



Peter Sommersacher

# **Planung, Bau, Inbetriebnahme und Vermessung eines Coronareaktors**

## **DIPLOMARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom- Ingenieurs

der Studienrichtung Verfahrenstechnik

erreicht an der

Technischen Universität Graz

Betreut von:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Matthäus Siebenhofer

Mag. rer. nat. Dr. techn. Peter Letonja

Institut für thermische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik

Technische Universität Graz

2010

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Matthäus Siebenhofer bedanken, der mir die Erstellung der Diplomarbeit ermöglichte.

Weiterer Dank gilt Herrn Mag. rer. nat. Dr. techn. Peter Letonja und Dipl.-Ing. Suleman Tahir, die immer Zeit für meine Fragen und Anliegen fanden und mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Weiters gilt mein Dank all jenen Mitarbeitern des Instituts für Thermische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, die mir beim Entstehen dieser Arbeit behilflich waren.

Besonderen Dank auch an meine Familie, ohne deren Unterstützung und Motivation die Durchführung meines Studiums nicht möglich gewesen wäre.

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## Kurzfassung

Ziel dieser Diplomarbeit war die Planung, Errichtung und Inbetriebnahme eines Coronareaktors. Ein Coronareaktor besteht aus den selben Bauelementen wie ein Rohrelektrofilter. Dieser besteht im Wesentlichen aus einer Sprühelektrode, die mit einer Hochspannung beaufschlagt wird und einer geerdeten Gegenelektrode. Die Sprühelektrode kann im einfachsten Fall als kreisrunder Draht, aber auch in mannigfaltiger Form ausgeführt werden.

Die für diese Arbeit neu gebaute Anlage arbeitet mit 4 bzw. 8 [mm] Bürstenelektroden. Die Gegenelektrode wird über einen elektrolythaltigen wässrigen Fallfilm, welcher geerdet ist, realisiert.

Der Reaktor war so auszuführen, dass die Möglichkeit der Visualisierung der Coronaentladung besteht. Bei elektrischer Entladung wird im Gasraum Ozon gebildet, welches bei der Versuchsanlage mittels Abluftsystem abgeführt wird.

Die von der Elektrode abgegebene UV-Strahlung wurde mittels chemischem Aktinometer bestimmt. Die eintreffende Strahlungsmenge wird durch die umgesetzte Stoffmenge einer photochemischen Reaktion bestimmt. Die Aktinometermessung ergab, dass 0,3 [W], dies entspricht 5,6% der elektrischen Leistung, als UV-Strahlung von der Elektrode abgegeben wird.

Nach erfolgter Planung und Bau wurde die Betriebscharakteristik vermessen. Man bezeichnet diese auch als Strom/Spannungs-Charakteristik. Der Verlauf beginnt bei der Coroneinsatzspannung. Bei steigender Spannung fließen höhere Ströme, bis zu der Durchschlagsspannung, wo der Strom sprunghaft bei konstanter Spannung zunimmt und somit die Einsatzgrenze eines Elektrofilters darstellt.

Die Betriebscharakteristik wurde vermessen und mit theoretisch ermittelten Werten verglichen. Obwohl die theoretischen Überlegungen von kreisrunden Sprühelektroden ausgehen, stimmen die experimentell ermittelten Strom/Spannungs-Charakteristika mit den theoretisch berechneten Ergebnissen gut überein.

## Abstract

The objective of this master thesis was the design, construction and commissioning of a corona discharge reactor. Such a reactor consists of the same components as a tubular electrostatic precipitator, essentially including a discharge electrode, which is connected to a high voltage power supply and a grounded counter electrode. The discharge electrode can be executed in the simplest case as a circular wire, but also in different shapes.

The newly built facility for this master thesis uses 4 or 8 [mm] brush discharge electrodes. The counter electrode is realized using an electrolyte- containing falling film, which is earthed. The design of the reactor had to enable visualisation of corona discharge.

Electrical discharge readily forms ozone which is removed by means of an exhaust system.

The UV radiation of the electrode was determined by chemical actinometer measurements, whereas the incident radiation is determined by the amount of converted substance of a photochemical reaction. The actinometer- measurement showed that 0,3 [W], corresponding to 5,6% of the electric power input, is delivered as UV radiation.

After design, set up and commissioning the operation characteristic- aka current/voltage- characteristic- was recorded. Discharge starts at the corona onset voltage. With increasing voltage higher current up to spark over, where the current suddenly increases at constant voltage and thus represents the limits of application of an electrostatic precipitator, is observed.

The operation characteristics were determined for brush electrodes and compared with theoretically calculated values. Although the theoretical current/voltage- characteristics only apply for wire type discharge electrodes, the experimentally determined current/voltage- characteristics for brush electrodes agree with the theoretically determined values.

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	I
Eidesstattliche Erklärung .....	II
Kurzfassung .....	III
Abstract .....	IV
Inhaltsverzeichnis .....	V
Nomenklatur .....	VIII
1 Aufgabenstellung .....	1
2 Grundlagen .....	2
2.1 Prinzipielles .....	2
2.2 Elektrizitätsleitung in Gasen .....	5
2.3 Physikalische Grundlagen der Coronaentladung .....	6
2.3.1 Elektronenanlagerung .....	7
2.3.2 Theoretische Strom/Spannungs- Beziehungen .....	10
2.4 Ozon .....	10
2.4.1 Darstellung .....	10
2.4.2 Chemische Eigenschaften .....	11
2.4.3 Ozonbildung im Elektrofilter .....	11
2.5 Mathematische Beschreibung der Coronaentladung .....	13
2.6 Sprühelektroden .....	18
2.6.1 Starre Sprühelektroden .....	18
2.6.2 Verbesserte starre Sprühelektroden .....	19
2.6.3 Konzept neuer Sprühelektroden .....	20
2.6.4 Ergebnisse der Testläufe der neuen Sprühelektroden .....	22
2.7 Fallfilm .....	24
3 Planung .....	26

---

3.1	Versuchsanlage .....	26
3.2	Coronareaktor .....	27
3.2.1	Flüssigkeitsabführung und Sprühelektrodenhalterung .....	28
3.2.2	Elektrodenhalterung und Spannvorrichtung.....	29
3.2.3	Sprühelektroden.....	31
3.3	Hochspannungsversorgung .....	32
3.3.1	Hochspannungsgenerator .....	32
3.3.2	Coronaeinsatzspannung und Erfahrungswerte.....	34
4	Aufbau.....	35
4.1	Erste Testläufe.....	36
5	Abnahmemessung.....	38
5.1	Strom/Spannungs- Charakteristik .....	38
5.2	Vergleich mit theoretischen Strom/Spannungs- Charakteristiken .....	41
5.3	Vergleich Messergebnis mit Literaturwerten.....	46
5.4	Theoretischer Trenngrad der vorhandenen Versuchsanlage.....	48
5.5	Visualisierung der Coronaentladung .....	50
5.6	Aktinometer Messung .....	53
5.6.1	Bestimmung des Photonenflusses mittels chemischen Aktinometern.....	53
5.6.2	Chemisches Iodid/Iodat Aktinometer .....	53
5.6.3	Vorbereiten der Ausgangslösung .....	56
5.6.4	Versuchsdurchführung chemisches Aktinometer.....	56
5.6.5	Berechnung des Photonenflusses.....	57
5.6.6	Ergebnisse der Aktinometermessung.....	58
6	Zusammenfassung .....	59
7	Verzeichnisse .....	61
7.1	Abbildungsverzeichnis .....	61
7.2	Tabellenverzeichnis .....	63
7.3	Literaturverzeichnis.....	64
8	Anhang.....	65

---

8.1	Messwerte der Strom/Spannungs- Charakteristik .....	65
8.2	Auswertung der Aktinometermessung.....	67



## Nomenklatur

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Abscheidefläche	$[m^2]$
$A_{352}$	Extinktion	$[\frac{mol}{g \cdot cm}]$
c	Lichtgeschwindigkeit	$[\frac{m}{s}]$
c	Partikelkonzentration	$[\frac{kg}{Nm^3}]$
c	Konzentration	$[\frac{mol}{l}]$
D	Reibungswiderstand	$[\frac{kg \cdot m}{s^2}]$
E	Strahlungsintensität	$[\frac{1}{mol}]$
$E_0$	Einsatzfeldstärke	$[\frac{kV}{m}]$
$E_a$	Auładefeldstärke	$[\frac{kV}{m}]$
$E_p$	Abscheidefeldstärke	$[\frac{kV}{m}]$
g	Erdbeschleunigung	$[\frac{m}{s^2}]$
h	Planck'sches Wirkungsquantum	$[J \cdot s]$
I	Coronastrom	$[\frac{mA}{m}]$
K	Ionenbeweglichkeit	$[\sqrt{\frac{m^3}{kg}}]$

---

L	Länge	$[m]$
M	molare Masse	$\left[\frac{g}{mol}\right]$
m	Masse	$[kg]$
N	Partikelanzahl	$[-]$
n	Molmenge	$[mol]$
$N_A$	Avogadro- Konstante	$\left[\frac{1}{mol}\right]$
P	Leistung	$[W]$
p	Druck	$[bar]$
R	Rohrradius	$[m]$
$r_0$	Sprühdrahradius	$[m]$
S	Verdünnung	$[-]$
T	Temperatur	$[K]$
T	Fraktionsabscheidegrad	$[-]$
t	Zeit	$[s]$
U	Betriebsspannung	$[kV]$
$U_0$	Coronaeinsatzspannung	$[kV]$
$U_{max}$	Durchschlagsspannung	$[kV]$
V	Volumen	$[m^3]$
v	Gasgeschwindigkeit	$\left[\frac{m}{s}\right]$
$V_{Vol}$	Volumenstrom	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$

---

$\dot{V}$	Volumenstrom	$\left[ \frac{m^3}{s} \right]$
$W$	Energie	$[J]$
$w$	Teilchenwanderungsgeschwindigkeit	$\left[ \frac{m}{s} \right]$
$w_m$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit	$\left[ \frac{m}{s} \right]$
$x$	Partikeldurchmesser	$[m]$
$\delta$	relative Luftdichte	$[-]$
$\delta$	Filmdicke	$[m]$
$\varepsilon_{352}$	Extinktionskoeffizient	$\left[ \frac{mol}{g \cdot cm} \right]$
$\Phi_\lambda$	Quantenausbeute	$[-]$
$\phi_P$	Photonenfluss	$\left[ \frac{1}{mol \cdot s} \right]$
$\eta$	dynamische Viskosität	$[Pa \cdot s]$
$\lambda$	Wellenlänge	$[m]$
$\rho_p$	Partikeldichte	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

# 1 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es einen Reaktor zu planen, bauen und in den Betriebe zu nehmen, in dem eine selbständige stabile Coronaentladung stattfinden kann. Ein weiteres Ziel ist es die Coronaentladung zu visualisieren, weshalb der Reaktorteil als Glasrohr ausgeführt werden soll. In diesen Glasrohr befindet sich im Zentrum eine Bürstenelektrode, die an eine Hochspannungsquelle angeschlossen sein soll. Die Gegenelektrode soll mit einem geerdeten Elektrolytfilm realisiert werden. Die Elektrolytlösung soll im Kreis gepumpt werden können, wobei die Möglichkeit der Einstellung eines bestimmten Flüssigkeitsstromes gegeben sein soll. Es soll auch eine Versorgung mit einem Frischluftsystem welches ebenfalls regelbar ist, realisiert werden, um gegebenenfalls entstehendes Ozon abzuführen.

Nach Planung und Bau einer solchen Anlage soll die Betriebscharakteristik, welche auch als Strom/Spannungs- Charakteristik bezeichnet wird, aufgenommen und mit einem berechneten Strom/Spannungs- Verlauf verglichen werden. Diese Vermessung soll mit zwei unterschiedlichen Elektrodendurchmessern erfolgen und der Unterschied soll beschrieben werden. Mittels Ermittlung und Darstellung des theoretischen Trenngradverlaufes soll die Einsetzbarkeit als Elektrofilter gezeigt werden. In einem letzten Schritt soll auch die Strahlungsintensität mit einem chemischen Aktinometer vermessen werden. Aufgrund der umgesetzten Stoffmenge einer photochemischen Reaktion soll auf die eintreffende Strahlungsmenge geschlossen werden.

---

## 2 Grundlagen

### 2.1 Prinzipielles

Bei einem Elektrofilter handelt es sich um einen Apparat oder eine Anlage, in der zur Abscheidung von Teilchen aus Gasen elektrische Kräfte angewendet werden. Man unterscheidet viele Typen und Ausführungen von Elektrofiltern, das Arbeitsprinzip ist jedoch bei allen das gleiche. Die Gliederung der Teilchenabscheidung in Elektrofiltern kann in drei grundlegende Vorgänge erfolgen:

1. die elektrische Aufladung der Teilchen,
2. die Abscheidung der geladenen Teilchen in einem elektrischen Feld und
3. die Entfernung des abgeschiedenen Staubes von den Niederschlagselektroden.

Alle Teilchen, welche in industriellen Gasen transportiert werden, besitzen eine natürliche Ladung, die ihnen durch Reibung, Flammenionisation und die Einwirkung kosmischer Strahlung auferlegt worden ist. Diese natürliche Ladung der Teilchen ist zu klein, um zur Abscheidung der Teilchen in Elektrofiltern genutzt werden zu können. Die Abscheidegrade von Versuchen mit Elektrofiltern mit natürlich geladenen Teilchen lagen in etwa bei 80 %. Es gibt verschiedene Methoden Teilchen künstlich aufzuladen. Die wirksamste ist die Verwendung der Aufladung im elektrischen Feld unter dem Einfluss von Coronaströmen. Die Aufrechterhaltung des elektrischen Feldes erfolgt meist zwischen einem dünnen Draht, der Sprühelektrode, die an negativer Hochspannung liegt, und einer zylindrischen oder plattenförmigen Elektrode, die geerdet ist. In dieser Anordnung tritt die Coronaentladung als sichtbares Glimmen in der Zone höchster Feldstärke, die sich in direkter Umgebung des Drahtes befindet, auf. In dieser Zone befindet sich eine große Zahl positiver und negativer Ionen. Liegt der negative Pol der Hochspannung am Draht, wie in allen industriellen Elektrofiltern, so wandern die positiven Ionen zum Draht und die negativen zur Platte. Beim Abscheidevorgang werden die Teilchen während des Durchwanderns des elektrischen Feldes durch intensives Ionenbombardement in einer Zeit von weniger als 0,01 [s] aufgeladen. Ein Kubikzentimeter Gas enthält unter normalen Bedingungen im Elektrofilter etwa  $10^8$  negative Ionen. Die Teilchenkonzentration in dichten Aerosolen liegt im Vergleich dazu in etwa bei  $10^6$  bis  $10^7$  Teilchen je Kubikzentimeter. Es werden Teilchenladungen erreicht, welche für 1 [ $\mu\text{m}$ ] große Teilchen etwa 300 Elektronenladungen und für 10 [mm] große Teilchen 30000 Elektronenladungen betragen.

Die Aufladung und Abscheidung kann man im gleichen Feld vornehmen (Abbildung 2-1 oben), was dem Cottrell-Prinzip entspricht. Im Gegensatz dazu kann man die Teilchen auch in einem zweiten elektrostatischen Feld abscheiden (Abbildung 2-1 unten),

was dem Penney-Prinzip entspricht. Den Vorgang der Teilchenabscheidung in einem Cottrell- Elektrofilter ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Der Coronastrom, entsteht in diesem Beispiel, an einem dünnen Draht, der am negativen Pol eines Hochspannungsgleichrichters liegt. Der Eintrag der Staubteilchen erfolgt von unten in das röhrenförmige Elektrofilter. Die Aufladung der Staubteilchen erfolgt auf den ersten Zentimetern. Durch das elektrische Feld werden die geladenen Teilchen an die Rohrwandung getrieben. Oft wird nur eine Zeitspanne von ein bis zwei Sekunden zur Abscheidung des gesamten Staubes benötigt. In zweistufigen Elektrofiltern (Abbildung 2-1 unten) erfolgt die Aufladung der Teilchen in der ersten Stufe, der sogenannten Coronastufe, und in einer zweiten, der rein statischen Stufe, werden diese abgeschieden. Im Allgemeinen werden einstufige Elektrofilter zur Reinigung industrieller Gase verwendet und zweistufige Filter nur zur Reinigung von Luft zu Klimatisierungs- und Lüftungszwecken.

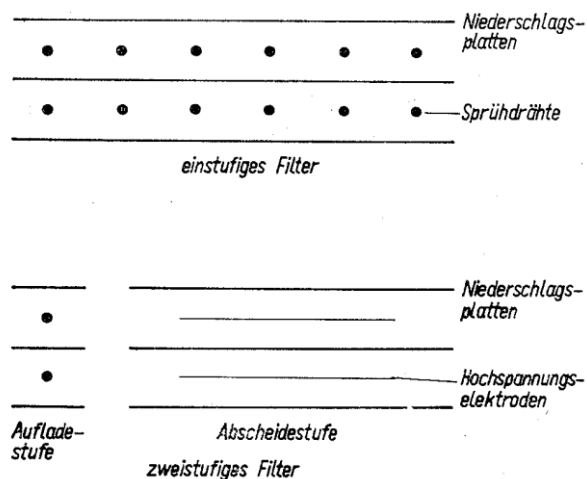


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines einstufigen und eines zweistufigen Elektrofilters [1]

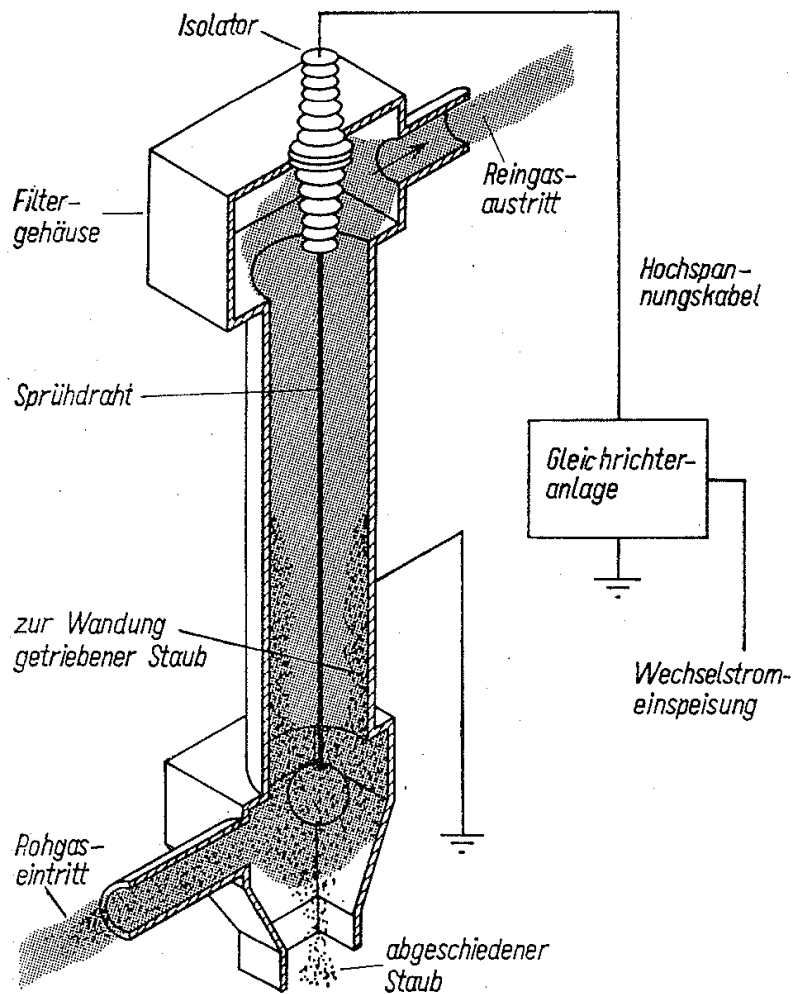


Abbildung 2-2: Prinzipanordnung eines einstufigen Elektrofilters [1]

Die Kraft, die auf die Teilchen im Gasstrom wirkt, wird durch das Coulombsche Gesetz nach Gleichung ( 2-1 ) [2] beschrieben. Laut diesem Gesetz ist die Kraft dem Produkt aus der Teilchenladung und der elektrischen Feldstärke proportional. Es wird auch die Wirkung unbedeutenderer elektrischer Kräfte, wie der Gradientkraft und der Dipolkräfte, diskutiert. Im Vergleich zur Coulomb- Kraft sind diese so klein, dass sie für die elektrische Entstaubung nur vom theoretischen Interesse sind.

$$\vec{F} = Q_0 \cdot \vec{E} = \frac{Q \cdot Q_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2-1)$$

$\epsilon_0$  elektrische Feldkonstante

Die Bewegung der Teilchen zur Niederschlagselektrode erfolgt durch Coulomb-Kräfte. Hingegen wird die Wanderung der Partikel durch Trägheits- und Reibungskräfte behindert. Es lässt sich nachweisen, dass für Stäube, die in Elektrofiltern abgeschieden werden, die Trägheitskräfte vernachlässigbar klein sind und die Reibungskräfte im Gas sich durch das Stokessche Gesetz beschreiben lassen. Die Geschwindigkeit, mit der sich ein Teilchen zur Niederschlagselektrode bewegt, wird durch das Gleichgewicht von Coulomb- und Stokes-Kräften bestimmt und wird als Wanderungsgeschwindigkeit bezeichnet. Sie nimmt mit der Teilchengröße, der Teilchenladung und der Feldstärke zu. Die Wanderungsgeschwindigkeit liegt für Teilchen von ungefähr 5 [ $\mu\text{m}$ ] Korngröße bei 3 [ $\text{cm/s}$ ] und für Teilchen von etwa 20 bis 30 [ $\mu\text{m}$ ] bei 10 bis 15 [ $\text{cm/s}$ ]. [1]

## 2.2 Elektrizitätsleitung in Gasen

Gase sind unter Normbedingungen nahezu ideale elektrische Isolatoren. Der Stromfluss ist bei geringer Potentialdifferenz kaum messbar. Erhöht man jedoch die Potentialdifferenz auf ein kritisches Maß, ist ein Punkt feststellbar, von dem an die Ionisation und die Leitfähigkeit des Gases zunehmen oder sogar enorm ansteigen können. Dieser Übergang wird als elektrischer Durchbruch oder Gasentladung bezeichnet und kann in verschiedenen Erscheinungsformen auftreten. Dazu zählen Funken-, Lichtbogen-, Corona- und Glimmentladungen. Diese traditionellen Bezeichnungen für Gasentladungen beziehen sich jeweils auf optische Erscheinungen oder physikalische Zustände.

Die Ionen in Gasen müssen im Gegensatz zu festen und flüssigen Leitern durch besondere Elementarprozesse unter Energiezufuhr erzeugt werden. Dieser Prozess wird als Ionisation bezeichnet.

Die Stoßionisation ist der dominierende Mechanismus der Ladungsträgererzeugung bei der Corona. Die freien Elektronen die sich im Gas befinden nehmen Energie aus einem elektrischen Feld auf und prallen mit Gasmolekülen zusammen, dabei werden aus den Molekülen Elektronen herausgeschlagen. Das Ergebnis dieses Prozesses ist die Erzeugung weiterer freien Elektronen und positiv geladene Gasionen. Das stoßende Elektron muss eine bestimmte Mindestenergie besitzen, die eine für das getroffene Molekül oder Atom charakteristische Größe darstellt und als Ionisationsenergie bezeichnet wird. [1]



## 2.3 Physikalische Grundlagen der Coronaentladung

Bei der elektrischen Abscheidung kommt unipolare Corona zur Anwendung. Dabei handelt es sich um eine stabile selbständige Gasentladung zwischen einer Sprühelektrode und einer Abscheideelektrode.

Die Ionisationsprozesse beschränken sich, wie in Abbildung 2-3 schematisch dargestellt, auf das Gebiet hoher elektrischer Feldstärke in oder nahe der Coronazone, das direkt an die Sprühelektrode angrenzt.

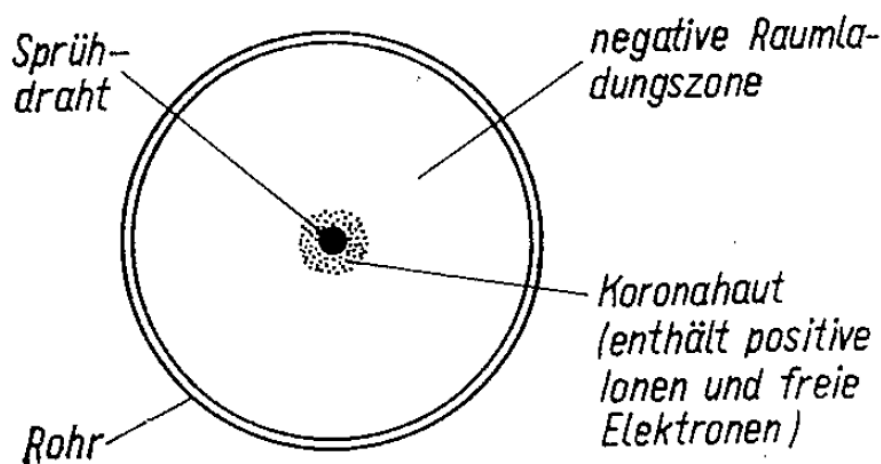


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der aktiven und der passiven Zone der Coronaentladung [1]

Voraussetzung für die Existenz der positiven oder negativen Corona ist einerseits das Vorhandensein einer Ionisationsquelle in der Nähe der Sprühelektrode, andererseits muss der Ionenstrom aus der aktiven Zone bzw. dem Ionisationsgebiet eine wirksame Raumladung in der passiven Zone der Entladung aufbauen. Die erste Forderung ist bei Verwendung von dünnem Draht, scharfen Kanten oder Spitzen in Gasen ausreichender Dichte erfüllt. Die zweite Forderung ist bei der positiven Corona immer erfüllt. Bei der positiven Corona sind die Träger des Stromes positive Ionen, die eine relativ geringe Beweglichkeit besitzen. Im Gegensatz dazu sind bei der negativen Corona freie Elektronen die Träger des Stromes. Diese werden in der aktiven Zone erzeugt. Die für die Ausbildung der Raumladung notwendigen Elektronen besitzen eine um 1000-mal größere Beweglichkeit als ionisierte Gasionen bei der positiven Corona.

Aufgrund von Elektronenanlagerung an elektronegative Gase kommt es zu sehr stabilen negativen Coronacharakteristiken. Die Bildung negativer Ionen erfolgt durch freie Elektronen

aus der Ionisationszone der Corona. Diese vereinigen sich beim Eintritt in das Gebiet geringerer Feldstärke mit Gasmolekülen. Es ist eine grundlegende Eigenschaft von Molekülen negative Ionen im elektrischen Feld auszubilden. Besitzen Gase keine Elektronenaffinität können sie keine negativen Ionen ausbilden. In weiterer Folge kann sich keine negative Corona formieren. Hierzu zählen: Stickstoff, Wasserstoff, Helium, Neon und Argon. Mit steigender Spannung kommt es am Coroneinsatzpunkt fast sofort zum Funkdurchbruch. In Gasen mit einer starken Elektronenaffinität, zum Beispiel Sauerstoff, Chlor, Schwefeldioxid, lässt sich eine stabile negative Corona erzeugen. [1]

### 2.3.1 Elektronenanlagerung

Als Elektronenanlagerung wird jener Prozess bezeichnet durch den sich Elektronen mit neutralen Molekülen verbinden und dadurch negative Ionen bilden. Die Gaszusammensetzung ist ausschlaggebend für die Anlagerungswahrscheinlichkeit. Sie ist für Gase wie Stickstoff und Wasserstoff gleich Null und zum Beispiel für Ammoniak sehr klein, bei den Halogenen erreicht sie dagegen relativ hohe Werte.

Es gibt zwei Arten von Anlagerungsprozessen.

In Gasen die Elektronenaffinität besitzen wie zum Beispiel: Sauerstoff und Schwefeldioxid, stoßen die Elektronen mit Molekülen zusammen und bleiben haften.

Die zweite Art der Elektronenanlagerung vollzieht sich in Gasen bei denen keine Elektronenaffinität vorliegt, wie zum Beispiel Kohlendioxid und Wasserdampf. Der Elektronenanlagerungsprozess vollzieht sich bei diesen Gasen stufenweise. Ein Molekül wird durch Elektronenstoß zunächst aufgespalten und anschließend erfolgt die Elektronenanlagerung an eines der Spaltprodukte. Zum Beispiel dissoziiert ein Kohlendioxidmolekül in Kohlenmonoxid und Sauerstoff. Das negative Ion entsteht dann durch Elektronenanlagerung an das Sauerstoffatom. Die Bildung der negativen Ionen bei Kohlendioxid erfolgt in einem zweistufigen Prozess, eben weil die Voraussetzungen für eine direkte Elektronenanlagerung nicht gegeben sind.

Die Wahrscheinlichkeit der Elektronenanlagerung ist von der molekularen Struktur abhängig, daher sind sehr starke Änderungen der Strom/Spannungs- Charakteristiken mit der Gaszusammensetzung zu erwarten. Diese Annahme wird durch die in Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5 dargestellten Kurven bestätigt. Aus diesen Graphen kann man erkennen, dass die Strom- Spannungs- Charakteristiken und die Durchschlagspannungen bei verschiedenartigen Gasen in enormen Bereichen schwanken können. Besonders ausgeprägt ist dieses Verhalten bei Gasen wie zum Beispiel  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  und  $\text{SO}_2$ , bei denen

zwar die Elektronenanlagerung vorkommt, die Wahrscheinlichkeit für den Ablauf dieses Prozesses jedoch unterschiedlich ist.

Um einen bemerkenswerten Einfluss auf die Corona in technischen Gasen ausüben zu können, sind nur kleinste Mengen dieser Gase erforderlich, zum Beispiel 0,5 bis 1 %  $\text{SO}_2$ ; 2 bis 3%  $\text{O}_2$ ; ungefähr 5%  $\text{H}_2\text{O}$ . Sind diese Komponenten in ausreichender Menge anwesend, so sind auch relativ große Anteile von  $\text{CO}_2$  ohne Bedeutung.

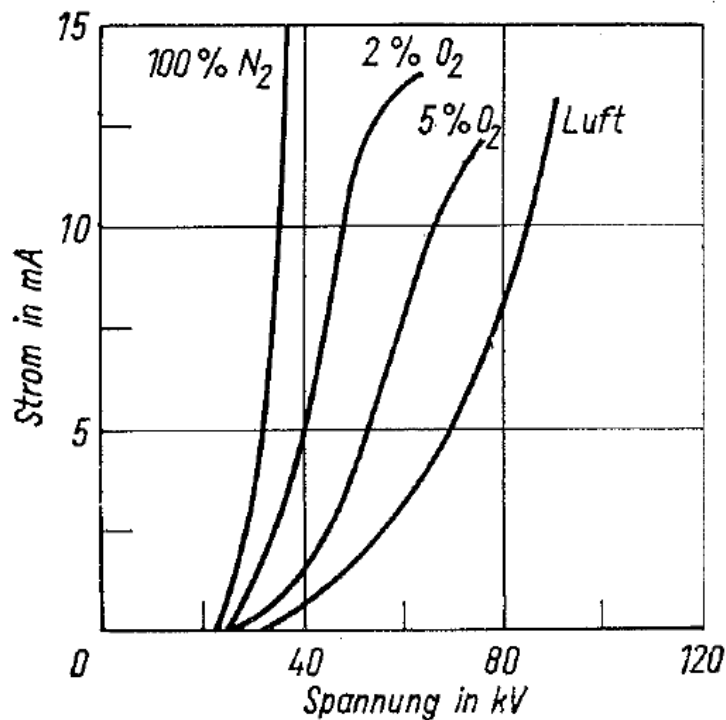


Abbildung 2-4: Strom/Spannungs- Charakteristiken der negativen Corona in Stickstoff- Sauerstoff- Gemischen. Rohrdurchmesser 150 [mm], Drahtdurchmesser 2,8 [mm] [1]

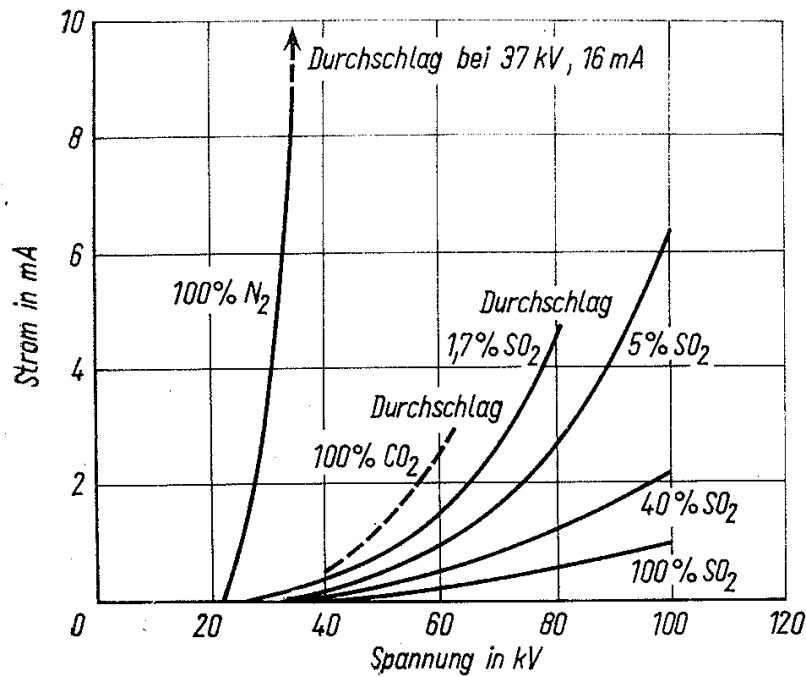


Abbildung 2-5: Strom/Spannungs- Charakteristiken der negativen Corona in Stickstoff- Sauerstoff- Gemischen. Rohrdurchmesser 150 [mm], Drahtdurchmesser 2,8 [mm] [1]

In Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5 ist außerdem der typische Verlauf einer Strom/Spannungs- Charakteristik zu erkennen. Die Kurven beginnen bei der sogenannten Coroneinsatzspannung. Bei weiter Spannungserhöhung nimmt der spezifische Strom zu. Beim Erreichen der Überschlagsgrenze nimmt der Strom bei gleichbleibender oder sogar abnehmender Spannung sehr schnell zu. Dieser Punkt wird als Durchschlagsspannung bezeichnet und stellt somit die Einsatzgrenze eines Elektrofilters dar.[1]

### 2.3.2 Theoretische Strom/Spannungs- Beziehungen

Die Strom/Spannungs- Charakteristiken der Coronaentladung sind Funktionen von Gaszusammensetzung, Gastemperatur und Gasdruck, Elektrodengeometrie, Spannungsform und Polarität, Staubansätzen an den Elektroden und der Staubkonzentration im Gas. Für blanke Koaxialzylinderelektroden in Luft lassen sich die Coronakennlinien theoretisch ableiten. Für das sogenannte symmetrische Parallelplattenelektrodensystem, wie es im Plattenelektrofilter zur Anwendung kommt, sowie für Rohrelektrofilter sind sehr gute Näherungsverfahren bekannt. Jedoch müssen für die meisten anderen Fälle die Charakteristiken experimentell bestimmt werden. Dennoch gelten dieselben allgemeinen Gesetzmäßigkeiten, wenn auch nur die einfachsten geometrischen Verhältnisse mathematisch behandelt werden können. [1]

## 2.4 Ozon

### 2.4.1 Darstellung

Ozon wird allgemein durch Einwirkung von Sauerstoffatomen auf Sauerstoffmoleküle dargestellt. Am gebräuchlichsten ist die Bildung von atomarem Sauerstoff aus Sauerstoffmolekülen. In diesen Fall beträgt die zur Aufspaltung der Sauerstoffmoleküle erforderliche Energie 249,2 [kJ/mol] pro Mol Sauerstoff. Dieser reagiert mit einem Sauerstoffmolekül nach Gleichung ( 2-2 ) [3] zu Ozon, was in Summe einen Energieaufwand von 142,7 [kJ/mol] ergibt.



Die Spaltung der Sauerstoffatome kann z. B. durch Zufuhr von thermischer Energie erfolgen. Bei erhöhter Temperatur wird der endotherme Zerfall des Ozons begünstigt wodurch sich geringe Ozonkonzentrationen ergeben. Es ist zweckmäßiger die Sauerstoffatome bei niedriger Temperatur durch Zufuhr von elektrischer, optischer oder chemischer Energie zu erzeugen und dann weiterreagieren zu lassen.

### 2.4.2 Chemische Eigenschaften

Als endotherme Verbindung hat Ozon große Neigung unter Bildung von Sauerstoff laut Gleichung ( 2-3 ) zu zerfallen.



Aus diesem Grund ist konzentriertes Ozon selbst bei 120°C sehr explosiv. In verdünntem Zustand erfolgt der Zerfall bei Normtemperatur nur allmählich. Beschleunigt wird der Zerfall durch Katalysatoren wie: Mangandioxyd, Bleioxid, Natronkalk.

Die charakteristischste Eigenschaft des Ozons ist sein starkes Oxidationsvermögen wie anhand von Gleichung ( 2-4 ) demonstriert wird.



Auch organische Stoffe werden von Ozon kräftig oxidiert. Man darf daher z.B. Ozon nicht durch Gummischläuche leiten, da diese zerstört werden. Ebenso werden organische Farbstoffe gebleicht, und Mikroorganismen zerstört. In größeren Konzentrationen wirkt Ozon verätzend auf die Atmungsorgane.

Ozon wird technisch z.B. zur Luftverbesserung und-sterilisation und zur Entkeimung von Trinkwasser verwendet.[3]

### 2.4.3 Ozonbildung im Elektrofilter

In einstufigen Elektrofiltern wird bei der Behandlung von Luft Ozon gebildet. Dabei werden Sauerstoffmoleküle durch Elektronenbeschuss in atomaren Sauerstoff gespalten. Ein Teil des atomaren Sauerstoffs reagiert mit molekularem Sauerstoff zu Ozon. Das Ozon entsteht in der Zone des sichtbaren Coronaglimmens, die den Sprühdraht umgibt. Der Ozongehalt des Reingases aus dem Elektrofilter kann in den ppm- Bereich ansteigen. [1]

Man kann die Einflüsse der Ozonbildungsrate für Rohrelektrofilter mit axialem Luftstrom wie folgt zusammenfassen:

- Die erzeugte Ozon- ( $O_3$ ) menge ist direkt proportional dem Corona Strom ( $I$ ).
- Die Erzeugung pro Einheit Strom steigt mit dem Sprühelektrodenradius  $r_0$ .
- Die Erzeugung pro Einheit Strom in einer negativen Corona ist um fünf bis achtfach so hoch als in einer positiven Coronaentladung. [4]

In Abbildung 2-6 und wird eine Strom/Spannungs- Charakteristik, die dazugehörige Ozonbildungsrate in Abhängigkeit der Coronaleistung in Abbildung 2-7, dargestellt. Bei diesen experimentell bestimmten Daten handelt es sich um einen Aufbau, der dem Rohrelektrofilter nachempfunden ist. Der Sprühdrahtdurchmesser beträgt  $100\ [\mu\text{m}]$  und der Manteldurchmesser der Erdungselektrode beträgt  $2\ [\text{cm}]$ . Der Reaktor wurde mit einem Luftstrom von  $1\ [\text{l/min}]$  durchströmt.

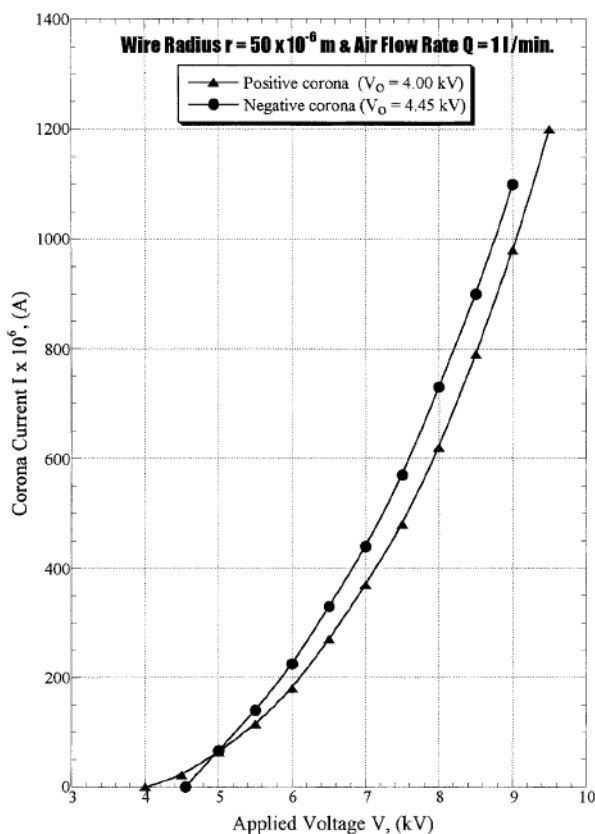


Abbildung 2-6: Strom/Spannungs- Charakteristik für positive und negative Coronaentladung [4]

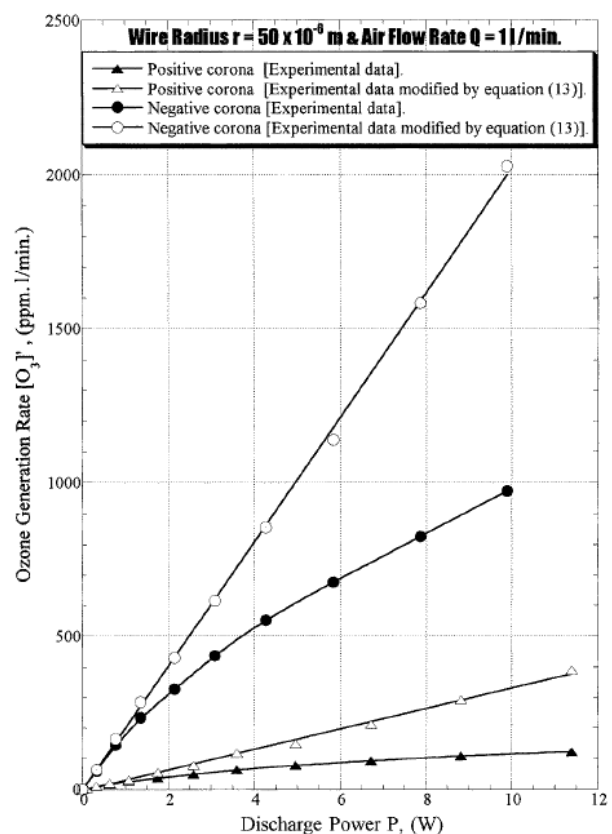


Abbildung 2-7: Ozonbildungsrate gegen Coronaleistung für positive und negative Coronaentladung [4]

In Abbildung 2-7 sind die Ozonbildungsraten der negativen und positiven Coronaentladung gegen die elektrische Leistung aufgetragen. Des weiteren erfolgt der Vergleich der effektiven Bildungsrate mit der theoretischen Bildungsrate. Dabei wurde die in Gleichung ( 2-3 ) erwähnte Zerfallsreaktion herausgerechnet. Je mehr Ozon erzeugt wird, desto mehr wird zerstört, mit der Konsequenz einer größeren Abweichung von der linearen Beziehung zwischen Coronaleistung und der Ozonbildungsrate.[4]

## 2.5 Mathematische Beschreibung der Coronaentladung

Die Werte für Spannung und Strom müssen laut Tabelle 2-1 in elektrostatische Si- Einheiten umgerechnet werden.

Tabelle 2-1: Umrechnung in elektrostatischen Si- Einheiten [5]

$1 \text{ ESU} = 1 \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{dyn}} = 1 \frac{\sqrt{\text{g} \cdot \text{cm}^3}}{\text{s}}$
$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s} = 10 \cdot c_0 = 3 \cdot 10^9 \text{ ESU}$
$1 \text{ kV} = 1,05 \cdot 10^{-2} \left[ \frac{\sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}}}{\text{s}} \right]$
$1 \text{ A} = 9,49 \cdot 10^4 \left[ \frac{\sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}^3}}{\text{s}^2} \right]$



Voraussetzung für die Bildung der Corona an der Sprühelektrode ist das Überschreiten einer kritischen Feldstärke, der Coroneinsatzfeldstärke  $E_0$ . Für die Ermittlung der Coroneinsatzfeldstärke wurde ein empirischer Ansatz laut Gleichung ( 2-5 ) [1] gefunden, nach dem die Coroneinsatzfeldstärke bei glatten runden Drähten vom Radius  $r_0$  des Sprühdrahtes und von der relativen Luftdichte nach Gleichung ( 2-6 ) abhängt.

$$E_0 = 3000 \cdot \delta + 90 \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta}{r_0}\right)} \left[ \frac{kV}{m} \right] \quad (2-5)$$

$$\delta = \frac{T_0 \cdot p}{T \cdot p_0} \quad (2-6)$$

$T_0 = 293,15$  [K];  $p_0 \dots 1,013$  [bar]

Für Rohrelektroabscheider errechnet man die Coroneinsatzspannung  $U_0$  nach Gleichung( 2-7 ).

$$U_0 = E_0 \cdot r_0 \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) [kV] \quad (2-7)$$

R Rohradius[m]

Der spezifische Coronastrom  $I$  [mA/m] (Strom pro Meter Sprühelektrode) beträgt für kleine Stromstärken laut Gleichung ( 2-8 ):

$$I = U \cdot (U - U_0) \frac{2K}{\left(R^2 \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)\right)} \left[ \frac{mA}{m} \right] \quad (2-8)$$

Bei mittleren Stromstärken ist Gleichung ( 2-9 ) anzuwenden.

$$I = \frac{2K}{R^2} \left[ (U - U_0)^2 + \frac{U_0 \cdot (U - U_0)}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \right] \left[ \frac{mA}{m} \right] \quad (2-9)$$

Die Ionenbeweglichkeit K ist für die positive und negative Corona angegeben:

$$K = 20 \left[ \sqrt{\frac{m^3}{kg}} \right] \quad (\text{negative Corona})$$

$$K = 10 \left[ \sqrt{\frac{m^3}{kg}} \right] \quad (\text{positive Corona}) \text{ und mit}$$

$$U \left[ \frac{\sqrt{kg \cdot m}}{s} \right] \quad \text{Betriebsspannung}$$

Die maximalen Betriebsspannung welche als Durchschlagsspannung  $U_{\max}$  bezeichnet wird liegt in der Regel zwischen  $U_{\max} = 6$  bis  $8$  [kV/cm], und stellt die Spannung pro 1 [cm] Abstand von der Sprühelektrode zur Niederschlagselektrode dar. [5]

Nach einer weiteren empirischen Beziehung wird die Abscheidefeldstärke  $E_p$  anhand von Gleichung ( 2-10 ) berechnet:

$$E_p = \sqrt{\frac{2 \cdot I}{K}} \left[ \frac{kV}{m} \right] \quad (2-10)$$

Für die Berechnung der treibenden Kraft für die Abscheidung wird neben der Abscheidefeldstärke noch die Aufladefeldstärke  $E_a$  benötigt. Diese kann über die mittlere Feldstärke (Betriebsspannung/ Rohrradius) in guter Näherung mit Gleichung ( 2-11 ) ermittelt werden.

$$E_a = \frac{U}{(R-r)} \left[ \frac{kV}{m} \right] \quad (2-11)$$

Mit der Kenntnis der Aufladefeldstärke  $E_a$  und der Abscheidefeldstärke  $E_p$  kann die Teilchenwanderungsgeschwindigkeit  $w$  laut Gleichung ( 2-12 ) berechnet werden:

$$w = \frac{E_a \cdot E_p \cdot x}{4\pi \cdot \eta} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (2-12)$$

$x$  Partikeldurchmesser

Nach dem Gesetz von Stokes wird der Reibungswiderstand  $D$  für ein kugelförmiges Teilchen nach Gleichung ( 2-13 ) berechnet:

$$D = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot x \cdot w(x) \left[ \frac{kg \cdot m}{s^2} \right] \quad (2-13)$$

Die Energie  $W$ , die für die Abscheidung eines Teilchens erforderlich ist, ist nach Gleichung ( 2-14 ) definiert.

$$W = D \cdot (R-r) [J] \quad (2-14)$$

$(R-r)$  Abstand von der Niederschlags Elektrode

Bei einer gegebenen Rohgaskonzentration  $c_0$  [kg/Nm<sup>3</sup>] ergibt sich die Anzahl  $N$  der Teilchen je m<sup>3</sup> nach Gleichung ( 2-15 ).

$$N = \frac{6 \cdot c_0}{\pi \cdot \rho_p \cdot x^3} \quad (2-15)$$

$\rho_p$  Partikeldichte

Daraus lässt sich wie folgt der Fraktionsabscheidegrad ermitteln.

Der über eine differentielle Länge  $dl$  mit der Geschwindigkeit  $w$  zur Niederschlagselektrode transportierte Staub muss der Abnahme der vom Gas mit der Geschwindigkeit  $v$  mitgeführten Staubmenge über diese differentielle Länge entsprechen. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung ( 2-16 ) angeführt.

$$2 \cdot R \cdot \pi \cdot w \cdot c \cdot dl = R^2 \cdot \pi \cdot v \cdot [c - (c + dc)] \quad (2-16)$$

$$-dc = \frac{2 \cdot c \cdot w \cdot dl}{R \cdot v}$$

Integriert man Gleichung ( 2-16 ) von Eintritt  $E$  bis zur Filterlänge  $L$  erhält man Gleichung ( 2-17 ).

$$c_L = c_E \cdot e^{\frac{-2 \cdot w_{(x)} \cdot L}{R \cdot v}} \quad (2-17)$$

Für eine definierte Teilchenfraktion mit bekannter Wanderungsgeschwindigkeit  $w_{(x)}$  leitet sich daraus der Fraktionsabscheidegrad  $T_{(x)}$  nach Gleichung ( 2-18 ) ab.

$$T_{(x)} = 1 - \frac{c_{(x)L}}{c_{(x)E}} = 1 - e^{\frac{-2 \cdot w_{(x)} \cdot L}{R \cdot v}} \quad (2-18)$$

Durch Multiplikation von Zähler und Nenner des Exponenten mit dem halben Rohrumfang ( $R\pi$ ) lassen sich die geometrischen Variablen zur spezifischen Abscheidefläche  $\frac{A}{\dot{V}}$  ( $\dot{V}$  = Volumenstrom in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) zusammenfassen. In dieser Form ist die Gleichung für den Abscheidegrad unter der Bezeichnung Deutsch-Gleichung ( 2-19 ) bekannt.

$$T_{(x)} = 1 - \frac{c_{(x)L}}{c_{(x)E}} = 1 - \cdot e^{-\frac{w_{(x)} \cdot A}{\dot{V}}} \quad (2-19)$$

[1]

## 2.6 Sprühelektroden

### 2.6.1 Starre Sprühelektroden

In der Regel werden Sprühelektroden mit zylindrischem Querschnitt von 1,5 bis 2 [mm] verwendet. Es gibt aber die unterschiedlichsten Ausführungsformen. Solche Ausführungen müssen den Grundprinzipien entsprechen und sollten möglichst praktisch handhabbar sein. Die Grundprinzipien können wie folgt zusammengefasst werden:

- Erreichung der bestmöglichen Resultate von Coronastrom [mA/m] gegen angelegte Spannung [kV]
- Maximale Feldstärke zum dazugehörigen Coronafeld
- Minimierung der angelegten Spannung
- Optimierung der Verteilungsgeometrie auf das Coronafeld gemäß der Niederschlagselektrode

Praktische Fragen die besondere Aufmerksamkeit erfordern, fallen in die folgenden Kategorien:

- Raumausnutzung innerhalb des Elektrofilters
- Bedenken möglicher Ausfälle und einfache Austauschbarkeit
- Einfache Fertigung und Installation
- langer Lebenszyklus

Auswertungen [6] haben gezeigt, dass die Ausführung von Sprüh- und Niederschlagselektrode einen erheblichen Beitrag zur Wirkungsgradsteigerung darstellt. Diese Erkenntnis hat zur Einführung sogenannter starrer Entladungselektroden geführt welche in Abbildung 2-8 dargestellt werden.

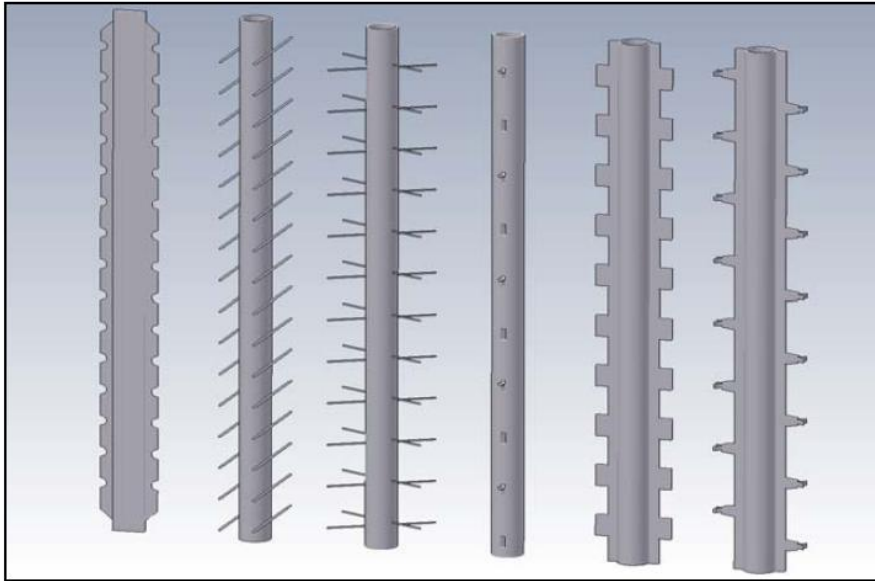


Abbildung 2-8: Verschiedene Typen starrer Sprühelektroden [6]

### 2.6.2 Verbesserte starre Sprühelektroden

Das Konzept der starren Sprühelektroden wurde nicht ursprünglich formuliert, um einem hohen leistungsfähigen Coronastrom zur Verfügung zu stellen, sondern auch ein allgemeines Phänomen zu lösen. Dies ist die lokale Coronaentladung/Durchschlag auf die Niederschlagselektrode, wie in Abbildung 2-9 dargestellt ist.



Abbildung 2-9: Bild der lokalen Coronaentladung auf die Niederschlagselektroden [6]

Die starren Sprühelektroden wurden seit ihrer Einführung ständig verbessert. Jedoch ergaben sich beim Einsatz von starren Sprühelektroden unter normalen Betriebsbedingungen folgende Probleme.

- Materialien die anfangs verwendet wurden, waren noch gegen unterschiedliche Grade der Korrosion empfindlich, die die annehmbare Lebensdauer beschränkt.
- Abtrennung von Spitzen von der röhrenförmigen Basis auf Grund des inkonsequenten oder schlechten Schweißens.
- Galvanische Erosion wegen des Gebrauches von verschiedenen Materialien.
- Deformation der Spitzen oder der Drähte während Operationen wie Hochdruckwäsche. (Diese Deformierung minimiert die Entladungen, die das relevante Feld weniger wirksam bzw. völlig unwirksam machen.) [6]

### **2.6.3 Konzept neuer Sprühelektroden**

Es wurde eine neue starre Sprühelektrode entwickelt, welche auf die vorhergehenden Erkenntnisse aufbaut.

- Auswahl von haltbarem Material mit hohem Widerstand gegen Gasverunreinigung und Korrosion.
- Geringe Grundmasse, um größtmöglichen Nutzen für die vorhandenen Strukturen im Falle von Nachrüstungen sowie strukturelle Gestaltungsbeschränkungen in neuen Elektrofilter zu erhalten.
- Starrheit des Materials das zu verwenden ist.
- Übereinstimmung in allen Einzelkomponenten.
- Minderung der Coroneinsatzspannung
- Maximierung der Corona Felddausbreitung.
- Sicherstellung einer einfachen Fertigung sowie praktischen Montage auf der Baustelle.

Bei Auswahl von Edelstahl wird ein Großteil der gestellten Anforderungen entsprochen. Edelstahl ist ein Material, hoch resistent gegen Korrosion sowie Erosion, ist unreaktiv in Gegenwart der meisten Chemikalien, sowie standhaft gegen die normal auftretenden Temperaturen in Elektrofiltern.

Obwohl das Konzept einige der akzeptierten Standardausführungen für starre Sprühelektroden einschließt, berücksichtigen die neuen Ausführungen auch die folgenden einzigartigen Eigenschaften:

- Kleiner Durchmesser nahtloser lasergeschweißter Rohre aus Edelstahl 25 [mm]. Diese minimieren die Coroneinsatzspannung.
- Manschettenähnliche Erweiterungsspitze die um das Trägerrohr (Mast) eingebaut und zur Sicherheit punktgeschweißt werden.
- Jede Erweiterungsspitze hält ausreichend große Erweiterungen in der horizontalen Ebene. Jedes Ende ist mit 4 Zinken ausgeführt. Die Zinken sind scharf angespitzt und können individuell gewölbt werden. So wird sichergestellt, dass sich diese Zinken der Abscheideelektrode anpassen können.
- Strömungsgünstige Ausführung der Erweiterungsspitzen für günstigen Gasstrom mit geringer Turbulenzeinbringung.

Die neue starre Sprühelektrode wird als „G- Spike“ bezeichnet und ist in Abbildung 2-10 dargestellt.

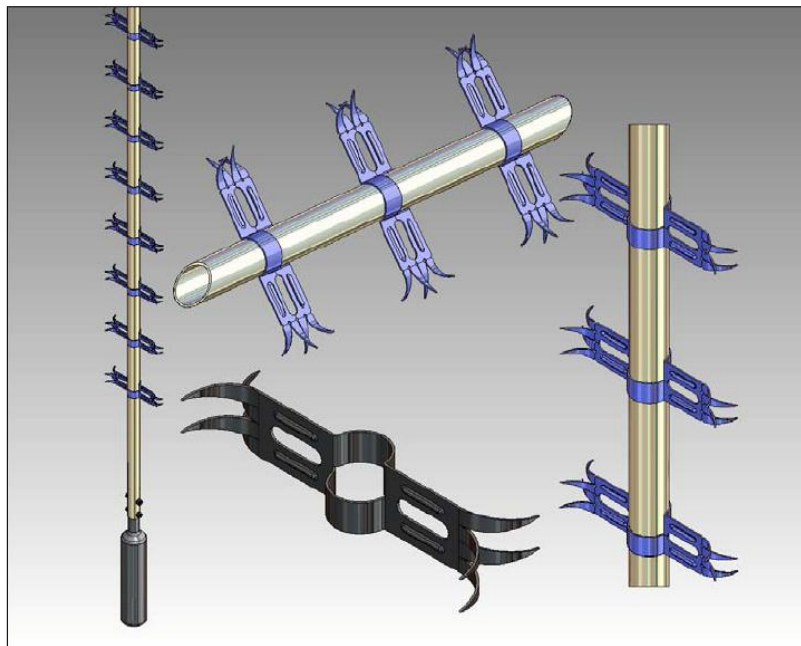


Abbildung 2-10: Detail einer innovativen starren Sprühelektrode (G- Spike) [6]



#### 2.6.4 Ergebnisse der Testläufe der neuen Sprühelektroden

Das Ausführungskonzept für die neue starre Sprühelektrode wurde in einer dafür konstruierten Anlage getestet, die wie folgt aufgebaut war.

- Eine variable Gaspassage für einen Plattenelektrofilteraufbau die auf einen Abstand von 300 oder 400 [mm] eingestellt werden kann, mit einer Gesamthöhe von bis zu 8 Metern.
- Möglichkeit der Aufnahme von mindestens 3 Passagen sowie unterschiedliche Konfigurationen: Platten, Rohrelektrofilter
- Justierbares Klopf System (Hammer Gewicht, Position und Zeitsteuerung)

Die G-Spike Sprühelektrode wurde ohne Lufdurchsatz und unter drei verschiedenen Bedingungen getestet. Zum Beispiel nur Mast (25 mm Rohr), Mast mit Spitzen (G-Spike) zwischen Plattenelektroden (300 mm Abstand) und exzentrisch montierten Spikes im Mast innerhalb eines Rohres mit 400 mm Durchmesser wie in Abbildung 2-11 dargestellt.



Abbildung 2-11: Im Rohr montierte Anwendung [6]

Die Resultate der Testläufe werden in Abbildung 2-12 zusammengefasst.

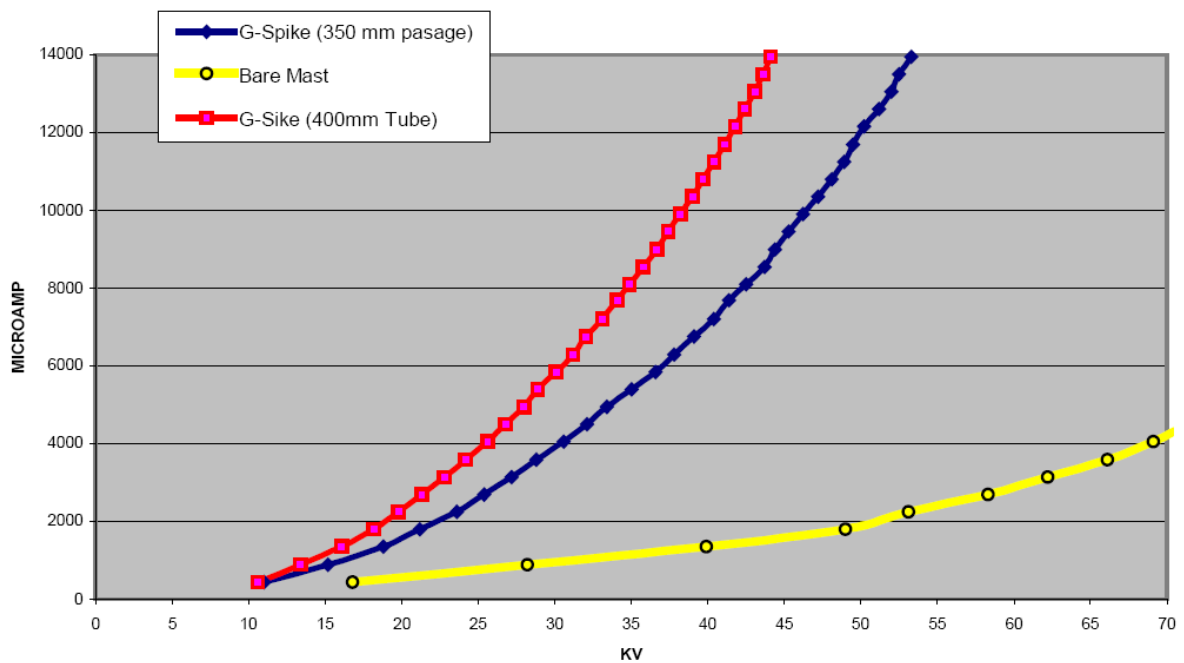


Abbildung 2-12:Drei Strom/Spannungs- Charakteristiken für G- Spike [6]

Die Ergebnisse zeigen eindeutig die Wirksamkeit der neuen Sprühelektroden und seine hohe Leistungsfähigkeit, vor allem bei der Rohrelektrofilter Ausführung.

Es erfolgt auch eine Visualisierung der Coronaentladung die in Abbildung 2-13 zu sehen ist. Man erkennt hier an den Spitzen die Zone der Coronaentladung.

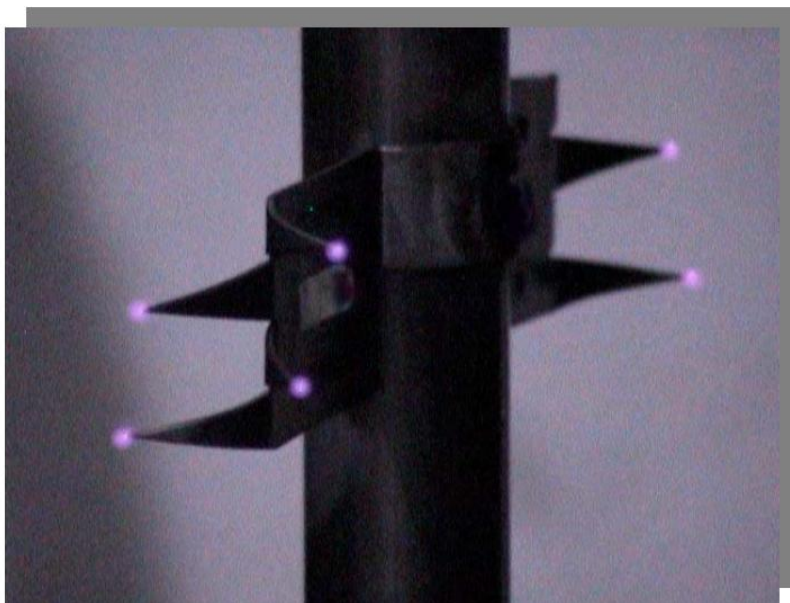


Abbildung 2-13: Visualisierung der Coronaentladung an den Spitzen [6]

## 2.7 Fallfilm

Eine Strömungsform die in vielen Stoffaustauschprozessen Anwendung findet ist der an einer Wand ablaufende Flüssigkeitsfilm. Bei Austauschprozessen wird der Film dünn gehalten, dadurch kann dieser als laminare Strömung berechnet werden. Die an der Wand anliegende Schicht hat die Geschwindigkeit Null. Die treibende Kraft ist in diesem Fall die Erdbeschleunigung  $\rho \cdot g$ , die an die Stelle des Druckabfalles  $-dp/dz$  eingesetzt wird. Man kann also laut Gleichung ( 2-20 ) [7] schreiben:

$$\rho \cdot g = -\eta \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (2-20)$$

Nach Integration von Gleichung ( 2-20 ) erhält man das Profil der Strömungsgeschwindigkeit und den Durchsatz. Die Randbedingungen lauten, wenn man die Filmdicke mit  $\delta$  bezeichnet.

$$x = 0 \Rightarrow \frac{dw}{dx} = 0$$

$$x = \delta \Rightarrow w = 0$$

Die erste Integration ergibt:

$$-\eta \frac{dw}{dx} = \rho \cdot g \cdot x$$

Aus der zweiten Integration folg:

$$-w = \frac{\rho \cdot g}{\eta} \cdot \frac{x^2}{2} + C_2 ; \quad C_2 = 0 - \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2}{2 \cdot \eta}$$

Daraus folgt Gleichung ( 2-21 )

$$w = \frac{\rho \cdot g}{2 \cdot \eta} (\delta^2 - x^2) \quad (2-21)$$

Um den Durchsatz  $\dot{V}$  nach Gleichung ( 2-22 ) zu errechnen, wird die Geschwindigkeit über  $x$  integriert und mit der Breite  $y$  des Films multipliziert

$$\dot{V} = y \frac{\rho \cdot g}{2 \cdot \eta} \left( \delta^2 \int_0^\delta dx - \int_0^\delta x^2 dx \right) = y \frac{\rho \cdot g}{2 \cdot \eta} \left( \delta^3 - \frac{\delta^3}{3} \right) = y \frac{\rho \cdot g}{3 \cdot \eta} \delta^3 \quad (2-22)$$

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich aus Gleichung ( 2-23 )

$$w_m = \frac{\dot{V}}{y \cdot \delta} = \frac{\rho \cdot g}{3 \cdot \eta} \delta^2 \quad (2-23)$$

Die Charakterisierung der Strömungsform des Rieselfilms erfolgt über die Reynolds- Zahl laut Gleichung ( 2-24 ), dazu wird der äquivalenten Durchmesser  $d_{\text{äq}} = 4f/U = 4 \delta y/y = 4 \delta$  benötigt, wobei  $y$  die Breite des Films ist.

Also

$$\text{Re} = \frac{w_m \cdot 4 \cdot \delta \cdot \rho}{\eta} \quad (2-24)$$

Die Strömung kann mehrere Formen annehmen. Bei  $Re < 20$  hat der Film eine glatte Oberfläche. In einem Bereich von  $20 < Re < 1000$  strömt der Film im Inneren noch laminar, zeigt aber eine wellige Oberfläche.  $1000 < Re < 1500$  ist ein Übergangsbereich, und bei  $Re > 1500$  strömt der Film turbulent.

Bei der praktischen Ausführung der Filmströmung wird meist ein Gasstrom dem Film von unten nach oben entgegengeführt. Dieser Gasstrom beeinflusst die Filmoberfläche, was durch die *Reynolds*-Zahl der Flüssigkeit nicht erfasst wird. Durch die Reibung am Gasstrom wird die Geschwindigkeit bei  $x = 0$  bis zu einem gewissen Grade herabgesetzt. Außerdem kann bei großer Gasgeschwindigkeit die Filmoberfläche aufgerissen werden. Diese Einflüsse stellen eine Herabsetzung des Durchsatzes dar, vergrößern aber innerhalb des Films die Durchmischung. [7]

### 3 Planung

Der im Rahmen dieser Diplomarbeit gebaute Coronareaktor besteht im Wesentlichen aus folgenden Bestandteilen:

- Einrichtung für die Bereitstellung und den Transport der Flüssigphase
- Einrichtung für die Bereitstellung und den Transport der Gasphase
- Einrichtung für die Bereitstellung der Hochspannung

#### 3.1 Versuchsanlage

Die gesamte Anlage besteht aus dem Coronareaktor, einem Vorlagebehälter, Möglichkeit zur Einstellung des Flüssigkeitsfilms und des Gasdurchsatzes, sowie diversen Anschlüssen zum Ablassen der Flüssigkeit. Die Versuchsanlage wird schematisch in Abbildung 3-1 dargestellt.

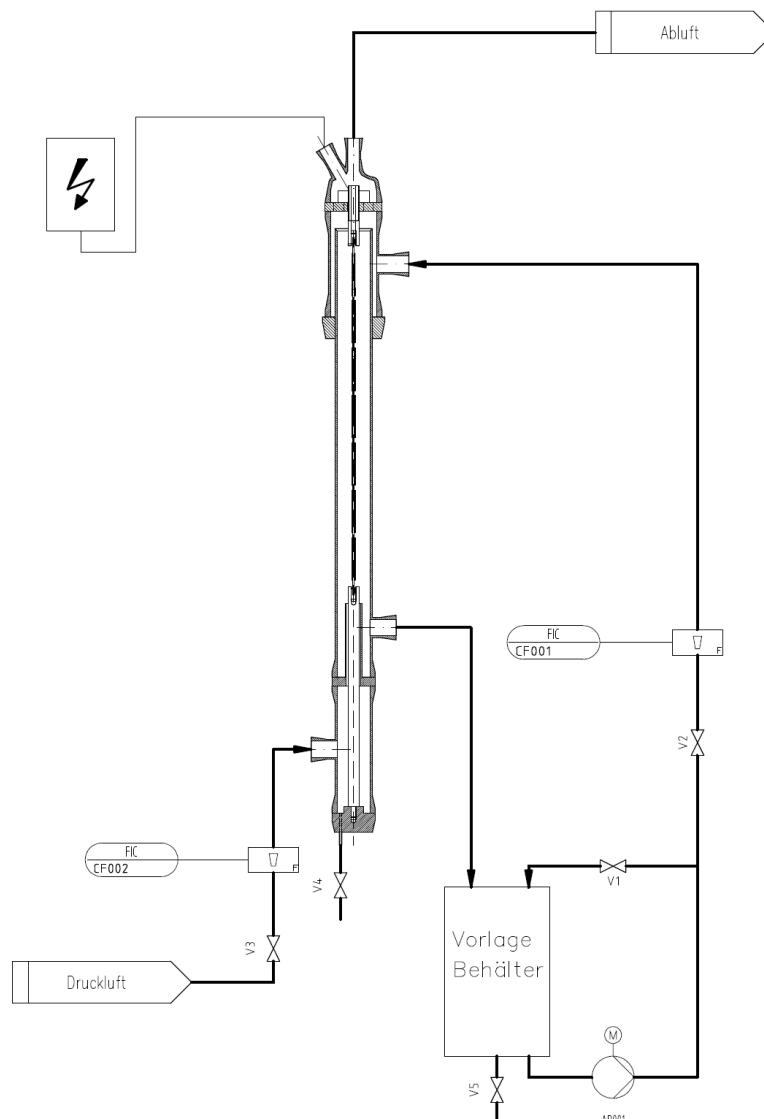


Abbildung 3-1: Fließbild der Versuchsanlage

### 3.2 Coronareaktor

Der Coronareaktor stellt das zentrale Element der Versuchsanlage dar und wird in Abbildung 3-2 dargestellt.

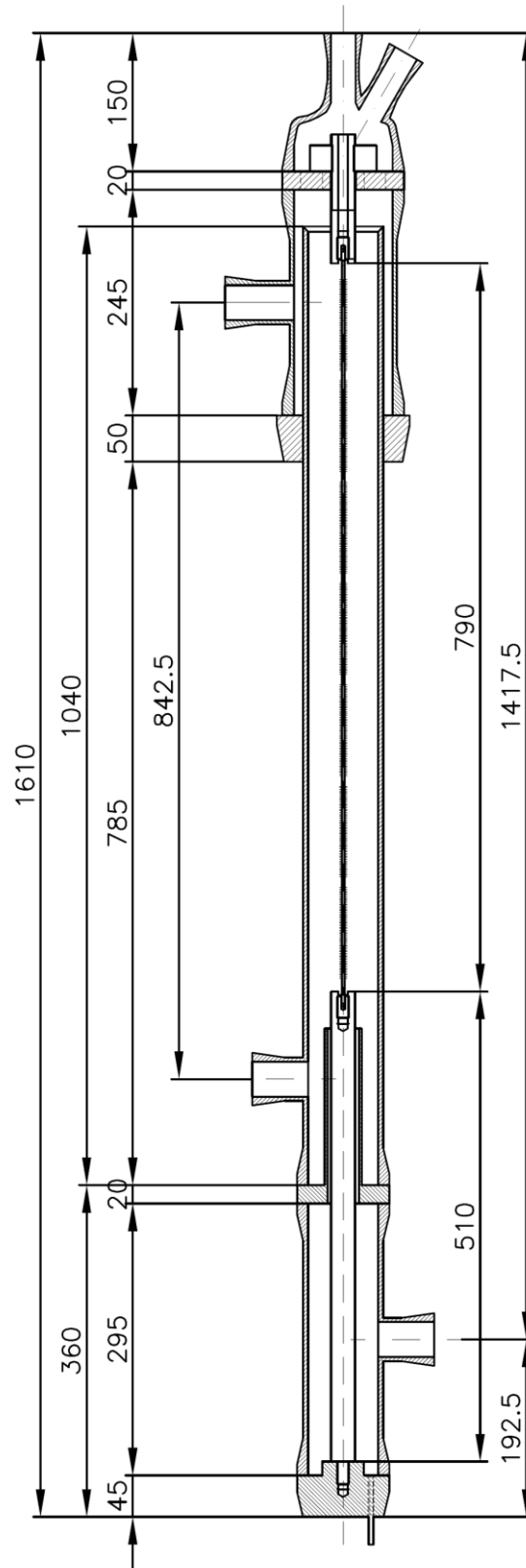


Abbildung 3-2: Schnitt durch den Coronareaktor

Das Hauptelement besteht aus einem Rohr aus Borosilicatglas mit einem Innendurchmesser von 76 [mm] (DN 80). Am oberen Ende ist dieses Rohr offen und mit einem Rundschliff versehen, der zur Erzeugung eines geschlossenen Flüssigkeitsfilms dient. An diesem Rohr ist ein Ring aus PVC welcher mit einer Dichtung aus Viton abgedichtet wird angebracht. Damit sich dieser Ring beim Spannen der Elektrode nicht nach unten verschiebt, wird dieser mit einer Rohrschelle in Position gehalten. An diesem Ring wird ein Rohr, ebenfalls aus Borosilicatglas DN 100, aufgesetzt welches einen Anschluss DN 40 besitzt, der für den Flüssigkeitsanschluss verwendet wird. Nach Eintritt der Flüssigphase in die Kolonne staut sich diese im Ringspalt zwischen Innen- und Außenrohr und steigt langsam nach oben. Sobald die Flüssigkeit die Oberkante des Innenrohrs erreicht, läuft sie über die geschliffene Kante und bildet auf der Innenseite des Rohres den Fallfilm.

Am oberen Ende befindet sich eine Vorrichtung um die Sprühelektrode zu spannen, sowie eine Abdeckung aus Glas zur Abführung der Abluft. Im mittleren Teil des Hauptrohres ist ein Flüssigkeitssammler angebracht. Dieser ist als PVC Rohr, welches mit einer PVC Platte verklebt ist, ausgeführt. Der Flüssigkeitssammler wird zwischen Hauptrohr und einem weiteren Glasrohr befestigt. Bei der Flüssigkeitsabführung ist ein T- Stück eingebaut um die Durchführung der Gegenelektrode sicherzustellen. Der Boden des Hauptrohres ist aus einem Deckel aus PVC gefertigt welcher eine Gewindebohrung für die Halterung der Sprühelektrode beinhaltet. Der Flüssigkeitsstrom wird mit einer Pumpe aufgebaut, wobei man den Durchfluss an einem Ventil einstellen und am Rotameter ablesen kann. Für geringe Durchflüsse und zur besseren Regelbarkeit ist eine Bypassleitung installiert. Der Gasstrom wird über eine Druckluftleitung sichergestellt, welcher auch einstellbar und am Rotameter ablesbar ist.

### **3.2.1 Flüssigkeitsabführung und Sprühelektrodenhalterung**

In Abbildung 3-3 sieht man den aus PVC ausgeführten Flüssigkeitssammler. Dieser ist als Rohr DN 40 ausgeführt welches einerseits die Halterung der Sprühelektrode durchführt, andererseits lässt es auch einen Gasstrom zu. An der Seite kann der Flüssigkeitsstrom abgeführt werden. Da sich dieser Anschluss nicht ganz am Boden befindet bleibt immer ein geringer Anteil an Flüssigkeit in diesem Anlagenteil. Aus diesem Grund wurde eine kleine schräge Bohrung in der Bodenplatte angebracht, um eine Möglichkeit der Entleerung mittels Ventil zu schaffen.

Die Halterung der Sprühelektrode ist aus PE- HD (Polyethylen high density) gefertigt. PE wurde aufgrund seines guten dielektrischen Verhaltens (spezifischer Durchgangswiderstand ca.  $10^{18}$  Ohm/cm) gewählt. Im Zentrum befindet sich eine Gewindebohrung M12 in der sich eine Schraube befindet, die selbst eine Gewindebohrung M4 hat. So wird sichergestellt,

dass beim Spannen der Sprühelektrode das Gewinde des Kunststoffes nicht ausgerissen wird.

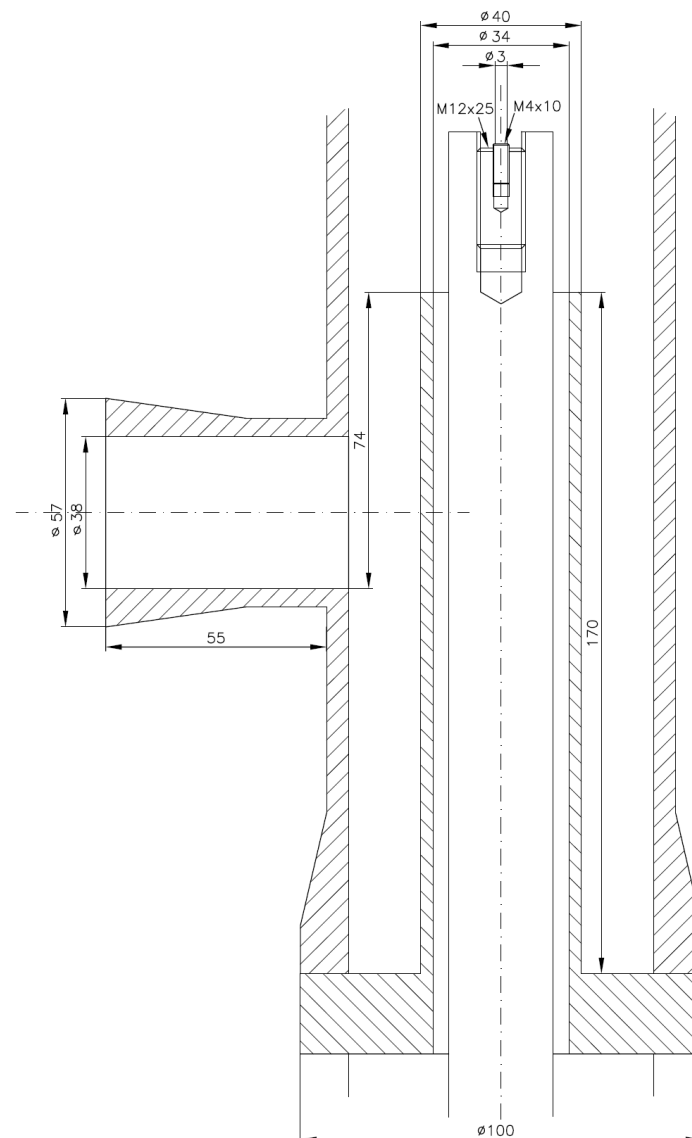


Abbildung 3-3: Detailansicht der Flüssigkeitsabführung und Sprühelektrodenhalterung

### 3.2.2 Elektrodenhalterung und Spannvorrichtung

In Abbildung 3-4 ist eine Detailansicht des oberen Reaktorteils abgebildet. Im unteren Teil der Zeichnung befindet sich die Elektrodenhalterung, diese ist äquivalent zur unteren Elektrodenhalterung ausgeführt.

Am Ende des DN 100 Rohrs ist eine PVC- Platte eingelegt. Im Zentrum befindet sich eine Bohrung für die Elektrodenhalterung. Es befinden sich drei weitere Bohrungen in der Platte zur Gasdurchführung. Auf dieser Platte befindet sich eine kleinere Platte, welche die Funktion einer Spannmutter übernimmt. Die Elektrodenhalterung ist mit einem Außengewinde gefertigt und somit kann die Sprühelektrode gespannt werden. Im Zentrum



der Elektrodenhalterung befindet sich im Gegensatz zur unteren Ausführung eine durchgehende Bohrung. Hier kann das Kabel zur Hochspannungserzeugung durchgeführt werden. Das Rohr wird mit einer Glaskuppel abgedeckt, mit welcher die Platte zwischen dem Rohr eingeklemmt wird. An der Glaskuppel befinden sich zwei Flansche DN 25 wobei einer zur Durchführung der Hochspannungserzeugung, der andere zur Abführung des Gasstromes dient.

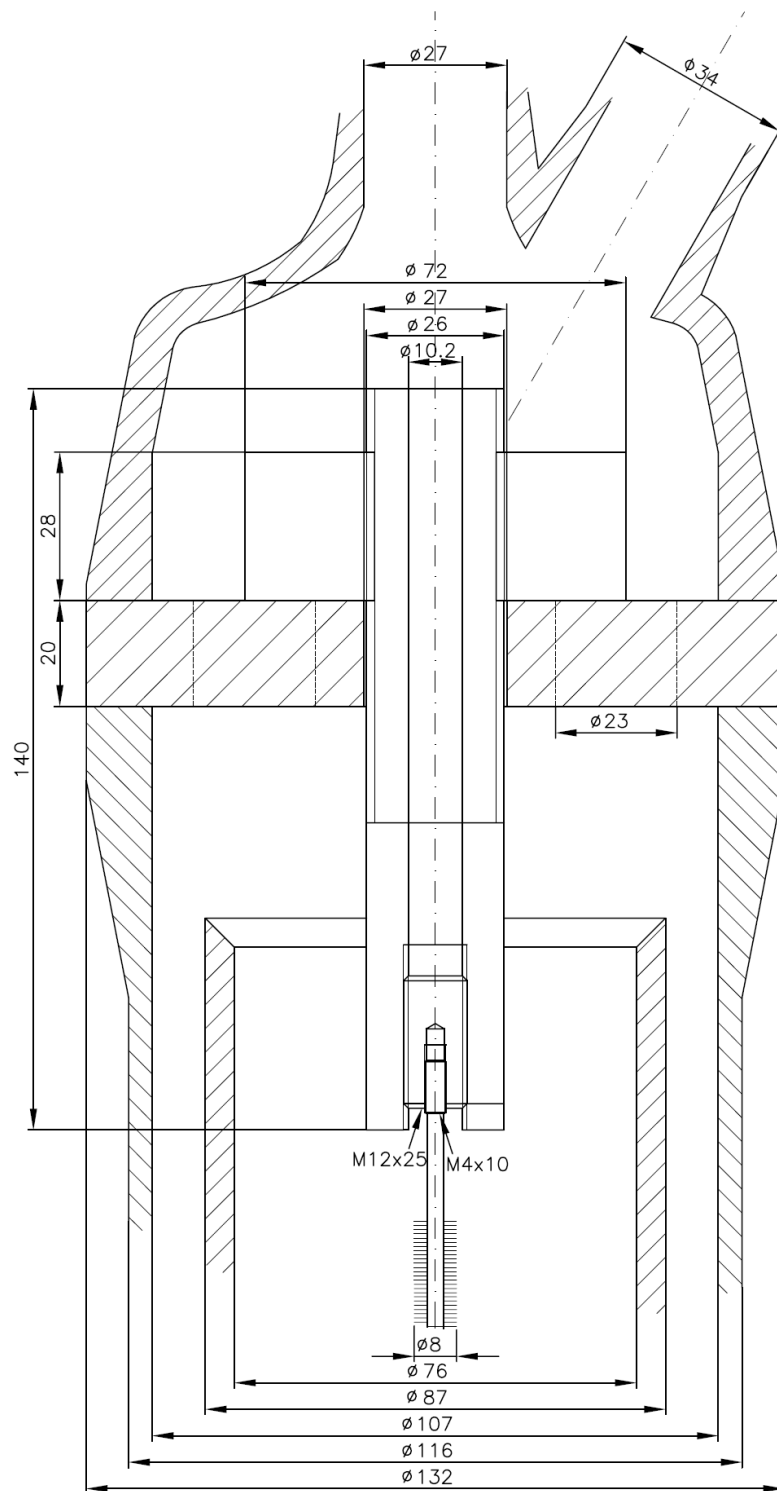


Abbildung 3-4: Detailansicht der Fallfilmaufbauvorrichtung

### 3.2.3 Sprühelektroden

Die Sprühelektrode wird als Bürstenelektrode ausgeführt. Der Haltedraht ist aus Stahl, die Bürstendrähte sind aus Edelstahl, gefertigt. Ursprünglich handelt es sich um einfache Flaschenbürsten, wobei die Länge der Bürsteneinheit 100 [mm] beträgt. Eine einzelne Bürste 4 und 8 [mm] ist in Abbildung 3-5 abgebildet. Um diese als Sprühelektrode einzusetzen wurden einfach einzelne Flaschenbürsten miteinander verschweißt. In diesem Reaktor wurden sieben solcher Bürsten miteinander verschweißt. Am Anfang und am Ende wurde zusätzlich noch ein Gewinde M4 für den Einbau aufgeschweißt. Es wurden zwei verschiedene Durchmesser untersucht, welche in Tabelle 3-1 angeführt sind.

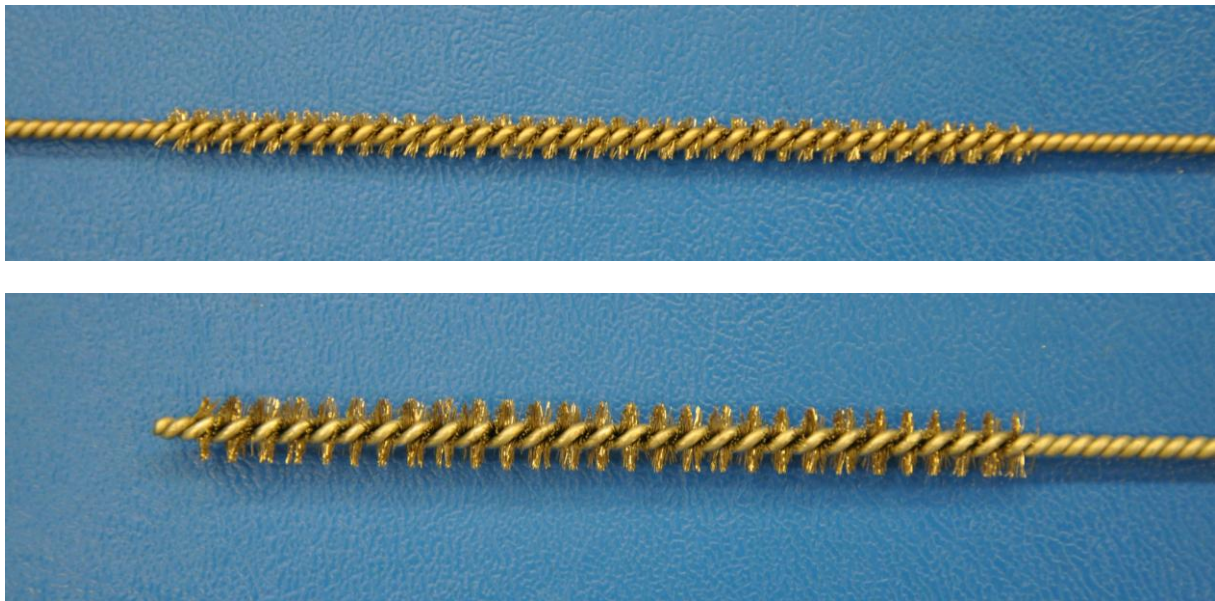


Abbildung 3-5: Bild einer einzelnen Flaschenbürste 4 und 8 [mm]

Tabelle 3-1: Abmessung der Sprühelektrode

Bezeichnung	[mm]	[mm]
Bürstendurchmesser	4	8
Drahtdurchmesser	0,10	0,15
Haltedrahtdurchmesser	2	3
Aktive Bürstenlänge	700	700

### 3.3 Hochspannungsversorgung

#### 3.3.1 Hochspannungsgenerator

Der Hochspannungsgenerator wurde von der Firma Wurmitzer gebaut. In Abbildung 3-6 ist eine Skizze der Vorderansicht des Hochspannungsgenerators abgebildet. Anhand dieser Skizze sollen die grundlegenden Funktionen und Anzeigen erläutert werden.

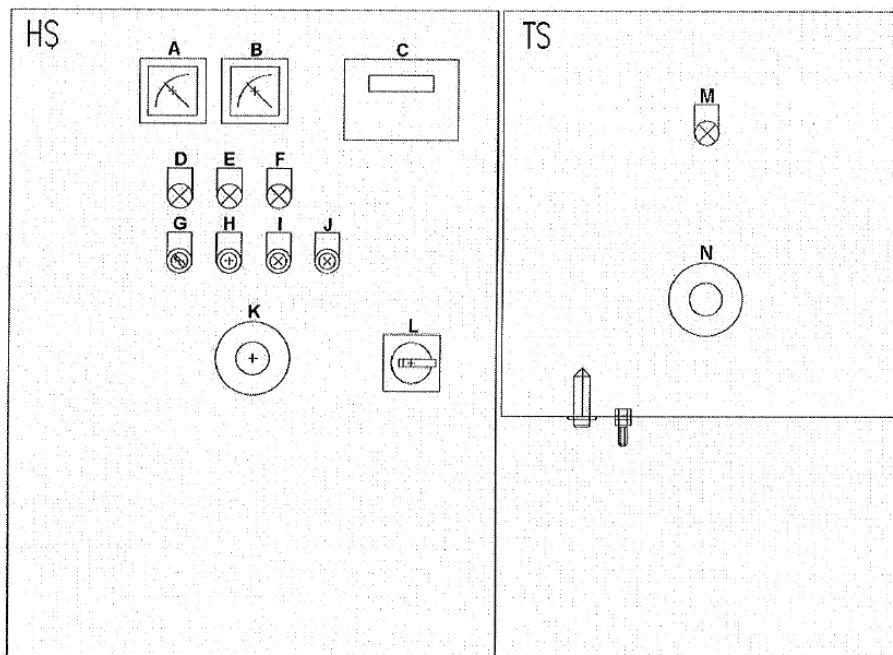


Abbildung 3-6: Hochspannungssteuerung und Anzeige

- A Aktuelle Spannungsanzeige [kV] (zeigt die Ausgangsspannung)
- B Aktuelle Stromanzeige [mA] (zeigt den Ausgangsstrom)
- C MPCS Bedienfeld
- D Anzeigensteuerung eingeschalten (zeigt, dass der Spannungsregler eingeschalten ist)
- E Notabschaltungsanzeige (zeigt, dass die Notabschaltungseinstellung eingeschalten ist)
- F Fehler MPCS Anzeige (zeigt, dass der MPCS Fehlermodus eingeschalten ist)
- G Nah / Fern Schalter (Nah aktiviert den Spannungsregler lokal, Fern ist für Fernsteuerungsbetrieb)
- H Reset Schalter (um Fehler oder Notabschaltung zurück zu setzen)

- 
- I Einschaltknopf und Anzeige (um das System zu starten und den „Ein“ Zustand anzuzeigen)
  - J Ausschaltknopf und Anzeige (um das System auszuschalten und den „Aus“ Zustand anzuzeigen)
  - K Notausschalter 1
  - L Hauptschalter
  - M Hochspannung Ein Anzeige (zeigt Gefahr an, HIGH VOLTAGE IS ACTIVE!)
  - N Notausschalter 2

Der gewünschte Sollwert der Ausgangsspannung muss im Menüpunkt MP021 eingestellt werden. Der aktuelle Sollwert ist im MP015 angezeigt. Der Spannungsregler regelt die Ausgangsspannung zu dem Wert welcher im MP015 angezeigt wird. Es können Werte von 0-24 [kV] mit einer Nachkommastelle eingestellt werden. Für weitere Informationen und Funktionen wird an dieser Stelle auf die Betriebsanleitung verwiesen.[8]

### 3.3.2 Coroneinsatzspannung und Erfahrungswerte

Der negative Pol der Hochspannung ist am Versuchsreaktor angeschlossen. Somit ist eine negative Coroneentladung sichergestellt. Die Coroneinsatzspannung kann nach Gleichung ( 2-7 ) berechnet werden und ist in Tabelle 3-2 angegeben.

Tabelle 3-2: Coroneinsatzspannung für die entsprechende Bürstenelektrode

Bürstenelektrode [mm]	Coroneinsatzspannung [kV]
4	5,2
8	6,2

Es sind auch Literaturwerte [5] für die Durchschlagspannung bekannt und in Gleichung ( 3-1 ) angegeben.

$$U_{\max} = R \cdot (600 - 800) [kV] \quad (3-1)$$

Die optimale Spannung kann nach Gleichung ( 3-2 ) berechnet werden.

$$U_{op} = (0,9 - 0,8) \cdot U_{\max} [kV] \quad (3-2)$$

Die Durchschlagspannung sowie die optimale Spannung werden anhand von Gleichung ( 3-1 ) und ( 3-2 ) für die geplante Anlage berechnet und in Tabelle 3-3 zusammengefasst.

Tabelle 3-3: Durchschlagspannung und optimale Spannung

	eingesetzter Wert	erhaltene Werte [kV]
Durchschlagspannung $U_{\max}$	700	26,6
optimale Spannung $U_{op}$	0,85	22,6

Aus Tabelle 3-3 ist ersichtlich, dass es sich beim Anlegen der maximalen Spannung von 22 [kV] um einen aus Literaturwerten optimalen Wert handelt.

## 4 Aufbau

Die Versuchsanlage wurde in ein auf Rädern gesetztes Stahlgerüst gebaut. Es wurde auf eine benutzerfreundliche Anbringung der einzelnen Komponenten geachtet, welche in Abbildung 4-1 ersichtlich ist.



Abbildung 4-1: Bild nach erfolgtem Aufbau der Versuchsanlage

Ein wichtiges Element für eine funktionierende Anlage stellt die Erdung dar. Vom Flüssigkeitssumpf des Fallfilmes führt ein Erdungskabel aus der Anlage heraus und ist mit dem Erdungsanschluss des Hochspannungsgenerators verbunden. Um eventuell auftretende Überschläge sowie Fehlerströme sicher abzuführen wurden jeder Flansch bzw. Rohrhalterung mit einem Erdungskabel versehen. Dieses Erdungskabel führt in einer redundanten Ausführung zu einem Erdungsanschluss. Es wurde zur zusätzlichen Sicherheit an der hinteren sowie an den seitlichen Fronten Platten aus PVC montiert.

#### **4.1 Erste Testläufe**

Die Anlage muss mit einem elektrolythaltigem Spülwasser betrieben werden, damit der Fallfilm elektrische Leitfähigkeit besitzt. Dazu wird eine Lösung aus ca. 40 [g/l]  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  hergestellt. Der Vorlagebehälter fasst vier Liter, dazu wird 160 [g]  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  in entionisiertem Wasser gelöst. Diese Lösung wird in den Vorlagebehälter gefüllt und die ersten Testläufe können gestartet werden.

Bei den ersten Testläufen zeigte sich ein Durchschlag auf die obere Elektrodenhalterung. Dieser Stromdurchschlag ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Die erste Ausführung der Elektrodenhalterung wurde aus PVC, mit geringem spezifischem Widerstand, gefertigt. Außerdem wurde das Hochspannungskabel an der Außenseite der Elektrodenhalterung geführt.

Aufgrund der Überschläge wurde die Elektrodenhalterung in PE- HD, mit hohem spezifischem Widerstand, gefertigt. Zur Optimierung wird das Hochspannungskabel im Zentrum der Elektrodenhalterung geführt.





Abbildung 4-2: Überslag auf die Elektrodenhalterung



## 5 Abnahmemessung

### 5.1 Strom/Spannungs- Charakteristik

Die Strom/Spannungs- Charakteristik wird mit einer 4 [mm] Bürstenelektrode und einer 8 [mm] Bürstenelektrode vermessen. Dazu wird am Hochspannungsgenerator eine Spannung eingestellt. Bei Erreichen der gewünschten Spannung wird dann der spezifische Coronastrom abgelesen. Um eine einfache Ablesung zu ermöglichen wird zwischen Draht der Erdungselektrode und Erdung des Hochspannungsgenerators ein Digitalmultimeter zwischengeschaltet. Dabei zeigte sich, dass speziell bei höheren Spannungswerten die Stromanzeige am Hochspannungsgenerator höhere Stromwerte anzeigt. Außerdem ist das Ablesen kleiner Stromwerte am Hochspannungsgenerator nicht einfach, da dieser mit einer analogen Anzeige mit einer 0,25 [mA] Unterteilung, ausgestattet ist. In Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2 sind die Stromwerte des Digitalmultimeters mit Strom MM, jene der Hochspannungsgeneratoranzeige mit Strom bezeichnet.

Um diesen Unterschied der Strommessung zu kontrollieren wurde ein zusätzliches Digitalmultimeter an den Erdungsdrähten der Flansche zwischengeschaltet. Nach dem Ohmschen Gesetz ist der Strom über einen Ohmschen Widerstand konstant. Mit dieser Messanordnung können etwaige Ströme, welche über Erdungsdrähte abgeführt werden, bestimmt werden.

Bei einer Spannung von 22 [kV] und einem Luftdurchsatz von 4,5 [m<sup>3</sup>/h] beträgt die Differenz zwischen der Anzeige am Digitalmultimeter und der des Hochspannungsgenerator 1,6 [mA]. Dieser Strom müsste demnach über die Erdungsdrähte der Flansche abgeführt werden. Bei Zwischenschalten eines weiteren Digitalmultimeters zwischen den Erdungsdrähten und der Erdung pendelt der Wert zwischen 0,02 und 0,05 [mA]. Da dieser Wert weit von 1,6 [mA] entfernt ist, konnte nachgewiesen werden, dass die Anzeige am Hochspannungsgenerator zu ungenau ist.

Aus diesem Grund werden die Stromwerte des Digitalmultimeters in den Diagrammen aufgetragen.

Des Weiteren erfolgt eine Untersuchung des Luftdurchsatzes auf die Strom- Spannungs- Charakteristik, bei konstantem Flüssigkeitsdurchsatz von 70 [l/h]. Diese Messungen wurden mit der 4 [mm] und 8 [mm] Bürstenelektrode durchgeführt.

Die Strom/Spannungs- Charakteristik bei Verwendung der 4 [mm] Bürstenelektrode ist in Abbildung 5-1, jene der 8 [mm] Bürstenelektrode ist in Abbildung 5-2, dargestellt.

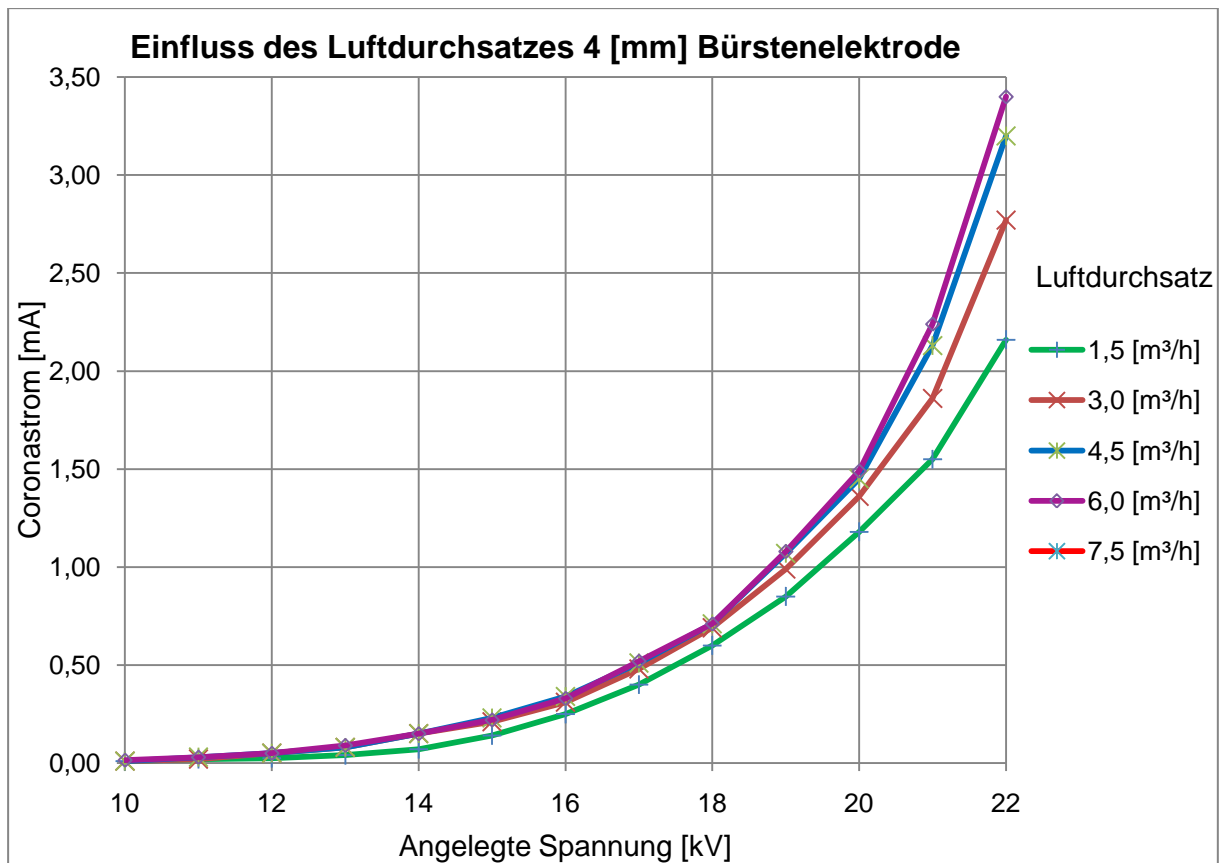


Abbildung 5-1: Einfluss des Luftdurchsatzes auf die Strom/Spannungs- Charakteristik bei Verwendung einer 4 [mm] Bürstenelektrode

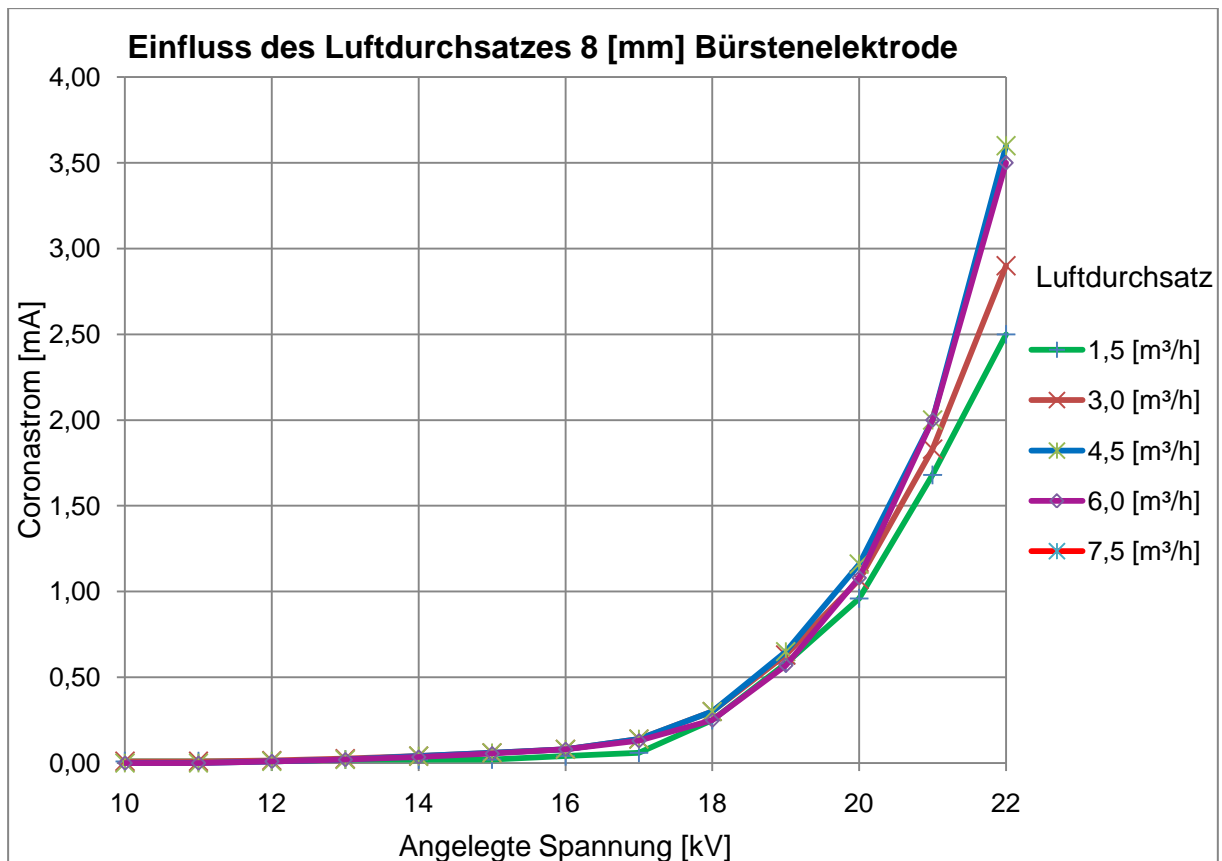


Abbildung 5-2: Einfluss des Luftdurchsatzes auf die Strom/Spannungs- Charakteristik bei Verwendung einer 8 [mm] Bürstenelektrode

Bei steigenden Luftdurchsätzen fällt auf, dass bei hohen Spannungen z.B. 22 [kV] höhere Stromwerte gemessen werden als bei niedrigeren Luftdurchsätzen. Dies kann anhand der Beeinflussung der ionisierten Gasmoleküle in Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit erklärt werden. Je höher die Gasgeschwindigkeit, desto höher die Beeinflussung und desto schmaler wird der Einsatzbereich der angelegten Spannung.

In Abbildung 5-3 erfolgt ein Vergleich der beiden Bürstenelektroden. Zur besseren Darstellung wird nur ein Luftdurchsatz von 4,5 [m³/h] abgebildet.

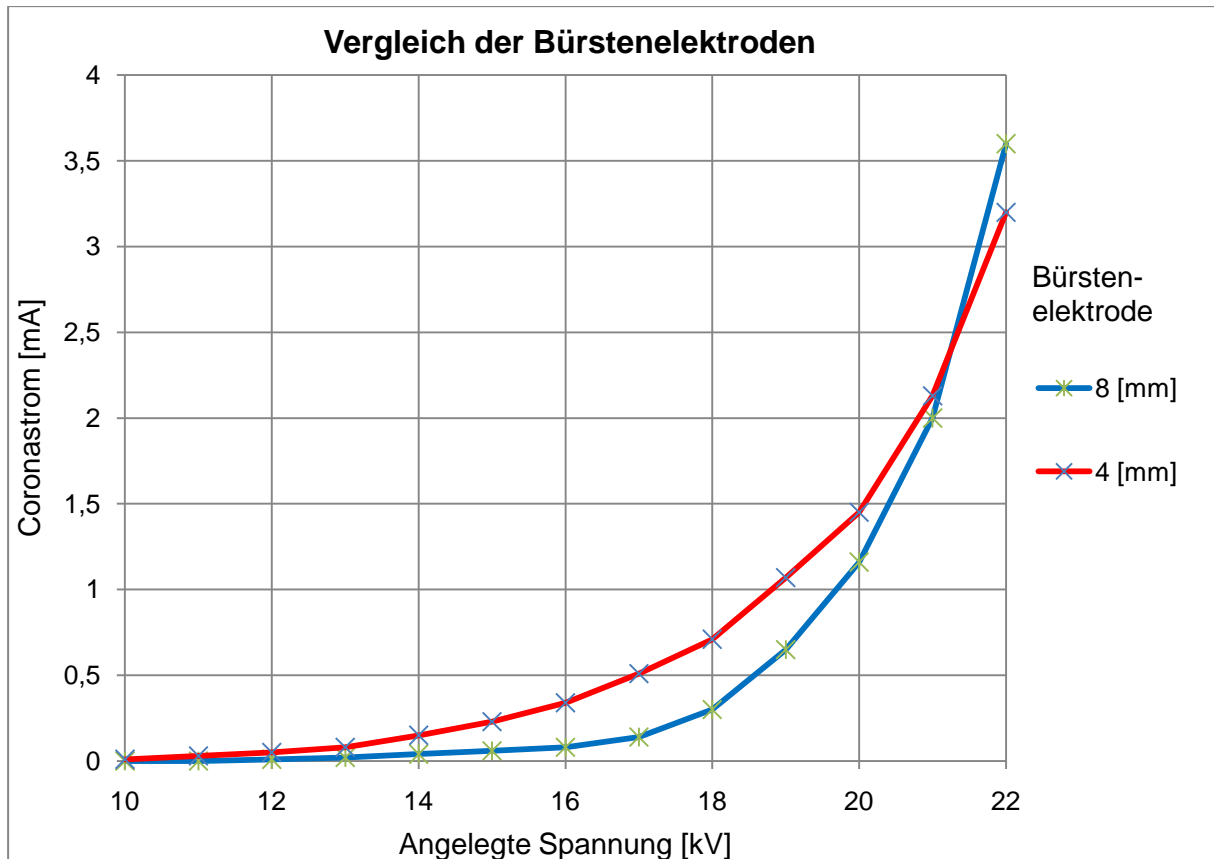


Abbildung 5-3: Vergleich der 4 [mm] Bürstenelektrode mit 0,10 [mm] Drahtdurchmesser und der 8 [mm] Bürstenelektrode mit 0,15 [mm] Drahtdurchmesser

Beim Vergleich der Bürstenelektroden kann man erkennen, dass bei der 4 [mm] Ausführung bereits bei geringen Spannungen ein Stromfluss gemessen wurde. Dies ist aufgrund des geringeren Drahtdurchmessers von 0,10 [mm] erklärbar. Der spezifische Strom der 8 [mm] Bürstenelektrode ist bei niedrigen Spannungen zuerst geringer, da diese einen Drahtdurchmesser von 0,15 [mm] aufweist. Ab einer Spannung von 18 [kV] ist ein relativ steiler Anstieg bemerkbar. Ab einer Spannung von 21 [kV] werden sogar die Stromwerte der 4 [mm] Bürstenelektrode übertroffen, was dem theoretischen Verlauf widerspricht.

## 5.2 Vergleich mit theoretischen Strom/Spannungs- Charakteristiken

Die Berechnung der theoretischen Strom/Spannungs- Charakteristik erfolgt nach Abschnitt 2.5. Die errechneten Werte für die 4 [mm] Bürstenelektrode sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst. Als Radius der Sprühelektrode wird in den Formeln der halbe Drahtdurchmesser eingesetzt.

Tabelle 5-1: Theoretisch berechnete Werte für die Strom/Spannungs- Charakteristik 4 [mm] Bürstenelektrode mit 0,10 [mm] Drahtdurchmesser

Bezeichnung	Einheit	Wert
$\delta$	[-]	1,0
$E_0$	$\left[ \frac{kV}{m} \right]$	15727,9
$E_0$	$\left[ \frac{\sqrt{kg \cdot m}}{m \cdot s} \right]$	165,1
R	[m]	0,0380
$r_0$	[m]	0,00005
$U_0$	[kV]	5,2
$U_0$	$\left[ \frac{\sqrt{kg \cdot m}}{s} \right]$	0,1
K	$\left[ \sqrt{\frac{m^3}{kg}} \right]$	20,0

Spannung	Theorie kleiner Ströme				Theorie mittlerer Ströme		
	Spannung	Strom	Strom	spez. Strom	Strom	Strom	spez. Strom
[kV]	$\left[ \frac{\sqrt{kg \cdot m}}{s} \right]$	$\left[ \frac{\sqrt{kg \cdot m^3}}{s^2} \right]$	$\left[ \frac{mA}{m} \right]$	$\left[ \frac{mA}{0,7m} \right]$	$\left[ \frac{\sqrt{kg \cdot m^3}}{s^2} \right]$	$\left[ \frac{mA}{m} \right]$	$\left[ \frac{mA}{0,7m} \right]$
6	0,06	2,16	0,02	0,02	3,76	0,04	0,03
8	0,08	10,25	0,11	0,08	30,35	0,32	0,22
10	0,11	22,02	0,23	0,16	81,37	0,86	0,60
12	0,13	37,48	0,39	0,28	156,83	1,65	1,16
14	0,15	56,62	0,60	0,42	256,72	2,71	1,89
16	0,17	79,44	0,84	0,59	381,04	4,02	2,81
18	0,19	105,94	1,12	0,78	529,79	5,58	3,91
20	0,21	136,13	1,43	1,00	702,97	7,41	5,19
22	0,23	170,00	1,79	1,25	900,59	9,49	6,64

In Abbildung 5-4 ist die vermessene Strom/Spannungs- Charakteristik der 4 [mm] Bürstenelektrode mit dem theoretisch berechneten Werten verglichen. Zur besseren Übersicht wird nur der Luftdurchsatz von 4,5 [m³/h] angezeigt.

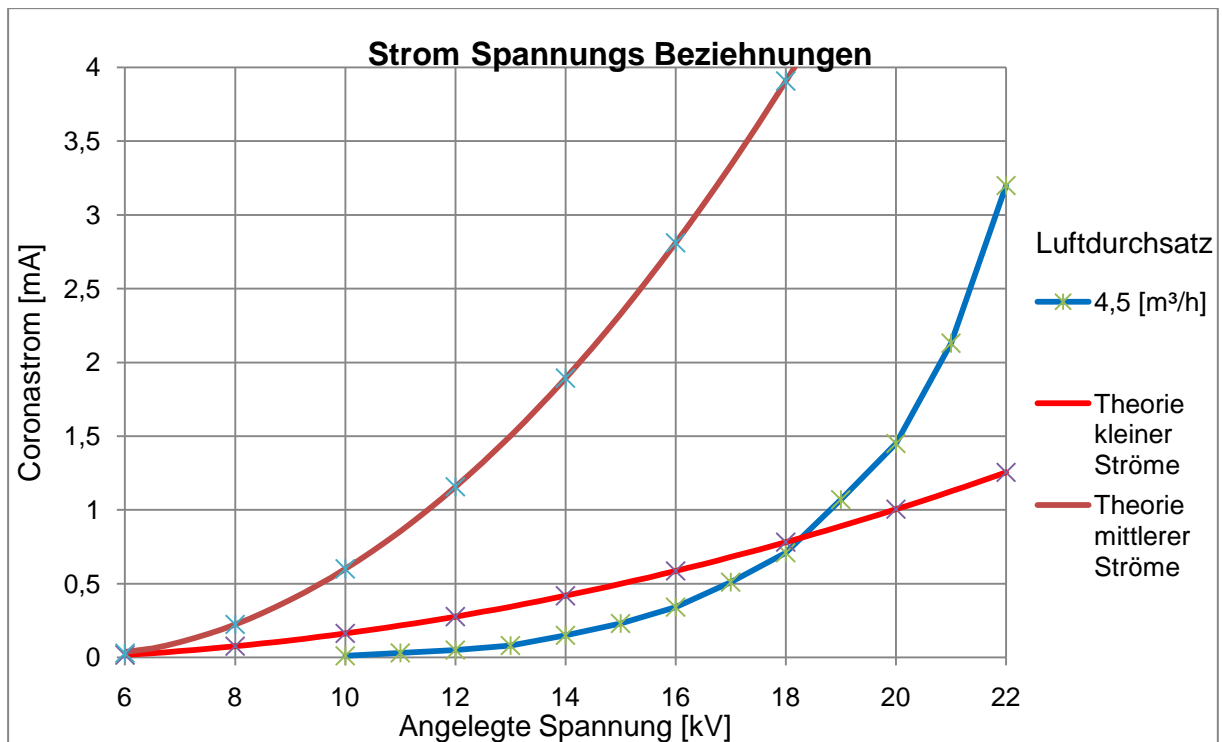


Abbildung 5-4: Vergleich der experimentell ermittelten Strom/Spannungs- Charakteristik 4 [mm] Bürstenelektrode mit theoretisch berechneten Werten 0,10 [mm] Drahtdurchmesser

Es erfolgt die Berechnung der theoretischen Strom/Spannungs- Charakteristik für die 8 [mm] Bürstenelektrode und ist in Tabelle 5-2 zusammengefasst. In weiterer Folge erfolgt der Vergleich der vermessen mit den theoretisch berechneten Werten. In Abbildung 5-5 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 5-2: Theoretisch berechnete Werte für die Strom/Spannungs- Charakteristik 8 [mm] Bürstenelektrode mit 0,15 [mm] Drahtdurchmesser

Bezeichnung	Einheit	Wert
$\delta$	[-]	1,0
$E_0$	$\left[ \frac{kV}{m} \right]$	13392,3
$E_0$	$\left[ \frac{\sqrt{kg \cdot m}}{m \cdot s} \right]$	140,6
R	[m]	0,038
$r_0$	[m]	0,000075
$U_0$	[kV]	6,3
$U_0$	$\left[ \frac{\sqrt{kg \cdot m}}{s} \right]$	0,1
K	$\left[ \frac{\sqrt{m^3}}{\sqrt{kg}} \right]$	20,0

Spannung	Theorie kleiner Ströme				Theorie mittlerer Ströme		
	Spannung	Strom	Strom	spez. Strom	Strom	Strom	spez. Strom
[kV]	$\left[ \frac{\sqrt{kg \cdot m}}{s} \right]$	$\left[ \frac{\sqrt{kg \cdot m^3}}{s^2} \right]$	$\left[ \frac{mA}{m} \right]$	$\left[ \frac{mA}{0,7m} \right]$	$\left[ \frac{\sqrt{kg \cdot m^3}}{s^2} \right]$	$\left[ \frac{mA}{m} \right]$	$\left[ \frac{mA}{0,7m} \right]$
8	0,08	6,84	0,07	0,05	14,65	0,15	0,11
10	0,11	18,36	0,19	0,14	54,31	0,57	0,40
12	0,13	33,80	0,36	0,25	118,41	1,25	0,87
14	0,15	53,17	0,56	0,39	206,93	2,18	1,53
16	0,17	76,46	0,81	0,56	319,89	3,37	2,36
18	0,19	103,67	1,09	0,76	457,28	4,82	3,37
20	0,21	134,80	1,42	0,99	619,11	6,52	4,57
22	0,23	169,86	1,79	1,25	805,36	8,49	5,94

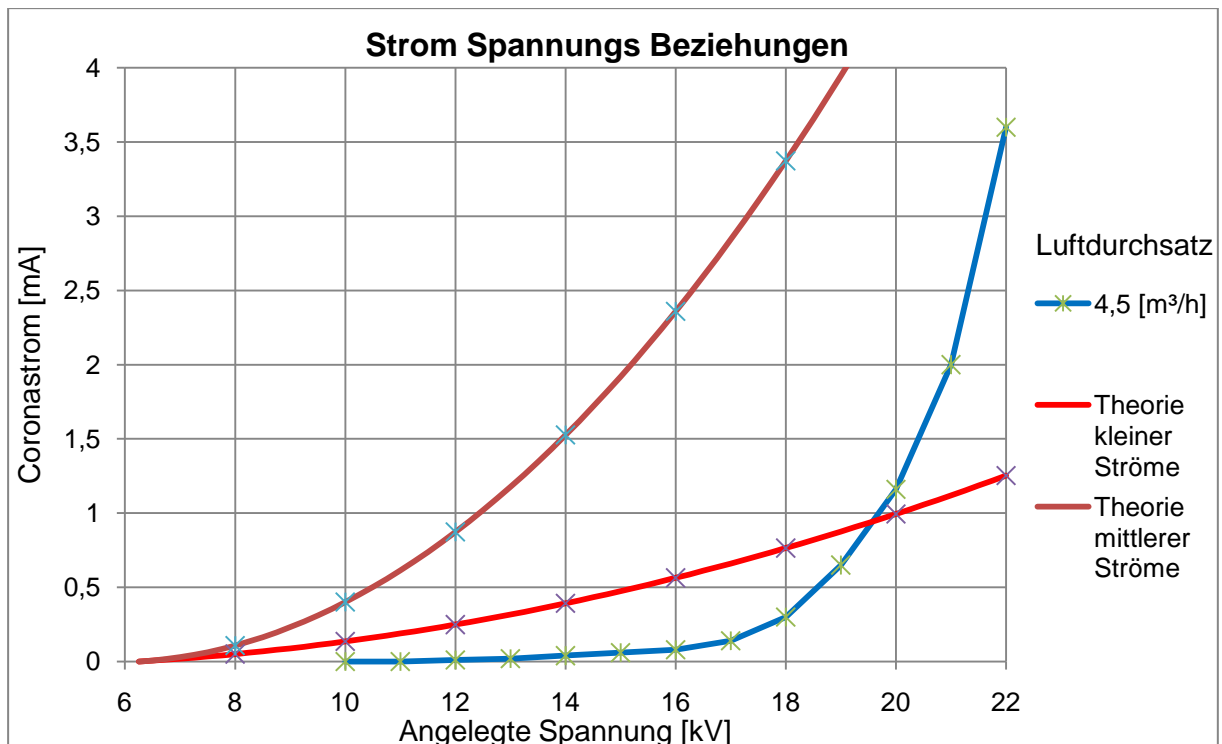


Abbildung 5-5: Vergleich der experimentell ermittelten Strom/Spannungs- Charakteristik 8 [mm] Bürstenelektrode mit theoretisch berechneten Werten 0,15 [mm] Drahtdurchmesser

Die vermessene Strom/Spannungs- Charakteristik stimmt im Kurvenverlauf mit dem theoretisch berechneten überein. Bis zu einer Spannung von 19 [kV] gleicht sich die Kurve der vermessenen Werte mit jener aus der theoretischen Berechnung bei Verwendung der Theorie kleiner Ströme. Besonders beim Verlauf mit der 4 [mm] Bürstenelektroden stimmen die experimentellen Werte und jener aus der Theorie für kleine Stromstärken gut überein.

Beim Vergleich, der berechneten Werten aus der Theorie mittlerer Stromstärken mit dem vermessenen Verlauf, kann man für höhere Spannungen eine Übereinstimmung erwarten. Dieser Bereich wurde nicht mehr vermessen, da der Hochspannungsgenerator mit 24 [kV] limitiert ist und die Vermessung bei 22 [kV] aus sicherheitstechnischen Gründen beendet wurde.

Die Abweichung der theoretischen Verläufe im unteren Spannungsbereich lässt sich durch Einsetzen des halben Drahtdurchmessers erklären, der mit 0,10 [mm] bzw. 0,15 [mm] einen sehr kleinen Wert darstellt. Außerdem beschreibt die Theorie kreisrunde Sprühelektroden und wird in diesen Fall für Bürstenelektroden verwendet.

Man erkennt aber trotz allen Umständen eine gute Übereinstimmung von Theorie und vermessenen Werten.



### 5.3 Vergleich Messergebnis mit Literaturwerten

An dieser Stelle soll die vermessene Strom/Spannungs- Charakteristik mit jenen aus Literaturdaten verglichen werden. In Abbildung 5-6 werden zusätzlich zu der vermessenen Strom/Spannungs- Charakteristik noch 3 weitere Charakteristiken aus der Literatur aufgetragen. Zur besseren Übersicht sind die Eckdaten in Tabelle 5-3 zusammengefasst. Bei der gebauten Anlage und den Ozongenerator [4] handelt es sich um Labor/Versuchs-Anlagen. Wobei die G- Spike [6] und das Stahlrohr [6] eher in der Industrie Anwendung finden. Außerdem ist der Elektrodendurchmesser dieser G- Spike unbekannt. Des weiteren wird auch keine effektive Elektrodenlänge in den Literaturdaten angegeben, sondern nur der über die gesamte Elektrode fließende Strom. Es handelt sich somit um einen quantitativen Vergleich.

Tabelle 5-3: Eckdaten der verschiedenen Reaktoren/Rohrelektrofilter

Bezeichnung	Rohrdurchmesser	Elektrodendurchmesser
	[mm]	[mm]
4 [mm] Bürstenelektrode	78	0,10
8 [mm] Bürstenelektrode	78	0,15
Ozongenerator [4]	20	0,10
G- Spike [6]	400	
Stahlrohr [6]	400	25

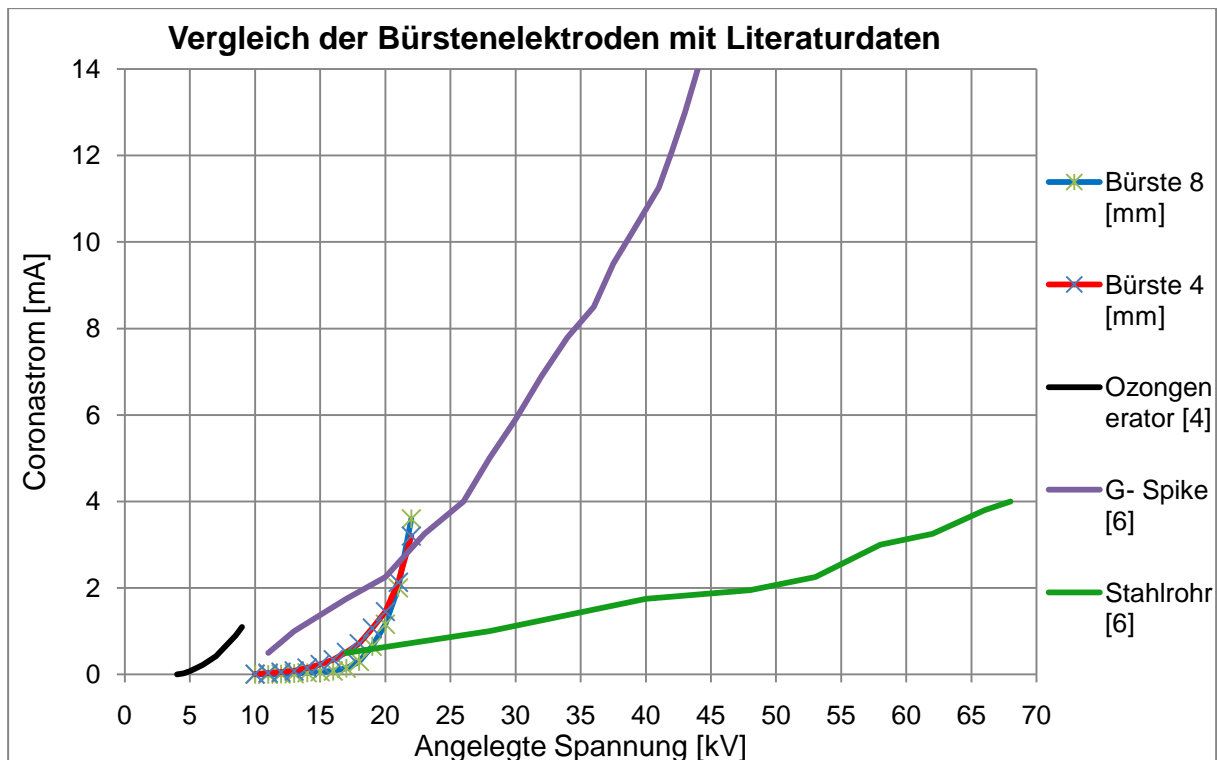


Abbildung 5-6: Vergleich des Messergebnisses mit Literaturdaten

Für den Ozongenerator stellt man eine niedrige Coroneinsatzspannung sowie geringe Stromwerte fest. Der relativ steile Verlauf kann anhand des geringen Erdungselektroden durchmessers erklärt werden. Im Vergleich mit den Messwerten gleicht der Kurvenverlauf jener dem Ozongenerator.

Betrachtet man den Verlauf der G- Spike und jenen des Stahlrohres, dann kann man keine Ähnlichkeit zu den Messergebnissen feststellen. Die Geometrie bei der G- Spike und dem Stahlrohr weicht zu stark von der neu errichteten Anlage ab. Außerdem wurden die Werte für die Strom/Spannungs- Charakteristik bei der G-Spike und dem Stahlrohr aus Diagrammen, welche in der Literatur vorhanden waren, herausgelesen. Dies führt zu gewissen Ungenauigkeiten und in weiterer Folge zu einem nicht glatten Kurvenverlauf.

Allgemein ist zu bemerken, dass die Coroneinsatzspannung mit größerem Drahtdurchmesser sowie mit steigendem Erdungselektroden durchmessers steigt. Außerdem ist der Verlauf der Strom/Spannungs- Charakteristik flacher mit steigenden Erdungselektroden durchmessern bei konstantem Drahtdurchmesser.

## 5.4 Theoretischer Trenngrad der vorhandenen Versuchsanlage

Der theoretische Trenngrad ist unter Kapitel 2.5 beschrieben. Zur Berechnung wird der Volumenstrom von 4,5 [m<sup>3</sup>/h] bzw. 16,33 [m<sup>3</sup>/h] herangezogen. Dies entspricht einer Gasgeschwindigkeit von ungefähr 0,3 [m/s] bzw. 1 [m/s]. Für die Berechnung werden theoretische Stromwerte herangezogen, in diesen Fall die Theorie kleiner Ströme. Die Berechnung erfolgt mit der 8 [mm] Bürstenelektrode, die einen Drahtdurchmesser von 0,15 [mm] aufweist. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst. Der theoretische Trenngradverlauf ist in Abbildung 5-7 dargestellt.

Tabelle 5-4: Berechnete Werte für den theoretischen Trenngrad

Bezeichnung	Einheit	Wert
U	[kV]	22,00
U	$\left[ \frac{\sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}}}{\text{s}} \right]$	0,23
I	$\left[ \frac{\text{mA}}{0,7\text{m}} \right]$	1,26
I	$\left[ \frac{\sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}^3}}{\text{s}^2 \cdot 0,7\text{m}} \right]$	140,6
E <sub>p</sub>	$\left[ \frac{\sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$	3,46
E <sub>a</sub>	$\left[ \frac{\sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$	6,79

		V: 4,5 [m <sup>3</sup> /h]	V: 16,33 [m <sup>3</sup> /h]
x	w <sub>(x)</sub>	T <sub>(x)</sub>	T <sub>(x)</sub>
[μm]	[m/s]	[-]	[-]
5	0,55	0,75	0,32
10	1,10	0,94	0,54
15	1,65	0,98	0,68
20	2,20	1,00	0,79
30	3,30	1,00	0,90
40	4,40	1,00	0,95
50	5,49	1,00	0,98
60	6,59	1,00	0,99
70	7,69	1,00	1,00
80	8,79	1,00	1,00

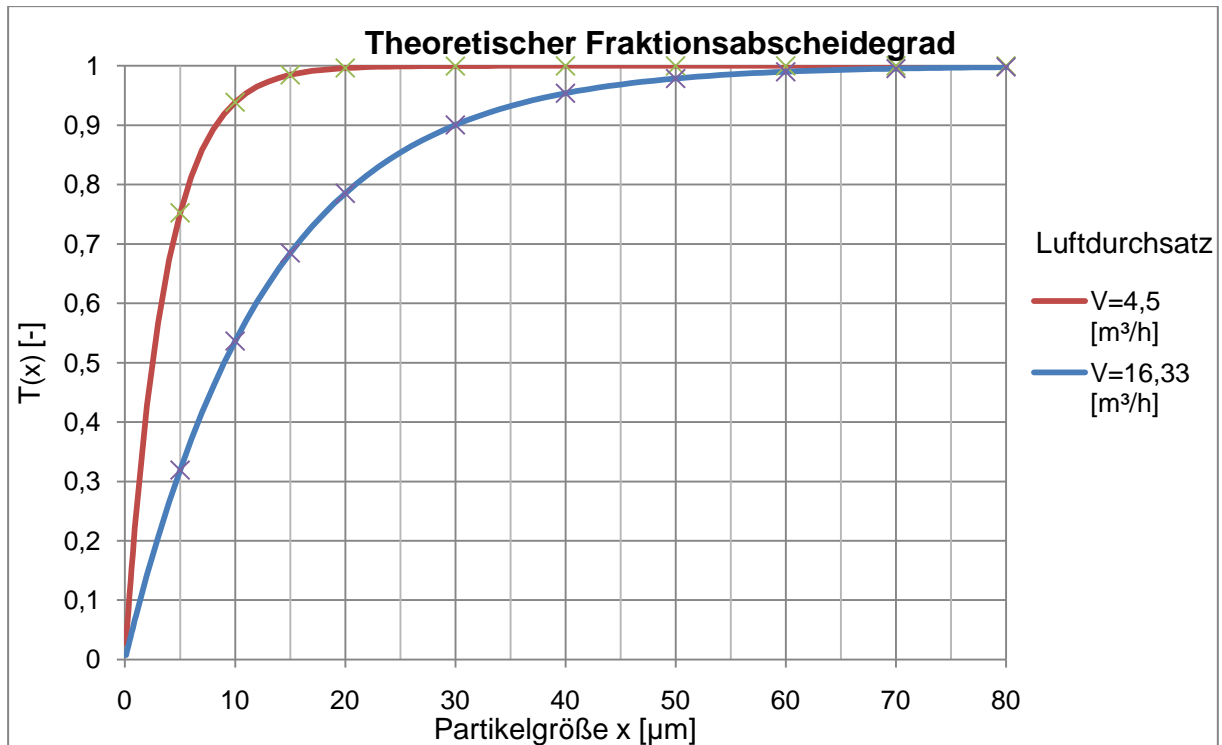


Abbildung 5-7: Theoretischer Fraktionsabscheidegrad für die in dieser Arbeit neu gebaute Anlage

Der Medianwert, die 50%ige Wahrscheinlichkeit der Abscheidung, beträgt bei einem Volumenstrom von  $4,5 \text{ [m}^3/\text{h]}$   $2,8 \text{ [}\mu\text{m]}$ , jener bei  $16,33 \text{ [m}^3/\text{h]}$  liegt bei  $10 \text{ [}\mu\text{m]}$ . Dies ist eine theoretische Betrachtung. Man erkennt aber, dass die gebaute Anlage als Elektrofilter zur Partikelabscheidung geeignet ist.

## 5.5 Visualisierung der Coronaentladung

In Abbildung 5-8 wird die Coronaentladung bei einer Spannung von 22 [kV] visualisiert. Die 4 [mm] Bürstenelektrode ist in diesem Fall eingebaut. Um die Coronaentladung zu visualisieren muss der Raum, in dem die Anlage aufgestellt ist, abgedunkelt werden.



Abbildung 5-8: Bild der Coronaentladung bei 22 [kV] mit der 4 [mm] Bürstenelektrode

Bei der 4 [mm] Bürstenelektrode sind bereits ab einer Spannung von 11 [kV] vereinzelte Büschel am Anfang und am Ende der einzelnen zusammengeschweißten Flaschenbürsten erkennbar. Mit steigender Spannung sind immer mehr solcher Büschel erkennbar die ab 16 [kV] bereits 2/3 des Reaktorraums ausfüllen. Bei 19 [kV] sind diese Büschel im gesamten Reaktorraum mit hoher Intensität feststellbar. Im Bereich von 22 [kV] sind hellere Überschläge, welche Blitzen ähneln, mit hoher Intensität beobachtbar. Diese Blitze sind unter anderem ein Grund dafür, dass die Spannung nicht weiter gesteigert wurde.

In Abbildung 5-8 ist im rechten unteren Teil der Bilder eine Zone mit hellen Blitzen erkennbar. Der Grund liegt darin, dass ein einzelner Draht länger ist. Die 4 [mm] Bürstenelektrode ist in Abbildung 5-9 abgebildet. Man kann die Schweißungen und den längeren Draht erkennen. Es ist auch ein Korrosionsproblem beim gewickelten Haltedraht sowie an den Schweißstellen feststellbar.



Abbildung 5-9: 4 [mm] Bürstenelektrode mit Fehlstellen

In Abbildung 5-10 erfolgt die Darstellung der Coronaentladung bei einer Spannung von 22 [kV] mit der 8 [mm] Bürstenelektrode.

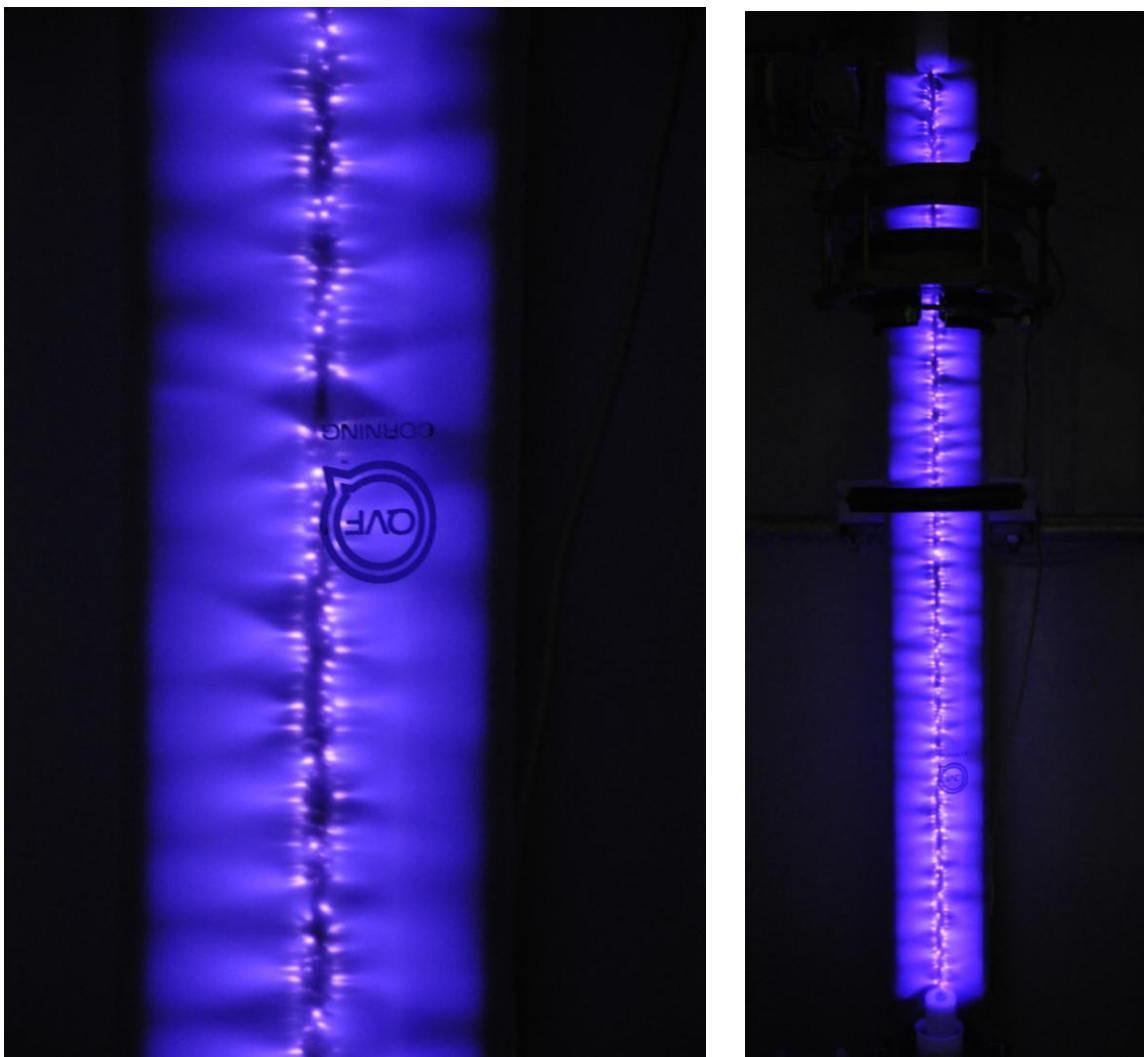


Abbildung 5-10: Bild der Coronaentladung bei 22 [kV] mit der 8 [mm] Bürstenelektrode

Bei der 8 [mm] Bürstenelektrode treten erste Büschel bei einer Spannung von 13 [kV] am Anfang und am Ende der zusammengeschweißten Flaschenbürsten auf. Bei einer Spannung von 19 [kV] ist der halbe Reaktorraum mit violett leuchtenden Büscheln ausgefüllt. Bei 22 [kV] sind immer wieder helle Zonen beobachtbar, die wieder auf normale Stärke abschwächen. Die Intensität der Blitze ist niedriger als bei der 4 [mm] Bürstenelektrode. Außerdem erscheint die Farbe der Coronaentladung bei der 8 [mm] Bürstenelektrode ein wenig dunkler. Diese Sprühelektrode enthält des Weiteren keine längeren Fehldrähte, deshalb sind auch keine vereinzelt Überschlagszonen erkennbar.

Allgemein muss bemerkt werden, dass kleine Abweichungen zu den Fotografien vorhanden sind. Auf den Fotos sieht die Coronaentladung wie eine leuchtende färbige Neonröhre aus. In Wirklichkeit sind aber einzeln leuchtende strahlenartige Büschel erkennbar. Auch die Farbe neigt in Wirklichkeit eher zu violett und nicht zu blau.

## 5.6 Aktinometer Messung

### 5.6.1 Bestimmung des Photonenflusses mittels chemischen Aktinometern

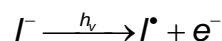
Aktinometer werden in der Regel zur Bestimmung des Photonenflusses von UV/VIS-Strahler verwendet. Die eintreffende Strahlungsmenge wird durch die umgesetzte Stoffmenge einer photochemischen Reaktion bestimmt.

### 5.6.2 Chemisches Iodid/Iodat Aktinometer

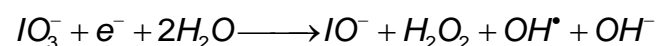
Eine Lösung aus 0,6 [mol/l] Kaliumiodid (KI) und 0,1 [mol/l] Kaliumiodat ( $\text{KIO}_3$ ) in 0,01 [mol/l] Borax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) kann als chemisches Aktinometer für UV-ND-Strahler mit einem Leistungsmaximum bei einer Wellenlänge von 254 [nm], sowie den vorliegenden Sprühelektroden - Fallfilm- System, verwendet werden. Die Aktinometerlösung ist unter einer Wellenlänge von 290 [nm] optisch opak und über einer Wellenlänge von 330 [nm] optisch transparent.

Durch UV-Bestrahlung von Kaliumiodid wird Triiodid gebildet, dessen Konzentration Aufschluss über die Quantenausbeute im Photoreaktor gibt. Kaliumiodat fungiert als Elektronenfänger (scavenger) und verhindert die Rückreaktion von freien Elektronen mit Iod. Borax dient als Puffersubstanz und sorgt dafür, dass der pH-Wert der Aktinometerlösung während der photochemischen Reaktion bei pH=9,25 konstant bleibt.

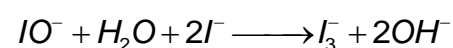
Die photochemische Anregung von Kaliumiodid führt zur Bildung von Iod Atomen und gelösten Elektronen.



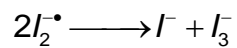
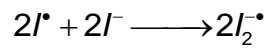
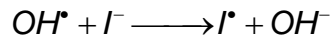
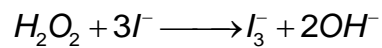
In Anwesenheit von Kaliumiodat werden Hypiodit, Wasserstoffperoxid, Hydroxylradikale und Hydroxide gebildet.



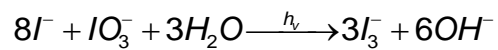
Durch die folgenden Teilreaktionen entsteht Triiodid.







Die bei der Bestrahlung des KI/KIO<sub>3</sub>-Aktinometers ablaufende Summenreaktion ist durch folgende Reaktionsgleichung gegeben:



Das gebildete Triiodid weist bei einer Wellenlänge von 352 [nm] ein Absorptionsmaximum auf. Durch Messung der Extinktion bei dieser Wellenlänge, kann die Konzentration an Triiodid ermittelt werden. Abbildung 5-11 zeigt die Absorptionsspektren von Kaliumiodat, Kaliumiodid und einer Lösung, die beide Substanzen enthält, vor und nach UV-Bestrahlung.

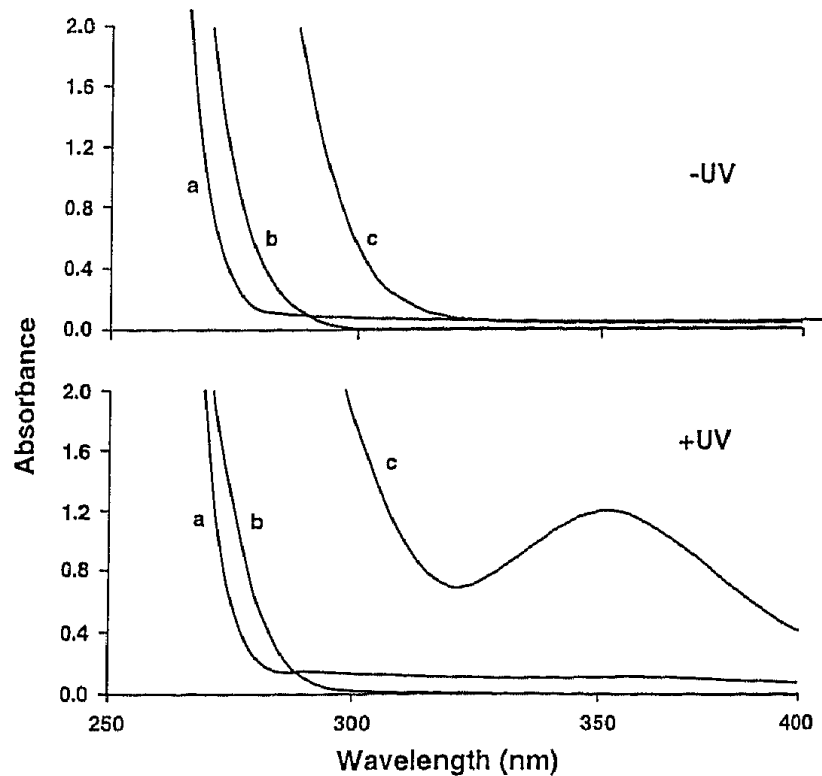


Abbildung 5-11: Absorptionsspektren von: a) Kaliumiodid (0,6 M), b) Kaliumiodat (0,1 M) und c) Mischung der beiden Substanzen vor und nach der Bestrahlung mit UV Licht [9]

Vor der UV-Bestrahlung absorbiert die Iodid/Iodat-Mischung jegliche Strahlung unter einer Wellenlänge von  $\lambda = 290$  [nm] und kaum Strahlung über einer Wellenlänge von  $\lambda = 330$  [nm]. Nach photochemischer Anregung weist die Mischung ein Absorptionsmaximum bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 352$  [nm] auf, was auf die Bildung von Triiodid zurückzuführen ist.

Die Quantenausbeute der Summenreaktion hängt von der Temperatur der Lösung, von der Konzentration des Kaliumiodids und der Wellenlänge ab. Dies ist in Gleichung ( 5-1 ) beschrieben.

$$\phi = 0,75 \left[ 1 + 0,02(T - 20,7) \right] \left[ 1 + 0,23(c - 0,577) \right] \quad (5-1)$$

Bei einer Temperatur von  $T = 24,1$  [°C], einer Kaliumiodid-Konzentration von  $c_{KI} = 0,6$  [mol/l] und einer Wellenlänge von  $\lambda = 254$  [nm] beträgt die Quantenausbeute der Aktinometerlösung  $\Phi = 0,805$ . Das optimale Verhältnis von Kaliumiodid zu Kaliumiodat beträgt 6:1. Weicht das

tatsächliche Verhältnis vom optimalen ab, so kann dies zu einer veränderten Quantenausbeute führen. [9][10]

### 5.6.3 Vorbereiten der Ausgangslösung

Die erforderlichen Konzentrationen an Kaliumiodid, Kaliumiodat und Borax werden von Rahn [9] übernommen. Die Auflösung von Kaliumiodid, Kaliumiodat und Borax erfolgt in entionisiertem Wasser. Die erforderlichen Mengen ermittelt man über die benötigten Konzentrationsangaben und sind in Tabelle 5-5 zusammengefasst.

Tabelle 5-5: Mengen der Ausgangslösung

Chemikalien	$C_{\text{erf}}$ $\left[ \frac{\text{mol}}{\text{l}} \right]$	$M$ $\left[ \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]$	$V_{\text{R}}$ [l]	$m_{\text{erf}}$ [g]
Kaliumiodid KI	0,60	166,01	4	398,44
Kaliumiodat $\text{KIO}_3$	0,10	214,00	4	85,60
Borax $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	0,01	381,37	4	15,26

### 5.6.4 Versuchsdurchführung chemisches Aktinometer

Es werden 3,8 [l] der Aktinometerlösung in den Vorlagebehälter gefüllt, die verbleibenden 200 [ml] werden für die spätere Verdünnung benötigt. Für dieses Experiment wird die 8 [mm] Bürstenelektrode verwendet. Nach dem Starten der Pumpe und der Ausbildung eines konstanten Flüssigkeitsfilm, wird der Hochspannungsgenerator gestartet. Es wird eine Spannung von 18 [kV] eingestellt, wonach sich ein spezifischer Strom von 0,3 [mA/0,7m] bei einem Luftvolumenstrom von 4,5 [m³/h] ausbildet. Dies ergibt eine Leistung von 5,4 [W].

Nach bestimmten Bestrahlungszeiten ( $t = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240$  [min]) werden Proben von je 5 ml genommen. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten werden die Probefläschchen sowie die gesamte Apparatur mit Aluminiumfolie ummantelt.

### 5.6.5 Berechnung des Photonenflusses

Zur Bestimmung der Triiodid-Konzentration wird die Extinktion bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 352$  [nm] mit einem Photometer gemessen. Vor der Photometrie müssen die Triiodid-Proben mit der Ausgangslösung verdünnt werden, da die gemessene Extinktion im Messbereich des Photometers liegen muss und das Lambert-Beersche Gesetz, mit dem die Triiodid-Konzentration berechnet wird, nur für verdünnte Lösungen gültig ist. [11] Der molare Extinktionskoeffizient von Triiodid  $\varepsilon_{352}$  beträgt  $27600$  [ $M^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ]. Zusammen mit der gemessenen Extinktion, der Schichtdicke der Küvette  $d = 1$  cm und dem Verdünnungsfaktor  $S$  kann die Konzentration des durch UV-Bestrahlung gebildeten Triiodids nach Gleichung ( 5-2 ) ermittelt werden.

$$c_{I_3} = \frac{A_{352} \cdot S}{\varepsilon_{352} \cdot d} \quad (5-2)$$

Durch Multiplikation der Konzentrationsdifferenz der aufeinander folgenden Triiodidproben  $\Delta c_{I_3}$  mit dem Reaktorvolumen  $V_R$  und anschließender Division durch die Quantenausbeute des Aktinometersystems  $\phi_\lambda$  erhält man laut Gleichung ( 5-3 ) die Strahlungsintensität  $E$ .

$$E = \frac{\Delta c_{I_3} \cdot V_R}{\phi_\lambda} \quad (5-3)$$

Der Photonenfluss des eingesetzten Bestrahlungssystems  $\phi_P$  kann mithilfe von Gleichung ( 5-4 ) berechnet werden.

$$\phi_P = \frac{E}{\Delta t} \quad (5-4)$$

Mit der Planckschen Gleichung ( 5-5 ) erhält man die Strahlungsleistung  $P_\lambda$ .

$$P_\lambda = \phi_P \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda} \cdot N_A \quad (5-5)$$

### 5.6.6 Ergebnisse der Aktinometermessung

Die Berechnung der Strahlungsleistung wird im Abschnitt 5.6.5 beschrieben. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 8-3 zusammengefasst. In Abbildung 5-12 wird die gebildete Menge an Triodid gegen die Zeit dargestellt.

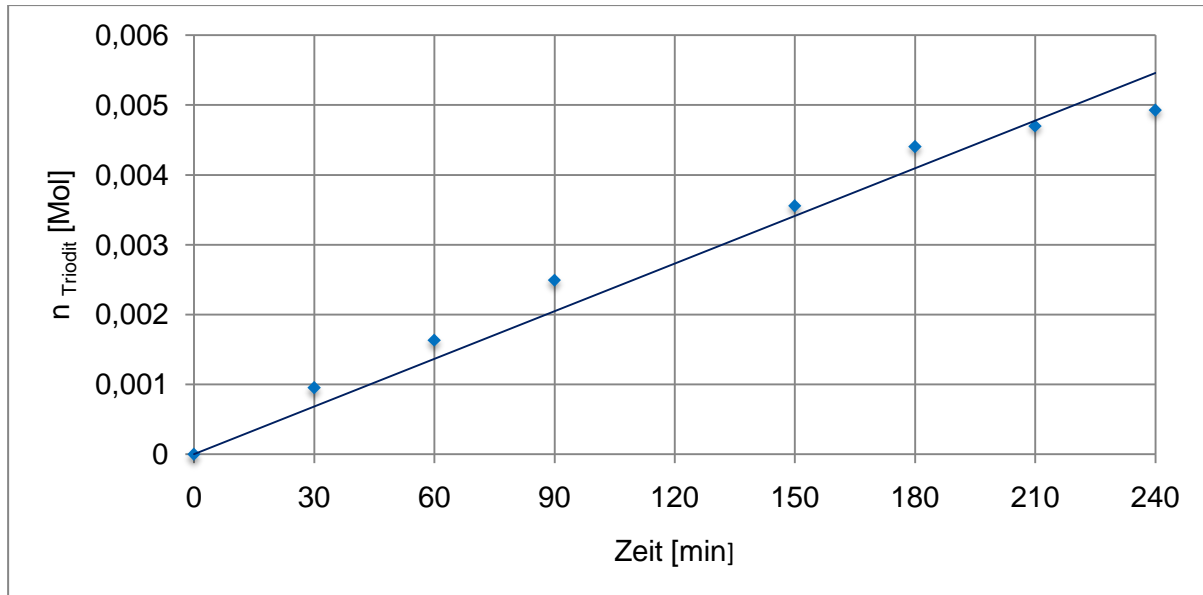


Abbildung 5-12: Triodidmenge der Absorbtionsmessung bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 352 \text{ [nm]}$

Die Berechnung der Strahlungsleistung wie im Abschnitt 5.6.5 beschrieben ergibt eine Leistung von 0,3 [W]. Die elektrische Leistung bei 18 [kV] beträgt 5,4 [W]. Daraus folgt, dass 5,6 % an Strahlungsleistung bei 18 [kV] von der Sprühelektrode abgegeben werden.

## 6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Coronareaktor geplant, gebaut und in Betrieb genommen. Die Arbeiten erfolgten am Institut für thermische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik.

Dieser Coronareaktor ist einem Rohrelektrofilter nachempfunden und besteht im Wesentlichen aus einer Sprühelektrode, die mit einer Hochspannung beaufschlagt wird und einer geerdeten Gegenelektrode. Die Gegenelektrode kann im Falle eines Rohrelektrofilters als geerdetes Stahlrohr, aber auch mit einem elektrolythaltigen Fallfilm, welcher geerdet ist, realisiert werden. Die Sprühelektrode kann im einfachsten Fall als kreisrunder Draht, aber auch in mannigfaltiger Form ausgeführt werden. In dieser Arbeit wurden Bürstenelektroden mit einem Durchmesser von 4 und 8 [mm] verwendet. Bei den Bürstenelektroden ist in einem Haltedraht ein dünner Draht eingewickelt. Der Drahtdurchmesser beträgt 0,10 und 0,15 [mm].

Ein wesentlicher Punkt der Aufgabenstellung war, den Reaktor so auszuführen, dass die Coronaentladung sichtbar ist. Dies ist nur möglich wenn man die Gegenelektrode als Glasrohr ausführt. Die Funktion der Erdung muss in diesem Fall ein elektrolythaltiger Fallfilm auf der Innenseite des Rohres übernehmen. Nach erfolgter Planung und Bau folgten einige Optimierungsschritte. Einer war die Errichtung eines Abluftsystems für das gebildete Ozon. Nach diesem Optimierungsschritten konnte die Betriebscharakteristik vermessen werden.

Die Betriebscharakteristik eines Elektrofilters wird auch als Strom/Spannungs- Charakteristik bezeichnet. Hierzu wird an der Sprühelektrode eine Hochspannung eingestellt und der fließende Strom vermessen. Der Hochspannungsgenerator wurde bis knapp unter der Durchschlagsspannung (22 [kV]) betrieben. Die typisch verlaufende Betriebscharakteristik von Elektrofiltern, beginnend bei der Coroneinsatzspannung, nimmt bei Erhöhung der Spannung kontinuierlich an spezifischen Strom zu. Der Einsatzbereich ist mit der Durchschlagsspannung limitiert, bei der die Stromwerte bei konstanter Spannung sprunghaft zunehmen.

Die Vermessung der Strom/Spannungs- Charakteristik wurde für 4 und 8 [mm] Bürstenelektroden, welche einen Drahtdurchmesser von 0,10 und 0,15 [mm] aufweisen, durchgeführt. Die Coroneinsatzspannung ist für die 4 [mm] Bürstenelektrode niedriger als jene für die 8 [mm] Elektrode. Bei einer Spannung von z.B. 19 [kV] misst man bei der 4 [mm] Elektrode höhere Stromwerte als bei der 8 [mm] Elektrode. Dies steht im Einklang mit aus der Theorie berechneten Werten, was auf den Drahtdurchmesser zurückzuführen ist.

Bei einer Spannung von 21[kV] übersteigen die Stromwerte der 8 [mm] Elektrode jene der 4 [mm] Elektrode. Dies steht im Widerspruch zur theoretischen Berechnung, jedoch wird in den theoretischen Überlegungen von kreisrunden Elektrode ausgegangen.

Bei Aufnahme der Betriebscharakteristik wurde auch der Volumendurchsatz an Luft berücksichtigt. Geringe Volumendurchsätze ergeben niedrigere Stromwerte. Dies kann mit der Beeinflussung der ionisierten Gasmoleküle bei höheren Luftgeschwindigkeiten erklärt werden.

Der theoretische Trenngrad wurde für die Versuchsanlage bei einer Spannung von 22 [kV] berechnet und dargestellt, da die gebaute Anlage als Elektrofilter auch zur Partikelabscheidung geeignet ist. Der Medianwert, die 50%ige Wahrscheinlichkeit der Abscheidung, beträgt bei einem Volumenstrom von 4,5 [m<sup>3</sup>/h] 2,8 [µm], jener bei 16,33 [m<sup>3</sup>/h] liegt bei 10 [µm].

Die von der Elektrode abgegebene UV- Strahlung wurde mittels chemischen Aktinometer bestimmt. Die eintreffende Strahlungsmenge wird durch die umgesetzte Stoffmenge einer photochemischen Reaktion bestimmt. In einer Aktinometermessung wurde die UV-Strahlungsintensität bei einer Spannung von 18 [kV] vermessen. Bei dieser Untersuchung ergab sich, dass 0,3 [W], dies entspricht 5,6% der elektrischen Leistung, als UV- Strahlung von der Elektrode abgegeben wird.

## 7 Verzeichnisse

### 7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines einstufigen und eines zweistufigen Elektrofilters [1] .....	3
Abbildung 2-2: Prinzipanordnung eines einstufigen Elektrofilters [1].....	4
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der aktiven und der passiven Zone der Coronaentladung [1].....	6
Abbildung 2-4: Strom/Spannungs- Charakteristiken der negativen Corona in Stickstoff-Sauerstoff- Gemischen. Rohrdurchmesser 150 [mm], Drahtdurchmesser 2,8 [mm] [1].....	8
Abbildung 2-5: Strom/Spannungs- Charakteristiken der negativen Corona in Stickstoff-Sauerstoff- Gemischen. Rohrdurchmesser 150 [mm], Drahtdurchmesser 2,8 [mm] [1].....	9
Abbildung 2-6: Strom/Spannungs- Charakteristik für positive und negative Coronaentladung [4].....	12
Abbildung 2-7: Ozonbildungsrate gegen Coronaleistung für positive und negative Coronaentladung [4].....	12
Abbildung 2-8: Verschiedene Typen starrer Sprühelektroden [6].....	19
Abbildung 2-9: Bild der lokalen Coronaentladung auf die Niederschlagselektroden [6].....	19
Abbildung 2-10: Detail einer innovativen starren Sprühelektrode (G- Spike) [6].....	21
Abbildung 2-11: Im Rohr montierte Anwendung [6] .....	22
Abbildung 2-12:Drei Strom/Spannungs- Charakteristiken für G- Spike [6] .....	23
Abbildung 2-13: Visualisierung der Coronaentladung an den Spitzen [6].....	23
Abbildung 3-1:Fließbild der Versuchsanlage .....	26
Abbildung 3-2: Schnitt durch den Coronareaktor .....	27
Abbildung 3-3: Detailansicht der Flüssigkeitsabführung und Sprühelektrodenhalterung .....	29
Abbildung 3-4: Detailansicht der Fallfilmaufbauvorrichtung .....	30
Abbildung 3-5: Bild einer einzelnen Flaschenbürste 4 und 8 [mm].....	31
Abbildung 3-6: Hochspannungssteuerung und Anzeige .....	32
Abbildung 4-1: Bild nach erfolgtem Aufbau der Versuchsanlage .....	35
Abbildung 4-2: Überslag auf die Elektrodenhalterung .....	37



---

Abbildung 5-1: Einfluss des Luftdurchsatzes auf die Strom/Spannungs- Charakteristik bei Verwendung einer 4 [mm] Bürstenelektrode.....	39
Abbildung 5-2: Einfluss des Luftdurchsatzes auf die Strom/Spannungs- Charakteristik bei Verwendung einer 8 [mm] Bürstenelektrode.....	40
Abbildung 5-3: Vergleich der 4 [mm] Bürstenelektrode mit 0,10 [mm] Drahtdurchmesser und der 8 [mm] Bürstenelektrode mit 0,15 [mm] Drahtdurchmesser .....	41
Abbildung 5-4: Vergleich der experimentell ermittelten Strom/Spannungs- Charakteristik 4 [mm] Bürstenelektrode mit theoretisch berechneten Werten 0,10 [mm] Drahtdurchmesser ..	43
Abbildung 5-5: Vergleich der experimentell ermittelten Strom/Spannungs- Charakteristik 8 [mm] Bürstenelektrode mit theoretisch berechneten Werten 0,15 [mm] Drahtdurchmesser ..	45
Abbildung 5-6: Vergleich des Messergebnisses mit Literaturdaten .....	47
Abbildung 5-7: Theoretischer Fraktionsabscheidegrad für die in dieser Arbeit neu gebaute Anlage.....	49
Abbildung 5-8: Bild der Coronaentladung bei 22 [kV] mit der 4 [mm] Bürstenelektrode .....	50
Abbildung 5-9: 4 [mm] Bürstenelektrode mit Fehlstellen .....	51
Abbildung 5-10: Bild der Coronaentladung bei 22 [kV] mit der 8 [mm] Bürstenelektrode .....	51
Abbildung 5-11: Absorptionsspektren von: a) Kaliumiodid (0,6 M), b) Kaliumiodat (0,1 M) und c) Mischung der beiden Substanzen vor und nach der Bestrahlung mit UV Licht [9] .....	55
Abbildung 5-12: Triodidmenge der Absorbtionsmessung bei einer Wellenlänge von $\lambda = 352$ [nm] .....	58

---

## 7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Umrechnung in elektrostatischen Si- Einheiten [5] .....	13
Tabelle 3-1: Abmessung der Sprühelektrode.....	31
Tabelle 3-2: Coroneinsatzspannung für die entsprechende Bürstenelektrode .....	34
Tabelle 3-3: Durchschlagspannung und optimale Spannung .....	34
Tabelle 5-1: Theoretisch berechnete Werte für die Strom/Spannungs- Charakteristik 4 [mm] Bürstenelektrode mit 0,10 [mm] Drahtdurchmesser .....	42
Tabelle 5-2: Theoretisch berechnete Werte für die Strom/Spannungs- Charakteristik 8 [mm] Bürstenelektrode mit 0,15 [mm] Drahtdurchmesser .....	44
Tabelle 5-3: Eckdaten der verschiedenen Reaktoren/Rohrelektrofilter .....	46
Tabelle 5-4: Berechnete Werte für den theoretischen Trenngrad .....	48
Tabelle 5-5: Mengen der Ausgangslösung .....	56
Tabelle 8-1: Messwerte der Strom/Spannungs- Charakteristik Bürstendurchmesser 4 [mm]	65
Tabelle 8-2: Messwerte der Strom/Spannungs- Charakteristik Bürstendurchmesser 8 [mm]	66
Tabelle 8-3: Auswertung der Aktinometermessung .....	67

---

### 7.3 Literaturverzeichnis

- [1] **White, Harry J.** *Entstaubung industrieller Gase mit Elektrofiltern*. Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1969.
- [2] **Ekbert, H., Gutekunst, J. und Rolf, M.** *Elektrotechnik für Maschinenbauer*. Heubach, Nürtingen und Esslingen : Springer- Verlag Berlin Heidelberg New York, 1999.
- [3] **Holleman, A.F. und Wiberg, E.** *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. Berlin : Walter de Gruyter & Co. , 1955.
- [4] **Yehia, A., Abdel- Salam, M. und Mizuno, A.** *On assessment of ozone generation*. Toyohashi : J. Phys. D: Appl. Phys. 33, 2000.
- [5] **Siebenhofer, M.** *Luftreinhaltung und Abluftreinigung*. Graz : Institut für Thermische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, 2010.
- [6] **Mischkulnig, G. und Bento, B.** *Enhanced corona discharge using innovative rigid discharge electrodes (RDE)*. Johannesburg : Enhanced corona discharge using innovative rigid discharge electrodes (RDE), 2004.
- [7] **Adolphi, G. und Velten Adolphi, H.** *Grundzüge der Verfahrenstechnik*. Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1974.
- [8] **Titz, E.** High voltage Supply Module for Electrostatic Filters, User Manual. Himmelberg : s.n., 2009.
- [9] **Rahn, R.O.** *Potassium Iodide as a Chemical Actinometer for 254 nm Radiation: Use of Iodate as an Electron Scavenger*. s.l. : J. Photochem. Photobiol., 1997. Vol. 66, No. 4: p 450-455.
- [10] **Rahn.** *Quantum Yield of the Iodide- Iodate Chemical Actinometer: Dependence on wavelength and Concentration*. s.l. : J. Photochem. Photobiol., 2003. Vol. 78, No. 2: p 146-152.
- [11] [http://www.ruhr-uni-bochum.de/imperia/md/content/physiolchem/biochemiker-praktikum/\\_e\\_grundlagen\\_spektro.pdf](http://www.ruhr-uni-bochum.de/imperia/md/content/physiolchem/biochemiker-praktikum/_e_grundlagen_spektro.pdf). [Online]

## 8 Anhang

### 8.1 Messwerte der Strom/Spannungs- Charakteristik

Tabelle 8-1: Messwerte der Strom/Spannungs- Charakteristik Bürstendurchmesser 4 [mm]

Luft =1,5 [m³/h]			Luft =3 [m³/h]			Luft =4,5 [m³/h]		
Spannung [kV]	Strom MM [mA]	Strom [mA]	Spannung [kV]	Strom MM [mA]	Strom [mA]	Spannung [kV]	Strom MM [mA]	Strom [mA]
10	0,01	0,0	10	0,01	0,0	10	0,01	0,0
11	0,02	0,1	11	0,02	0,1	11	0,03	0,1
12	0,03	0,1	12	0,05	0,1	12	0,05	0,1
13	0,04	0,1	13	0,08	0,2	13	0,08	0,2
14	0,07	0,3	14	0,15	0,4	14	0,15	0,3
15	0,14	0,4	15	0,21	0,5	15	0,23	0,4
16	0,25	0,6	16	0,31	0,6	16	0,34	0,6
17	0,40	0,9	17	0,48	0,9	17	0,51	0,9
18	0,60	1,1	18	0,69	1,2	18	0,71	1,1
19	0,85	1,5	19	0,99	1,6	19	1,07	1,6
20	1,18	2,0	20	1,36	2,1	20	1,45	2,1
21	1,55	2,6	21	1,86	3,1	21	2,13	3,4
22	2,16	4,0	22	2,77	4,5	22	3,20	5,0
Luft =6 [m³/h]			Luft =7,5 [m³/h]					
Spannung [kV]	Strom MM [mA]	Strom [mA]	Spannung [kV]	Strom MM [mA]	Strom [mA]			
10	0,02	0,1	10	0,01	0,0			
11	0,03	0,1	11	0,03	0,1			
12	0,05	0,1	12	0,05	0,1			
13	0,09	0,2	13	0,08	0,2			
14	0,15	0,3	14	0,14	0,3			
15	0,22	0,5	15	0,22	0,5			
16	0,33	0,6	16	0,33	0,6			
17	0,52	0,9	17	0,50	0,9			
18	0,71	1,4	18	0,69	1,1			
19	1,08	1,6	19	1,06	1,6			
20	1,49	2,3	20	1,55	2,4			
21	2,24	3,5	21	2,17	3,4			
22	3,40	5,1	22	3,22	5,0			

Tabelle 8-2: Messwerte der Strom/Spannungs- Charakteristik Bürstendurchmesser 8 [mm]

Luft =1,5 [m³/h]			Luft =3 [m³/h]			Luft =4,5 [m³/h]		
Spannung [kV]	Strom MM [mA]	Strom [mA]	Spannung [kV]	Strom MM [mA]	Strom [mA]	Spannung [kV]	Strom MM [mA]	Strom [mA]
10	0,01	0,0	10	0,01	0,0	10	0,00	0,00
11	0,01	0,0	11	0,01	0,0	11	0,00	0,00
12	0,01	0,0	12	0,02	0,0	12	0,01	0,00
13	0,02	0,1	13	0,03	0,1	13	0,02	0,10
14	0,02	0,1	14	0,04	0,1	14	0,04	0,10
15	0,02	0,1	15	0,06	0,2	15	0,06	0,10
16	0,04	0,1	16	0,08	0,2	16	0,08	0,15
17	0,06	0,2	17	0,14	0,2	17	0,14	0,20
18	0,25	0,3	18	0,30	0,5	18	0,30	0,50
19	0,58	1,0	19	0,63	1,0	19	0,65	1,00
20	0,96	1,6	20	1,07	1,6	20	1,16	1,90
21	1,68	2,6	21	1,83	3,0	21	2,00	3,10
22	2,50	4,0	22	2,90	4,5	22	3,60	5,20
Luft =6 [m³/h]			Luft =7,5 [m³/h]					
Spannung [kV]	Strom MM [mA]	Strom [mA]	Spannung [kV]	Strom MM [mA]	Strom [mA]			
10	0,00	0,00	10	0,00	0,00			
11	0,00	0,00	11	0,00	0,00			
12	0,01	0,00	12	0,00	0,00			
13	0,02	0,10	13	0,01	0,00			
14	0,04	0,10	14	0,01	0,10			
15	0,06	0,10	15	0,03	0,10			
16	0,08	0,15	16	0,05	0,15			
17	0,13	0,20	17	0,09	0,20			
18	0,25	0,50	18	0,20	0,40			
19	0,57	0,90	19	0,50	0,60			
20	1,08	1,60	20	0,96	1,40			
21	2,00	3,10	21	1,95	2,60			
22	3,50	5,20	22	3,48	4,60			

## 8.2 Auswertung der Aktinometermessung

Bei der Probennummer 4 welche in Tabelle 8-3 angeführt ist, handelt es sich um einen Messfehler. Diese Messreihe wurde für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt.

Tabelle 8-3: Auswertung der Aktinometermessung

Probennr. [-]	Zeit $t$ [min]	Extinktion $A$ bei 352 [nm] [-]	Verdünnung $S$ [-]	Konzentration Triiodid $c_{I_3^-}$ [mol/l]	Konzentrations- differenz $\Delta c$ [mol/l]	Volumen $V$ [l]
0	0	0,000	1	0,000E+00	-	3,80
1	30	0,693	10	2,511E-04	2,511E-04	3,80
2	60	0,791	15	4,299E-04	1,788E-04	3,80
3	90	0,905	20	6,558E-04	2,259E-04	3,80
4	120	0,626	20	4,536E-04	-2,022E-04	3,80
5	150	1,034	25	9,366E-04	4,830E-04	3,80
6	180	1,280	25	1,159E-03	2,228E-04	3,80
7	210	1,366	25	1,237E-03	7,790E-05	3,80
8	240	1,432	25	1,297E-03	5,978E-05	3,80

Probennr. [-]	Molmenge $n_{I_3^-}$ [mol]	Temperatur $T$ [°C]	Quanten- ausbeute $\Phi$ [-]	Strahlungs- intensität $E$ [Einstein]	Photonen- fluss $\Phi_P$ [Einstein/s]	Strahler- leistung $P$ [W]
0	-	24,1	0,805	-	-	
1	9,541E-04	24,1	0,805	1,185E-03	6,583E-07	
2	1,634E-03	24,1	0,805	8,438E-04	4,688E-07	
3	2,492E-03	24,1	0,805	1,066E-03	5,923E-07	
4	1,724E-03	24,1	0,805	-9,541E-04	-5,300E-07	
5	3,559E-03	24,1	0,805	2,279E-03	1,266E-06	
6	4,406E-03	24,1	0,805	1,052E-03	5,842E-07	
7	4,702E-03	24,1	0,805	3,676E-04	2,042E-07	
8	4,929E-03	24,1	0,805	2,821E-04	4,634E-07	
					6,053E-06	0,3