



Schlussbericht zum Verbundvorhaben:

**Plakat: Energieeffiziente Beseitigung von flüchtigen,
organischen Schadstoffen und biologischen Kontaminationen in
Abgasströmen durch plasmabasierte, heterogene Katalyse (FKZ
03ET1666E) 01.01.2020-31.12.2022**

**Lehrstuhl für Angewandte Elektrodynamik und Plasmatechnik
Prof. Dr.-Ing. Peter Awakowicz, Alexander Böddecker
Tel.: 0234-32-23062; Fax.: 0234-32-14230
E-Mail: awakowicz@aept.rub.de**

2023

Schlussbericht zum Verbundvorhaben:
Plaskat: Energieeffiziente Beseitigung
von flüchtigen, organischen
Schadstoffen und biologischen
Kontaminationen in Abgasströmen
durch plasmabasierte, heterogene
Katalyse (FKZ 03ET1666E)
01.01.2020-31.12.2022

Lehrstuhl für Angewandte Elektrodynamik und Plasmatechnik
Prof. Dr.-Ing. Peter Awakowicz, Alexander Böddecker
Tel.: 0234-32-23062; Fax.: 0234-32-14230
E-Mail: awakowicz@aept.rub.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	v
1 Schlussbericht der Ruhr-Universität Bochum	1
1.1 Kurze Darstellung	1
1.1.1 Aufgabenstellung	1
1.1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .	2
1.1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	2
1.1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand (an den angeknüpft wurde)	3
1.1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
1.2 Eingehende Darstellung	4
1.2.1 Verwendung der Zuwendung und Darstellung der erzielten Ergebnisse im Vergleich zu den vorgegebenen Zielen	4
1.2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	13
1.2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	13
1.2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwendbarkeit der Ergebnisse im Sinne des vorgeschriebenen Verwertungsplan	13
1.2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	14
1.2.6 Publikationen	14
Literaturverzeichnis	15

1 Schlussbericht der Ruhr-Universität Bochum

1.1 Kurze Darstellung

1.1.1 Aufgabenstellung

Thermische Nachverbrennung ist eines der am häufigsten eingesetzten Verfahren, bei dem mit VOCs (engl. volatile organic compounds) belastete Abluft auf eine hohe Temperatur aufgeheizt wird und die VOCs verbrannt werden. Dieser Ansatz ist sehr energieintensiv und die Energieeffizienz skaliert sehr stark mit dem Grad der Verunreinigung. Zu dieser Thematik soll im Rahmen des Forschungsprojekts PLASKAT ein energieeffizientes Verfahren für die Abluftreinigung bei geringen Verunreinigungen entwickelt werden, das auf einem "kalten" Plasma basiert und somit elektrische Energie anstelle von Erdgas verwendet, wobei das Plasma selbst schnell ein- und ausgeschaltet werden kann und in Sekunden voll einsatzbereit ist. Zusätzlich soll die Effizienz des Prozesses durch den Einsatz von Katalysatoren erhöht werden. Das Verfahren beruht darauf, dass bei der Erzeugung von nicht-thermischen Atmosphärendruckplasmen, in der Gasphase hochaktive Chemie angeregt wird und sich reaktive Spezies bilden. Bei einer vollständigen Oxidation der VOC Moleküle, werden neben der Luft ausschließlich CO₂ und H₂O emittiert.

In diesem Projekt wird eine dielektrisch behinderte Entladung auf der Oberfläche (SDBD) einer Keramik mit beidseitig aufgedruckten metallischen Gitter (Elektrode), die speziell für die Abluftreinigung konzipiert wurde, mit mittelfrequenter Hochspannung (9 kV_{pp}-13 kV_{pp} bei 250 Hz - 4 kHz) erzeugt. Bei Atmosphärendruckplasmen dient Sauerstoff in der Luft (O₂) als Quelle für die Bildung verschiedener reaktiver Sauerstoffspezies, beispielsweise O, O₃ und O₂⁻, OH und weitere ROS (engl. "reactive oxygen species") auch in Kombination mit Wasserstoff, wenn die Prozessluft Luftfeuchtigkeit aufweist. Des Weiteren kommt es zur Bildung diverser Stickstoffspezies (RNS, "reactive nitrogen species") und elektronischer, oder ro-vibratorischer Anregung der Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle (O₂ und N₂). Durch die Erzeugung von reaktiven Spezies im Plasma ist eine vollständige Oxidation jedoch schwer für hohe Gasflüsse zu erreichen. Um diese dennoch energieeffizient zu ermöglichen, wird das Plasma mit speziellen Katalysatoren kombiniert, die die Oxidation unterstützen sollen. Dieses Projekt befasst sich mit der Entwicklung eines Aufbaus, um anwendungsrelevante Gasflussraten zu behandeln und in Kombination mit verschiedenen Anordnungen und Arten von Katalysatoren in Bezug auf ihre Wirksamkeit zu untersuchen.

Des Weiteren soll neben der Abluftreinigung von VOCs ein weiteres Anwendungsfeld der

Plasmatechnologie ausgenutzt werden. Dabei soll die Wirkung und Effizienz der entwickelten Anlage auf die Inaktivierung von Mikroorganismen untersucht werden. Dieser Ansatz könnte bspw. in Lüftungssystemen von Krankenhäusern, Reinräumen, Laboren oder pandemisch bedingten Unterbringungen von Vorteil sein.

1.1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

An der RUB wurden Vorversuche mit einzelnen Elektroden (Keramikplatten mit beidseitigem metallischem Gitter, bereitgestellt vom Partner Alumina Systems GmbH) für die Abluftreinigung durchgeführt, die einen maximalen Luftstrom von 10 Lmin^{-1} zuließen. Diese beinhalteten grundlagenbasierte Forschung, sowie erste Tests hinsichtlich der Abluftreinigung von VOCs. Durch diese Forschung waren grundlegende Diagnostiken, wie bspw. Flammenionisationsdetektoren bereits am Lehrstuhl vorhanden und mussten nicht neu beschafft werden. Die vorhandenen Plasmareaktoren waren allerdings zu klein, um anwendungsnahe hohe Gasflüsse von etlichen 100 Lmin^{-1} hinreichend gut zu behandeln. Auf Grundlage der kleinen Reaktoren wurde während der Projektlaufzeit ein Reaktor entwickelt, der 5 Elektroden gleichzeitig fassen und elektrisch versorgen kann. Durch die modulare Bauart konnte der Aufbau jederzeit auf höhere Gasflüsse umgestellt werden, indem mehrere Plasmakammern parallelgeschaltet werden können. Die dafür notwendige elektrische Versorgung soll von Redline Technologies während des Projekts entwickelt werden. Eine künstliche Verunreinigung des Gasstroms, konnte nicht mehr nur mit Bublern für flüssige Medien erzeugt werden, sondern erforderte ein komplexes Verdampfersystem, welches ebenfalls in der Projektlaufzeit aufgebaut und hinsichtlich Gasmischung weiterentwickelt wurde. Eine detaillierte Beschreibung der Reaktoren und des Aufbaus ist in dem Kapitel über die eingehende Darstellung zu finden.

1.1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Um das Verhalten der entwickelten, hochskalierten Plasmakammer hinsichtlich der VOC Konversion zu untersuchen, wurde das System elektrisch und optisch charakterisiert. Es wurde eine Gasversorgung installiert, die es ermöglicht, VOC als Gase sowie als Flüssigkeiten zum Gasstrom hinzuzuführen. Die Flüssigkeiten werden dabei verdampft und in geheizten Rohren in den Gasstrom gesprüht. Die Führung der Rohrleitungen, spezielle Filter und Mischelemente, sowie die Länge der Rohrleitung bis zur Plasmakammer ermöglichen eine nahezu homogene radiale VOC Verteilung im Rohr, wodurch optimale Bedingungen zur Untersuchung der Effizienz des Systems in der VOC Reinigung vorliegen. Die VOC-Konversion wurde dann bei verschiedenen Gasflüssen bis maximal $30 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ für verschiedene VOCs und Elektrodendesigns untersucht. Parallel dazu, wurden je nach Entwicklungsstand der Katalysatoren bei dem Kooperationspartner neoxid GmbH, im Folgenden mit "neoxid" bezeichnet, unterschiedliche Katalysatoren eingesetzt, um deren Einfluss auf die Konversion zu untersuchen. Dabei wurden hauptsächlich beschichtete Streckmetallgitter parallel zu den Elektroden in die Kammer (IPC) sowie nachgeschaltete Katalysatoren (PPC) verwendet. Metallplatten oder Streckmetallgitter, die im Zuge der Katalysatormessungen in die Plasmakammer eingesetzt wurden, zeigten aufgrund ihres Vorhandenseins schon

einen Einfluss auf die Konversion, obwohl die Objekte selbst keine nachweisbare katalytische Aktivität aufwiesen. Um dies weiter zu untersuchen und neue Wege der Optimierung zu finden, wurde ein Schlierenaufbau angefertigt um eine strömungsmechanische Analyse des Systems zu ermöglichen.

Für die Plasmabehandlung von Sporen wurde zusammen mit dem DLR das sporenbildende Bakterium *Bacillus subtilis* ausgewählt und auf Objektträgern in der Kammer plasmabehandelt. Da die Ergebnisse aufzeigten, dass die Inaktivierung von Endosporen sehr gering wettbewerbsfähig ist, wurde entschieden, Bakterieninaktivierungsraten für vegetative und damit anwendungsrelevante *Micrococcus luteus* Bakterien zu untersuchen, die dem Gasstrom zugeführt werden und somit in der Gasphase behandelt werden. Die Ergebnisse zeigen konkurrenzfähige Resultate. Diese wurden statistisch ausgewertet.

1.1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand (an den angeknüpft wurde)

Die Gasbehandlung mittels Niedertemperaturplasmen in Kombination mit Katalysatoren der Anordnung In Plasma Catalysis (IPC) oder "Post Plasma Catalysis (PPC)" wurde schon für verschiedene Anwendungen untersucht. Dabei ist das Ziel, die ablaufenden Prozesse weiter zu verstärken, sodass sich der zusätzliche Einsatz von Katalysatoren positiv auf die Energieeffizienz auswirkt. Die Auswahl der richtigen Katalysatoren für die VOC Reinigung bei Temperaturen, die nahe der Raumtemperatur stattfinden, ist aufwendig und stellt ein hohes Forschungspotential dar. Während sich manche Katalysatoren zwar auf die Gasphasenchemie auswirken, kann nicht direkt ein Einfluss auf die VOC Konversion geschlussfolgert werden. Diese Wissenslage bedingt einen hohen wissenschaftlichen und technischen Aufwand, bei dem konventionelle Methoden und Katalysatoren, aber auch völlig neuartige Materialien für die Plasmakatalyse getestet, als auch weiterentwickelt werden müssen.

Zur Behandlung von Mikroorganismen mit dem Ziel, diese zu inaktivieren gibt es in der Fachliteratur hauptsächlich Quellen, die die Plasmabehandlung auf Oberflächen durchführen. Die Behandlung der Mikroorganismen in der Gasphase mittels Niedertemperaturplasmen ist von einem technischen Standpunkt aus gesehen neuartig und daher gibt es auch keine kommerziellen Systeme zu erwerben. Alle technischen Methoden zur Herstellung einer künstlich erzeugten Belastung durch Mikroorganismen in der Gasphase, die reproduzierbar ist, wie bspw. das von uns entwickelte Düsensystem, ist im Bereich der Plasmatechnik neuartig und zeitaufwendig.

Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Für die Durchführung des beschriebenen Vorhabens wurde an der RUB (AEPT) der im Schlussbericht vorgestellte Plasmareaktor entwickelt und eingesetzt. Für die Analytik wurden Flammenionisationsdetektoren (FIDs) der Firma ErsaTec zur Messung der Konzentration der flüchtigen Kohlenwasserstoffverbindungen eingesetzt. Für die Sprühung und Verteilung der Bakterien im Gasstrom wurde eine Düse der Firma Düsen-Schlick GmbH zusammen mit einem selbst aufgebauten elektronischen Versorgungssystem an der RUB verwendet. Die Ozonkonzentration in der Abluft wurde mittels eines Ozonmessgeräts (Mo-

del 106-MH) der Firma Envilyse GmbH gemessen. Die gesamte Versuchsanlage benötigt einen elektrischen als auch aerodynamischen Regelungsprozess, der mit der Software LabVIEW von National Instruments realisiert wurde. Diese Anlagensteuerung wurde ebenfalls an der RUB entwickelt. Zur Messung des aerodynamischen Verhaltens wurde ein optisches System in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Hydraulische Strömungsmaschinen (RUB) entwickelt. Es wurden im Rahmen des Projektes keine Patente seitens der RUB angemeldet.

Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentendienste

In diesem Schlussbericht sind ausschließlich Literaturquellen mit direktem Bezug benannt. Eine für die Thematik relevante Übersicht der Fachliteratur kann in der Veröffentlichung von Alexander Böddecker [1] und der Dissertation von Lars Schücke [2] entnommen werden.

1.1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Plakat Projekts wurde ein Dienstleistungsvertrag mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) geschlossen, der maßgeblich die Bereitstellung von biologischen Proben und deren Untersuchung umfasste. Auf regelmäßigen Treffen wurden die Ergebnisse diskutiert und neue Konzepte besprochen. Die Zusammenarbeit beschränkte sich neben den regelmäßigen Treffen hauptsächlich auf die Bereitstellung von *Bacillus subtilis* Sporen, deren Untersuchung nach erfolgter Plasmabehandlung sowie die Bereitstellung von vorbereiteten Medien für Proben.

Mit dem ebenfalls an der RUB befindlichen Lehrstuhl für Hydraulische Strömungsmaschinen wurden optische Messungen durchgeführt, um das aerodynamische Verhalten der Entladung zu charakterisieren. Dabei beschränkte sich die Zusammenarbeit auf grundlagenbasierte Forschung.

1.2 Eingehende Darstellung

Die nachfolgende eingehende Darstellung des Projekts ist bereits in wissenschaftlichen Fachzeitschriften oder wissenschaftlichen Vorträgen oder Postern veröffentlicht worden. Daher können diese Ergebnisse ebenfalls mit dem Schlussbericht veröffentlicht werden. Diese Teile und Abschnitte werden durch entsprechende Zitationen des ZE gekennzeichnet. Der vertrauliche Teil dieser Darstellung wurde von dieser Fassung entfernt.

1.2.1 Verwendung der Zuwendung und Darstellung der erzielten Ergebnisse im Vergleich zu den vorgegebenen Zielen

Das Verbundvorhaben "Plakat: Energieeffiziente Beseitigung von flüchtigen, organischen Schadstoffen und biologischen Kontaminationen in Abgasströmen durch plasmabasierte, heterogene Katalyse" wurde an der Ruhr-Universität Bochum bearbeitet und gemäß dem Arbeitsplan wurden im Projektzeitraum folgende Ergebnisse erzielt:

Aufbau und Beschreibung der Versuchsanlage

Zu Beginn der Projektlaufzeit wurde ein Plasmareaktor konzipiert, der für die Gasbehandlung von höheren Gasströmen geeignet sein sollte. In diese Plasmakammer, die in Abbildung 1.1 zu sehen ist, können fünf Elektroden (SDBD) von Alumina Systems eingebaut und betrieben werden. Der Querschnitt der Reaktorkammer beträgt 100 mm x 100 mm, sodass ein Volumenfluss von $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ einer Gasgeschwindigkeit von 3 ms^{-1} entspricht. Die Quartzfenster an den Seiten erlauben den optischen Zugang für eine Charakterisierung der Entladung. Die verwendete Elektrodenkonfiguration ist in Abbildung 1.2 dargestellt.



Abbildung 1.1: Zeichnung der im Projekt entwickelten Plasmakammer. [1]

In Abbildung 1.3 kann eine schematische Darstellung des verwendeten Aufbaus für die VOC-Konversion betrachtet werden. Die Gasversorgung wird durch zwei parallel geschaltete Heizgebläse (Leister Hotwind System) gewährleistet. Das ermöglicht eine Variation der Gasgeschwindigkeit zwischen 1 ms^{-1} und 3 ms^{-1} und eine Lufttemperatur bis zu 650°C . Eine erhöhte Lufttemperatur kann einerseits dafür verwendet werden, um Prozessgase besser nachzustellen, als auch um Kondensation in den Rohrleitungen zu vermeiden. Zusätzlich bietet das System die Möglichkeit, Katalysatoren thermisch zu aktivieren. Das Rohrsystem besteht aus ISO-K DN 63 Rohren mit einem Rohrinne Durchmesser von 70 mm. Im Rahmen des Projektes wird hauptsächlich die Konversion von Butoxyethanol und *n*-Butan untersucht. Das *n*-Butan ist aufgrund des hohen Dampfdrucks von 2.14 bar bei Raumtemperatur gasförmig und kann daher direkt aus einer Gasflasche mit einem Massenflussregler

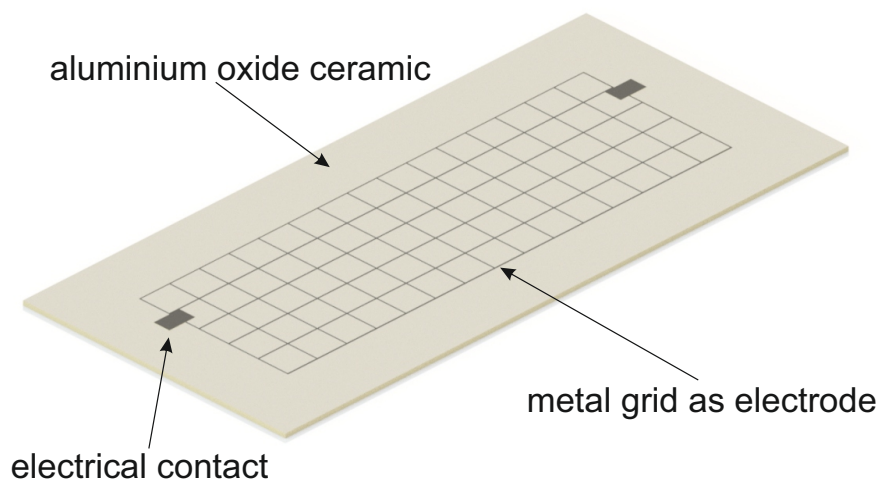


Abbildung 1.2: Zeichnung der verwendeten Elektrode (SDBD). Die Unterseite und Oberseite sind identisch und stellen die gegenseitigen Gegenelektroden dar. [1]

(kurz MFC, Bronkhorst LOW- Δ P-FLOW F-201DV) über ein Drei-Wege-Ventil dem Luftstrom zugefügt werden.

Butoxyethanol besitzt einen deutlich niedrigeren Dampfdruck (80 Pa) und ist deshalb bei Raumtemperatur flüssig. Flüssige VOCs, wie diese, müssen also zunächst verdampft werden. Das flüssige VOC befindet sich in einem Druckbehälter, welcher mit Stickstoff bei etwa 3 bar (relativ) gehalten wird. Die VOC-Menge wird mit einem Coriolis-Massendurchflussregler (kurz C-MFC, Bronkhorst mini CORI-FLOW ML120V00) eingestellt. In dem nachgeschalteten Verdampfer (Bronkhorst CEM Evaporator W-202A) wird das VOC mit einem Trägergasfluss von 0.2 slm Stickstoff bei 80 °C bis 140 °C verdampft. Die benötigte Temperatur wird mit einem vom Hersteller bereit gestellten Online-Rechner bestimmt. Mit dem drei-Wege-Ventil kann zwischen *n*-Butan und dem Verdampfer umgeschaltet werden. Die Einspritzung erfolgt durch einen Partikelfilter und gegen die Strömungsrichtung. Beides verbessert die Durchmischung des VOCs mit dem restlichen Gasstrom. Zur Kondensatverhinderung sind alle Rohre hinter dem Verdampfer bis zum Partikelfilter ebenfalls mit Heizleitungen der Firma HORST GmbH beheizt.

Die Flussgeschwindigkeit wird mithilfe zweier Strömungssonden (Schmidt Technology SS 20.651) gemessen. Diese bestimmen durch ein thermisches Messprinzip sowohl die Gas-temperatur als auch die Strömungsgeschwindigkeit bei Standardbedingungen vor und nach der Plasmakammer. Mit der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit kann ein Regelkreis für die Drehzahl der Lüfter geschlossen werden. So wird durch einen PI-Regler die Strömungsgeschwindigkeit auf einem konstanten Sollwert gehalten.

Als Generator dient ein G2000 der Firma Redline Technologies. Dieser erzeugt Rechteckimpulse mit einer Amplitude von bis zu 300 V und einer Frequenz von bis zu 500 kHz. Diese Rechteckimpulse werden über einen externen Transformator mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:33 auf eine asymmetrische Hochspannung hochgesetzt. Die Sekun-

därinduktivität des Transformators und die Kapazität der 5 Elektroden bilden so einen Serienschwingkreis, welcher eine Resonanzfrequenz von etwa 38 kHz besitzt. Die daraus entstehende Spannung entspricht einer gedämpften Sinusschwingung. Aufgrund der starken Schwingungsdämpfung nach der Anregung zündet das Plasma nur in den ersten Halbwellen. Für die hier durchgeführten Messungen werden HV-Spannungen von 11 kV (Spitze-Spitze verwendet).

Um die vom Transformator abgegebene Leistung zu bestimmen, wird der Strom I und die Spannung U direkt an der Plasmakammer gemessen. Für die Spannungsmessung wird der Tastkopf Tektonix P6015A verwendet. Dieser ermöglicht aufgrund seiner Dämpfung um den Faktor 1000 die sichere Messung der Hochspannung. Der Tastkopf besitzt am Ende seines Anschlusskabels ein Anpassnetzwerk, um den Tastkopf an die Impedanz des Oszilloskops anzupassen. Der Strom der Entladung wird mit einer Pearson Probe (Model 6585) induktiv gemessen. Sie misst das Magnetfeld, welches der Strom des durch den Eisenkern geführten Leiters erzeugt. Am Ausgang ergibt sich so eine Spannung von $U_{\text{Probe}} = I \cdot 1 \frac{\text{V}}{\text{A}}$. Die Daten der Strom- und Spannungsmessung werden von einem Oszilloskop (Teledyne LeCroy WaveRunner 8254) erfasst. Im Oszilloskop wird ebenfalls die Momentanleistung und durch zeitliche Integration die während eines Pulses umgesetzte Energie berechnet. Diese Daten werden zusammen mit den Spitze-Spitze-Werten der Strom und Spannungsmessung an die LabVIEW-Steuerung weitergegeben. Dort wird die Wirkleistung P berechnet. Dies geschieht durch Multiplikation der umgesetzten Energie mit der Anregungsfrequenz f_{Anregung} . Insgesamt gilt dann für die berechnete Leistung:

$$P = f_{\text{Anregung}} \cdot \int_{\text{T}} U \cdot I dt \quad (1.1)$$

In der Programmsteuerung wird mit den Messwerten der Spannungsmessung ein Regelkreis für die Spannung an den Elektroden geschlossen. So wird die resultierende Spannung konstant gehalten. Dies ist notwendig, da das Verhältnis zwischen der Generatorspannung und der Spannung des Schwingkreises nicht konstant ist und sich unter anderem mit der Temperatur der Elektroden ändert.

Die Konzentration der VOC-Verunreinigung wird mit zwei Flammenionisationsdetektoren (ErsaTec SmartFID ST, kurz FIDs) gemessen. Dafür wird vor und nach der Plasmakammer eine kleine Gasmenge (ca. 1.2 L min^{-1}) zur Untersuchung entnommen. Die dafür verwendeten Schläuche werden beheizt, um die Bildung von Kondensat an den Schlauchwänden zu verhindern. Das Probengas wird in einer beheizten Brennkammer in einer Wasserstoffflamme verbrannt. In dieser Wasserstoffflamme werden Kohlenwasserstoffe zersetzt und reagieren zusammen mit atomarem Sauerstoff zu CHO-Ionen. Elektronen und Ionen werden durch ein zwischen den Elektroden angelegtes Feld getrennt. Dadurch kann ein kleiner Strom im Bereich von einigen Picoampere gemessen werden, welcher proportional zur Kohlenwasserstoffkonzentration ist. Dieser Strom wird verstärkt und nach einer Kalibrierung in eine Konzentration in parts-per-million (ppm) umgerechnet.

Diese Aufspaltung geschieht nur bei brennbaren Verbindungen, die FIDs messen also den Anteil an nicht vollständig oxidierten Verbindungen. Wenn durch das Plasma eine Konversion des eingespeisten VOCs stattfindet, zeigt der FID hinter der Plasmakammer eine

geringere Konzentration an. Daraus kann die relative Konversion η_{rel} in der Plasmakammer bestimmt werden.

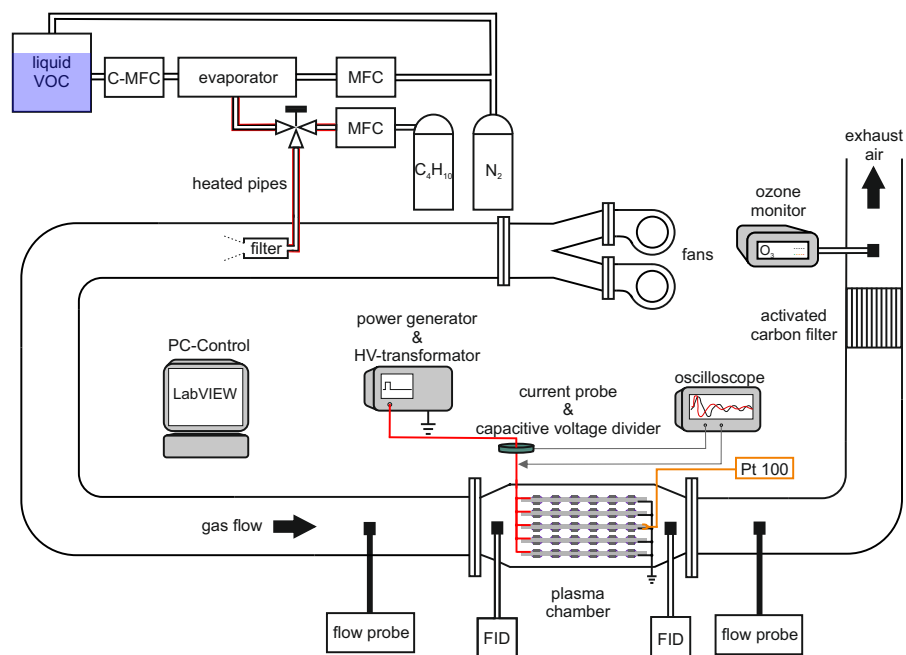


Abbildung 1.3: Schematische Zeichnung des Aufbaus. [1]

Elektrische und optische Charakterisierung

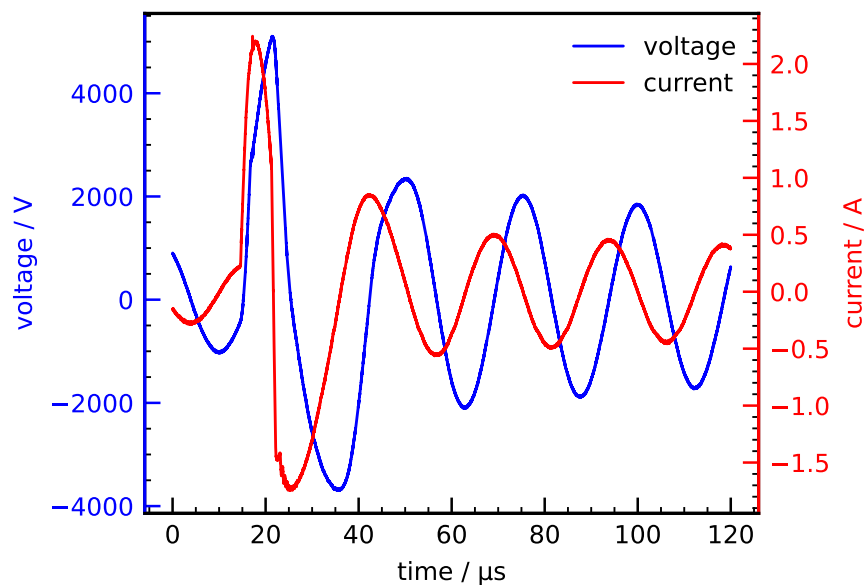


Abbildung 1.4: Wellenform von Strom und Spannung bei 11 kV und 4 kHz. [1]

In Abbildung 1.4 ist die Strom- und Spannungscharakteristik des fünfmal betriebenen Standardmoduls mit fünf simultan betriebenen Standardelektroden aufgetragen. Da die Kapazität der Elektroden zusammen mit der Induktivität des Transformators des G2000 Generators einen Schwingkreis bilden, ist das zu sehende sinusförmige Verhalten zu erwarten. Durch die Kapazität der Elektroden ist die Phasenverschiebung zwischen den beiden Signalen nahezu 90° . Die Resonanzfrequenz des angeregten Schwingkreises beträgt etwa 38 kHz, während die Spannungspulse mit einer Frequenz zwischen 250 Hz und 4 kHz angeregt werden. Die genannten Spannungen in dieser Arbeit beziehen sich in der Regel auf die Spitze-zu-Spitze Spannung der ersten beiden Halbwellen.

Messungen der Abluft in unterschiedlichen Konfigurationen

Die Konversionsuntersuchungen erfolgen generell für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten (1 m s^{-1} , 2 m s^{-1} , 3 m s^{-1}). Dabei werden 3 verschiedene Konzentrationen (50 ppm, 100 ppm, 200 ppm) untersucht. Aufgrund der physikalischen Limitationen der verwendeten Massenflussregler kann die Konzentration von 1000 ppm ausschließlich bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m s^{-1} gemessen werden.

Bei einer Injektion von Isopropanol oder Butoxyethanol in den Hauptgasstrom können die VOCs im Rohrleitungssystem kondensieren. Die Bildung eines Kondensats führt zu einer zeitlich und räumlich inhomogenen Verteilung von VOCs, welche sich in der Form eines schwankenden Messsignals darstellt. Zusätzlich dürfen keine Flüssigkeiten in Kontakt mit Hochspannungskomponenten kommen. Die Kondensatbildung kann durch die Nutzung der Heizfunktion der Gebläse verhindert werden. Dadurch wurde das gesamte Luftvolumen auf 65°C für Isopropanol bzw. 120°C für Butoxyethanol erhitzt. Die Temperaturerhöhung hat keinen signifikanten Einfluss auf die Konversion, da eine thermische Oxidation erst bei Temperaturen von über 700 K auftritt.

Abbildung 1.5 zeigt die relative Konversion a) und die absolute Konversion b) in Abhängigkeit von der Energiedichte für unterschiedliche Konzentrationen von Butoxyethanol. Die Verläufe zeigen ein ähnliches Verhalten mit steigender Energiedichte. Während die relative Konversion für niedrige Butoxyethanol Konzentrationen am höchsten ist, erreicht die absolute Konversion für die höchsten Butoxyethanolkonzentrationen ihr Maximum. Für alle Graphen sinkt die Steigung für höhere Energiedichten, sodass die Effizienz bei hohen Energiedichten niedriger ist. Das Verhalten ist zu erwarten, da bei höheren Energiedichten mehr reaktive Spezies produziert werden, was zu einer höheren Konversion der VOCs führt, unter der Voraussetzung, dass die zunehmende Temperatur die Chemie nicht auf eine Weise ändert, die andere Arten von Reaktionen bevorzugt. Wenn reaktive Spezies in der Oxidation von VOCs verbraucht werden, nimmt ihre Dichte ab und damit auch die Wahrscheinlichkeit für weitere Oxidationen. Dies führt zum Ergebnis, dass es nicht möglich ist, dieselbe relative Menge an VOCs bei höheren Konzentrationen mit den gleichen elektrischen Einstellungen zu konvertieren. Der Steigung der Kurven kann bei zunehmender Energiedichte abnehmen, da es schwieriger wird, VOCs zu konvertieren, die die Elektroden in Regionen weit von den aktiven Entladungen passieren. Dies liegt daran, dass reaktive Teilchen hauptsächlich im aktiven Entladungsvolumen produziert werden, da ihre Produktion in vielen Fällen von der Elektronendichte abhängt. Dementsprechend nimmt die Dichte der reaktiven Teilchen und somit auch die Konversion mit wachsendem Abstand zur Elektrode ab. [1]

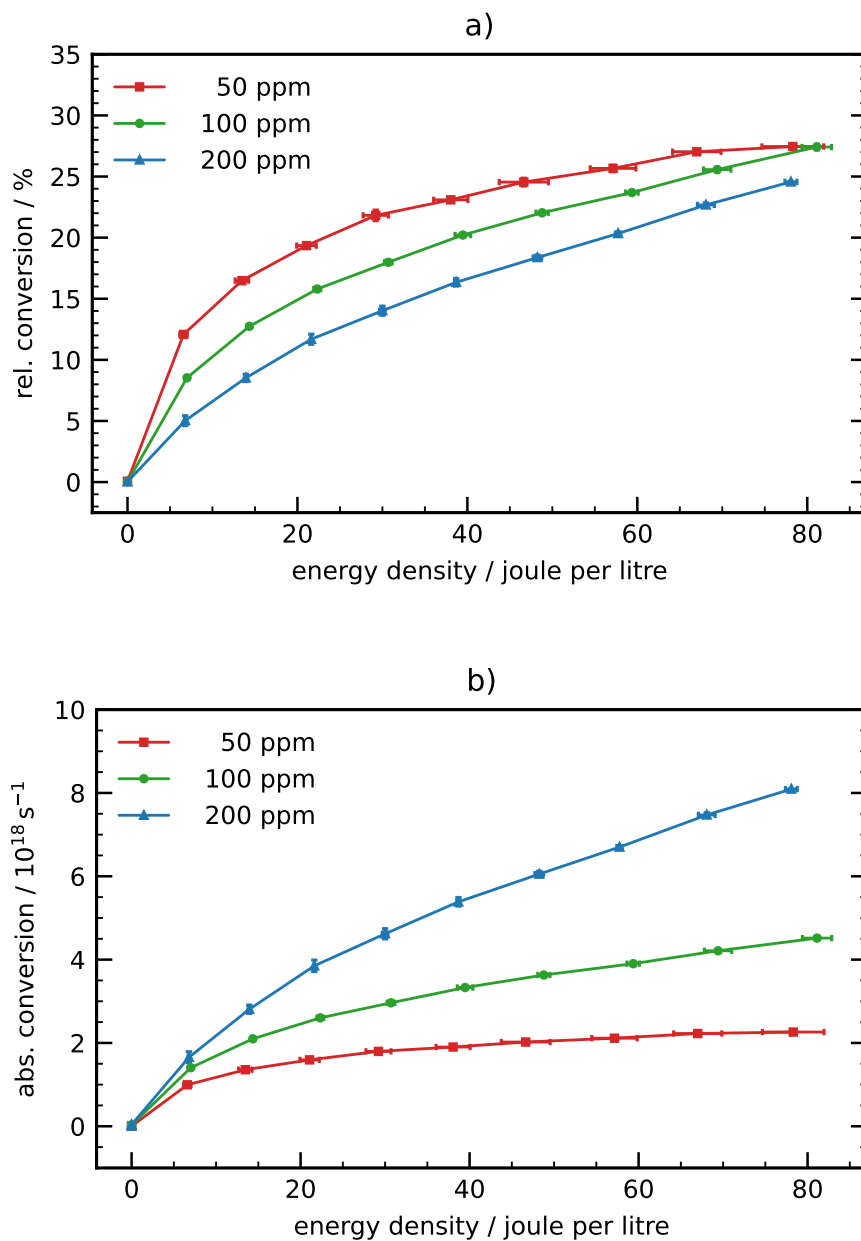


Abbildung 1.5: Relative Konversion (a) und absolute Konversion (b) für verschiedene Butoxyethanol Konzentrationen bei einer konstanten Gasgeschwindigkeit von 3 ms^{-1} . [1]

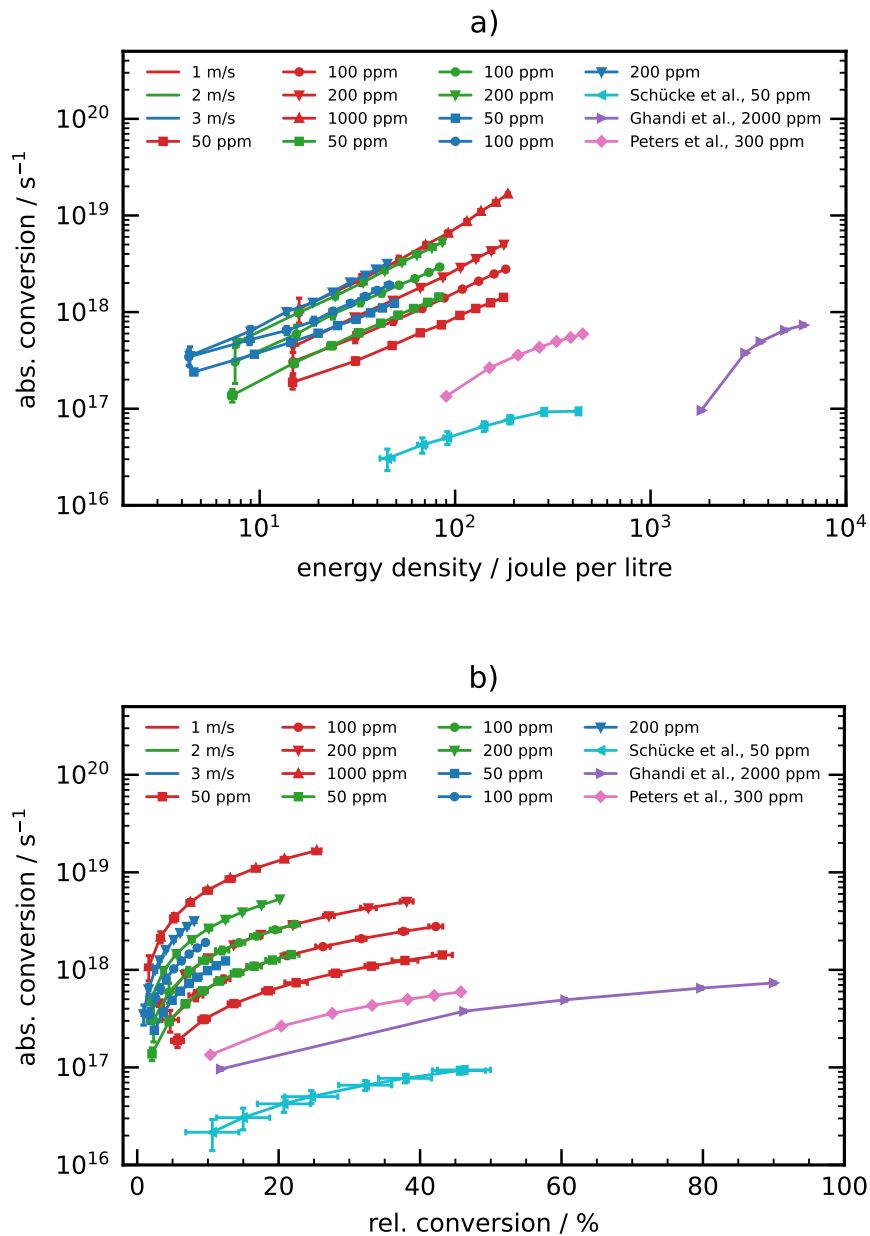


Abbildung 1.6: Absolute Konversion von *n*-butan in Abhängigkeit von der Energiedichte a) und relativer Konversion b). Verglichen mit [3–5]. [1]

Abbildung 1.6 zeigt die absolute Konversion von *n*-Butan für verschiedene Gasgeschwindigkeiten und Konzentrationen in Abhängigkeit von der Energiedichte a) und der relativen Konversion b). In beiden Diagrammen sind zum Vergleich zusätzlich die Ergebnisse von den Arbeiten von Schücke et al. [5], Peters et al. [4] und Gandhi et al. [3], aufgetragen. Schücke et al. verwenden dieselbe Plasmaquelle in einem Einzelelektrodensystem bei einem Gasfluss von 10 slm. Während die durchschnittliche Verweilzeit eines *n*-Butan Moleküls in dem Aufbau von Schücke et al. etwa 1.6 s beträgt, beträgt sie in dem von uns entwickelten Generator 0.34 s. Daher wäre es zu erwarten, dass eine nicht so hohe relative Konversion zu

erzielen wäre. Allerdings erreicht das hochskalierte System eine signifikant höhere absolute Konversion bei diesen Parametern. Das führt zu der Annahme, dass es zusätzliche Effekte in dem hochskalierten System gibt, die für die Konversion förderlich sind. Einer dieser Effekte könnte die verschiedene Plasmaaerodynamik sein, die daher auch im Rahmen dieses Projekts untersucht wird. [1]

1.2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für eine detaillierte Aufschlüsselung der Kosten

1. 0812: Beschäftigte E12-E15: Personalkosten Alexander Bödcker (E13)
2. 0835: Vergabe von Aufträgen: Dienstleistungsvertrag mit DLR, Reparatur und Wartung eines Massenflussreglers
3. 0843: Sonst. allg. Verw.-Ausgaben: Rohrverschraubungskomponenten, Gase bzw. VOCs und weitere Chemikalien, elektronische Komponenten, biologische Verbrauchsmaterialien
4. 0846: Dienstreisen: Konferenzkosten GEC 2022, Sendai, Japan
5. 0850: Gegenstände über 410 €: Massenflussregler und Verdampfungssystem, passive Thermosonde, Ozonmessgerät, Strommesssonde, Plasmakammern

1.2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen des Plakat Projektes ist es unabdingbar die VOC Konversion und Bakterieninaktivierung in Abhängigkeit von der investierten elektrischen Leistung zu messen, um eine Aussage über die Energieeffizienz zu erhalten und um die Wettbewerbsfähigkeit angeben zu können. Die Messungen zeigen erfolgreich, dass im Vergleich zu anderen plasmabasierten Systemen die Effizienz hoch ist. Die gewonnenen Daten können dafür genutzt werden den Prozess auf industriellen Maßstab zu übertragen. Die Wirtschaftlichkeit muss noch durch einen speziell für die Industrie hergestellten Generator gesteigert werden, weil der verwendete Laborgenerator zu teuer ist und das breite Parameterspektrum (Variabilität der Pulsfrequenz und Spannungsamplitude) nicht für die Anwendung benötigt wird.

1.2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwendbarkeit der Ergebnisse im Sinne des vorgeschriebenen Verwertungsplan

Ein hoher wissenschaftlicher Nutzen wurde bereits dadurch gezeigt, dass es eine Veröffentlichung in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift, sowie zwei Präsentationen auf einer internationalen Konferenz erfolgt sind und weitere Publikationen geplant sind. Das modular entwickelte System ist betriebsfähig und kann so die Grundlage für weiterführende Messungen unter realen Bedingungen in der Anwendung darstellen. Aus der technischen/-wissenschaftlichen Perspektive bietet dieses System schon jetzt eine vielversprechende Alternative gegenüber konventionellen Methoden in der Industrie, weil bspw. keine fossi-

len Rohstoffe für den Betrieb verwendet werden müssen und ein vollständig nachhaltiger Prozess realisierbar wäre. Weiterhin ist eine Regelung denkbar, die zeitlich veränderlichen VOC-Konzentrationen im Produktionsprozess effizient reduzieren kann.

1.2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

1.2.6 Publikationen

Im Projektzeitraum wurden die folgenden Publikationen veröffentlicht:

Publikationen in Fachzeitschriften

A. Bötdecker et al., "A scalable twin surface dielectric barrier discharge system for pollution remediation at high gas flow rates," *Reaction Chemistry & Engineering*, vol. 7, no. 11. Royal Society of Chemistry (RSC), pp. 2348–2358, 2022. doi: 10.1039/d2re00167e.

(Geplant) A. Bötdecker et al., "Characterization of the flow field induced by a surface dielectric barrier discharge in quiescent air with particle image velocimetry and schlieren imaging"

Publikationen auf Konferenzen

A. Bötdecker et al., "Upscaling of a surface dielectric barrier discharge for air purification" [Poster], The Gaseous Electronics Conference 75, 3-7 October, Sendai, Japan

A. Bodnar et al., "Enhancing the Decomposition of Polluted Air Streams with Additional Metal Plates in a Multi-Electrode Twin Surface Dielectric Barrier Discharge System" [Poster], The Gaseous Electronics Conference 75, 3-7 October, Sendai, Japan

Abschlussarbeiten

- 1) Anna Lena Schöne, "Gas Flow Effects in Surface Dielectric Barrier Discharges", *Masterarbeit*, Ruhr-Universität Bochum, 2022
- 2) Arisa Bodnar, "Investigation of a Twin Surface Dielectric Barrier Discharge for the Decomposition of Polluted Air Streams", *Bachelorarbeit*, Ruhr-Universität Bochum, 2022
- 3) Katja Wenselau, "Untersuchung des Strömungsfeldes einer beidseitigen dielektrisch behinderten Oberflächenentladung für die Abluftreinigung", *Bachelorarbeit*, Ruhr-Universität Bochum, 2022
- 4) Samuel Jonas Giesekus, "Untersuchung der Abluftreinigung durch eine beidseitige dielektrische Oberflächenentladung unter der Betrachtung von verschiedenen Elektrodengeometrien", *Bachelorarbeit*, Ruhr-Universität Bochum, 2021

Literaturverzeichnis

- [1] A. Böddecker, A. Bodnar, L. Schücke, J. Gieseke, K. Wenselau, R. T. Nguyen-Smith, T. Oppotsch, C. Oberste-Beulmann, M. Muhler, A. R. Gibson, and P. Awakowicz, “A scalable twin surface dielectric barrier discharge system for pollution remediation at high gas flow rates,” *React. Chem. Eng.*, vol. 7, pp. 2348–2358, 2022. [4](#), [5](#), [6](#), [8](#), [9](#), [10](#), [11](#), [12](#), [13](#)
- [2] L. Schücke, *Analysis of reaction kinetics in a surface dielectric barrier discharge for the conversion of volatile organic compounds*. doctoralthesis, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsbibliothek, 2022. [4](#)
- [3] M. S. Gandhi, Y. Mok, S. Lee, and H. Park, “Effect of various parameters for butane decomposition under ambient temperature in a dielectric barrier discharge non-thermal plasma reactor,” *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 44, pp. 786–794, Sept. 2013. [12](#)
- [4] N. Peters, L. Schücke, K. Ollegott, C. Oberste-Beulmann, P. Awakowicz, and M. Muhler, “Catalyst-enhanced plasma oxidation of *n*-butane over α -MnO₂ in a temperature-controlled twin surface dielectric barrier discharge reactor,” *Plasma Processes and Polymers*, vol. 18, p. 2000127, Apr. 2021. [12](#)
- [5] L. Schücke, J.-L. Gembus, N. Peters, F. Kogelheide, R. T. Nguyen-Smith, A. R. Gibson, J. Schulze, M. Muhler, and P. Awakowicz, “Conversion of volatile organic compounds in a twin surface dielectric barrier discharge,” *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 29, p. 114003, Nov. 2020. [12](#)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Diese sind namentlich mit Kontaktdaten auf der Titelseite gelistet.