist es beim Versprühen von **vollentsalztem Wasser**, wo der dominierende Ladungstrennungsprozess an der Düse erfolgt. Hier werden die höchsten Raumpotentiale und elektrischen Feldstärken ohne die räumliche Begrenzung des Behälters gemessen. Im Behälter reduziert sich das Raumpotential und die elektrische Feldstärke, da der sich beim Aufprall bildende Sprühnebel niedriger oder entgegengesetzt geladen ist.

Zusammengefasst führen die im Folgenden beschriebenen Änderungen der Parameter zu einem Anstieg der Prozesse der Ladungstrennung beim Versprühen von Wasser und zu einer Erhöhung der Aufladung des Strahls und Sprühnebels.

- Erhöhung des Pumpendrucks
- Das Versprühen in die Position „Unten rechts“, gegenüber der Position „Oben rechts“
- Reduzierung des Abstands der Düse zur Behälterwand

- Verwendung von nicht rotierenden und nicht aufweitenden Strahlen
- Temperaturerhöhung des versprühten Wassers (Faustformel: pro 1 K um 1 %)
- Reduzierung der elektrischen Leitfähigkeit
- Ein kleinerer Düsendurchmesser beim Versprühen von vollentsalztem Wasser (ohne Aufprall)
- Ein größerer Düsendurchmesser beim Versprühen von Trinkwasser und beim Aufprall von vollentsalztem Wasser

Für die Durchführung der sicherheitstechnischen Betrachtung entscheidend sind die bei den „Worst-Case“-Parametern und -Szenarien bestimmten elektrischen Feldstärken, Raumpotentiale und übertragenen Ladungen (Tabelle 4.10).

Tabelle 4.10: Bereiche der elektrischen Feldstärke, des Raumpotentials und der übertragenen Ladung der Untersuchungen im 1 m<sup>3</sup> Behälter und ohne die räumliche Begrenzung des Behälters

	Wasserart		
	Meerwasser <sup>*A</sup>	Trinkwasser	Vollentsalztes Wasser
Untersuchungen im leitfähigen geerdeten 1 m <sup>3</sup> Behälter			
Elektrische Feldstärke in kV/m	1,10 bis 7,89	-26,49 bis -3,05	-18,90 bis 41,80
Raumpotential in kV	-0,10 bis 0,61	-2,29 bis 0,51	-25,40 bis 4,59
Untersuchungen ohne die räumliche Begrenzung des Behälters			
Elektrische Feldstärke in kV/m	-	-0,95 bis 1,09	-31,40 bis 184,8
Raumpotential in kV	-0,22 bis -0,11	-0,62 bis 0,32	-48,04 (Messbereichsüberschreitung) bis 7,32
Übertragene Ladung in nC	Keine Entladungen	Keine Entladungen	-0,160 bis 0,114

<sup>\*A</sup> In Absprache mit den Kooperations- und Projektpartnern erfolgten keine Untersuchungen bei Pumpendrücken von über 500 bar

#### 4.4.3 Meilenstein 2: „Worst-Case“-Parameter und Szenarien festgelegt?

Die Festlegung der „Worst-Case“-Parameter und Szenarien ist der zweite Meilenstein, den es zu erreichen gilt. Anhand der Untersuchungen ist es gelungen die „Worst-Case“-Parameter zu ermitteln. Daraus abzuleiten und einzugrenzen sind die Parameterbereiche, die in den realen Behältern zu untersuchen sind. Beispielsweise ist ein Versprühen in der Position „Oben rechts“ nicht mehr durchzuführen und begrenzt die aufwendigen und kostenintensiven Untersuchungen an den realen Behältern auf eine unbedingt notwendige Anzahl.



## 4.5 AP 5: Untersuchungen an realen Behältern

AP 5 beinhaltet die Untersuchungen an den realen leitfähigen geerdeten mittelgroßen Behältern. Die Innendurchmesser und -längen des 6,2 m<sup>3</sup>, 16,8 m<sup>3</sup> und 44,0 m<sup>3</sup> Behälters sind Tabelle 4.2 zu entnehmen. Es wird an die Untersuchungen im 1 m<sup>3</sup> Behälter angeknüpft, um den Einfluss der größeren Abmessungen der Behälter auf die Raumladungswolke zu bestimmen. Der Unterschied gegenüber den Untersuchungen ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters ist der zusätzliche Aufprall der Tropfen des Wasserstrahls und -sprühnebels auf eine Oberfläche.

### 4.5.1 Versuchsanordnung und -durchführung

Die Versuchsanordnung und -durchführung ist vergleichbar zu der Modellanordnung im 1 m<sup>3</sup> Behälter. Beim Einbau der Feldstärkenmesstechnik sind die Adapterplatten für die realen Behälter zu nutzen (Kapitel 4.3.1). Für die Raumpotentialmesstechnik liegt der Träger aus PVC-U (Kapitel 4.3.2) auf der äußeren Mantelfläche des Behälters oder vorhandenen Trittgittern auf. Der Isolationsstab der Raumpotentialmesstechnik ist so zu positionieren, dass sich die Elektrode im Mittelpunkt des Behälters befindet. Die Untersuchungen beschränken sich auf Rundstrahldüsen. Wie im 1 m<sup>3</sup> Behälter wurde entlang der Mittelachse des Behälters (mittig) oder im Winkel zu dieser gesprüht. Bei der Bezeichnung „kurze Seite“ wurde beim 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter, bei der Hälfte der Länge der Behälter, in Richtung des Behälterdurchmessers gesprüht. Die Düsenausrichtung „Im Winkel“ entspricht beim 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter der Position „unten rechts“ (Kapitel 4.4.1). Beim 44,0 m<sup>3</sup> Behälter wurde von oben durch eine außermittige, nahe der Mantelfläche befindliche Öffnung des Behälters auf die Behälterwand oder in das Volumen des Behälters gesprüht. Der Abstand der Düse zur Behälterwand beträgt beim Versprühen in der Position „unten rechts“ in den 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter ( $0,675 \pm 0,075$ ) m und beim 44,0 m<sup>3</sup> Behälter 0,40 m. Um den Abstand zwischen Düse und Behälterwand im 16,8 m<sup>3</sup> Behälter auf 0,19 m zu reduzieren, wurde für vergleichende Messungen eine Prallplatte am Düsenrohr befestigt (Anhang F, Abbildung 11.1). Um die Abhängigkeit vom Behältervolumen und -durchmesser abzubilden, sind in den tabellarisch aufgeführten Ergebnissen (Anhang F) der Untersuchungen in den realen Behältern ergänzend die Messwerte beim Versprühen von Wasser in den 1 m<sup>3</sup> Behälter aufgeführt. Wurde das Wasser vor dem Versprühen temperiert, ist in der Spalte „Düsenausrichtung“ die Temperatur des Wassers vor dem Versprühen angegeben. Die Temperierung von 25 °C gilt nur für den 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter. Die Versuchsdurchführung entspricht der in der Modellanordnung (Kapitel 4.4.1). Außer am 44 m<sup>3</sup> Behälter sind Abläufe montiert, um eine Ansammlung von Wasser zu vermeiden. Die Untersuchungen erfolgten mit Trinkwasser und vollentsalztem Wasser.

### 4.5.2 Ergebnisse

Die Gesamtheit der durchgeführten Messungen der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials im 6,2 m<sup>3</sup>, 16,8 m<sup>3</sup> und 44,0 m<sup>3</sup> Behälters sind Anhang F zu entnehmen. Die folgende Beschreibung der Abhängigkeiten der Parameter beim Versprühen von Trinkwasser und vollentsalztem Wasser beziehen sich stets auf gleichbleibende Parameter der Flüssigkeitsstrahler, geändert wird lediglich der Behälter.

**Trinkwasser:** Der dominierende Ladungstrennungsprozess findet beim Aufprall des Strahls auf eine Oberfläche, wie bspw. der Behälterwand, statt. Aus diesem Grund werden in den Behältern

höhere Beträge der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials gemessen als bei den Untersuchungen ohne die räumliche Begrenzung des Behälters. Ein Anstieg des Behältervolumens und -durchmessers reduziert die elektrische Feldstärke und das Raumpotential, wenn die Parameter der Flüssigkeitsstrahler konstant bleiben. Die Begründung dafür ist die konstante Anzahl Ladungsträger, die in den Behälter eingebracht, bzw. beim Prozess der Ladungstrennung erzeugt wird. Steigt das Behältervolumen, reduziert sich die Tropfendichte, die Raumladungsdichte und folglich die elektrische Feldstärke und das Raumpotential.

**Vollentsalztes Wasser:** Der dominierende Ladungstrennungsprozess findet an der Düse und im Zuge der hydrodynamischen Instabilität des Strahls statt. Aus diesem Grund werden die höchsten Beträge der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials ohne die räumliche Begrenzung des Behälters gemessen oder wenn mittig in den Behälter gesprüht wird. Der sich durch den Aufprall bildende Sprühnebel ist entgegengesetzt oder im Betrag niedriger geladen als der Strahl. Die räumliche Begrenzung bewirkt, dass der Sprühnebel die Höhe der Aufladung des Strahls reduziert. Dieser Effekt ist umso stärker, je kleiner das Behältervolumen und der -durchmesser ist.

Bei einem konstanten Pumpendruck erhöht sich mit dem Düsendurchmesser der Volumenstrom. Die Geschwindigkeit der Tropfen beim Aufprall ändert sich nicht. Das bedeutet, dass ein größerer Düsendurchmesser nicht den Prozess der Ladungstrennung, sondern die Anzahl der Ladungsträger im Volumen des Behälters erhöht. Aus diesem Grund werden beim Sprühen im Winkel von **Trinkwasser** und **vollentsalztem Wasser** mit größeren Düsendurchmessern höhere elektrische Feldstärken und Raumpotentiale gemessen. Die für eine sicherheitstechnische Betrachtung ausschlaggebenden maximalen elektrischen Feldstärken und Raumpotentiale sind in Tabelle 4.11 aufgeführt. Um die Vergleichbarkeit zu den Messungen im 1 m<sup>3</sup> Behälter und ohne die räumliche Begrenzung des Behälters zu erleichtern, wurden die Messergebnisse ergänzend in Tabelle 4.11 eingetragen.

Tabelle 4.11: Bereiche der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials der Untersuchungen 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 m <sup>3</sup> Behälter		
Elektrische Feldstärke in kV/m	-26,49 bis -3,05	-18,90 bis 41,80
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	-14,06 bis -3,69	-11,95 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	-10,87 bis 0,58	-
Untersuchungen ohne die räumliche Begrenzung des Behälters		
Elektrische Feldstärke in kV/m	-0,95 bis 1,09	-31,40 bis 184,8
Raumpotential in kV	-0,62 bis 0,32	-48,04 (Messbereichs- überschreitung) bis 7,32

Beim Sprühen im Winkel ergibt sich eine homogene Raumladungsdichte im Behälter. Anhand von Gleichung 4.7 ist theoretisch eine Umrechnung der elektrischen Feldstärke am Rand in das Raumpotential im Mittelpunkt des Behälters möglich.

Es wurde erkannt, dass sich in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit der Wasserart Ableitpfade, über die im Volumen des Behälters befindlichen Tropfen, ergeben. Für die Raumpotentialmessung sind Korrekturfaktoren anzugeben, die bei der sicherheitstechnischen Betrachtung zu beachten sind. Die Bestimmung der Korrekturfaktoren  $K_R$  ist nach Gleichung 4.11 durchzuführen:

$$K_R = \frac{R \cdot E(R)}{2 \cdot \Phi(0)} \quad 4.11$$

Tabelle 4.12 zeigt die durch Gleichung 4.11 bestimmten Korrekturfaktoren. Die Berechnung ist nur durchführbar, wenn für die Kombination aus Düsendurchmesser und Pumpendruck Messwerte der elektrischen Feldstärke und des Raumpotentials vorliegen. Beim Sprühen im Winkel von vollentsalztem Wasser ergibt sich keine homogene Raumladungsdichte, wenn der Abstand zwischen Düse und Behälterwand ( $0,675 \pm 0,075$ ) m entspricht. Der Abstand ist ausreichend groß, damit sich die positiven Tropfen, die sich durch die hydrodynamische Instabilität des Strahls bilden, im Volumen des Behälters verteilen und entgegengesetzt geladen zum negativen Sprühnebel, der sich durch den Aufprall bildet, sind. Die betroffenen Messungen sind durchgestrichen.

Tabelle 4.12: Korrekturfaktor in Abhängigkeit von der Wasserart

		Korrekturfaktoren $K_R$									
		Vollentsalztes Wasser				Trinkwasser				Meerwasser	
Düsen- durchmesser in mm	Druck in bar	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 Abweichungen		<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

#### 4.6 AP 6: Sicherheitstechnische Schlussfolgerungen

Die sicherheitstechnischen Schlussfolgerungen beantworten die Fragestellung, unter welchen Bedingungen sich eine gefährliche Aufladung bei der Reinigung von kleinen und mittelgroßen Behältern erzeugen lässt. Betrachtet werden Büschelentladungen zwischen leitfähigen geerdeten Einbauten oder der leitfähigen geerdeten Behälterwand und dem als isolierend geltenden Wassersprühnebel. Bei der sicherheitstechnischen Bewertung erfolgt eine Unterscheidung zwischen Trinkwasser und vollentsalztem Wasser. Die Aussagen gelten für eine Rückstoßkraft von maximal 250 N, mit der Ausnahme des Versprühens von Trinkwasser in kleine Behälter mit maximal 1 m<sup>3</sup>.

**Trinkwasser: Kleine, leitfähige geerdete Behälter bis 1 m<sup>3</sup>:** Das maximale gemessene Raumpotential beträgt -2,29 kV. Der dem Raumpotential zugehörige Düsendurchmesser beträgt 2,00 mm, bei einem Pumpendruck von 500 bar. Das Raumpotential ist im Sinne der sicherheitstechnischen Bewertung mit dem Korrekturfaktor (Kapitel 4.5.2) auf -5,73 kV zu korrigieren. Als „Worst-Case“-Annahme kann zusätzlich die Temperatur des versprühten Wassers von 32,6 °C auf 100 °C (kein Verdampfen) erhöht werden. Unter der in Kapitel 4.1.1 beschriebenen und durch Messungen bestätigte Erhöhung des Effektes der Ladungstrennung um 1 % pro 1 K, ist ein maximales Raumpotential von -9,57 kV möglich. Selbst unter den Parametern, die den Prozess der Ladungstrennung begünstigen, dem angewendeten Korrekturfaktor und einer Temperaturerhöhung des versprühten Wassers auf 100 °C überschreitet das Raumpotential nicht den in Kapitel 4.1.4 angegebenen Grenzwert aus [3] für das Raumpotential von 58 kV. Beim Versprühen von Trinkwasser in kleine Behälter mit einem Volumen von maximal 1 m<sup>3</sup> besteht keine elektrostatische Zündgefahr für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA, deren MZE 0,24 mJ beträgt oder übersteigt. Aus den in [16, 29] durchgeführten Versuchen mit einer elektrostatischen Applikationsanlage und dem Versprühen von Flüssigkeiten, die eine zweite Phase beinhalten, geht hervor, dass in einem 1 m<sup>3</sup> Behälter das Raumpotential einen Betrag von 16 kV nicht übersteigt. Aus diesem Grund kann beim Versprühen von Trinkwasser in einen 1 m<sup>3</sup> Behälter die Rückstoßkraft von 250 N überschritten werden, ohne dass mit einer elektrostatischen Zündgefahr für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA, deren MZE 0,24 mJ beträgt oder übersteigt, zu rechnen ist.

**Mittelgroße, leitfähige geerdete Behälter bis 44 m<sup>3</sup> und einem Behälterdurchmesser von bis zu 2,5 m:** Die Messungen in den mittelgroßen Behältern unterschreiten den Grenzwert des Raumpotentials von 58 kV und den Grenzwert der elektrischen Feldstärke von 100 kV/m. Bei Einhaltung der Rückstoßkraft von 250 N ist nicht mit elektrostatischen Zündgefahren für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA, deren MZE 0,24 mJ beträgt oder übersteigt, zu rechnen. Ergänzend gelten bis zu einem Pumpendruck von 500 bar die aktuellen Grenzwerte der Behältermaße und Flüssigkeitsstrahler aus [2, 3] als sicher.

**Vollentsalztes Wasser:** Beim Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser auf eine Oberfläche treten Leuchterscheinungen auf (Abbildung 4.14). Speziell bei dünnen isolierenden Schichten ergeben sich Effekte, die optisch einer Gasentladung ähneln. Mit den Messtechniken Handcoulombmeter, Shunt und der Antennenmesstechnik konnten keine Gasentladungen nachgewiesen werden. Bei den Leuchterscheinungen kann es sich um andere Effekte handeln, deren Zündgefahr in weiterführenden Projekten zu untersuchen ist.

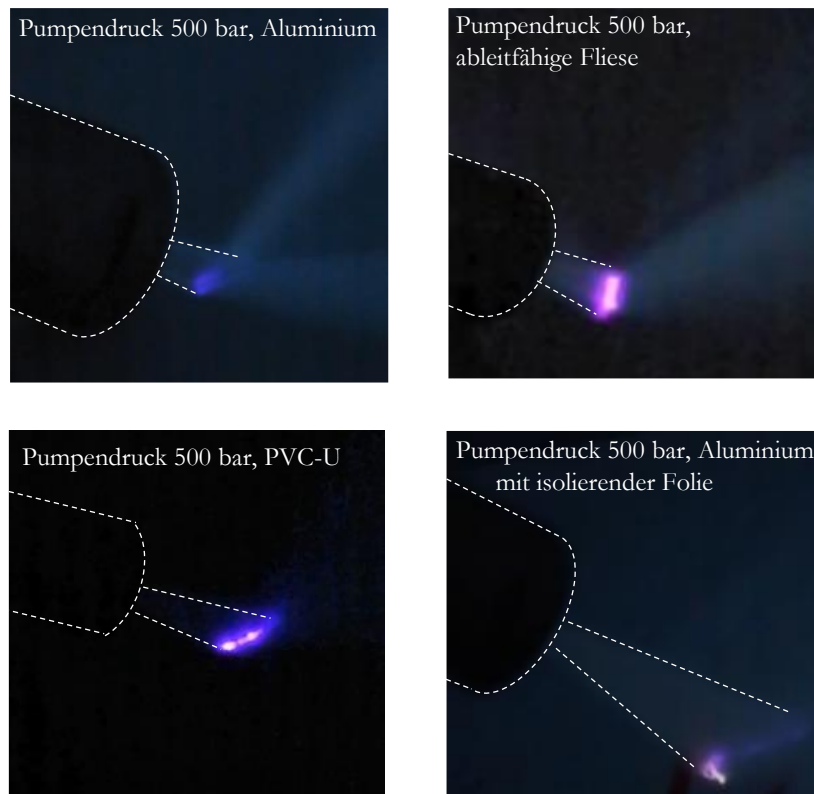


Abbildung 4.14: Leuchterscheinungen beim Aufprall des Strahls aus vollentsalztem Wasser auf Aluminium (oben links), ableitfähige Fliese (oben rechts), PVC-U (unten links) und Aluminium, beschichtet mit einer dünnen isolierenden Folie (unten rechts)

Beim Versprühen von vollentsalztem Wasser ergeben sich Raumpotentiale von über 48 kV. Der Messbereich der Raumpotentialmesstechnik wurde bereits bei einem Pumpendruck von 500 bar überschritten. Die Messungen der elektrischen Feldstärken an verschiedenen Düsendurchmessern zeigen, dass durch eine Reduzierung des Düsendurchmessers höhere Raumpotentiale zu erwarten sind, die den Grenzwert des Raumpotentials von 58 kV überschreiten. Die gemessenen elektrischen Feldstärken überschreiten bestätigend den Grenzwert von 100 kV/m. Beim Versprühen von vollentsalztem Wasser ergibt sich erschwerend die Eigenheit, dass der sich durch die hydrodynamische Instabilität ablösende Sprühnebel entgegengesetzt zum Strahl geladen ist. Daraus folgt, dass nicht nur das Raumpotential des Strahls oder Sprühnebels gegen Erdpotential betrachtet werden muss, sondern auch die Potentialdifferenz zwischen dem Strahl und Sprühnebel.

Da zum aktuellen Zeitpunkt nicht feststeht, ob durch die Leuchterscheinungen beim Aufprall des Strahls, durch die hohen Raumpotentiale und hohen elektrischen Feldstärken eine Zündgefahr zu erwarten ist, sind die aktuell geltenden Grenzwerte der Behältermaße und der Flüssigkeitsstrahler aus [2, 3] einzuhalten. Um hohe Raumpotentiale beim Versprühen von vollentsalztem Wasser zu vermeiden, gilt als Empfehlung Düsendurchmesser von unter 1,00 mm und Strahlen, die in das Volumen des Behälters ausgerichtet sind, zu vermeiden.

Das Auftreten von isolierten Leitern, auch solchen in Form von zusammenhängenden herabfallenden Wassermassen oder Strahlsegmenten, wird vernachlässigt, da mit deren Auftreten unter den Bedingungen der durchgeführten Untersuchungen und Besichtigungen der Behälterreinigungen nicht zu rechnen ist. Treten diese prozessbedingt auf, ist eine gesonderte sicherheitstechnische Betrachtung durchzuführen.

## 5 Veröffentlichungen von Dritten zur Forschungsthematik

Seit Projektbeginn wurde eine relevante Veröffentlichung von Dritten zur Forschungsthematik veröffentlicht, die nicht explizit im Literaturverzeichnis aufgeführt ist:

- SCHIERDING, C.: *Eignung von Feldmühen als rückführbares Messmittel im elektrostatischen Feld*. Technische Universität Braunschweig; Verlag Dr. Hut. Dissertation. 2021

Die Dissertation beinhaltet wesentliche Erkenntnisse zur Eignung von Feldstärkenmessgeräten als rückführbares Messmittel im elektrostatischen Feld. Die Erkenntnisse waren übertragbar auf die Feldstärkenmessgeräte, wie sie in diesem Forschungsprojekt eingesetzt wurden.



## 6 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

**Messtechnik:** Die Feldstärkenmesstechnik, Raumpotentialmesstechnik und Messtechnik der übertragenen Ladung wurden für den Einsatz in sprühnebelbelasteter Umgebung und für Messungen direkt am Strahl ausgelegt. Feldstärkenmessgeräte werden im Plattenkondensator kalibriert. Die festen Oberflächen des Kalibrieraufbaus sind ungleich zu Wasserstrahlen und -sprühnebeln. Anhand von Messungen an Strahlen bekannten Raumpotentials konnte die Eignung des Messgerätes unter bestimmten Voraussetzungen bestätigt werden. Weiterhin hat sich durch die Raumpotentialmessung bestätigt, dass das Feldstärkenmessgerät die im Messbereich befindlichen geladenen Tropfen mittelt. Das ist beispielweise der Fall, wenn der Sprühnebel geringer oder in der Polarität entgegengesetzt zum Strahl geladen ist. Durch die Raumpotentialmesstechnik konnte der dominierende Prozess der Ladungstrennung in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit der Wasserart bestimmt werden.

**Messergebnisse:** Die Untersuchungen liefern eine Datenbasis für künftige sicherheitstechnische Bewertungen für das Versprühen von Wasser. Es ist nun bekannt, welche Parameter den Prozess der Ladungstrennung begünstigen. Anders als in den Regelwerken und technischen Spezifikationen beschrieben, muss zwischen den Wasserarten unterschieden werden, da die elektrische Leitfähigkeit entscheidet, an welcher Stelle (Düse, Strahl oder Aufprall) die Ladungstrennung überwiegend erfolgt. Eine Übersicht, wie die Parameter beim Versprühen von Wasser die Prozesse der Ladungstrennung und die Raumladung erhöhen, zeigt Abbildung 6.1:

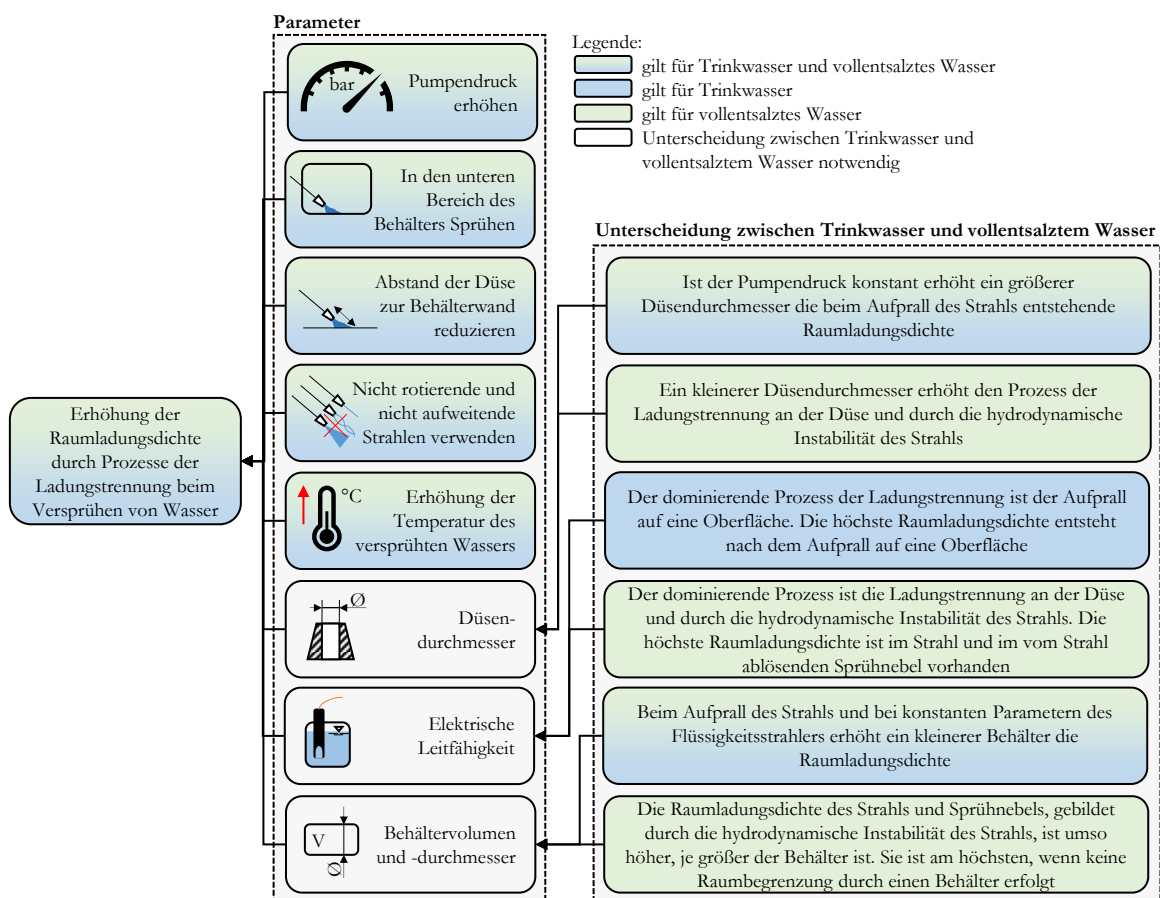


Abbildung 6.1: Übersicht, wie die Parameter beim Versprühen von Wasser die Prozesse der Ladungstrennung und die Raumladung erhöhen

**Sicherheitstechnische Bewertung:** Die in Kapitel 4.6 beschriebene sicherheitstechnische Bewertung zeigt, dass in leitfähigen geerdeten Behältern kleiner Größe bis maximal  $1 \text{ m}^3$  beim Versprühen von **Trinkwasser** nicht mit elektrostatischen Zündgefahren für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA, deren MZE  $0,24 \text{ mJ}$  beträgt oder übersteigt, zu rechnen ist. Für leitfähige geerdete mittelgroße Behälter bis maximal  $44 \text{ m}^3$  und einem Behälterdurchmesser von bis zu  $2,5 \text{ m}$  muss die Rückstoßkraft  $250 \text{ N}$  unterschreiten, um eine elektrostatische Zündgefahr für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA, deren MZE  $0,24 \text{ mJ}$  beträgt oder übersteigt, sicher auszuschließen oder es sind die aktuell geltenden Grenzwerte der Behältermaße und Flüssigkeitsstrahler aus [2, 3] einzuhalten. Die sicherheitstechnische Bewertung gilt für die in Tabelle 4.2 festgelegten Parameterbereiche und ausschließlich für Büschelentladungen, ausgehend vom Sprühnebel oder Strahl. Isolierte Leiter in Form von zusammenhängenden Wassermassen sind nicht Bestandteil der sicherheitstechnischen Bewertung. Eine Übersicht der sicherheitstechnischen Bewertung zeigt Abbildung 6.2:

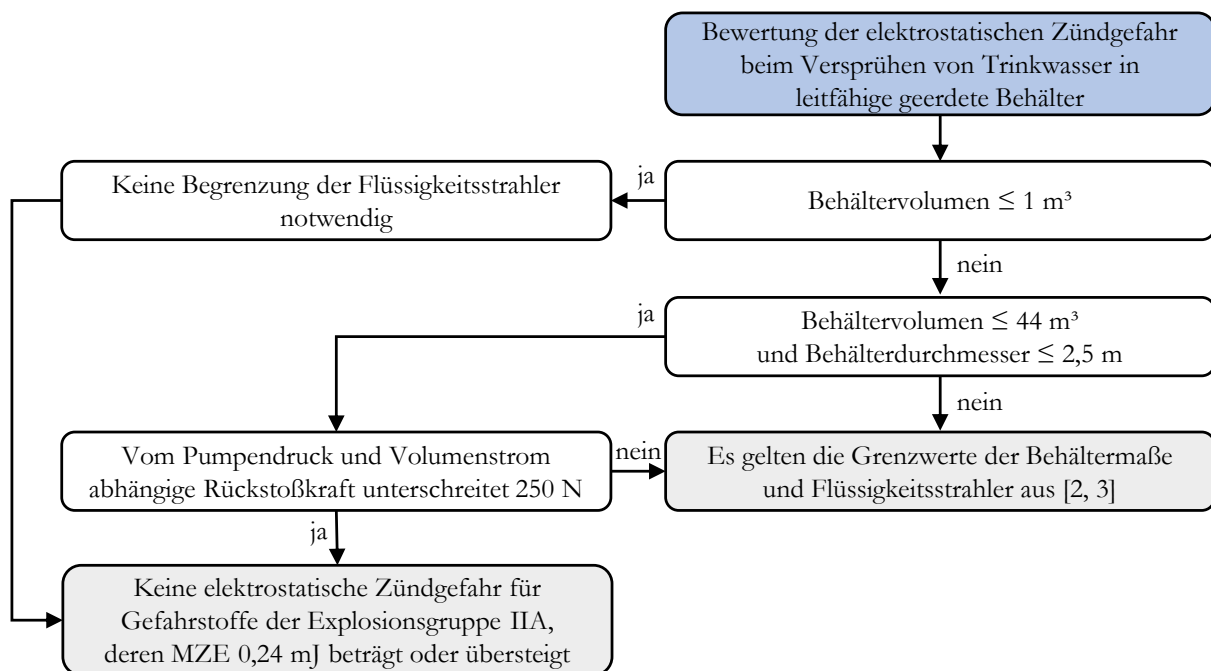


Abbildung 6.2: Sicherheitstechnische Bewertung elektrostatischer Zündgefahren beim Versprühen von Trinkwasser in leitfähige geerdete Behälter

Beim Versprühen von **vollentsalztem Wasser** sind aufgrund der Leuchterscheinungen beim Aufprall des Strahls, den hohen Raumpotentialen und hohen elektrischen Feldstärken die aktuell geltenden Grenzwerte der Behältermaße und Flüssigkeitsstrahler aus [2, 3] einzuhalten.

## 7 Umsetzungs- und Verwertungsplan

Es wird angestrebt in weiterführenden Forschungsprojekten, die in Zusammenarbeit mit der Industrie erfolgen, die Herkunft und Zündfähigkeit der Leuchterscheinungen beim Aufprall des Strahls von vollentsalztem Wasser zu bestimmen. Ist eine Zündgefahr sicher auszuschließen, sind unter bestimmten Voraussetzungen die sicherheitstechnischen Aussagen von Trinkwasser auf das Versprühen von vollentsalztem Wasser zu übertragen. Die Datenbasis und die Messtechnik ist zu



verwenden, um in weiterführenden Projekten die in Tabelle 4.1 zusammengefassten Parameter weiter abzuarbeiten und den Einfluss auf den Prozess der Ladungstrennung zu untersuchen.

Um die Erkenntnisse zur Messtechnik und der sicherheitstechnischen Bewertung der Öffentlichkeit zugänglich zu machen, ist ein Beitrag mit Veröffentlichung im Jahre 2023 bei einer Konferenz geplant. In Frage dafür kommen die 15. Fachtagung Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit in Köthen und/oder die Electrostatics 2023 in London. Im Juni 2022 erfolgt bereits ein Vortrag beim ProcessNet-Arbeitsausschuss Elektrostatische Aufladung (AA-ESA) in Frankfurt am Main.

In Absprache mit Experten der Elektrostatik, wie z. B. im Arbeitskreis „Themenfeld Elektrostatik“ des Sachgebiets Explosionsschutz der DGUV, ist eine Einarbeitung der Erkenntnisse in die nationale technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 727 und darüber hinaus eine Einarbeitung in die internationale technische Spezifikation IEC TS 60079-32-1 anzustreben. Im Zuge dessen ist ein Vorschlag für eine mögliche Bewertung für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIB zu diskutieren.

## 8 Danksagung

Wir möchten die Gelegenheit nutzen und uns persönlich und im Namen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig sehr herzlich bei allen am Projekt beteiligten Personen für die großartige Unterstützung bedanken. Ein besonderer Dank geht an die Industriepartner, die im Laufe des Projekts mit ihrem Know-How, großen Engagement und den Maschinen einen enorm großen Beitrag geleistet haben. Ein ebenfalls großer Dank geht an die DGUV und die Berufsgenossenschaften, die das Projekt finanziell gefördert haben. Zu guter Letzt möchten wir uns bei allen Experten der Elektrostatik und dem Forschungsbegleitkreis „Behälterreinigung“ für die regen Diskussionen bedanken.

## 9 Literaturangaben

- [1] 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
- [2] TECHNISCHE REGEL FÜR GEFahrSTOFFE: *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))
- [3] 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
- [4] LÜTTGENS, G. ; SCHUBERT, W. ; LÜTTGENS, S. ; PIDOLL, U. von ; EMDE, S.: *Statische Elektrizität : Durchschauen - Kontrollieren - Einsetzen*. Weinheim : Wiley-VCH, 2020
- [5] KRÄMER, H.: *Kriterien zur Beurteilung der Zündgefahren infolge elektrostatisch aufgeladener Flüssigkeiten : Übersichtsbeiträge*. In: *Chemie Ingenieur Technik* 55 (1983), Nr. 6, S. 419–428
- [6] LENARD, P.: *Über Wasserfallelektrizität und über die Oberflächenbeschaffenheit der Flüssigkeiten*. In: *Annalen der Physik und Chemie* 352 (1915), Nr. 12, S. 463–524
- [7] LENARD, P.: *Ueber die Electricität der Wasserfälle*. In: *Annalen der Physik und Chemie* 282 (1892), Nr. 8, S. 584–636

- [8] PIERCE, E. T.: *WATERFALLS, BATHROOMS AND--PERHAPS--SUPERTANKER EXPLOSIONS*. In: *SAE technical papers* (1970), Nr. 700922, S. 89–96
- [9] ZENTRAKKOMMISSION FÜR DIE RHEINSCHIFFFAHRT ; OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM: *ISGINTT : Internationaler Sicherheitsleitfaden für die Binnenschifffahrt und Binnentankterminals*. erste Auflage. Strasbourg : Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, 2010
- [10] 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
- [11] STEEN, H. (Hrsg.): *Handbuch des Explosionsschutzes*. Weinheim : Wiley-VCH, 2000
- [12] 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
- [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] WOZNIAK, G.: *Zerstäubungstechnik : Prinzipien, Verfahren, Geräte*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2003
- [15] 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
- [16] 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)
- [17] 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
- [18] ZELENY, John: *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
- [19] 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> – Überprüfungsdatum 2021-09-06
- [20] DGUV REGEL 100-500: *Betreiben von Arbeitsmitteln, Kapitel 2.36 Arbeiten mit Flüssigkeitsstrahlern*. Ausgabe 3/2017. Berlin : Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), 2017
- [21] HAMMELMANN MASCHINENFABRIK GMBH: *Düsentabellen A bis T*. Auflage 1/05. Oelde, 2005
- [22] BUSTIN, W. M. ; DUKEK, W. G.: *Electrostatic Hazards in the Petroleum Industry*. Letchworth, Engl. : Research Studies Press LTD., 1983 (Electrostatics and electrostatic applications series 2)
- [23] 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

- [24] ALFRED KÄRCHER SE & CO. KG: *Bedienungsanleitung HD 13/35 GE; HD 9/50 Ge*. Nr.: 59651540, Winnenden, Aufl. Jan. 2021
- [25] CHILWORTH TECHNOLOGY LIMITED: *USER MANUAL: JCI 131 / JCI 131F Adverse Conditions Electrostatic Fieldmeter*. o. J.
- [26] LANGER, T. ; BEYER, M. ; PIDOLL, U. von: *Messtechnische Charakterisierung elektrostatischer Entladungen*. In: *Technisches Messen* 75 (2008), Nr. 9, S. 516–524
- [27] BRITTON, L. G.: *Avoiding static ignition hazards in chemical operations*. New York, NY : Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1999 (A CCPS concept book)
- [28] 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
- [29] 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)
- [30] 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
- [31] 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>
- [32] MEGGER INSTRUMENTS LIMITED: *Bedienungsanleitung MIT515 / MIT525 / MIT1025 / MIT1525 : 5 kV, 10 kV und 15 kV Isolationsprüfgeräte*. Auflage 12/2020. Dover, 2020
- [33] SCHNIER ELEKTROSTATIK GMBH: *Betriebsanleitung Handcoulombmeter : Typ: HMG 11/02 Art.Nr.: 810276*. 810276-BAL-DE/EN-090120. Reutlingen, 2008
- [34] 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
- [35] 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.

## 10 Veröffentlichungen aus dem Projekt

Im Folgenden sind die Veröffentlichungen zur Thematik in Form von schriftlichen Konferenzbeiträgen, Zeitschriftenartikeln, Vorträgen ohne schriftliche Veröffentlichungen und die betreuten studentischen Arbeiten aufgeführt:

### Konferenzbeiträge:

- 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:

- 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

### 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 beim Versprühen von Flüssigkeiten – Untersuchung praxisrelevanter Prozesse bei der Reinigung kleiner und mittlerer Behälter. Sitzung des Process-Net-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

**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.
- 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.

## 11 Anhang

Anhang A: Übersicht Parameter Besichtigungen Behälterreinigung .....	50
Anhang B: Gefährdungsbeurteilung für Versuche bei Industriepartnern .....	51
Anhang C: Betriebsanweisung für Versuche bei Industriepartnern .....	57
Anhang D: Messwerte der Untersuchungen am horizontalen Wasserstrahl, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters .....	59
Anhang E: Messwerte der Untersuchungen beim Sprühen von Wasser in den 1 m <sup>3</sup> Behälter .....	62
Anhang F: Messwerte der Untersuchungen beim Sprühen von Wasser in reale Behälter .....	70

## Anhang A: Übersicht Parameter Besichtigungen Behälterreinigung


In Tabelle 11.1 sind die anhand der Besichtigungen von manuellen, halbautomatischen und automatischen Behälterreinigungsprozessen in Deutschland ermittelten Parameter aufgezeigt.

Tabelle 11.1: Übersicht Parameter Besichtigungen Behälterreinigung

Unternehmen	Lechler GmbH	Mankiewicz Gebr. & Co. (GmbH & Co. KG)	Hamburg	Hamburg	Hamburg	Automatische Behälterreinigung für Fässer Hersteller Putzma	Automatische Behälterreinigung für Ansatzbehälter Hersteller Provec	BASF Coatings GmbH	Münster	Münster	Mischbehälter für Lackherstellung	Rhein Fass GmbH	Leuchwagshafen	Mannheim	Wäscheanlage für LKW-Trailer	Mannheim	Wäscheanlage für LKW-Trailer	HOYER Group/cons europe GmbH	Mannheim	Manuelle IBC Behälterreinigung (je Arbeitsschritt 3 gleichzeitig)	Mannheim	Wäscheanlage für LKW-Trailer	Gladbeck	BUCHEN Umweltservice GmbH	Holland	
Standort	Menzingen	Scheffel	Hamburg	Hamburg	Hamburg	Automatische Behälterreinigung für Fässer Hersteller Putzma	Automatische Behälterreinigung für Ansatzbehälter Hersteller Provec	Münster	Münster	Münster	Mischbehälter für Lackherstellung	Rhein Fass GmbH	Leuchwagshafen	Mannheim	Wäscheanlage für LKW-Trailer	Mannheim	Wäscheanlage für LKW-Trailer	HOYER Group/cons europe GmbH	Mannheim	Manuelle IBC Behälterreinigung (je Arbeitsschritt 3 gleichzeitig)	Mannheim	Wäscheanlage für LKW-Trailer	Gladbeck	BUCHEN Umweltservice GmbH	Holland	
Bezeichnung	Düsenkatalog, Besichtigung Unternehmen	Fließautomatische Behälterreinigung Hersteller tecos	Automatische Behälterreinigung für Fässer Hersteller Putzma	Automatische Behälterreinigung für Fässer Hersteller Putzma	Automatische Behälterreinigung für Fässer Hersteller Putzma	Automatische Behälterreinigung für Ansatzbehälter Hersteller Provec	Automatische Behälterreinigung für Ansatzbehälter Hersteller Provec	Automatische IBC Reinigungsstraße	Automatische IBC Reinigungsstraße	Mischbehälter für Lackherstellung	IBC Behälterreinigung	Rhein Fass GmbH	Leuchwagshafen	Mannheim	Wäscheanlage für LKW-Trailer	Mannheim	Wäscheanlage für LKW-Trailer	HOYER Group/cons europe GmbH	Mannheim	Manuelle IBC Behälterreinigung (je Arbeitsschritt 3 gleichzeitig)	Mannheim	Wäscheanlage für LKW-Trailer	Gladbeck	BUCHEN Umweltservice GmbH	Holland	
Einheit																										
<b>Behälter</b>																										
Werkstoff	-	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	Edelstahl	Metall	Kunststoff (PE)	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	Metall	
Volumen	m <sup>3</sup>	bis 2	bis 0,2	bis 2	bis 2	bis 2	bis 2	bis 2	bis 25	bis 25	1 bis 1,6	1 bis 1,6	1 bis 30	1 bis 30	1 bis 30	1 bis 30	1 bis 30	1 bis 30	1 bis 30	1 bis 30	1 bis 30	1 bis 30	1 bis 30	1 bis 30		
Durchmesser	m	bis 24	-	-	-	-	-	-	2 (bis 3,6)	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1		
Geometrie	-	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch, zylindrisch	quadratisch, zylindrisch		
Rückstände	%	bis 10	bis 10	bis 10	bis 10	bis 10	bis 10	bis 10	bis 10	bis 5	5	5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10		
<b>Reinigungs-equipment</b>																										
Volumenstrom	l/s	bis 10,65	1,25	1,39 bis 2,00	1,39 bis 2,00	1,39 bis 2,00	1,39 bis 2,00	1,39 bis 2,00	bis 0,83	-	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83		
Pumpendruck	bar	bis 12	bis 10	bis 10	bis 10	bis 10	bis 10	bis 10	bis 50	bis 12	80 bis 180	80 bis 180	80 bis 180	80 bis 180	80 bis 180	80 bis 180	80 bis 180	80 bis 180	80 bis 180	80 bis 180	80 bis 180	80 bis 180	80 bis 180	80 bis 180		
Spritzzeit	min	von 3 bis 12	-	von 5 bis 10	von 5 bis 10	von 5 bis 10	von 5 bis 10	von 5 bis 10	-	-	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)	15 s (10 s Pause)		
<b>Düse/n</b>																										
Position	-	2/3 der Höhe	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig/Mannloch	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig	mittig		
Anzahl Düsen	Anzahl	von bis	1	4	4	4	4	4	bis 4	1	1	1	bis 3	bis 3	bis 3	bis 3	bis 3	bis 3	bis 3	bis 3	bis 3	bis 3	bis 3	bis 3		
Geometrie	-	Rund-, Flach- und Rotationsdüsen	Rundstrahl rotierend (Zielstrahlreiner)	Rundstrahl rotierend (Zielstrahlreiner)	Rundstrahl rotierend (Zielstrahlreiner)	Rundstrahl rotierend (Zielstrahlreiner)	Rundstrahl rotierend (Zielstrahlreiner)	Rundstrahl rotierend (Zielstrahlreiner)	Rundstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend	Flachstrahl manuell Rotation automatisiert	Flachstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend	Rundstrahl rotierend		
Durchmesser	mm	von bis	-	5	3	3	3	3	bis 4	bis 2,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Tropfengröße	µm	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
<b>Reinigungsmedium</b>																										
Bezeichnung	-	Gemisch organischer Lösemittel; Burylacetat, Xylol, Methoxypropylacetat	Gemisch organischer Lösemittel; Burylacetat, Xylol, Methoxypropylacetat	Gemisch organischer Lösemittel; Burylacetat, Xylol, Methoxypropylacetat	Gemisch organischer Lösemittel; Burylacetat, Xylol, Methoxypropylacetat	Gemisch organischer Lösemittel; Burylacetat, Xylol, Methoxypropylacetat	Gemisch organischer Lösemittel; Burylacetat, Xylol, Methoxypropylacetat	Gemisch organischer Lösemittel; Burylacetat, Xylol, Methoxypropylacetat	Gemisch organischer Lösemittel; Burylacetat, Xylol, Methoxypropylacetat	Zum Vorspülen Reinigungsmedium und Regenerat	Natronlauge-Wasser-Gemisch	Leitungswasser oder in Verbindung mit Aceton	Lauge, Zitronensäure, Seifen, Wasser	zu 90% Leitungswasser	Leitungswasser	Leitungswasser	Leitungswasser	Leitungswasser	Leitungswasser	Leitungswasser	Leitungswasser	Leitungswasser	Leitungswasser	Leitungswasser	Leitungswasser	
Leitfähigkeit	µS/m	-	-	-	-	-	-	-	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4		
Anzahl Phasen	-	1 später Mehrphasig	1 später Mehrphasig	1 später Mehrphasig	1 später Mehrphasig	1 später Mehrphasig	1 später Mehrphasig	1 später Mehrphasig	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2	1 bis 2		
Temperatur	°C	bis 200	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40	15 bis 40		
Kreislauf	-	Schleimbildung, Auffüllung mit frischem Medium	Schleimbildung, Auffüllung mit frischem Medium	Schleimbildung, Auffüllung mit frischem Medium	Schleimbildung, Auffüllung mit frischem Medium	Schleimbildung, Auffüllung mit frischem Medium	Schleimbildung, Auffüllung mit frischem Medium	Schleimbildung, Auffüllung mit frischem Medium	Schleimbildung, Auffüllung mit frischem Medium	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung	Mit Filter und Nachschärfung		
Luftanteil im Zulauf	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Einsatz von Luft/Dampf	-	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein		
<b>Sonstiges</b>																										
Erdung	-	Erdeklemme	Fließband	Durch Gitter	Durch Gitter	Durch Gitter	Durch Gitter	Durch Gitter	Erdeklemme	Förderband	Boden und Gitter	Erdeklemme	Erdeklemme	Erdeklemme	Erdeklemme	Erdeklemme	Erdeklemme	Erdeklemme	Erdeklemme	Erdeklemme	Erdeklemme	Erdeklemme	Erdeklemme	Erdeklemme		
Umwelt	-	Klimatisierte Halle	Klimatisierte Halle	Klimatisierte Halle	Klimatisierte Halle	Klimatisierte Halle	Klimatisierte Halle	Klimatisierte Halle	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert	nicht klimatisiert		
Ansammlung von Wasserlassen	Ja/Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein		

## Anhang B: Gefährdungsbeurteilung für Versuche bei Industriepartnern

Beispielhaft ist die Gefährdungsbeurteilung der Versuche bei der Fa. BUCHEN UmweltService GmbH aufgeführt:


 Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin	<b>Gefährdungsbeurteilung</b> <b>Durchführung von Messungen beim</b> <b>Hochdruckversprühen von Wasser</b> <b>in einen 1 m<sup>3</sup> und 7 m<sup>3</sup> Behälter</b> <b>und beim Sprühen auf dem Freifeld</b> gemäß BetrSichV §3 und GefStoffV §6	03/2021

OE.:	3.73
------	------

1. Stammdaten				
<b>Labora Aufbau:</b> Erfassung der elektrostatischen Messgrößen Potential, elektrische Feldstärke und ggf. Entladungen beim Hochdruckversprühen von Wasser bei bis zu 2700 bar in einen 1 m <sup>3</sup> und 7 m <sup>3</sup> Behälter und beim Sprühen auf dem Freifeld.				
<b>Baujahr:</b> 2021		<b>Standort:</b> BUCHEN UmweltService GmbH, Weiterbildungszentrum, Weselerstr. 100, 46562 Voerde (Emmelsum)		
OE-Leitung/Verantwortlicher: PTB Braunschweig, Verantwortlich für Messtechnik: Arbeitsgruppenleiter 3.73 Dr. Martin Thedens, Durchführung durch wissenschaftlichen Mitarbeiter 3.73 Florian Baumann BUCHEN UmweltService GmbH, Verantwortlich für Hochdruckreinigungstechnik				
<b>Gefährdungsbeurteilung für Standort nach Arbeitsschutzgesetz durchgeführt?</b> <input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein				
2. Mögliche Gefährdungen durch den Laboraufbau und den Betrieb				
<b>mechanische Gefährdung</b>		<b>Elektrische Gefährdung</b>	<b>Chemische Gefährdung</b>	
<input type="checkbox"/> Quetsch-, Scher- und Schnittgefahr <input type="checkbox"/> Fangstellen und offene bewegte Teile <input checked="" type="checkbox"/> Sturz- und Stolpergefahr <input checked="" type="checkbox"/> Absturzgefahr		<input checked="" type="checkbox"/> Gefährliche Körperdurchströmung <input checked="" type="checkbox"/> Lichtbögen <input checked="" type="checkbox"/> Elektromagnetische Felder <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Flüssigkeiten, Dämpfe, Gase <input type="checkbox"/> Feststoffe, Stäube <input type="checkbox"/> sonstige Gefahrstoffe <input type="checkbox"/>	
<b>Brand / Explosion</b>		<b>Thermische Gefährdung</b>	<b>Physikalische Einwirkungen</b>	
<input type="checkbox"/> Explosionsfähige Gemische <input type="checkbox"/> potenzielle Zündquellen bei Vorhandensein explosionsfähiger Gemische <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/> Heiße Medien (heiße Oberflächen) <input type="checkbox"/> Kalte Medien (kalte Oberflächen, Kältemittel) <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Lärm <input type="checkbox"/> Nichtionisierende und ionisierende Strahlung <input type="checkbox"/> Radioaktive Strahlung <input type="checkbox"/> Ganz- / Teilkörperschwingung Vibrationen	
<b>Druck</b>		<b>Sonstiges</b>	<b>Sonstiges</b>	
<input type="checkbox"/> Freisetzung gespeicherter Energie <input checked="" type="checkbox"/> Hochdruckwasserstrahlen		<input type="checkbox"/> Informationsaufnahme, Erkennbarkeit <input type="checkbox"/> Handhabung von Stellteilen	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
3. Nutzungsbezogene Anforderungen (technisch organisatorisch, personenbezogen)				
3.1 Geräteinformation		Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Betriebsanleitung, Herstellerdokumentation, Sicherheitsinfos vorhanden?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Für Messgeräte der PTB und Hammelmann Hochdrucktechnik: Vorhanden, sortiert und vom PC-Arbeitsplatzes aus leicht erreichbar.
Sind diese für alle Beschäftigten zugänglich?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Nach Absprache mit Florian Baumann (PTB) sind diese Informationen einsehbar.
Kennzeichnung (Hersteller, technische Daten), Gefahrenhinweise vorhanden?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Werden Versuche im Freien durchgeführt, wird der Bereich mit Warnhinweisen „Achtung Hochdruckwasserstrahl“ versehen und gesperrt.
3.2 Bereitstellung und Nutzung		Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Raumbedarf/Beleuchtung/Belüftung ausreichend?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Instandhaltungsfreundliche Gestaltung?		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	


Stand: 03/2021



 Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin	<b>Gefährdungsbeurteilung</b> <b>Durchführung von Messungen beim</b> <b>Hochdruckversprühen von Wasser</b> <b>in einen 1 m<sup>3</sup> und 7 m<sup>3</sup> Behälter</b> <b>und beim Sprühen auf dem Freifeld</b> gemäß BetrSichV §3 und GefStoffV §6	03/2021
---	---	---------


3. Nutzungsbezogene Anforderungen (Fortsetzung Seite 1)			
3.2 Bereitstellung und Nutzung (Fortsetzung Seite 1)	Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Gibt es Wechselwirkungen mit anderen Tätigkeiten im Umfeld, die zu einer Gefährdung führen können Wenn ja: Erläuterung unter Punkt 6.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Während der Versuche finden keine Schulungen statt. Beim Sprühen ins Freie wird der Bereich abgesperrt (6 m Radius).
Werden Geräteinformationen beachtet?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ist die Ver- oder Entsorgung/Verbrauch von Material, Betriebs- oder Hilfsstoffen oder Energie ohne Umweltbelastungen/Gefahren geregelt?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Entsorgung des Abwassers erfolgt durch Ablauf in Halle. Das Wasser und die Behälter sind nicht kontaminiert mit Gefahrstoffen.
Ist der Aufbau augenscheinlich mängelfrei?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Der Aufbau der vormontierten Messgeräte wird innerhalb der PTB auf Mängel geprüft (beschädigte Kabel etc.).
Sind die Benutzer unterwiesen?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diese Gefährdungsbeurteilung wird vor Ort allen Beteiligten vor der Durchführung der Versuche zur Verfügung gestellt.
Alleinarbeit gestattet?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Alleinarbeit ist durch die Art der Versuche nicht möglich.
Sind ein sicherer Zugang zum Aufbau und ein gefahrloser Aufenthalt gewährleistet?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Der 7 m <sup>3</sup> Behälter besitzt eine Plattform, auf der sicher gearbeitet werden kann. Für das Versprühen wird durch Firma BUCHEN ein Podest vor dem 7 m <sup>3</sup> Behälter aufgebaut.
Sind außergewöhnliche Ereignisse/Vorkommnisse bekannt, die bereits zu einem Unfall/Gefährdung geführt haben? Wenn ja, bitte kurz getroffene Maßnahmen angeben.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3.3 Schutzmaßnahmen	Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Sind Schutzeinrichtungen vorhanden und wirksam?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Für das Hochdruckversprühen von Wasser gelten die Schutzeinrichtungen der Firma BUCHEN.
Sind Vorkehrungen für sichere Änderung/Wartung/Instandsetzung getroffen (Stillstand, Sicherung gegen unabsichtliches Wiedereinschalten)?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Für das Hochdruckversprühen von Wasser gelten die Schutzeinrichtungen der Firma BUCHEN.
Sind Gefahrenkennzeichen/Gefahrenhinweise vorhanden?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Werden Versuche im Freien durchgeführt, wird der Bereich mit Warnhinweisen „Achtung Hochdruckwasserstrahl“ versehen und gesperrt.
Sind Signal- und Warneinrichtungen vorhanden?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Werden Versuche im Freien durchgeführt, wird der Bereich mit Warnhinweisen „Achtung Hochdruckwasserstrahl“ versehen und gesperrt.

Stand: 03/2021

 Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin	<b>Gefährdungsbeurteilung</b> <b>Durchführung von Messungen beim</b> <b>Hochdruckversprühen von Wasser</b> <b>in einen 1 m<sup>3</sup> und 7 m<sup>3</sup> Behälter</b> <b>und beim Sprühen auf dem Freifeld</b> gemäß BetrSichV §3 und GefStoffV §6	03/2021
---	---	---------


3. Nutzungsbezogene Anforderungen (Fortsetzung Seite 2)			
3.3 Schutzmaßnahmen (Fortsetzung Seite 2)	Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Nottaster / Notaus vorhanden?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Für die Messtechnik von Seiten der PTB wird kein Notaus benötigt. Die Hochdrucktechnik der Firma Hammelmann besitzt ab Werk einen Notaus.
Wenn nein: Nachrüstung erfolgt bis (Datum)			
3.4 Betriebsanweisungen	Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Wurde aufgrund dieser Gefährdungsbeurteilung eine Betriebsanweisung für den Aufbau erstellt und wird diese regelmäßig überprüft?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Prüfung nicht notwendig, da einmalige Versuchsdurchführung
Werden die Beschäftigten anhand der Betriebsanweisung und ggf. weiterer Unterlagen angemessen unterwiesen?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Die Betriebsanweisung wird zusammen mit dieser Gefährdungsbeurteilung allen Beteiligten vor den Versuchen zur Verfügung gestellt. Beide Dokumente werden während der Versuche gut sichtbar ausgehängt.
4. Technische Anforderungen			
4.1 Befehleinrichtungen (Steuereinrichtungen / Bedienelemente / Schaltungen)	Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Sind diese deutlich sichtbar, identifizierbar, ggf. gekennzeichnet?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Jegliche Bedienung der Messtechnik erfolgt vom Messwagen aus. Die Bedienung darf lediglich durch Herrn Baumann erfolgen. Die sichere Bedienung des Hochdruckreinigers erfolgt durch Firma BUCHEN.
Sind diese außerhalb des Gefahrenbereichs angeordnet?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Der Messwagen ist außerhalb des Bereiches, in dem mit dem Hochdruckwasserstrahl gearbeitet wird.
Sind diese gegen unabsichtliches Betätigen gesichert?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Die Bedienung der Messtechnik erfolgt lediglich über das passwortgesicherte Notebook von Herrn Baumann. Dieses wird bei kurzzeitigem Verlassen des Arbeitsplatzes gesperrt und ist mit einem Passwort versehen oder wird bei langfristigem Verlassen des Arbeitsplatzes mitgeführt. Die sichere Bedienung des Hochdruckreinigers erfolgt durch Firma BUCHEN.
Sichere Bauweise (auf Beanspruchungen /vorhersehbare Störungen ausgelegt)?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Die sichere Bedienung des Hochdruckreinigers erfolgt durch Firma BUCHEN.
4.2 Ingangsetzen des Laboraufbaus	Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Gefahrenbereich vom Bedienungsstand aus einsehbar (Personen/Hindernisse usw.)?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Der Gefahrenbereich kann vom Messwagen eingesehen werden.
Verfügt der Aufbau über mehrere Befehleinrichtungen zum Ingangsetzen?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Der Hochdruckreiniger wird nur durch die geschulten Mitarbeiter der Firma BUCHEN angeschaltet. Die Messtechnik kann nur am Messwagen durch Herrn Baumann eingeschaltet werden.
Ist ein unabsichtliches Ingangsetzen möglich (gilt auch für Wiedereingangssetzen nach Stillstand)?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Der Hochdruckreiniger wird nur durch die geschulten Mitarbeiter der Firma BUCHEN angeschaltet. Die Messtechnik kann nur am Messwagen durch Herrn Baumann eingeschaltet werden.

Stand: 03/2021

 Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin	<b>Gefährdungsbeurteilung</b> <b>Durchführung von Messungen beim</b> <b>Hochdruckversprühen von Wasser</b> <b>in einen 1 m<sup>3</sup> und 7 m<sup>3</sup> Behälter</b> <b>und beim Sprühen auf dem Freifeld</b> gemäß BetrSichV §3 und GefStoffV §6	03/2021
---	---	---------


4. Technische Anforderungen			
4.3 Stillsetzen und Not-Aus-Schaltung	Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Ist eine Abschaltung für den gesamten Aufbau vorhanden?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Von den Messgeräten geht keine Gefahr aus. Diese werden am Messwagen bedient und ausgeschaltet. Die Druckluftzufuhr wird bei Abbruch oder Beendigung des Versuches sofort elektronisch abgeschaltet. Der Hochdruckreiniger und der Saugwagen werden durch Firma BUCHEN bedient und abgeschaltet.
Ist eine Abschaltung der gesamten Anlage bzw. einzelner gefahrbringender Teile von jedem Arbeitsplatz aus möglich?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Von den Messgeräten geht keine Gefahr aus. Diese werden am Messwagen bedient und ausgeschaltet. Die Druckluftzufuhr wird bei Abbruch oder Beendigung des Versuches sofort elektronisch abgeschaltet. Der Hochdruckreiniger und der Saugwagen werden durch Firma BUCHEN bedient und abgeschaltet.
Hat die Abschaltung Vorrang vor der Einschaltung?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wird die Messung abgebrochen, kann ein erneuter Start erst durch das Durchlaufen der Initialisierungsmaske und erneuter Bestätigung am Notebook erfolgen. Die Druckluft wird auch erst dann wieder eingeschaltet.
<b>Not-Aus-Schaltung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- vorhanden?</li> <li>- möglichst schnelles Stillsetzen?</li> <li>- ohne zusätzliche Gefährdung?</li> <li>- leicht und schnell erreichbar?</li> <li>- auffällig gekennzeichnet?</li> </ul>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Für die Messtechnik von Seiten der PTB wird kein Notaus benötigt. Am 18.12.2020 wurde mit allen Beteiligten besprochen, dass kein zusätzlicher Notaus benötigt wird.
4.4 Gefährdungen durch den Aufbau und den Messbetrieb	Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Gefahr durch herabfallende/herausschleudernde Gegenstände (ggf. Schutzeinrichtung)?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Beim Arbeiten mit Hochdruckwasserstrahlen wird eine Schutzbrille getragen.
Gefahr durch ausströmende Gase / Dämpfe / Flüssigkeiten / Stäube (ggf. Zurückhalten / Ableitung)?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Beim Arbeiten mit Hochdruckwasserstrahlen wird eine Schutzbrille getragen.
Gefahr durch unbeabsichtigt Positions-/Lageveränderung des Arbeitsmittels (ggf. Stabilisierung/Befestigung)?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Beim Anbringen der vormontierten Messtechnik besteht Gefahr durch herabfallende Teile, wie Kabel, Schläuche, Messgeräte und Metallteile. Es erfolgt eine Absprache der Handhabung mit allen Beteiligten vor Ort.
Standhalten gegen innere und äußere Belastungen (auch bei Verbindungsteilen)?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Die Schläuche und Kupplungen der Druckluft sind für die Belastung ausgelegt. Beim Sprühen in den Behälter wird der Versuch sofort abgebrochen, wenn Beschädigungen an der Behälterwand sichtbar sind.
Splitter- / Bruchgefahr (ggf. Schutzeinrichtung)?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Während des Hochdruckversprühens von Wasser auf dem Freifeld müssen alle Personen im näheren Umfeld eine Schutzbrille tragen.
sehr heiße / kalte Teile (ggf. Schutzeinrichtung)?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Brand / Erhitzung?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Stand: 03/2021

	<b>Gefährdungsbeurteilung</b> <b>Durchführung von Messungen beim</b> <b>Hochdruckversprühen von Wasser</b> <b>in einen 1 m<sup>3</sup> und 7 m<sup>3</sup> Behälter</b> <b>und beim Sprühen auf dem Freifeld</b> gemäß BetrSichV §3 und GefStoffV §6	03/2021
---	---	---------

4. Technische Anforderungen (Fortsetzung Seite 4)			
4.4 Gefährdungen durch den Laboraufbau und den Messprozess (Fortsetzung Seite 4)	Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Explosionsgefahr?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Berühren spannungsführender Teile (ggf. Schutzeinrichtung)?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Erdung aller ableitfähigen und leitfähigen Teile. Hochspannungsmesskopf, -Kabel und die Potentialmesssonde können unter Hochspannung stehen. Das Gehäuse des Hochspannungsmesskopfes ist geerdet. Das Hochspannungskabel ist isoliert. Vor der Demontage der Potentialmesssonde muss geprüft werden, ob sich noch Hochspannung auf dem System befindet. Zur Sicherheit muss eine Erdung vor der Demontage erfolgen.
Hydraulische/pneumatische/thermische Energie (Energieform angeben, auch Zu- und Ableitung beachten und)? (Leitungen, Schläuche und andere Einrichtungen zum Erzeugen oder Fortleiten dieser Energien müssen so verlegt sein, dass mechanische, thermische oder chemische Beschädigungen vermieden werden)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Die Schläuche und Kabel werden außerhalb der Durchgangsbereiche verlegt, um die Stolpergefahr und Beschädigungen zu minimieren. Die Schläuche und Kupplungen der Druckluft sind für die Belastung ausgelegt.
4.5 Anforderungen an Schutzeinrichtungen	Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Aufzählung der Schutzeinrichtungen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Für die Schutzeinrichtungen für das Hochdruckversprühen von Wasser ist Firma BUCHEN verantwortlich. Alle ableitfähigen und leitfähigen Teile des Aufbaus werden geerdet. Davon ausgenommen sind Teile der Potentialmesstechnik.
Sind die Schutzeinrichtungen stabil gebaut?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Stellen die Schutzeinrichtungen eine zusätzliche Gefährdung dar?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
können Schutzeinrichtungen umgangen / unwirksam gemacht werden (gilt auch bei Instandsetzung / Wartung)?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Besteht ein ausreichender Abstand der Schutzeinrichtungen zum Gefahrenbereich?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Schränkt die Schutzeinrichtung die Beobachtung der Messung mehr als notwendig ein?	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4.6 Instandsetzung / Wartung / Umbau	Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
nur bei Stillstand des Arbeitsmittels möglich? (ansonsten: Schutzmaßnahmen oder Durchführung außerhalb des Gefahrenbereiches)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Die Bediener des Hochdruckreinigers sind für diese Standardarbeiten geschult.
Arbeiten unter angehobenen Teilen: Sicherung gegen Herabfallen?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Der Aufbau der Potentialmesssonde wird durch Zwingen und Spanngurte gegen Herabfallen ausreichend gesichert
bei gespeicherten Energien trotz Abschaltung (z.B. Federbelastungen): gekennzeichnete Einrichtung zur Energiefreimachung vorhanden? (falls nicht möglich: Gefahrenhinweise angebracht?)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Die Druckluftversorgung muss vor der Demontage drucklos geschaltet werden. Haupthahn abdrehen und Druck ablassen.

Stand: 03/2021


 Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin	<b>Gefährdungsbeurteilung</b> <b>Durchführung von Messungen beim</b> <b>Hochdruckversprühen von Wasser</b> <b>in einen 1 m<sup>3</sup> und 7 m<sup>3</sup> Behälter</b> <b>und beim Sprühen auf dem Freifeld</b> gemäß BetrSichV §3 und GefStoffV §6	03/2021
---	---	---------

4. Technische Anforderungen <i>(Fortsetzung Seite 5)</i>			
4.7 Arbeitsumgebung / sonstige Grundsatzanforderungen	Ja	Nein	Erläuterung (ggf. bei nein: Maßnahmen, nähere Angaben)
Vorrichtung zum Abschalten jeder einzelnen Energiequelle:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Die Bedienung der Messtechnik erfolgt lediglich über das passwortgesicherte Notebook von Herrn Baumann. Dieses wird bei kurzzeitigem Verlassen des Arbeitsplatzes gesperrt und ist mit einem Passwort versehen oder wird bei langfristigem Verlassen des Arbeitsplatzes mitgeführt. Das Feldstärkenmessgerät JCI 131 ist zusätzlich durch einen Schlüsselschalter gesichert. Die sichere Bedienung des Hochdruckreinigers erfolgt durch Firma BUCHEN.
- vorhanden?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
- gegen unbefugtes/irrtümliches Betätigen gesichert? (z.B. Schloss)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
- Wiederanlaufschutz?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Schalter nur mit „Ein“- und „Aus“-Stellung?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5. Prüfungen und befähigte Personen			
Muss das Arbeitsmittel oder bestimmte Teile des Aufbaus regelmäßig geprüft werden?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Die eingesetzten Geräte der PTB durchlaufen wiederkehrende Prüfungen. Für die Prüfung des Hochdruckreinigers ist die Firma BUCHEN zuständig.
Zur Prüfung des Dokumentes werden die Personen Florian Baumann (PTB Braunschweig, Ersteller) Mario Becker (BUCHEN UmweltService GmbH) und Jens Noack (BUCHEN UmweltService GmbH) einbezogen.			
_____	_____	_____	
Datum, Unterschrift	Datum, Unterschrift	Datum, Unterschrift	
Beratung und Unterstützung erhalten Sie durch die Fachkräfte für Arbeitssicherheit der PTB, ☎ 9021			
6. Mögliche gegenseitige Gefährdungen (Bei der Verwendung des Laboraufbaus haben folgende Gefährdungen auch Auswirkungen auf die Arbeitsumgebung bzw. auf andere Beschäftigte).			
Während der Messungen finden keine Schulungen im Weiterbildungszentrum statt. Für die Versuche auf dem Freifeld wird der Bereich abgesperrt.			
7. Ihre Risikoeinschätzung			
<input type="checkbox"/> keine Gefährdung <input type="checkbox"/> Gefährdungen sind wahrscheinlich zu erwarten* <input checked="" type="checkbox"/> Gefährdungen vorhanden*			
*Bitte erstellen Sie eine Betriebsanweisung. Die Betriebsanweisung wird allen Beteiligten vorab ausgehändigt.			
Bei eventuellen Rückfragen wenden Sie sich bitte an die Fachkräfte für Arbeitssicherheit der PTB ☎ 9021 oder an den Beauftragten für Arbeitssicherheit der PTB ☎ 9170			
<b>Notrufnummer BUCHEN UmweltService GmbH Voerde: 112</b>			

Stand: 03/2021

## Anhang C: Betriebsanweisung für Versuche bei Industriepartnern

Beispielhaft ist die Betriebsanweisung der Versuche bei der Fa. BUCHEN UmweltService GmbH aufgeführt:

<b>Betriebsanweisung - Durchführung von Messungen beim Hochdruckversprühen von Wasser in einen 1 m<sup>3</sup> und 7 m<sup>3</sup> Behälter und beim Sprühen auf dem Freifeld</b>	
Firma: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Abteilung: Arbeitsgruppe 3.73 (Physikalische Zündprozesse)	Nummer: 01 Ausgabe/Stand: 03/2021
<b>1. Anwendungsbereich</b>	
Arbeitsbereich/-platz:	BUCHEN UmweltService GmbH, Weiterbildungszentrum, Weselerstr. 100, 46562 Voerde (Emmelsum), Halle des Weiterbildungszentrums
Arbeitsmittel:	PTB Braunschweig: Messwagen mit diversen Messgeräten. Feldstärkenmessgerät JCI 131 und Potentialmesstechnik vormontiert zum Einbau in die Behälter. Merck KGaA: 1 m <sup>3</sup> und 7 m <sup>3</sup> Behälter Buchen UmweltService GmbH: Hochdruckreiniger bis 2700 bar
Tätigkeit:	Erfassung der elektrostatischen Messgrößen Potential, elektrische Feldstärke und ggf. Entladungen beim Hochdruckversprühen von Wasser bis 2700 bar in einen 1 m <sup>3</sup> und 7 m <sup>3</sup> Behälter und ins Freie.
	
<b>2. Gefahren für Mensch und Umwelt</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augenverletzung durch Spritzer und Schmutzpartikel, die sich durch den Wasserstrahl lösen.</li> <li>- Elektrischer Schlag, durch die nicht entladene Potentialmesssonde.</li> <li>- Rutschgefahr durch Nässe.</li> <li>- Gefahr durch herausspritzende Flüssigkeiten unter hohem Druck (z.B. bei Schlauchbruch oder Hochdruckwasserstrahlen).</li> <li>- Stolper-, Sturz- und Absturzgefahr bei Nutzung von Leitern und der Plattform des 7 m<sup>3</sup> Behälters.</li> <li>- Stolper- und Sturzgefahr durch Schläuche und Leitungen.</li> <li>- Lärmbelastung durch Hochdruckreiniger und Kompressor.</li> <li>- Durch die Corona-Pandemie ist eine Ansteckung mit dem Coronavirus bei Kontakt mit Personen möglich.</li> </ul>	
<b>3. Schutzmaßnahmen und Verhaltensregeln</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tägliche Überprüfung der Erdung an den Komponenten am Messwagen und der Messgeräte. Vor dem Ausbau der Potentialmesssonde muss diese separat geerdet werden.</li> <li>- Der Aufbau muss auf isolierte Leiter überprüft werden. Ableitfähige und leitfähige Teile sind zu erden.</li> <li>- Vor dem Beginn von Änderungen am Versuchsaufbau ist die Entladung der Potentialmesssonde sicherstellen.</li> <li>- Unterweisung: Personen müssen vor Aufnahme ihrer jeweiligen Tätigkeit (Demontage oder Montage der vormontierten Messgeräte, Bedienung der Messgeräte, Bedienung des Hochdruckreinigers) mit den damit verbundenen Gefahren und Maßnahmen zu ihrer Abwendung unterwiesen sein und beauftragt werden. Sie müssen mit der Durchführung der ihnen übertragenen Arbeiten vertraut sein. Die Betriebsanweisung sowie die betriebsinternen Sicherheitsvorschriften der Firma BUCHEN UmweltService GmbH sind zu beachten.</li> <li>- Ein Verbandskasten ist bereitzulegen.</li> <li>- Das Bedienen des Hochdruckreinigers und Arbeiten in einem Radius von unter 6 m, ausgehend von der Düse, ist nur mit erforderlicher PSA zulässig.</li> <li>- Vor Beginn der Tätigkeiten müssen Kollegen in der unmittelbaren Umgebung über mögliche Gefährdungen informiert werden. Bei Freistraherversuchen muss der Bereich mit Schildern „Achtung Hochdruckwasserstrahl“ abgesperrt werden.</li> <li>- Das Verlegen von Schläuchen und Leitungen ist in Durchgangsbereichen zu vermeiden.</li> <li>- Leitern und Tritte dürfen nur durch unterwiesenes Personal genutzt werden. Leitern und Tritte müssen in regelmäßigen Zeitintervallen und vor ihrer Nutzung geprüft werden.</li> <li>- Es müssen die „Ärztlichen Informationen für Verletzungen durch Hochdruckwasserstrahlen“ (Visitenkarte) der Firma BUCHEN UmweltService GmbH mitgeführt und im Notfall vorgezeigt werden.</li> </ul>	



#### 4. Persönliche Schutzmaßnahmen und Verhaltensregeln

- Zur Hautreinigung nur die vorgesehenen Hautreiniger, niemals Lösemittel verwenden.
- Verkehrs- und Fluchtwege zur eigenen Sicherheit immer freihalten.
- Nur die für die jeweilige Tätigkeit vom Arbeitgeber bereitgestellte Schutzausrüstung verwenden:
- Ableitfähige Sicherheitsschuhe nach EN ISO 20345:2011 S2 tragen.
- Das Bedienen des Hochdruckreinigers und Arbeiten in einem Radius von unter 6 m, ausgehend von der Düse, ist nur mit erforderlicher PSA zulässig.
- Beim Hochdruckversprühen von Wasser sind die Augen durch eine Schutzbrille vor Spritzern und Schmutzpartikel, die sich durch den Wasserstrahl lösen, zu schützen.
- Aufgrund der aktuellen Corona-Situation muss dauerhaft eine FFP2-Maske getragen werden. Die Pausenzeiten sind einzuhalten.
- Während des Betriebs der Pumpen und beim Versprühen muss ein Gehörschutz angelegt werden.

#### 5. Verhalten bei Störungen und im Gefahrfall

Notruf: 112

- Der Sprühvorgang wird durch die Mitarbeiter der Firma BUCHEN UmweltService GmbH sofort abgebrochen. Eine Abschaltung der Messtechnik und der Druckluft erfolgt am Messwagen von Herrn Baumann.
- Können während des Betriebs auftretende Störungen durch den Anlagenführer nicht beseitigt werden, ist der Vorgesetzte bzw. die Fachabteilung für Instandhaltung zu verständigen.
- Im Brandfall zunächst mit Wassernebel, Schaum oder Trockenlöschmittel löschen. Bei starker Wärmeentwicklung Gefahrenbereich verlassen und Feuerwehr kontaktieren.

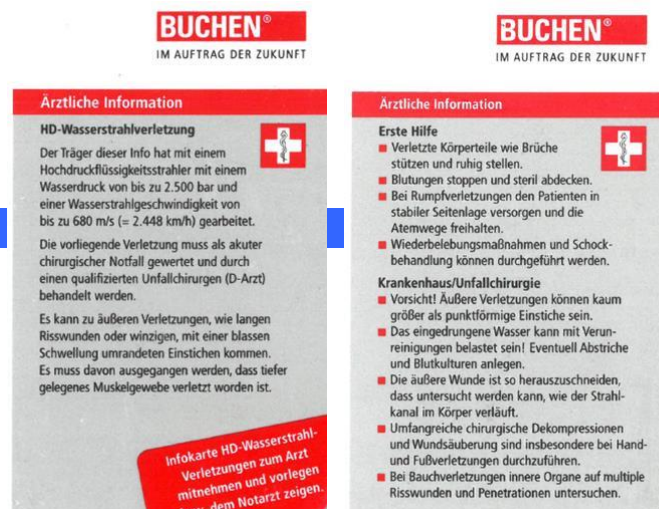
#### 6. Verhalten bei Unfällen – Erste Hilfe

Notruf: 112

- Absichern der Unfallstelle → Hochdruckreiniger, Druckluft und Messgeräte abschalten.
- Selbstschutz beachten, Verletzten aus dem Gefahrenbereich bringen.
- Notruf wählen: Wo? Wer? Was? Wie viele? Warten!
- Den Verletzten beruhigen, Erste Hilfe leisten. Ersthelfer hinzuziehen
- Unfall unverzüglich Vorgesetzten oder dessen Vertreter melden.
- Hinweis: Es müssen die „Ärztlichen Informationen für Verletzungen durch Hochdruckwasserstrahlen“ (Visitenkarte) der Firma BUCHEN UmweltService GmbH mitgeführt und dem Arzt vorgezeigt werden.

### Notruf: 112

Datum: 24.03.2021



## Anhang D: Messwerte der Untersuchungen am horizontalen Wasserstrahl, ohne die räumliche Begrenzung des Behälters

### Elektrische Feldstärke:

Tabelle 11.2: Elektrische Feldstärken beim horizontalen Versprühen von Trinkwasser, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters

Düsendurchmesser in mm	Düsen-träger	Abstand zur Düse in m	Pumpen-druck in bar	Elektrische Feldstärke in kV/m
1,05	-	1,0	100	0,34
1,05	-	1,0	200	0,38
1,05	-	1,0	300	0,49
1,05	-	1,0	400	0,36
1,05	-	1,0	500	0,38
1,05	-	2,0	100	0,36
1,05	-	2,0	200	0,69
1,05	-	2,0	300	0,98
1,05	-	2,0	400	0,86
1,05	-	2,0	500	1,01
1,05	-	3,0	100	0,15
1,05	-	3,0	200	0,47
1,05	-	3,0	300	1,09
1,05	-	3,0	400	0,62
1,05	-	3,0	500	0,83
1,05	-	4,0	100	-0,69
1,05	-	4,0	200	-0,95
1,05	-	4,0	300	-0,67
1,05	-	4,0	400	-0,90
1,05	-	4,0	500	-0,63

Tabelle 11.3: Elektrische Feldstärken beim horizontalen Versprühen von vollentsalztem Wasser, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters

Düsendurchmesser in mm	Düsen-träger	Abstand zur Düse in m	Pumpen-druck in bar	Elektrische Feldstärke in kV/m
0,50	A	1,0	1500	106,8
0,50	A	2,0	1500	184,8
0,50	A	3,0	1500	150,8
1,00	A	1,0	300	4,90
1,00	A	2,0	300	-31,40
1,00	A	3,0	300	11,40
1,00	A	4,0	300	-23,50
1,00	T	1,0	2500	35,40
1,00	T	2,0	2500	46,20
1,00	T	3,0	2500	65,00



**Raumpotential:**

Tabelle 11.4: Raumpotentiale des Strahls beim horizontalen Versprühen von Trinkwasser, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters

Düsendurchmesser in mm	Düsen-träger	Abstand zur Düse in m	Pumpen-druck in bar	Raumpotential in kV
1,05	-	1,0	100	0,08
1,05	-	1,0	200	0,14
1,05	-	1,0	300	0,12
1,05	-	1,0	400	0,20
1,05	-	1,0	500	0,08
1,05	-	2,0	100	0,00
1,05	-	2,0	200	0,18
1,05	-	2,0	300	0,23
1,05	-	2,0	400	0,24
1,05	-	2,0	500	0,23
1,05	-	3,0	100	0,00
1,05	-	3,0	200	0,10
1,05	-	3,0	300	0,16
1,05	-	3,0	400	0,14
1,05	-	3,0	500	0,25
1,05	-	4,0	100	0,00
1,05	-	4,0	200	0,00
1,05	-	4,0	300	0,14
1,05	-	4,0	400	0,10
1,05	-	4,0	500	0,08
1,00	T	0,5 bis 1,0	2500	0,32

**Messung im Sprühnebel**

1,00	T	0,5 bis 1,0	2500	-0,62
------	---	-------------	------	-------

Tabelle 11.5: Raumpotentiale beim horizontalen Versprühen von Meerwasser, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters

Düsendurchmesser in mm	Düsen-träger	Abstand zur Düse in m	Pumpen-druck in bar	Raumpotential in kV
1,05	-	0,5	500	-0,14
1,05	-	1,0	500	-0,11
1,05	-	2,0	500	-0,11
1,05	-	3,0	500	-0,22

Tabelle 11.6: Raumpotentiale beim horizontalen Versprühen von vollentsalztem Wasser, ohne die räumliche Begrenzung eines Behälters

Düsendurchmesser in mm	Düsen-träger	Abstand zur Düse in m	Pumpen-druck in bar	Raumpotential in kV
1,05	-	0,5	500	-48,04
1,05	-	1,0	500	-41,56
1,05	-	2,0	500	6,04
1,05	-	3,0	500	6,92
1,05	-	4,0	500	7,32

### Übertragene Ladung:

Tabelle 11.7: Übertragene Ladungen, gemessen mit dem Handcoulombmeter, beim Versprühen von vollentsalztem Wasser

Düsendurchmesser in mm	Düsen-träger	Pumpen-druck in bar	Messposition	Übertragene Ladung in nC
0,50	A	1500	Geerdete Düse	k. E.
0,50	A	1500	Strahl	k. E.
0,50	A	1500	Kontakt Strahl über Elektrode zur Düse	-67,9
0,50	A	500	Strahl	k. E.
0,50	A	500	Kontakt Strahl über Elektrode zur Düse	-19,0
2,00	A	500	Strahl	k. E.
2,00	A	500	Kontakt Strahl über Elektrode zur Düse	k. E.
2,00	A	200	Strahl	k. E.
2,00	A	200	Kontakt Strahl über Elektrode zur Düse	k. E.

k. E. = keine Entladung messtechnisch detektierbar

Tabelle 11.8: Übertragene Ladungen, gemessen mit dem Shunt, beim Versprühen von vollentsalztem Wasser

Düsendurchmesser in mm	Düsen-träger	Pumpen-druck in bar	Elektrodengeometrie	Krümmungsradius der Elektrode in m	Übertragene Ladung in nC (pos.)	Übertragene Ladung in nC (neg.)
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
0,50	A	1500	Kugel	0,0125	k. E.	-0,160
0,50	A	1500	Kugel	0,0030	k. E.	k. E.
0,50	A	1500	Kugel	0,0015	k. E.	k. E.
0,50	A	1500	Füllstandssensor	0,0005	k. E.	k. E.

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

## Anhang E: Messwerte der Untersuchungen beim Sprühen von Wasser in den 1 m<sup>3</sup> Behälter

Wurde das Wasser vor dem Versprühen temperiert, ist in der Spalte „Düsenausrichtung“ die Temperatur des Wassers vor dem Versprühen angegeben. Bei den Untersuchungen mit den Flachstrahldüsen ist zwischen der 0° Ausrichtung und 90° Ausrichtung zu unterscheiden. Bei der 0° Ausrichtung erfolgt die Aufweitung des Strahls in der horizontalen Ebene. Bei der 90° Ausrichtung in der vertikalen Ebene.

### Elektrische Feldstärke:

Tabelle 11.9: Elektrische Feldstärken beim Versprühen von Trinkwasser in den 1 m<sup>3</sup> Behälter

Düsen- durch- messer in mm	Düsen- träger	Düsen- geometrie	Düsenausrich- tung	Abstand Düse zu Behälter- wand in m	Pumpen- druck in bar	Temp. des ver- sprühten Wassers in °C	Elektri- sche Feld- stärke in kV/m
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	100	23,8	-3,92
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	200	26,4	-6,86
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	300	28,3	-9,34
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	400	30,1	-10,82
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	500	33,9	-12,39
1,05	-	Rund	Oben rechts	0,19	100	21,6	-5,05
1,05	-	Rund	Oben rechts	0,19	200	23,4	-6,95
1,05	-	Rund	Oben rechts	0,19	300	23,6	-8,09
1,05	-	Rund	Oben rechts	0,19	400	24,9	-8,75
1,05	-	Rund	Oben rechts	0,19	500	26,1	-9,11
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	100	25,9	-5,87
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	200	27,4	-9,09
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	300	28,9	-10,82
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	400	29,7	-11,69
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	500	30,8	-12,27
1,05	-	Flach 0°	Mittig	1,0	100	20,8	-3,05
1,05	-	Flach 0°	Mittig	1,0	200	22,9	-5,80
1,05	-	Flach 0°	Mittig	1,0	300	23,6	-6,92
1,05	-	Flach 0°	Mittig	1,0	400	25,0	-7,21
1,05	-	Flach 0°	Mittig	1,0	500	26,3	-7,77
1,05	-	Flach 90°	Mittig	1,0	100	20,5	-3,29
1,05	-	Flach 90°	Mittig	1,0	200	22,5	-6,15
1,05	-	Flach 90°	Mittig	1,0	300	23,9	-6,82
1,05	-	Flach 90°	Mittig	1,0	400	25,3	-7,48
1,05	-	Flach 90°	Mittig	1,0	500	26,4	-7,94
1,35	-	Flach 0°	Mittig	1,0	100	18,2	-3,88
1,35	-	Flach 0°	Mittig	1,0	200	18,8	-6,32
1,35	-	Flach 0°	Mittig	1,0	300	19,9	-7,48
1,35	-	Flach 90°	Mittig	1,0	100	17,4	-3,99
1,35	-	Flach 90°	Mittig	1,0	200	18,6	-6,54

1,35	-	Flach 90°	Mittig	1,0	300	19,7	-7,71
1,25	-	Rund	Mittig	1,0	100	21,1	-4,42
1,25	-	Rund	Mittig	1,0	200	21,0	-6,48
1,25	-	Rund	Mittig	1,0	300	21,5	-7,87
1,05	-	Flach 90°	Unten rechts	0,19	100	21,7	-5,13
1,05	-	Flach 90°	Unten rechts	0,19	200	22,1	-6,93
1,05	-	Flach 90°	Unten rechts	0,19	300	23,1	-7,67
1,05	-	Flach 90°	Unten rechts	0,19	400	24,6	-8,06
1,05	-	Flach 90°	Unten rechts	0,19	500	25,8	-8,35
1,05	-	Rotation	Unten rechts	0,19	100	20,3	-4,90
1,05	-	Rotation	Unten rechts	0,19	200	21,9	-7,87
1,05	-	Rotation	Unten rechts	0,19	300	22,9	-9,19
1,05	-	Rotation	Unten rechts	0,19	400	24,5	-10,19
1,05	-	Rotation	Unten rechts	0,19	500	25,4	-10,61
0,50	A	Rund	Unten rechts	0,19 bis 0,40	500	31,5	-5,41
0,50	A	Rund	Unten rechts	0,60	1500	40,9	-7,18
1,00	A	Rund	Unten rechts	0,19 bis 0,40	500	38,4	-11,64
1,00	A	Rund	Unten rechts	0,60	1500	55,5	-19,75
1,00	T	Rund	Unten rechts	0,60	1500	55,3	-14,17
1,00	T	Rund	Unten rechts	0,60	2500	74,6	-26,49
2,00	A	Rund	Unten rechts	0,19 bis 0,40	500	32,6	-17,53
4,00	A	Rund	Unten rechts	0,19 bis 0,40	100	26,1	-7,77
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	100	19,1	-3,70
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	200	21,8	-5,74
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	300	23,6	-7,02
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	400	25,6	-8,44
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	500	26,3	-9,46
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	100	42,2	-5,77
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	200	48,8	-10,07
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	300	50,8	-10,35
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	400	51,5	-11,53
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	500	53,7	-13,26
1,05	-	Rund	Unten rechts, 5 °C	0,19	100	15,0	-4,56
1,05	-	Rund	Unten rechts, 5 °C	0,19	200	16,1	-6,62
1,05	-	Rund	Unten rechts, 5 °C	0,19	300	17,5	-7,50
1,05	-	Rund	Unten rechts, 5 °C	0,19	400	18,7	-8,90
1,05	-	Rund	Unten rechts, 5 °C	0,19	500	19,3	-9,00
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	100	41,4	-6,57
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	200	47,4	-10,53
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	300	50,3	-11,80
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	400	50,9	-12,90
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	500	53,7	-13,50

Tabelle 11.10: Elektrische Feldstärken beim Versprühen von Meerwasser in den 1 m<sup>3</sup> Behälter

Düsen- durch- messer in mm	Düsen- träger	Düsen- geometrie	Düsenausrich- tung	Abstand Düse zu Behälter- wand in m	Pumpen- druck in bar	Temp. des ver- sprühten Wassers in °C	Elektri- sche Feld- stärke in kV/m
1,05	-	Rund	Mittig, 25 °C	1,0	100	28,9	1,10
1,05	-	Rund	Mittig, 25 °C	1,0	200	32,1	1,92
1,05	-	Rund	Mittig, 25 °C	1,0	300	34,5	2,94
1,05	-	Rund	Mittig, 25 °C	1,0	400	35,9	3,95
1,05	-	Rund	Mittig, 25 °C	1,0	500	36,9	5,10
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	100	26,9	1,56
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	200	31,0	3,85
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	300	33,4	5,96
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	400	35,0	6,03
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	500	36,2	7,14
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	100	41,6	2,10
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	200	47,8	4,19
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	300	51,0	4,84
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	400	52,5	6,86
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	500	53,5	7,89

Tabelle 11.11: Elektrische Feldstärken beim Versprühen von vollentsalztem Wasser in den 1 m<sup>3</sup> Behälter

Düsen- durch- messer in mm	Düsen- träger	Düsen- geometrie	Düsenaus- richtung	Abstand Düse zu Behälter- wand in m	Pumpen- druck in bar	Zeitpunkt der Messung	Temp. des ver- sprühten Wassers in °C	Elektri- sche Feld- stärke in kV/m
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	100	Vor 2 min	24,7	-9,75
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	200	Vor 2 min	26,9	-13,91
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	300	Vor 2 min	27,3	-13,11
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	400	Vor 2 min	28,8	-9,99
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	500	Vor 2 min	30,0	-18,30
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	100	Nach 2 min	24,7	-5,32
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	200	Nach 2 min	26,9	-3,37
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	300	Nach 2 min	27,3	9,83
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	400	Nach 2 min	28,8	19,42
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	500	Nach 2 min	30,0	27,80
1,00	A	Rund	Mittig	1,0	500	-	40,0	-9,30
1,00	T	Rund	Mittig	1,0	1500	-	57,0	41,80
1,00	T	Rund	Mittig	1,0	2500	-	67,2	24,70
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	100	Vor 2 min	25,2	-14,43
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	200	Vor 2 min	27,6	-17,12
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	300	Vor 2 min	29,5	-18,90
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	400	Vor 2 min	31,0	-15,42
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	500	Vor 2 min	32,0	-16,09
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	100	Nach 2 min	25,2	-9,45
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	200	Nach 2 min	27,6	-7,94

1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	300	Nach 2 min	29,5	-5,78
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	400	Nach 2 min	31,0	-4,49
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	500	Nach 2 min	32,0	-4,07
1,00	A	Rund	Unten rechts	0,60	1500	-	43,9	-13,30
1,00	T	Rund	Unten rechts	0,60	1500	-	47,3	-10,05
1,00	T	Rund	Unten rechts	0,60	2500	-	71,6	-10,31

### Raumpotential:

Tabelle 11.12: Raumpotentiale beim Versprühen von Trinkwasser in den 1 m<sup>3</sup> Behälter

Düsen- durch- messer in mm	Düsen- träger	Düsen- geometrie	Düsenaus- richtung	Abstand Düse zu Behälter- wand in m	Abstand Elektrode zu Behäl- terwand in m	Pumpen- druck in bar	Temp. des ver- sprühten Wassers in °C	Raumpo- tential in kV
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,15	100	26,1	-0,13
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,15	200	28,1	-0,22
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,15	300	30,5	-0,26
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,15	400	31,9	-0,27
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,15	500	33,5	-0,20
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,30	100	25,2	-0,25
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,30	200	27,8	-0,33
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,30	300	29,9	-0,44
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,30	400	31,5	-0,47
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,30	500	32,6	-0,33
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,45	100	25,2	-0,24
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,45	200	27,8	-0,29
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,45	300	29,9	-0,37
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,45	400	31,5	-0,37
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,45	500	32,6	-0,36
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	100	26,2	0,29
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	200	28,2	0,30
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	300	30,5	0,25
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	400	32,1	0,30
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	500	33,1	0,24
1,05	-	Rund	Oben rechts	0,19	0,54	100	26,4	-0,66
1,05	-	Rund	Oben rechts	0,19	0,54	200	28,0	-0,76
1,05	-	Rund	Oben rechts	0,19	0,54	300	29,9	-0,82
1,05	-	Rund	Oben rechts	0,19	0,54	400	31,4	-0,81
1,05	-	Rund	Oben rechts	0,19	0,54	500	31,9	-0,99
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,54	100	24,9	-0,90
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,54	200	27,2	-1,09
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,54	300	29,3	-1,39
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,54	400	30,5	-1,48
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,54	500	31,5	-1,40
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,42	0,54	500	32,6	-1,17
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,65	0,54	500	32,6	-0,90
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,15	100	24,8	-0,36
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,15	200	27,4	-0,52

1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,15	300	29,4	-0,60
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,15	400	30,5	-0,60
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,15	500	31,3	-0,55
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,30	100	24,7	-0,59
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,30	200	27,9	-0,90
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,30	300	28,8	-1,11
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,30	400	30,5	-1,08
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,30	500	32,2	-1,06
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,45	100	26,2	-0,63
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,45	200	28,4	-0,91
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,45	300	29,5	-1,08
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,45	400	30,5	-1,16
1,05	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,45	500	32,1	-1,29
1,05	-	Flach 0°	Mittig	1,0	0,54	100	22,3	-0,24
1,05	-	Flach 0°	Mittig	1,0	0,54	200	22,2	-0,38
1,05	-	Flach 0°	Mittig	1,0	0,54	300	22,7	-0,38
1,05	-	Flach 0°	Mittig	1,0	0,54	400	23,5	-0,42
1,05	-	Flach 0°	Mittig	1,0	0,54	500	25,2	-0,40
1,25	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	100	17,3	0,38
1,25	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	200	18,8	0,33
1,25	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	300	19,7	0,30
1,05	-	Flach 90°	Unten rechts	0,19	0,54	100	25,4	-0,76
1,05	-	Flach 90°	Unten rechts	0,19	0,54	200	27,3	-0,86
1,05	-	Flach 90°	Unten rechts	0,19	0,54	300	28,9	-0,98
1,05	-	Flach 90°	Unten rechts	0,19	0,54	400	30,8	-1,02
1,05	-	Flach 90°	Unten rechts	0,19	0,54	500	31,9	-1,03
1,05	-	Rotation	Unten rechts	0,19	0,54	100	19,5	-0,84
1,05	-	Rotation	Unten rechts	0,19	0,54	200	21,2	-1,18
1,05	-	Rotation	Unten rechts	0,19	0,54	300	22,1	-1,27
1,05	-	Rotation	Unten rechts	0,19	0,54	400	23,7	-1,30
1,05	-	Rotation	Unten rechts	0,19	0,54	500	24,6	-1,30
1,25	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,54	100	17,3	-0,78
1,25	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,54	200	18,8	-0,88
1,25	-	Rund	Unten rechts	0,19	0,54	300	19,9	-0,90
0,50	A	Rund	Unten rechts	0,19 bis 0,40	0,54	500	31,5	-0,49
1,00	A	Rund	Unten rechts	0,19 bis 0,40	0,54	500	38,4	-1,51
1,00	A	Rund	Unten rechts	0,60	0,54	1500	55,5	-2,13
1,00	T	Rund	Unten rechts	0,60	0,54	1500	55,3	-1,54
1,00	T	Rund	Unten rechts	0,60	0,54	2500	74,6	-1,69
2,00	A	Rund	Unten rechts	0,19 bis 0,40	0,54	500	32,6	-2,29
4,00	A	Rund	Unten rechts	0,19 bis 0,40	0,54	100	26,1	-1,03
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,15	100	43,0	-0,20
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,15	200	48,0	-0,35
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,15	300	50,2	-0,46
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,15	400	52,3	-0,52
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,15	500	53,8	-0,54
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,30	100	42,3	-0,31
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,30	200	47,8	-0,44
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,30	300	50,4	-0,62
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,30	400	52,0	-0,70
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,30	500	53,6	-0,64

1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,45	100	42,8	-0,25
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,45	200	48,3	-0,34
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,45	300	50,8	-0,47
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,45	400	51,5	-0,53
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,45	500	53,7	-0,51
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	100	42,6	0,39
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	200	47,9	0,51
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	300	50,8	0,51
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	400	52,4	0,50
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	500	53,7	0,48
1,05	-	Rund	Unten rechts, 5 °C	0,19	0,54	100	14,4	-0,62
1,05	-	Rund	Unten rechts, 5 °C	0,19	0,54	200	15,3	-1,06
1,05	-	Rund	Unten rechts, 5 °C	0,19	0,54	300	16,9	-1,11
1,05	-	Rund	Unten rechts, 5 °C	0,19	0,54	400	18,2	-1,10
1,05	-	Rund	Unten rechts, 5 °C	0,19	0,54	500	19,1	-1,04
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	100	42,3	-0,85
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	200	47,9	-1,48
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	300	50,4	-1,52
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	400	52,6	-1,66
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	500	53,9	-1,66

Tabelle 11.13: Raumpotentiale beim Versprühen von Meerwasser in den 1 m<sup>3</sup> Behälter

Düsen- durch- messer in mm	Düsen- träger	Düsen- geometrie	Düsenaus- richtung	Abstand Düse zu Behälter- wand in m	Abstand Elektrode zu Behäl- terwand in m	Pumpen- druck in bar	Temp. des ver- sprühten Wassers in °C	Raumpo- tential in kV
1,05	-	Rund	Mittig, 25 °C	1,0	0,54	100	27,8	-0,07
1,05	-	Rund	Mittig, 25 °C	1,0	0,54	200	31,5	-0,06
1,05	-	Rund	Mittig, 25 °C	1,0	0,54	300	33,9	0,06
1,05	-	Rund	Mittig, 25 °C	1,0	0,54	400	35,4	0,09
1,05	-	Rund	Mittig, 25 °C	1,0	0,54	500	36,5	0,09
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	100	43,3	-0,07
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	200	48,3	-0,10
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	300	51,0	-0,04
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	400	52,2	-0,04
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	500	53,3	-0,05
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	0,54	100	27,8	0,11



1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	0,54	200	31,0	0,23
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	0,54	300	33,4	0,29
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	0,54	400	34,8	0,44
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	0,54	500	36,2	0,61
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	100	42,2	0,15
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	200	46,7	0,23
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	300	49,7	0,30
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	400	51,1	0,30
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	500	52,5	0,61

Tabelle 11.14: Raumpotentiale beim Versprühen von vollentsalztem Wasser in den 1 m<sup>3</sup> Behälter

Düsen- durch- messer in mm	Düsen- träger	Düsen- geometrie	Düsenaus- richtung	Abstand Düse zu Behälter- wand in m	Abstand Elektrode zu Behäl- terwand in m	Pumpen- druck in bar	Temp. des ver- sprühten Wassers in °C	Raumpo- tential in kV
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	100	26,6	-5,44
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	200	29,6	-10,60
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	300	31,6	-17,56
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	400	32,9	-18,88
1,05	-	Rund	Mittig	1,0	0,54	500	33,6	-20,04
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	100	42,8	-11,47
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	200	47,4	-25,40
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	300	49,5	-24,96
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	400	49,7	-18,16
1,05	-	Rund	Mittig, 45 °C	1,0	0,54	500	52,1	-23,92
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	0,54	100	30,1	-2,48
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	0,54	200	32,4	-2,74
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	0,54	300	34,2	-2,84
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	0,54	400	35,7	-2,74
1,05	-	Rund	Unten rechts, 25 °C	0,19	0,54	500	36,8	-2,67
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	100	43,4	-2,40
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	200	48,2	-2,63

1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	300	51,1	-2,72
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	400	52,0	-2,46
1,05	-	Rund	Unten rechts, 45 °C	0,19	0,54	500	53,3	-2,24
0,50	A	Rund	Unten rechts	0,19 bis 0,40	0,54	500	k. M.	0,72
0,50	A	Rund	Unten rechts	0,60	0,54	1500	k. M.	4,59
1,00	A	Rund	Unten rechts	0,60	0,54	1500	43,9	-0,86
1,00	T	Rund	Unten rechts	0,60	0,54	1500	57,0	1,71
1,00	T	Rund	Unten rechts	0,60	0,54	2500	67,2	2,25

k. M. = keine Messung

## Anhang F: Messwerte der Untersuchungen beim Sprühen von Wasser in reale Behälter

Der Abstand zwischen Düse und Behälterwand wurde im 6,2 m<sup>3</sup> und 16,8 m<sup>3</sup> Behälter, mittels einer am Düsenrohr befestigten Prallplatte, auf 0,19 m reduziert (Abbildung 11.1).

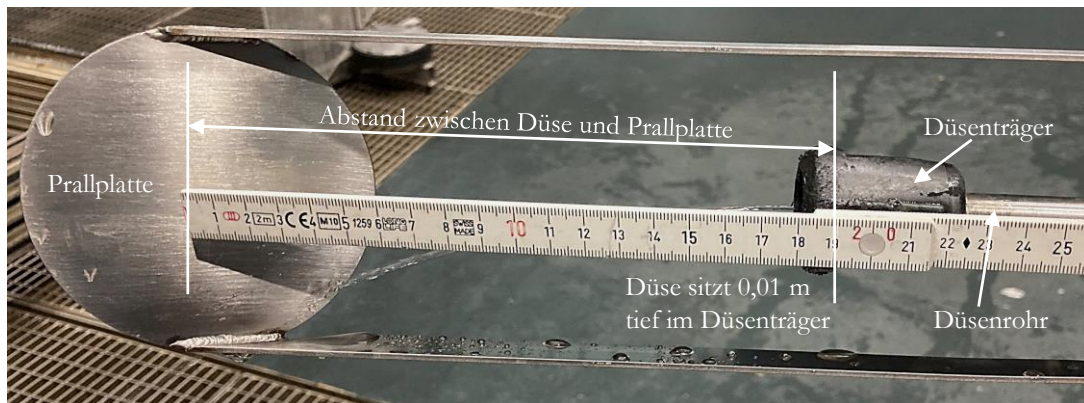


Abbildung 11.1: Prallplatte zur Reduzierung des Abstands zwischen Düse und dem Aufprallort

### Elektrische Feldstärke:

Tabelle 11.15: Elektrische Feldstärken beim Versprühen von Trinkwasser in reale Behälter

Düsen- durch- messer in mm	Dü- sen- trä- ger	Düsenaus- richtung	Pumpen- druck in bar	Temp. des versprühten Wassers in °C (links) und die elektrische Feldstärke in kV/m (rechts)									
				Behälter: 1,0 m <sup>3</sup> , Ø 1,07 m		Behälter: 6,2 m <sup>3</sup> , Ø 1,40 m		Behälter: 16,8 m <sup>3</sup> , Ø 1,79 m		Behälter: 44,0 m <sup>3</sup> , Ø 2,5 m			
				°C	kV/m	°C	kV/m	°C	kV/m	°C	kV/m		
0,50	A	Mittig	500	-	-	40,9	-4,73	Technischer Defekt des Feldstärkenmessgerätes					
0,50	A	Mittig	1000	-	-	-	-					k. M.	0,44
0,50	A	Mittig	1500	-	-	40,2	-5,95					-	-
1,05	-	Mittig	500	33,9	-12,39	-	-					-	-
1,05	-	Mittig, 45 °C	500	53,7	-13,26	-	-					-	-
1,00	A	Mittig, 25 °C	500	-	-	-	-					32,5	-4,68
1,00	A	Mittig, 50 °C	500	-	-	-	-					57,5	-9,97
1,00	A	Mittig, 90 °C	500	-	-	-	-					97,5	-10,87
1,00	A	Mittig	1000	-	-	-	-					k. M.	-0,31
1,00	A	Mittig	1500	-	-	38,8	-9,86					-	-
1,00	T	Mittig	1500	-	-	42,6	-14,06					-	-
1,00	T	Mittig	2500	-	-	53,9	-12,58					-	-
2,00	A	Mittig	500	-	-	36,1	-13,37					-	-
4,00	A	Mittig	100	-	-	26,1	-3,69					-	-
0,50	A	Im Winkel	500	31,5	-5,41	38,0	-4,60					-	-
0,50	A	Im Winkel	1000	-	-	-	-					k. M.	0,58
0,50	A	Im Winkel	1500	40,9	-7,18	39,4	-6,31					-	-
1,05	-	Im Winkel	500	30,8	-12,27	-	-					-	-
1,00	A	Im Winkel	500	38,4	-11,64	-	-					32,5	-3,42

1,05	-	Im Winkel, 45 °C	500	53,7	-13,50	-	-	-	-
1,00	A	Im Winkel	500	-	-	-	-	57,5	-5,73
1,00	A	Im Winkel	500	-	-	-	-	97,5	-7,94
1,00	A	Im Winkel	1000	-	-	-	-	k. M.	0,40
1,00	A	Im Winkel	1500	55,5	-19,75	47,8	-12,14	-	-
1,00	T	Im Winkel	1500	55,3	-14,17	48,4	-10,49	-	-
1,00	T	Im Winkel	2500	74,6	-26,49	54,9	-11,87	-	-
2,00	A	Im Winkel	500	32,6	-17,53	43,6	-12,35	-	-
4,00	A	Im Winkel	100	26,1	-7,77	38,3	-3,72	-	-

k. M. = keine Messung und keine Temperierung des Wassers

Tabelle 11.16: Elektrische Feldstärken beim Versprühen von vollentsalztem Wasser in reale Behälter

				Temp. des versprühten Wassers in °C (links) und die elektrische Feldstärke in kV/m (rechts)							
Düsen- durch- messer in mm	Dü- sen- trä- ger	Düsenaus- richtung	Pumpen- druck in bar	Behälter: 1,0 m <sup>3</sup> , Ø 1,07 m		Behälter: 6,2 m <sup>3</sup> , Ø 1,40 m		Behälter: 16,8 m <sup>3</sup> , Ø 1,79 m		Behälter: 44,0 m <sup>3</sup> , Ø 2,5 m	
				°C	kV/m	°C	kV/m	°C	kV/m	°C	kV/m
0,50	A	Mittig	500	-	-	44,6	44,0	Technischer Defekt des Feldstärkenmessgerätes		Keine Messungen	
0,50	A	Mittig	1000	-	-	47,4	49,8				
0,50	A	Mittig	1500	-	-	46,1	79,1				
0,50	A	Mittig	2000	-	-	47,9	69,0				
1,05	-	Mittig	500	30,0	27,80	-	-				
1,00	A	Mittig	500	40,0	-9,30	29,5	-9,23				
1,00	A	Mittig	1500	-	-	43,8	20,32				
1,00	T	Mittig	1500	57,0	41,80	46,7	46,10				
1,00	T	Mittig	2500	67,2	24,70	56,8	39,70				
2,00	A	Mittig	500	-	-	36,7	-9,55				
0,50	A	Im Winkel	500	-	-	36,1	-6,52				
0,50	A	Im Winkel	1500	-	-	41,4	-7,21				
1,05	-	Im Winkel	500	32,0	-16,09	-	-				
1,00	A	Im Winkel	500	-	-	40,9	-9,52				
1,00	A	Im Winkel	1500	43,9	-13,30	50,5	-11,95				
1,00	T	Im Winkel	1500	47,3	-10,05	50,8	-10,84				
1,00	T	Im Winkel	2500	71,6	-10,31	60,0	-11,18				
2,00	A	Im Winkel	500	-	-	37,1	-10,19				

**Raumpotential:**

Tabelle 11.17: Raumpotentiale beim Versprühen von Trinkwasser in reale Behälter

				Temp. des versprühten Wassers in °C (links) und das Raumpotential in kV (rechts)							
Düsen- durch- messer in mm	Dü- sen- trä- ger	Düsenaus- richtung	Pumpen- druck in bar	Behälter: 1,0 m <sup>3</sup> , Ø 1,07 m		Behälter: 6,2 m <sup>3</sup> , Ø 1,40 m		Behälter: 16,8 m <sup>3</sup> , Ø 1,79 m		Behälter: 44,0 m <sup>3</sup> , Ø 2,5 m	
				°C	kV	°C	kV	°C	kV	°C	kV
0,50	A	Mittig	500	-	-	40,9	0,92	-	-	-	-
0,50	A	Mittig	1500	-	-	40,2	0,92	-	-	-	-
1,00	T	Mittig	1500	-	-	42,6	-2,01	-	-	-	-
1,00	T	Mittig	2500	-	-	53,9	-2,94	-	-	-	-
1,05	-	Mittig	100	26,1	-0,13	25,7	0,18	28,2	-0,68	-	-
1,05	-	Mittig	300	30,5	-0,26	29,6	0,71	29,9	-1,32	-	-
1,05	-	Mittig	500	33,5	-0,20	32,7	-0,79	32,3	-1,97	-	-
1,05	-	Mittig, 45 °C	100	42,6	0,39	34,4	0,49	29,4	-0,64	-	-
1,05	-	Mittig, 45 °C	300	50,8	0,51	40,0	0,85	33,3	-1,40	-	-
1,05	-	Mittig, 45 °C	500	53,7	0,48	44,7	0,94	37,1	-1,57	-	-
0,50	A	Im Winkel	500	31,5	-0,49	38,0	-0,41	-	-	-	-
0,50	A	Im Winkel	1500	-	-	39,4	-1,01	-	-	-	-
1,00	A	Im Winkel	1500	55,5	-2,13	47,8	-1,56	-	-	-	-
1,00	T	Im Winkel	1500	55,3	-1,54	48,4	-1,34	-	-	-	-
1,00	T	Im Winkel	2500	74,6	-1,69	54,9	-1,77	-	-	-	-
1,05	-	Im Winkel, kurze Seite, 25 °C	100	-	-	26,0	-0,39	32,9	-0,28	-	-
1,05	-	Im Winkel, kurze Seite, 25 °C	300	-	-	29,3	-0,54	33,5	-0,84	-	-
1,05	-	Im Winkel, kurze Seite, 25 °C	500	-	-	31,7	-0,48	34,8	-0,94	-	-
1,05	-	Im Winkel, 25 °C	100	24,9	-0,90	30,0	-0,24	24,7	-0,36	-	-
1,05	-	Im Winkel, 25 °C	300	29,3	-1,39	30,9	-0,42	28,4	-0,80	-	-
1,05	-	Im Winkel, 25 °C	500	31,5	-1,40	33,3	-0,55	30,6	-0,88	-	-
1,05	-	Im Winkel, 45 °	100	42,3	-0,85	31,6	-0,50	26,0	-0,38	-	-
1,05	-	Im Winkel, 45 °	300	50,4	-1,52	41,1	-0,55	31,1	-0,75	-	-
1,05	-	Im Winkel, 45 °	500	53,9	-1,66	44,9	-0,64	35,3	-0,99	-	-
2,00	A	Im Winkel	500	32,6	-2,29	43,6	-1,92	-	-	-	-
4,00	A	Im Winkel	100	26,1	-1,03	38,3	-0,40	-	-	-	-
1,05	-	Im Winkel, Prallplatte, 25 °C	100	-	-	-	-	34,4	-0,18	-	-

Feuchte der Luft über 70 %

1,05	-	Im Winkel, Prallplatte, 25 °C	300	-	-	-	-	36,0	-0,37
1,05	-	Im Winkel, Prallplatte, 25 °C	500	-	-	-	-	37,6	-0,79

### Versprühen von Trinkwasser mit dem Hohlstrahlrohr der Feuerwehr:

Vollstrahl	6 bis 7	-	-	-	-	18,8	-0,14	-	-
Mittlere Aufweitung von 45° (Sprühstrahl)	6 bis 7	-	-	-	-	18,5	-0,26	-	-
Maximale Aufweitung von 120° (Schutzschild)	6 bis 7	-	-	-	-	24,6	-0,75	-	-

Tabelle 11.18: Raumpotentiale beim Versprühen von vollentsalztem Wasser in reale Behälter

				Temp. des versprühten Wassers in °C (links) und das Raumpotential in kV (rechts)							
Düsen- durch- messer in mm	Dü- sen- trä- ger	Düsenaus- richtung	Pumpen- druck in bar	Behälter: 1,0 m <sup>3</sup> , Ø 1,07 m		Behälter: 6,2 m <sup>3</sup> , Ø 1,40 m		Behälter: 16,8 m <sup>3</sup> , Ø 1,79 m		Behälter: 44,0 m <sup>3</sup> , Ø 2,5 m	
				°C	kV	°C	kV	°C	kV	°C	kV
0,50	A	Mittig	500	-	-	44,6	25,00	-	-		
0,50	A	Mittig	1500	-	-	46,1	35,72	-	-		
0,50	A	Mittig	2000	-	-	47,9	32,68	-	-		
1,00	T	Mittig	1500	-	-	46,7	12,64	-	-		
1,00	T	Mittig	2500	-	-	56,8	11,92	-	-		
1,05	-	Mittig, 25 °C	100	26,6	-5,44	25,7	1,04	30,4	-0,60		
1,05	-	Mittig, 25 °C	300	31,6	-17,56	30,3	2,79	31,9	2,33		
1,05	-	Mittig, 25 °C	400	32,9	-18,88	31,4	2,95	-	-		
1,05	-	Mittig, 25 °C	500	33,6	-20,04	33,1	2,12	34,6	7,01		
1,05	-	Mittig, 45 °C	100	42,8	-11,47	29,5	1,26	29,5	-0,79		
1,05	-	Mittig, 45 °C	300	49,5	-24,96	37,6	2,34	35,5	2,46		
1,05	-	Mittig, 45 °C	500	52,1	-23,92	43,8	2,61	39,4	-1,42		
0,50	A	Im Winkel	500	k. M.	0,72	36,1	-0,34	-	-		
0,50	A	Im Winkel	1500	k. M.	4,59	41,4	-0,40	-	-		
1,00	A	Im Winkel	1500	43,9	-0,86	50,5	-2,42	-	-		
1,00	T	Im Winkel	1500	57,0	1,71	50,8	-2,86	-	-		
1,00	T	Im Winkel	2500	67,2	2,25	60,0	-2,49	-	-		
1,05	-	Im Winkel, kurze Seite, 25 °C	100	-	-	27,2	-1,46	33,5	-1,04		
1,05	-	Im Winkel, kurze Seite, 25 °C	300	-	-	31,3	-1,98	34,7	-1,27		
1,05	-	Im Winkel, kurze Seite, 25 °C	500	-	-	34,2	-1,55	35,4	-1,26		
1,05	-	Im Winkel, 25 °C	100	30,1	-2,48	23,8	-0,73	33,1	-1,18		

Keine Messungen

1,05	-	Im Winkel, 25 °C	300	34,2	-2,84	28,8	-1,89	34,3	-1,60
1,05	-	Im Winkel, 25 °C	500	36,8	-2,67	32,9	-1,90	34,9	-1,55
1,05	-	Im Winkel, 45 °C	100	43,4	-2,40	35,6	-1,26	26,8	-2,01
1,05	-	Im Winkel, 45 °C	300	51,1	-2,72	40,6	-2,02	31,7	-2,11
1,05	-	Im Winkel, 45 °C	500	53,3	-2,24	44,1	-2,28	36,0	-2,22
1,05	-	Im Winkel, kurze Seite, Prallplatte, 25 °C	100	-	-	-	-	24,7	0,40
1,05	-	Im Winkel, kurze Seite, Prallplatte, 25 °C	300	-	-	-	-	26,9	-0,33
1,05	-	Im Winkel, kurze Seite, Prallplatte, 25 °C	500	-	-	-	-	28,8	-0,62
1,05	-	Im Winkel, Prallplatte, 25 °C	100	-	-	-	-	21,5	-0,51
1,05	-	Im Winkel, Prallplatte, 25 °C	300	-	-	-	-	24,9	-0,46
1,05	-	Im Winkel, Prallplatte, 25 °C	500	-	-	-	-	27,7	-0,93
2,00	A	Im Winkel	500	-	-	37,1	-2,99	-	-
4,00	A	Im Winkel	100	-	-	k. M.	-1,89	-	-

k. M. = keine Messung und keine Temperierung des Wassers



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin**  
 Bundesallee 100  
 38116 Braunschweig  
 Florian Baumann  
 Telefon: 0531 592-3438  
 E-Mail: [florian.baumann@ptb.de](mailto:florian.baumann@ptb.de)  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)  
 Stand: 04/2022









Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt**  
Nationales Metrologieinstitut  
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: (0531) 592-93 21  
Fax: (0531) 592-30 08  
E-Mail: [presse@ptb.de](mailto:presse@ptb.de)  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)