

Institut für Kolbenmaschinen (IFKM)  
Rintheimer Querallee 2  
76131 Karlsruhe



## **Plasma - Abgasnachbehandlung für regenerativ gefeuerte Stationärmotoranwendungen**

### **Abschlussbericht**

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

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

**Az. 33885/01**

eingereicht von

Tobias Michler, M.Sc. & Dr.-Ing. Olaf Toedter

Karlsruhe, 1. Mai 2020

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



|    |                 |         |             |             |                       |
|----|-----------------|---------|-------------|-------------|-----------------------|
| Az | <b>33885/01</b> | Referat | <b>24/0</b> | Fördersumme | <b>113.230,00 EUR</b> |
|----|-----------------|---------|-------------|-------------|-----------------------|

|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Antragstitel</b> | <b>BTB-Bio Plasma - Abgasnachbehandlung für regenerativ gefeuerte Stationärmotoranwendungen</b> |
|---------------------|---|

|                   |  |
|-------------------|--|
| <b>Stichworte</b> | Reduktion der Partikel durch Niedertemperatur- Plasmen, regenerative Kraftstoffe |
|-------------------|--|

|                  |                   |                   |                 |
|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Laufzeit         | Projektbeginn     | Projektende       | Projektphase(n) |
| <b>24 Monate</b> | <b>19.12.2017</b> | <b>18.12.2019</b> | <b>2</b>        |

Zwischenberichte

|                              |  |  |
|------------------------------|--|--|
| <b>Bewilligungsempfänger</b> | Karlsruher Institut für Technologie<br>Institut für Kolbenmaschinen<br>Rintheimer Querallee 2<br>76131 Karlsruhe | Tel 0721 608 43639<br>Fax 0721 608 48578 |
|                              |  | Projektleitung<br>Dr.-Ing. Olaf Toedter  |
|                              |  | Bearbeiter<br>Tobias Michler, M. Sc.     |

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>Kooperationspartner</b> | Prof. Trimis<br><br>Engler-Bunte-Institut<br><br>Karlsruher Institut für Technologie |
|----------------------------|--|

### **Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens**

Im vorgeschlagenen Projekt soll die Abgasnachbehandlung von Abgasen, welche bei der Verbrennung von BtL- und PtL-Kraftstoffen entstehen, unter Einsatz nicht-thermischer Plasmen untersucht werden. Die Notwendigkeit des Einsatzes biogener Kraftstoffe liegt in ihrem CO<sub>2</sub>-Vorteil begründet, birgt aber bei der veränderten Gemischbildung neue Risiken der Partikelbildung, v.a. bei dem Einsatz von Kraftstoffblends. Im Rahmen erster Untersuchungen am IFKM konnten bereits erste positive Einflüsse aufgezeigt werden. Zu untersuchen gilt es jedoch, welches die zentralen Einflussparameter der NTP-Behandlung sind und wie das penetrierte Volumen und der Energieeinsatz, um ein nicht-thermisches Plasma zu erzeugen, optimiert werden können.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Die Bewertung des Niedertemperatur-Plasmas und seiner Einsatzmöglichkeiten im Abgasstrang hat sehr viele Einflussgrößen und soll hinsichtlich seiner Effizienz, seiner Realisierbarkeit und seiner Effekte bewertet werden. Diese Ergebnisse können zusammen als Basis dafür genommen werden, ob ein derartiges System mit Blick auf eine Serienanwendung entwickelt werden kann.

- Zur Bewertung werden für die unterschiedlichen Ziele die jeweiligen Methoden eingesetzt:
- Multi-Physics Simulation des Gesamtsystems mit der Simulationsumgebung Comsol
- Experimentelle Untersuchungen an Abgassträngen von Motorprüfstände
- TPO und TGA zur Charakterisierung des Rußes.

## **Ergebnisse und Diskussion**

An zwei unterschiedlichen Forschungseinzylinder Motoren wurden sowohl konventionelle wie auch aus regenerativen Quellen stammende von Otto – und Dieselmotoren untersucht. Hierbei wurde besonders auf die Partikelemission dieser geachtet. Aufgrund des erhöhten Aromatengehaltes des aus regenerativen Quellen hergestellten Ottokraftstoffes wies dieser eine erhöhte Partikelemission auf. Dagegen zeigte die alternative Dieselmotormischung ein sehr ähnliches Verhalten zu dem fossilen Kraftstoff.

Um das aktivierte Volumen des folgenden Niedertemperatur-Plasma-Generators zu erhöhen wurde mittels einer Multiphysicsimulation die für diesen Anwendungsfall optimale Geometrie erarbeitet. Um einen hohen Partikelmassenstrom im Abgas zu generieren wurden die folgenden Versuche an einem Vier-Zylinder Dieselmotor durchgeführt. In zwei verschiedenen Betriebspunkten wurden sowohl die Partikelanzahl als auch die Größenverteilung gemessen und zusätzlich noch Rußproben entnommen um diese später mittels TPO-Analyse auf ihre Reaktivität zu prüfen. Die Betriebsparameter Duty-Cycle und Spannung des NTP-Generators wurden dabei variiert um den Einfluss dieser zu analysieren. Es konnte dabei keine Verbesserung der Partikelemission oder sonstiger Emissionen festgestellt werden. In kleinerem Maßstab ist dies jedoch in der Literatur belegt. Dies legt den Schluss nahe, dass diese Anwendung in motorisch relevanten Größenordnungen ihr Potential nicht vollständig entfalten kann.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die Ergebnisse des Projektes werden in Form eines Abschlussberichtes zusammengefasst und auch auf Seminaren am KIT öffentlich präsentiert.

Ferner werden die Ergebnisse im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Profilvereinigung Mobilität eingebracht werden und in Publikationen veröffentlicht werden.

[1] Impact of Non-Thermal Plasma on Particulate Emissions in Application in a Diesel Engine Exhaust Duct. Langhorst, T.; Toedter, O.; Koch, T.; Gonner, P. 2017. SAE International, Warrendale (PA). doi:10.4271/2017-01-5100

## **Fazit**

Das Projekt NTP-Bio zielte auf den bisher noch nicht oder unzureichend erforschten Aspekt der Niedertemperatur-Plasma-Abgasnachbehandlung von Partikeln und erwartete hier signifikante Ergebnisse. Hierzu wurden Untersuchungen an einem Forschungseinzylinder mit einem Diesel aus regenerativen Quellen durchgeführt und aufgrund ihrer Partikelemission beurteilt. Zusätzlich wurde ein weiterer Ottomotor-Forschungseinzylinder verwendet um die Partikelemissionen von handelsüblichem Super E5 sowie eine Mischung aus diesem Super E5 und einem aus regenerativen Quellen hergestellten Kraftstoff zu bewerten. Der verwendete „Biodiesel“ überzeugte dabei durch seine problemlose Verwendung in bestehenden Systemen und bezüglich seines thermodynamischen Verhaltens. Bei niedrigen Lastpunkten zeigte er eine leicht erhöhte Partikelemission, die sich jedoch mit steigender Last aufhebt und teilweise auch umkehrt. Mit Hilfe dieses Diesels ist ein hohes CO<sub>2</sub> Einsparpotential vorhanden, welches auf jeden Fall genutzt werden muss. Die Abgasnachbehandlung mittels des entwickelten und optimierten Niedertemperatur Plasma Generators war derweil nur bedingt erfolgreich. Es zeigte sich, dass dieser Generator seine Wirkung in motorisch relevanten Größenordnungen nicht vollständig entfalten kann. Weshalb dieser Teil des Projektes leider keinen Erfolg brachte.

## Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Projektkennblatt .....</b>  | <b>I</b>  |
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>   | <b>IV</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>   | <b>VI</b> |
| <b>1 Zusammenfassung .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2 Einleitung.....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>3 Vorüberlegung, Anforderungen und Multi-Physics-Modellierung.....</b>  | <b>4</b>  |
| 3.1 Physikalische Grundlagen der Plasmaentladung und deren Einfluss auf die<br>Rußoxidation.....                 | 4         |
| 3.1.1 Physik der Coronaentladung .....   | 4         |
| 3.1.2 Plasmaphysikalische Bedingungen der verwendeten Coronaentladung .....                                      | 6         |
| 3.1.3 Wichtige Reaktionspfade der Rußoxidation.....  | 8         |
| 3.1.4 Wichtige Reaktionspfade in der Coronaentladung für die Rußreaktion.....                                    | 9         |
| 3.1.5 Bewertung der im NTP-Generator entstandenen Spezies auf die Rußoxidation                                   | 10        |
| 3.2 Stichversuch am Motorenprüfstand .....   | 11        |
| 3.3 Multi-Physics-Modellierung des „NTP“ und Optimierung des Penetrationsvolumens                                | 14        |
| 3.3.1 Betrachtete NTP-Generatorgeometrien.....   | 14        |
| 3.3.2 Simulationsergebnisse .....  | 15        |
| 3.4 Aufbau des NTP Generators .....  | 21        |
| 3.4.1 Aufbau des NTP Rohrs .....   | 21        |
| 3.4.2 Verwendetes Coronasystem .....   | 21        |
| 3.4.3 Triggerkette und Delay .....   | 22        |
| <b>4 Versuchsvorbereitung und Durchführung der Prüfläufe.....</b>  | <b>24</b> |
| 4.1 Penetration von Diesel-Abgas Versuchsaufbau.....   | 24        |
| 4.1.1 Versuchsträger.....  | 24        |
| 4.1.2 Verwendete Messtechnik .....   | 25        |
| 4.2 Analyse der Rußproben mittels Temperaturprogrammierter Oxidation .....                                       | 28        |
| <b>5 Vergleich unterschiedlicher Kraftstoffe im stationären Betrieb an zwei<br/>Forschungseinzylindern .....</b> | <b>29</b> |
| 5.1 Gesamtpartikelkonzentration der untersuchten Kraftstoffe .....   | 29        |
| 5.1.1 Diesel.....  | 29        |

|          |  |   |
|----------|--|---|
| 5.1.2    | Otto .....   | 30  |
| 5.2      | Partikelgrößenverteilung .....                                       | 31  |
| 5.2.1    | B7 Diesel vs. R33 bei mittleren Drehzahlen und niedrigen Lasten..... | 31  |
| 5.2.2    | B7 Diesel vs. R33 bei niedrigen Drehzahlen und Lasten .....          | 31  |
| 5.2.3    | Otto bei mittleren Lasten .....                                      | <b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b> |
| <b>6</b> | <b>Analyse der Versuchsergebnisse.....</b>                           | <b>33</b>                                 |
| 6.1      | Partikelkonzentration und Durchmesser .....                          | 34  |
| 6.2      | Regenerationsverhalten .....   | 37  |
| 6.3      | Bewertung der Ergebnisse .....                                       | 38  |
|          | <b>Fazit .....</b>   | <b>40</b>                                 |
|          | <b>Projektbezogene Publikationen .....</b>                           | <b>42</b>                                 |
| <b>7</b> | <b>Literaturangaben.....</b>   | <b>43</b>                                 |

## Abbildungsverzeichnis

|   |   |
|---|---|
| Abbildung 1: Inhomogenes elektrisches Feld einer „Spitze-Platte“- Elektrodenkonfiguration [2].....  | 4   |
| Abbildung 2: Verschiedene Formen der Coronaentladung bei einer „Spitze-Platte“- Elektrodenkonfiguration [2].....  | 5   |
| Abbildung 3: Zusammenhang von Ionisation, Dissoziation und vibratorische Anregung für N <sub>2</sub> und O <sub>2</sub> mit der mittleren Elektronenenergie.....  | 6   |
| Abbildung 4: Grauwert Intensität durch gemittelte Bilder bei Variation der Primärspannung..   | 7   |
| Abbildung 5: Aktivierter Bereich und effektive Grauwert Intensität der Coronaentladung bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungskonditionen.....   | 8   |
| Abbildung 6: Integration des NTP-Generators in das Abgasnachbehandlungssystem des Versuchsträgers.....  | 11  |
| Abbildung 7: Partikelreduktion durch NTP-Generator vor DPF .....  | 12  |
| Abbildung 8: DPF Regeneration mit und ohne NTP-Generator. Verwendet wurde dabei ein Ein-Spitzen-Igniter.....  | 13  |
| Abbildung 9: Übersicht der simulierten NTP-Reaktoren. <b>a) Standardgeometrie</b> bei der die Corona-Igniter nahe beieinander liegen. <b>b) In der Spiralgeometrie</b> sind die Igniter im 90° Winkel zueinander angeordnet und nach hinten versetzt. <b>c) Die Versatzgeometrie</b> kennzeichnet sich dadurch aus, dass Igniter eins und zwei, und drei und vier jeweils um 180° zueinander versetzt sind. <b>d) Bei der Reihengeometrie</b> liegen alle Igniter in einer Linie zueinander. <b>e) Die Vergleichsanordnung</b> ist sehr ähnlich zu der Standardgeometrie. Jedoch sind die Igniter deutlich weiter am Rand des NTP-Generator-Rohrs angesiedelt. Diese Anordnung entspricht der im Stichversuch. .... | <b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b> |
| Abbildung 10: Arbeitsbereich der Standardgeometrie im Querschnitt.....  | 16  |
| Abbildung 11: Arbeitsbereich der Spiralgeometrie im Längsschnitt von y = -2 cm bis y = 2 cm in 1 cm Schritten.....  | 17  |
| Abbildung 12: Arbeitsbereich der Versatzgeometrie im Längsschnitt von y = -2 cm bis y = 2 cm in 1 cm Schritten.....   | 18  |
| Abbildung 13: Arbeitsbereich der Reihengeometrie im Längsschnitt von y = -2 cm bis y = 2 cm in 1 cm Schritten.....  | 19  |
| Abbildung 14: Arbeitsbereich der Vergleichsgeometrie im Querschnitt.....  | 20  |
| Abbildung 15: Schematischer Aufbau des NTP.....   | 21  |
| Abbildung 16: System-Layout des Corona-Zündsystems [47].....  | 22  |
| Abbildung 17: Triggerkette für die einzelnen Igniter des Corona Systems .....   | 23  |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 18: Aufbau der Coronaigiter im Abgasstrang. Zu sehen sind drei der Igniter mit den zugehörigen Kühlwendeln. Links von den Ignitern befindet sich die erste Verdünnungsstufe des EEPS. ....                                   | 25 |
| Abbildung 19: Funktionsschema des EEPS [48]. ....  | 27 |
| Abbildung 20: Gesamtpartikelkonzentration von handelsüblichem B7 und R33 Diesel bei unterschiedlichen Drehzahlen. Der $p_{me}$ bei $1400 \text{ min}^{-1}$ beträgt 3 bar. Der $p_{me}$ bei $2000 \text{ min}^{-1}$ beträgt 4 bar. .... | 30 |
| Abbildung 21: Partikelgrößenverteilung von B7 und R33 Diesel bei $2000 \text{ min}^{-1}$ und einem $p_{me}$ von 4 bar ....   | 31 |
| Abbildung 22: Partikelgrößenverteilung von B7 und R33 Diesel bei $1400 \text{ min}^{-1}$ und einem $p_{me}$ von 3bar ....  | 32 |
| Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Spannung der Primärseite im Coronoasteuergerät und dem Duty-Cycle $tDuty$ . ....   | 34 |
| Abbildung 24: TPNC bei Variation der Corona buck Spannung, Frequenz und Anzahl der Bursts. Betriebspunkt: $2000 \text{ min}^{-1}$ $p_{me}$ 4 bar. ....   | 35 |
| Abbildung 25: Übersicht des Durchmessers des Maximums (Diameter@Peak) und dem Sauter Mean Diameter (SMD) bei Variation der Corona buck Spannung. Betriebspunkt: $2000 \text{ min}^{-1}$ $p_{me}$ 4 bar. ....                           | 35 |
| Abbildung 26: TPNC bei Variation der Corona buck Spannung. Betriebspunkt: $1500 \text{ min}^{-1}$ $p_{me}$ 4 bar. ....   | 36 |
| Abbildung 27: Übersicht des Durchmessers des Maximums (Diameter@Peak) und dem Sauter Mean Diameter (SMD) bei Variation der Corona buck Spannung. Betriebspunkt: $1500 \text{ min}^{-1}$ $p_{me}$ 4 bar. ....                           | 36 |
| Abbildung 28: Schwärzungszahl als Funktion der Corona buck Spannung. Betriebspunkt: $1500 \text{ min}^{-1}$ $p_{me}$ 4 bar. ....   | 37 |
| Abbildung 29: Ergebnis der TPO-Analyse für die Referenz bei $1500 \text{ min}^{-1}$ und einem $p_{me}$ von 4 bar. ....   | 38 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>AGR</b>                  | Abgasrückführung                                 |
| <b>AMA</b>                  | Abgasmessanlage                                  |
| <b>ATL</b>                  | Abgasturbolader                                  |
| <b>CLD</b>                  | Chemilumineszenzdetektor                         |
| <b>CRT</b>                  | Continuously Regenerating Trap                   |
| <b>DOC</b>                  | Diesel Oxidations Katalysator                    |
| <b>DPF</b>                  | Diesel Partikel Filter                           |
| <b>EEPS</b>                 | Engine Exhaust Particle Sizer                    |
| <b>FID</b>                  | Flammenionisationsdetektor                       |
| <b>FSN</b>                  | Schwärzungszahl                                  |
| <b>FTIR</b>                 | Fourier Transformations Infrarot Spektrometer    |
| <b>HF</b>                   | Hochfrequenz                                     |
| <b>INCA</b>                 | Integrated Calibration and Application Tool      |
| <b>NDIR</b>                 | Nichtdisperiver Infrarot Detektor                |
| <b>NTP</b>                  | Niedertemperatur Plasma                          |
| <b><math>p_{me}</math></b>  | Effektive Mitteldruck                            |
| <b><math>p_{mi}</math></b>  | Indizierte Mitteldruck                           |
| <b>PSS</b>                  | Particulate Sampling System                      |
| <b>SMD</b>                  | Sauter Mean Diameter                             |
| <b>TGA</b>                  | Thermogravimetrische Analyse                     |
| <b><math>T_{max}</math></b> | Temperatur des Peaks bei der TGA                 |
| <b>TPNC</b>                 | Gesamtpartikelkonzentration                      |
| <b>TPO</b>                  | Temperaturprogrammierte Oxidation                |
| <b>°KWvZOT</b>              | Grad Kurbelwellenwinkel vor Zünd-oberen-Totpunkt |



## 1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Niedertemperatur Plasma (NTP)- Generator zur Reduktion der Anzahl und Steigerung der Reaktivität von Rußpartikeln untersucht und mittels Multiphysicssimulation optimiert.

Mit Hilfe eines von BorgWarner gestellten Hochfrequenzzündgerätes wurde ein Niedertemperatur Plasma Generator auf Basis der Coronaentladung umgesetzt. In einem ersten Stichversuch wurde der Niedertemperatur Plasma Generator am Abgasstrang eines 2l Dieselmotor getestet. Dazu wurde mithilfe eines Partikelzählers und eines Partikelspektrometers sowohl die gesamte Partikelanzahl, sowie die Größenverteilung der Partikel erfasst. Dort wies er eine Partikelreduktion von etwa 10% auf. Auch Versuche beim gezielten Abbrennen beladener Dieselpartikelfilter deuteten auf eine Verbesserung des Abbrandverhaltens hin.

Daraufhin wurde mittels einer 3D Multiphysicssimulation der Plasma Generator optimiert. Ziel war es, das durch die sogenannten Corona Igniter hervorgerufene Entladungsfeld auf ein Maximum zu vergrößern. Dies gelang durch eine Optimierung der Anordnung der Igniter und es konnte eine Steigerung des aktivierten Volumens um den Faktor 9,2 erreicht werden.

Verglichen wurden an einem Forschungseinzyylinder verschiedene Kraftstoffe wie B7 und R33 Blue Diesel, welcher teilweise aus regenerativen Quellen stammt. In einzelnen gewählten Betriebspunkten zeigte der nachhaltigere Diesel eine leicht erhöhte Partikelemission mit mehr größeren Partikeln, aber keine veränderte Größenverteilung. In anderen Betriebspunkten lag dafür die Partikelemission unter dem Wert mit fossilem Diesel.

Zusätzlich wurden ähnliche Versuche mit Ottokraftstoffen an einem weiteren Forschungseinzyylinder durchgeführt. Hierbei wurde handelsübliches Super E5 mit einer Mischung aus Super E5 und einem Kraftstoff aus regenerativen Quellen (bioliq) verglichen. Auch hier zeigte die Mischung mit dem nachhaltigen Kraftstoff eine leichte Erhöhung der Partikelemission und des Partikeldurchmessers.

Der optimierte Niedertemperatur Plasmagenerator wurde wieder in der zuvor beschriebenen Testumgebung eingesetzt. Um den Einfluss eines beladenen DPFs auszuschließen, wurde dieser vor den Messungen entfernt und durch ein gerades Rohrstück ersetzt. Die Messungen zeigten trotz des deutlich gesteigerten Aktivierungsvolumens der Coronaentladung keinen Effekt des Plasma Generators auf die Partikelanzahl sowie die Partikelgrößenverteilung. Als Kriterium für die Größenverteilung wurden die Kenngrößen des Sauter Mean Diameters und der Peakposition gewählt. Zusätzlich dazu wurden - um die Reaktivität des Rußes bewerten zu können - Rußproben gesammelt und von dem Kooperationspartner dem Engler-Bunte-Institut mittels TPO analysiert. Auch hier wurde leider entgegen der Erwartungen aus dem Stichversuch kein Effekt des Plasmagenerators festgestellt.

Die potenziellen Gründe für die unterschiedlichen Messergebnisse sind vielfältig und nicht genau zu bestimmen, jedoch zeigen die folgenden Betrachtungen einen Ansatz. Der Einfluss der Beladung und damit der erzeugte Gegendruck des DPF auf das Verhalten der Partikeloxidation im Abgasstrang ist nicht auszuschließen. Zum anderen könnte einfach das aktivierte Volumen der Coronaentladung bezogen auf die Verweildauer der Partikel in diesem Volumen zu gering sein. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Abgasnachbehandlung mittels des verwendeten NTP Generators in motorisch relevanten Größenordnungen nicht

zielführend ist. Allerdings zeigte der R33 Blue Diesel® in den Betrachtungen, dass dieser definitiv Konkurrenzfähig zum konventionellen B7 Diesel ist und somit ein hohes Potential zur CO<sub>2</sub> Einsparung bietet.

Die Autoren bedanken sich beim Engler-Bunte-Institut für deren Unterstützung bei der Auswertung und Betrachtung der Rußreaktivität und den wertvollen Diskussionen in dem Thema, bei der Fa. COMSOL für die gewährte Unterstützung zur Umsetzung der Simulation und bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung des Forschungsprojektes unter Az. 33885.

## 2 Einleitung

Das Einsatzgebiet von Dieselmotoren besteht neben dem Individualverkehr in Form von Personenkraftwagen vor allem auch in Arbeitsmaschinen und stationären Anwendungen wie Not- und Stromaggregate. Auch im Transport und Off-Road Bereich werden Verbrennungsmotoren noch weit mehr als 20 Jahre eingesetzt werden müssen [1]. Gerade Letzt genannten Strom- und Notstromaggregate wie auch der Transport und Off-Road Bereich werden auch in zukünftigen Anwendungen mit Kraftstoffen betrieben werden. Diese müssen im Zuge der Dekarbonisierung mit Kraftstoffen aus regenerativen Quellen befeuert werden.

Zur Reduktion der aus den genannten Quellen emittierten Partikelemissionen werden Partikelfilter verbaut werden. Jedoch besteht dort die Aufgabenstellung der kontrollierten Beladung und Regeneration. Bei überfüllten Partikelfiltern kann es im Extremfall zur Verstopfung oder thermischen Zerstörung des Filters kommen. Um dies zu vermeiden, muss der Ruß in Partikelfiltern regelmäßig abgebrannt werden. Dies kann auf passive Weise durch  $\text{NO}_2$ , wie es bei EURO 5 Pkws eingeführt wurde, oder durch eine aktive Regeneration mittels Erhöhung der Abgastemperatur erfolgen. Gerade letzteres führt durch die daraus hervorgehenden schlechteren Wirkungsgrade zu steigenden Kraftstoffverbräuchen und damit einem erhöhten  $\text{CO}_2$ -Ausstoß.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, einen Niedertemperatur-Plasma Generator (NTP Generator) zu bewerten mit dem es möglich sein soll, zum einen die Rußreaktivität zu erhöhen und den Partikelanzahl- und Massenstrom zu verringern, was zu einer Erhöhung und im Optimalfall Beseitigung des Regenerationsintervalls führen würde. Dabei soll der NTP Generator exemplarisch an einem Dieselmotor im stationären Betrieb getestet werden und die Auswirkung des generierten Plasmas auf die Partikelemission und Reaktivität bewertet werden. Diese Bewertung erfolgt einerseits mittels eines Partikelspektrometers, dem Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS) und andererseits dem Particulate Sampling System (PSS20). Das Partikelspektrometer ist dabei in der Lage Änderungen an der Partikelgrößenverteilung zu detektieren. Mittels des PSS20 werden Rußproben aus dem Abgasstrang entnommen. Diese können im Nachhinein bzgl. ihrer Reaktivität analysiert werden.

Zunächst erfolgt dabei eine theoretische Betrachtung in der Machbarkeitsstudie, die neben den möglichen Reaktionspfaden auch die notwendigen Energien, um ein reaktives Plasma zu erzeugen, auflistet. An einem Strömungsprüfstand wurden die für den NTP Generator verwendeten Corona Igniter untersucht und sowohl mit einer Hochgeschwindigkeitskamera sowie spektroskopisch visualisiert. Für die Versuche einer realitätsnahen Umsetzung eines solchen NTP-Plasmagenerators wurde ein Motorenprüfstand aufgebaut und mit der notwendigen Messtechnik bestückt. Dort wurden Stichversuche durchgeführt, um den Ist-Stand und die Wirkung des NTP zu testen. Anschließend wurde mittels einer Multiphysics-Simulation eine optimale Gestaltung des NTP angestrebt um dessen Wirkungsgrad zu steigern. Die anschließende Verifizierung erfolgte wieder am Motorenprüfstand. Hierbei wurde auch der Einfluss und das Verhalten von Kraftstoffanteilen aus regenerativen Quellen begutachtet. Hierfür wurde jeweils ein Diesel und ein Otto Forschungseinzyylinder verwendet.

Die Validierung des Niedertemperatur Plasma Generators wurde an dem zuvor beschriebenen Motorenprüfstand analysiert. Hierbei wird neben der Partikelanzahl und Größenverteilung auch auf die Rußreaktivität eingegangen.

### 3 Vorüberlegung, Anforderungen und Multi-Physics-Modellierung

#### 3.1 Physikalische Grundlagen der Plasmaentladung und deren Einfluss auf die Rußoxidation

##### 3.1.1 Physik der Coronaentladung

In einem stark inhomogenen Feld wird ein überhöhtes elektrisches Feld erzeugt. Dies kann vor allem an scharfen Spitzen der Elektroden beobachtet werden. Dieses Feld ist, wie Abbildung 1 zeigt, nur sehr nahe der Spitze stark überhöht. Mit zunehmender Entfernung zu dieser scharfen Kante nimmt das elektrische Feld deutlich ab. Unter den gezeigten Bedingungen entsteht eine Coronaentladung nahe an der spitzen Elektrode.

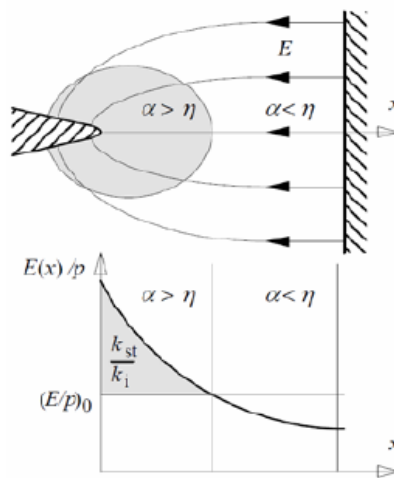


Abbildung 1: Inhomogenes elektrisches Feld einer „Spitze-Platte“- Elektrodenkonfiguration [2]

Die Coronaentladung tritt auf, sobald eine Spannung größer der Einsetzspannung ( $U_e$ ) anliegt. Steigt die Spannung bis zur Durchbruchspannung an, können Überschläge auftreten [2]. Diese partiellen Durchbrüche bei einer „Spitze-Platte“-Elektrodenkonfiguration können, wie Abbildung 2 zeigt, in drei verschiedene Phasen unterteilt werden.

**Glimm-Corona (Glow Corona):** Erreicht die Spannung die Corona-Einsetzspannung tritt nahe der spitzen Elektrode zunächst ein schummriges, in Luft violettes, Licht auf. Diese Leuchterscheinung wird Glimm-Corona genannt.

**Streamer-Corona (oder Brush Corona):** Mit steigender Spannung werden mehrere Streamer geformt. Diese bilden sich aufgrund von stark anwachsenden Elektronenlawinen aus. Diese Lawinen besitzen, im Falle eines positiven Streamers, einen negativen Kopf und einen positiven Schwanz. Das erzeugte Feld zwischen Kopf und Schwanz wirkt dem angelegten entgegen. Dadurch ist die Bewegungsgeschwindigkeit dieser Lawine stark eingeschränkt [3, 4]. Die Eindringtiefe dieser Corona ist deutlich höher im Vergleich zu der Glimm-Corona

**Leader:** Mit weiter ansteigender Spannung tritt Thermoionisation auf. Dies führt zu deutlich höheren Schlagweiten der Entladung. An der Spitze dieser Entladungsform treten Streamer auf, die den Kanal weiter ionisieren. Diese Form der Corona tritt nur bei Schaltstoßspannungen und Wechselfspannungen auf [2]. Eine Coronaentladung die zu einem Leader wird durchläuft alle drei Phasen nacheinander.

Geschätzte Temperatur 10-15 eV

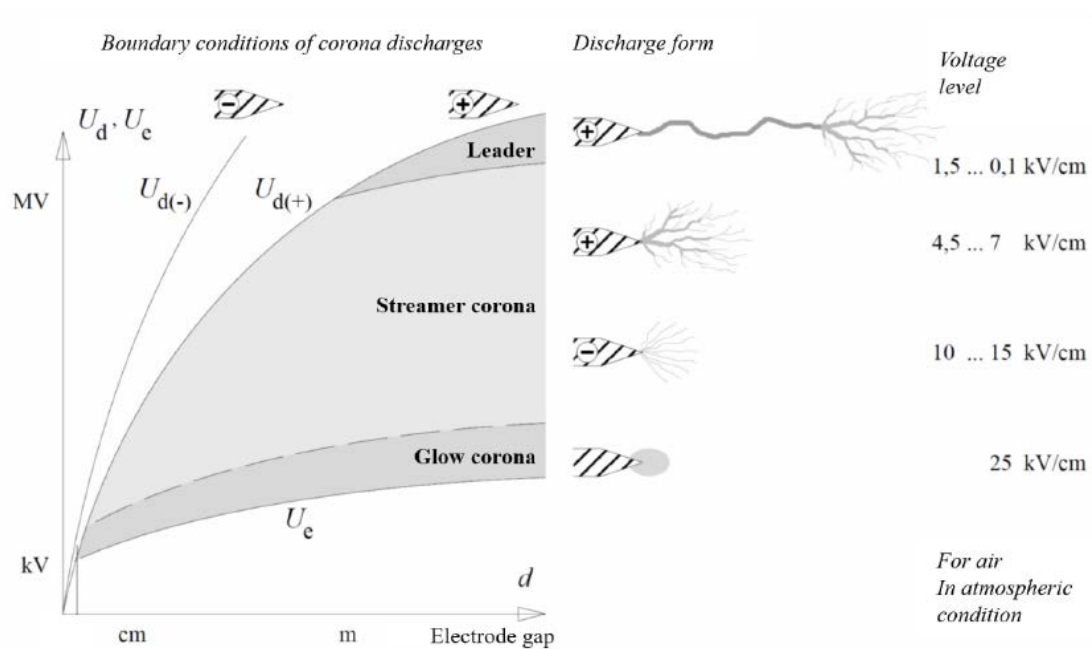


Abbildung 2: Verschiedene Formen der Coronaentladung bei einer „Spitze-Platte“-Elektrodenkonfiguration [2].

Die hohen Elektronenenergien bei der Coronaentladung führen zu unterschiedlichen Reaktionen des Gases. In diesem Fall werden die Mechanismen der Vibrationsanregung, der Dissoziation und der Ionisation verschiedener Gase unterschieden. Diese Reaktionen werden unter anderem durch die sogenannten Wirkungsquerschnitte (Cross-section) charakterisiert. Die Wirkungsquerschnitte werden in Abhängigkeit der mittleren Elektronenenergie aufgetragen. Dadurch entsteht Abbildung 3, welche diese Wirkungsquerschnitte für die oben genannten Reaktionen für verschiedene Gase zeigt.

**Vibratorische Anregung:** Bei der vibratorischen Anregung wird ein Molekül zum Schwingen angeregt.

**Dissoziation:** Die Dissoziation benötigt höhere Elektronenenergien verglichen mit der vibratorischen Anregung. Hierbei werden Moleküle in einzelne Atome oder kleinere Moleküle aufgespalten. Diese Aufspaltung kann durch Elektronen- oder Atom/Molekülstöße geschehen. Im Falle von molekularem Sauerstoff entsteht dabei atomarer oftmals ionisierter Sauerstoff.

**Ionisation:** Bei der Ionisation werden Elektronen von dem Atom oder Molekül getrennt.

Dadurch entstehen sehr reaktive Spezies. Diese können einen Beitrag zur Rußoxidation liefern.

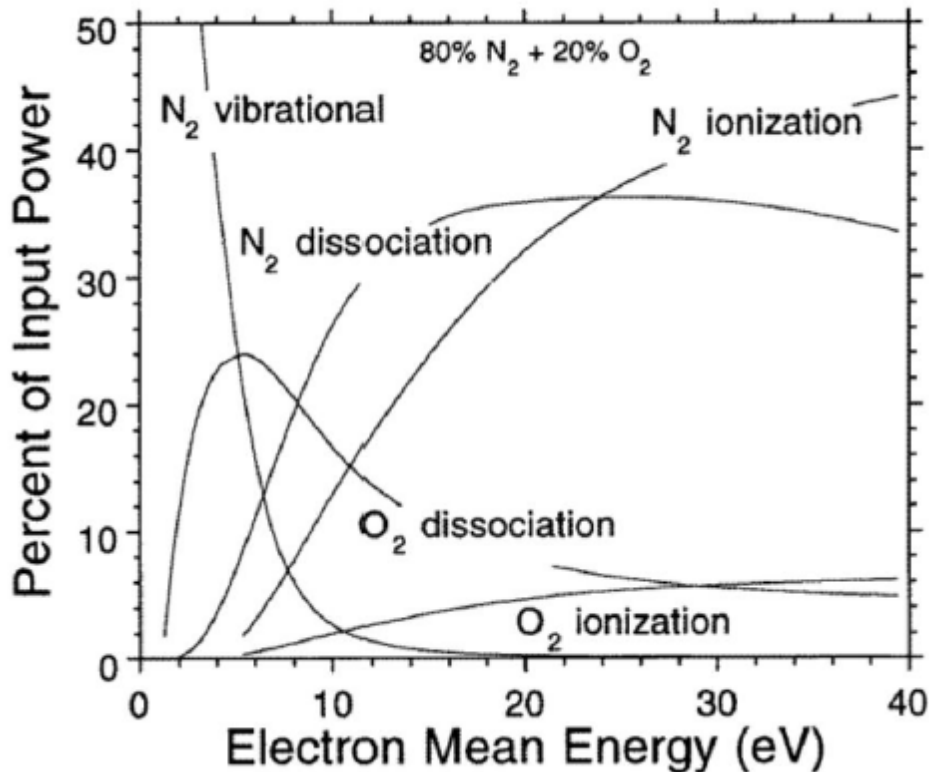


Abbildung 3: Zusammenhang von Ionisation, Dissoziation und vibratorische Anregung für N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> mit der mittleren Elektronenenergie.

### 3.1.2 Plasmaphysikalische Bedingungen der verwendeten Coronaentladung

Zum besseren Verständnis der Entladung wurden unterschiedliche Plasmatemperaturen und der aktivierte Bereich bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten erfasst. Zusätzlich wurde die Art der Anströmung des Corona-Igniters verändert. Die Untersuchungen fanden an einem Strömungsprüfstand mithilfe eines fünf-Stern-Corona-Igniters der Fa. BorgWarner statt. Die Auslenkung der Corona wurde mittels einer Highspeed-Kamera (LaVision HighSpeedStar 6) erfasst.

Zunächst wurde die Primärspannung ohne Strömung variiert. Erfasst wurde der Grauwert der Leucht-Intensität der Entladung sowie der sich daraus nach Gleichung (1) ergebene aktive Bereich des Beobachtungsfeldes. Die Verläufe werden in Abbildung 4 aufgezeigt. Mit steigender Primärspannung wird auch die Grauwert Intensität und der aktivierte Bereich erhöht. Durch die überproportionale Erhöhung des aktivierten Bereichs steigt sinkt die effektive Grauwert Intensität ab. Dies hängt maßgeblich mit der gesteigerten Eindringtiefe der Corona zusammen. Durch das mit dem Abstand zur spitzen Elektrode sinkende inhomogene Feld wird dort auch die Intensität schwächer. Dies führt zu einem flacheren Anstieg der Intensität bei höherer Primärspannung.

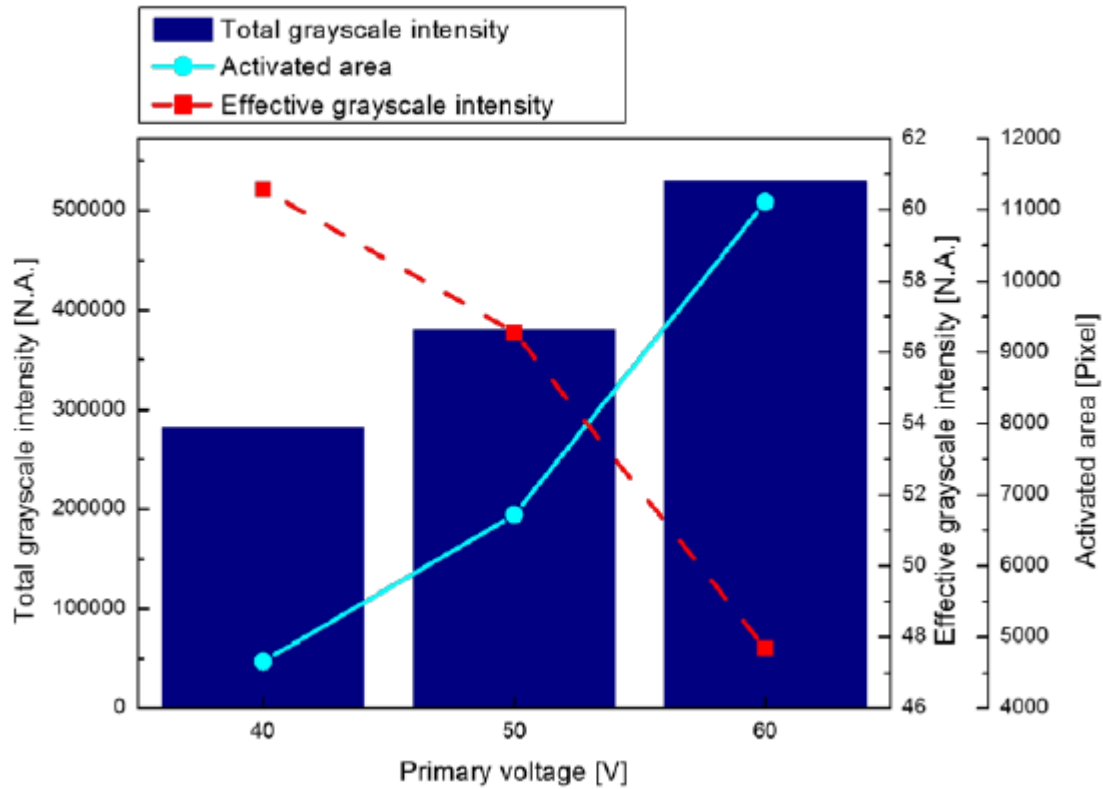


Abbildung 4: Grauwert Intensität durch gemittelte Bilder bei Variation der Primärspannung

$$\text{Effektive Grauwert Intensität} = \frac{\text{Gesamte Grauwert Intensität}}{\text{Aktivierter Bereich}} \quad (1)$$

Der aktivierte Bereich und die effektive Grauwert-Intensität sind in Abbildung 5 in Abhängigkeit des Massenstroms und verschiedenen Anströmbedingungen dargestellt. Der Trend des aktivierten Bereichs verläuft bei den drei Strömungskonditionen ähnlich. Mit steigendem Massenstrom sinkt der Anteil des aktivierten Bereichs. Die effektive Grauwert Intensität steigt leicht mit steigendem Massenstrom an.

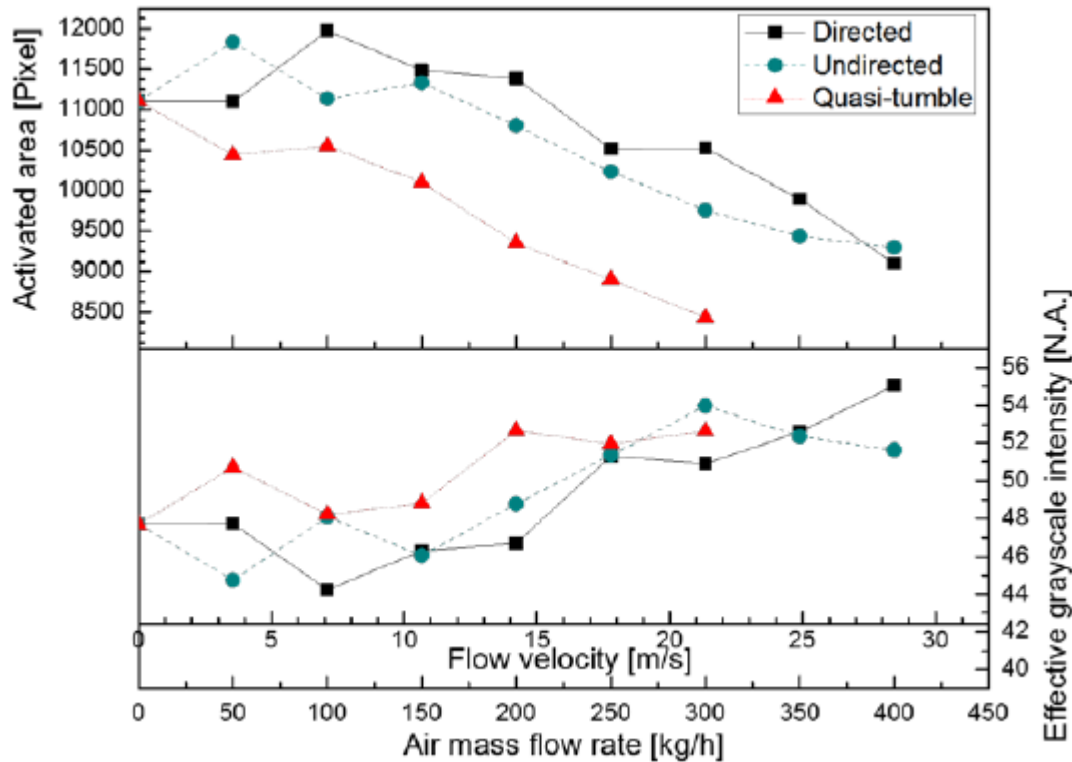


Abbildung 5: Aktivierter Bereich und effektive Grauwert Intensität der Coronaentladung bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungskonditionen.

Zur Charakterisierung des Plasmas wurden auch die Rotations-, Vibrations- und Elektronentemperatur bestimmt. Dies geschah durch die spektroskopische Messung an angeregten molekularen Stickstoff des  $C^3 \Pi_u \rightarrow B^3 \Pi_g$  bzw.  $B^2 \Sigma_u^+ \rightarrow X^2 \Sigma_u^+$  Übergangs. Die gemessenen Spektren wurden danach mit simulierten Spektren verglichen, um die Temperatur zu erhalten. Als Simulationssoftware diente SPARTAN [5, 6]. Aus den Messungen ergeben sich für die Rotationstemperatur etwa 2000 K, für die Vibrationstemperatur 3900 K und für die Elektronentemperatur  $\geq 17$  eV. Die Ergebnisse zeigen eine vernachlässigbare Abhängigkeit der Vibrations- und Elektronentemperatur von der Strömungsgeschwindigkeit. Lediglich eine leichte Abnahme der Rotationstemperatur als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit ist zu verzeichnen.

### 3.1.3 Wichtige Reaktionspfade der Rußoxidation

Die durch das Plasma erzeugten Radikale dienen als Oxidationsmittel [7 bis 9]. Im Falle der Coronaentladung sind dies atomarer und molekularer Sauerstoff, Ozon, Stickstoffdioxid oder Hydroxylradikal. Dabei ist die Aktivierungsenergie von Ruß mit molekularem Sauerstoff am höchsten. Die Temperatur, bei der die Rußoxidation stattfindet, ist abhängig vom Oxidationspartner. Diese Abhängigkeit wird unter anderem durch die Aktivierungsenergie  $E_A$  beschrieben.

Tang [10] hat die Aktivierungsenergie  $E_a$  bei der Kohlenstoffoxidation mit den oben genannten Oxidationsmitteln in ihren Versuchen bestimmt. Die Messungen wurden bei 25°C und einem Druck von 1 atm durchgeführt. Ihre Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Tabelle verdeutlicht, dass die reaktiven Spezies  $O_3$ , O und OH die niedrigsten Aktivierungsenergien aufweisen.



Tabelle 1: Wichtige Reaktionspartner und deren Aktivierungsenergie bei der Oxidation von Ruß nach [10]

| Oxidationsmittel | Aktivierungsenergie $E_a$<br>(kJ/mol) | Aktivierungsenergie $E_a$<br>(eV) | Quelle |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------|
| O <sub>2</sub>   | 102 ~ 210                             | 1,06 ~ 2,18                       | [11]   |
| NO <sub>2</sub>  | 50                                    | 0,52                              | [12]   |
| O <sub>3</sub>   | 44,4                                  | 0,46                              | [13]   |
| O                | 28,8                                  | 0,30                              | [13]   |
| OH               | 11                                    | 0,11                              | [11]   |

### 3.1.4 Wichtige Reaktionspfade in der Coronaentladung für die Rußreaktion

Alle möglichen Reaktionen einer Gasentladung zu erfassen und aufzulisten, würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Eine Übersicht der für die Autoren wichtigsten Reaktionen bei der Entstehung der genannten Oxidationsmittel wird in Tabelle 2 zusammengefasst. In der Tabelle befinden sich neben dem Reaktionspfad auch die benötigten Energien durch Elektronen- oder Ionenstöße. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die angegebenen Energien eine Funktion der reduzierten Feldstärke und der Gastemperatur sind. Die maximal notwendigen Energien zum Aufbrechen der Stickstoffverbindung betragen etwa 15 eV. Wie die Voruntersuchungen gezeigt haben, kann die Korona solche Elektronenenergien bereitstellen. Somit sind alle unten aufgelisteten Reaktionen möglich.

Tabelle 2: Übersicht über die wichtigsten Reaktionen zur Erzeugung der vorher genannten Oxidationsmittel in einem Plasma

| Element   | Reaktion   | Energie (eV) | Quelle   |
|-----------|--|--------------|--|
| $O_n$     | $e^- + O_2 \rightarrow O_2^* + e^-$                                | 6~           | [14],[15], [16]  |
|           | $e^- + O_2 \rightarrow O_2^* + e^- \rightarrow 2O + e^-$           | 6,1          | [17], [18], [19], [20],<br>[21], [22], [23], [24],<br>[25]   |
|           | $e^- + O_2 \rightarrow O_2^* + e^-$<br>$\rightarrow O + O^* + e^-$ | 8,4          | [26], [27], [19], [28],<br>[29], [14], [30], , [31],<br>[32] |
|           | $N_2^* + O_2 \rightarrow 2O + N_2$                                 | 6,2          | [33], [22], [23], [34]                                       |
| $O_{n^+}$ | $e^- + O \rightarrow O^+ + 2e^-$                                   | 13,6         | [27]   |
|           | $e^- + O_2 \rightarrow O_2^+ + 2e^-$                               | 12,1         | [26], [27], [29], [15]                                       |
|           | $e^- + O_2^+ \rightarrow 2O$                                       | 6,9          | [28], [14]   |

|         |                                    |     |                              |
|---------|------------------------------------|-----|------------------------------|
|         | $e^- + O_2^+ \rightarrow O^* + O$  | 5   | [14]                         |
|         | $e^- + O_2^+ \rightarrow 2O^*$     | 4   | [14]                         |
| $O_n^-$ | $e^- + O_2 \rightarrow O^- + O$    | 4,4 | [35], [36], [27], [37], [28] |
|         | $e^- + O^- \rightarrow O + 2e^-$   | 1,5 | [35]                         |
|         | $O^- + O \rightarrow O_2 + e^-$    | 2,1 | [35], [38]                   |
| $NO_x$  | $N^* + O_2 \rightarrow NO + O$     | 1,8 | [39], [40], [22], [14], [34] |
|         | $NO + O + M \rightarrow NO_2 + M$  | 3,2 | [41], [21], [22], [34], [42] |
|         | $2NO_2 \rightarrow NO + O$         | 1,2 | [41], [21], [22]             |
|         | $NO_2 + \rightarrow NO + O_2$      | 2,0 | [21], [22], [38], [34]       |
|         | $e^- + NO \rightarrow N + O + e^-$ | 6,1 | [40]                         |
|         | $e^- + NO \rightarrow NO^- + 2e^-$ | 9,2 | [43]                         |
|         | $e^- + NO^+ \rightarrow N + O$     | 2,8 | [17]                         |
| $OH$    | $e^- + H_2O \rightarrow OH + e^-$  | 4,7 | [44], [16], [45], [31], [46] |
|         | $e^- + H_3O^* \rightarrow OH + 2H$ | 1,3 | [47], [16]                   |

### 3.1.5 Bewertung der im NTP-Generator entstandenen Spezies auf die Rußoxidation

Die Oxidation von Dieselruß mit molekularem Sauerstoff beginnt ab etwa 770 K. Um diese Temperaturen im DPF zu erreichen, wird eine zusätzliche späte Diesel-Einspritzung des Verbrennungsmotors getätigt.

Im Gegensatz hierzu ist die notwendige Temperatur bei der Oxidation mit  $NO_2$  deutlich geringer. Die Oxidation startet bei Temperaturen von 470 K [48]. Eine Oxidation durch  $NO_x$  wird beim sogenannten CRT-Verfahren angewendet. Somit stellt die  $NO_x$ -Produktion des NTP-Generators eine Möglichkeit zur Reduzierung der DPF-Abbrandtemperatur dar.

Eine Oxidation mittels Ozon findet schon bei geringeren Temperaturen statt. Dies wird durch die notwendige Aktivierungsenergie gezeigt. Allerdings ist bei höheren Temperaturen auch eine starke Dissoziation des Moleküls zu beobachten. So zeigt [36], dass bei sonst gleichen Bedingungen eine Steigerung der Temperatur von 318 K auf 418 K die Ozonkonzentration um mehr als 70% sinken lässt. Zu erwarten ist somit ein schneller Zerfall der Ozonmoleküle. Allerdings besteht die Möglichkeit, direkt Rußpartikel im Plasma zu oxidieren. Somit wird die Beladung des DPF verlangsamt. Ein Effekt auf die eigentliche DPF-Regeneration ist voraussichtlich vernachlässigbar.

Die Aktivierungsenergie von Ruß bei Verwendung von angeregtem atomarem Sauerstoff ist noch geringer, verglichen mit Ozon. Allerdings besitzen diese Atome oft nur Lebensdauern von wenigen Nano- bzw. Mykrosekunden. Allerdings benötigt die Strömung vom NTP bis zum DPF einige Millisekunden. Somit sind diese angeregten Sauerstoffe nicht für die Regeneration im DPF einsetzbar. Jedoch kann eine Reaktion der Rußpartikel im NTP stattfinden. Dadurch ist eine erhöhte Beladungsdauer des DPF zu erwarten.

Die Rußoxidation durch OH-Radikale benötigt die niedrigste Aktivierungsenergie. OH-Radikale können aufgrund ihrer, verglichen mit atomarem Sauerstoff, langen Lebensdauer noch bis zum Erreichen des DPF existieren. Auf diesem Wege wäre ein verbesserter Rußabbrand ähnlich dem CRT-Verfahren zu erwarten. Die Radikale versprechen aufgrund ihrer Reaktionsfreudigkeit auch eine Reduktion des Partikelstroms.

### 3.2 Stichversuch am Motorenprüfstand

In einem ersten Stichversuch wurde ein NTP-Generator aufgebaut und an einem 4-Zylinder 2l Dieselmotor getestet. Die Integration des Generators in den Abgasstrang ist in Abbildung 6 dargestellt. Bei dem NTP-Generator handelt es sich um vier Corona-Igniter. Diese sind in einer Ebene in 90° Winkeln zueinander angeordnet. Der NTP-Generator wurde mit einem Flexrohr verbunden und zwischen Abgasturbolader und Abgasnachbehandlungsbox positioniert. Eine Kühlung der Corona-Igniter durch wasserdurchflossene Kühlwendeln musste aufgrund der hohen Temperaturen eingesetzt werden. Zwischen dem NTP-Generator und dem DPF sind Messstellen zur Entnahme von gasförmigen Emissionen und Partikelemissionen angebracht. Die Messung der gasförmigen Emissionen erfolgte über ein FTIR (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer). Durch ein AVL 415S (Smokemeter) wurde die „Filter Smoke Number“ (FSN) bestimmt. Das Partikelspektrometer „Engine Exhaust Particle Sizer“ (TSI EEPS Model 3090) maß die Partikelgrößenverteilung. Nach dem DPF wurde die Partikelkonzentration mithilfe eines DISCmini Partikelzählers der Firma Testo erfasst.

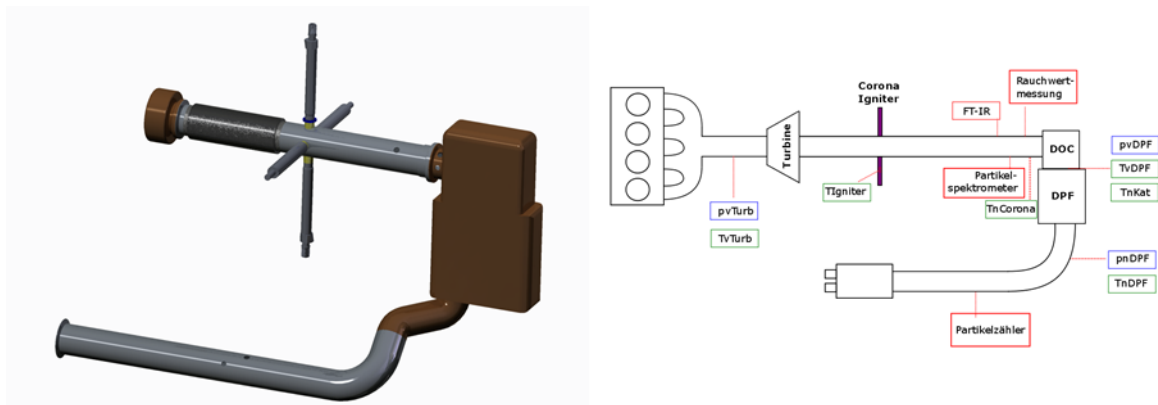


Abbildung 6: Integration des NTP-Generators in das Abgasnachbehandlungssystem des Versuchsträgers.

Die ersten Stichversuche zeigten, dass eine höhere Leistung des NTP-Generators positiv auf die Partikelemission wirkt. Zusätzlich konnte eine Verbesserung der Rußreduktion mit einem steigenden Duty-Cycle der Corona-Entladung im NTP-Generator beobachtet werden. Beispielhaft hierfür steht Abbildung 7. Diese zeigt eine Partikelgrößenverteilung mit (rot) und ohne (schwarz) NTP-Generator. Besonders in der Akkumulationsmode bei etwa 70 nm ist die Partikelemission um bis zu 10% reduziert. Problematisch stellten sich Überschläge der

Coronaentladung heraus. Tritt dieses Phänomen ein verschlechtert sich die Partikelreduktion drastisch.

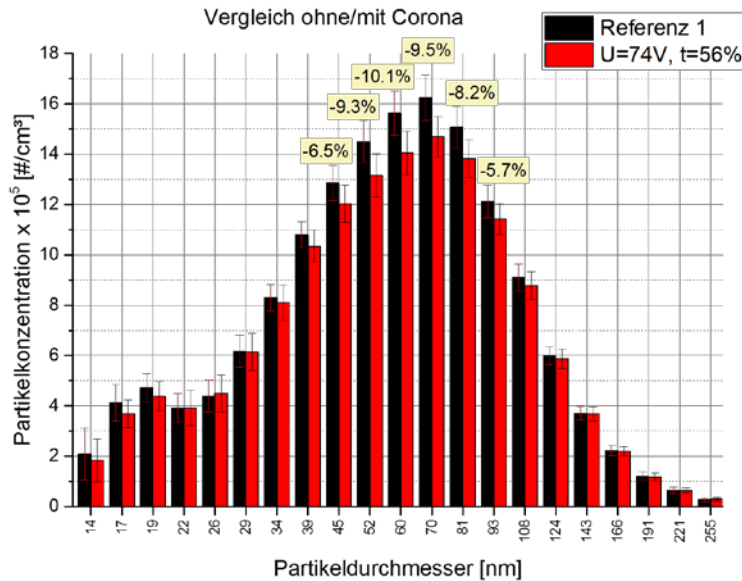


Abbildung 7: Partikelreduktion durch NTP-Generator vor DPF

Die Regeneration des DPF wurde über den Differenzdruck beobachtet. Hierzu wurde der DPF zunächst in einem vorgegebenen Beladungspunkt mit Ruß beladen. Dabei war der NTP-Generator mit einer Bulk-Spannung von 70 V eingeschaltet. Ab einem Differenzdruck von 200 mbar wurde auf den Regenerationspunkt umgeschaltet. Der Duty-Cycle der Ansteuerung der Coronaentladung betrug 52 %. Um von Strömungs-Störeinflüssen zu Beginn und am Ende der Regeneration frei zu sein wurde nur der Bereich von 150 mbar – 75 mbar betrachtet. Als Maß für die Regenerationsfähigkeit wurde das Zeitintervall in dem der Druck von 150 mbar auf 75 mbar abfällt gewählt. Abbildung 8 zeigt eine solche Regeneration unter den vorher beschriebenen Randbedingungen.

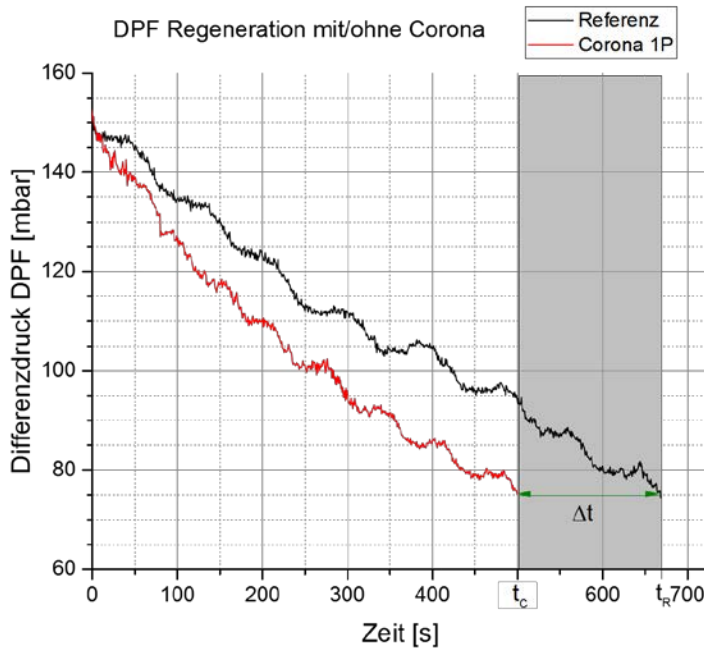


Abbildung 8: DPF Regeneration mit und ohne NTP-Generator. Verwendet wurde dabei ein Ein-Spitzen-Igniter

Bei eingeschaltetem NTP-Generator konnte die Regenerationszeit um 169 s verkürzt werden. Im Folgenden wird dies auf den Kraftstoffverbrauch umgerechnet. Die Kraftstoffreduktion durch den NTP-Generator während der Regeneration wird durch folgende Gleichung (2) bestimmt:

$$\Delta V_K = \Delta t * \frac{\dot{m}_K}{\rho_K} [dm^3] \quad (2)$$

Aus der Zeitdifferenz  $\Delta t = 169$  s, dem mittleren Kraftstoffverbrauch  $m_K = 3,9$  kg/h und der Kraftstoffdichte  $\rho_K = 0,815$  kg/l ergibt sich der Verbrauchsunterschied  $\Delta V_K = 0,22$  l.

Da der NTP-Generator auch Energie benötigt wird als nächstes berechnet, wie lange dieser aktiv sein muss um den Verbrauchsvorteil aufzuheben. Zunächst wird die Energie aus dem Verbrauchsunterschied  $\Delta E_{Reg}$  mit Hilfe des unteren Heizwertes  $H_u$  nach Gleichung (3) berechnet:

$$\Delta E_{Reg} = \Delta V_K * H_u * \rho_K \left[ \frac{kW}{h} \right] \quad (3)$$

Bei einem unteren Heizwert von 11,7 kWh/kg ergibt sich ein Energieunterschied von 2,1 kWh. Der NTP-Generator weist eine Leistungsaufnahme  $P_C$  von 182 W auf. Die erzeugte Energie muss von der Lichtmaschine und damit vom Motor bereitgestellt werden. Bei beiden Systemen muss noch der jeweilige Wirkungsgrad  $\eta_{LM} = 75\%$  (Lichtmaschine) und  $\eta_M = 43\%$  (Motor im Idealfall) berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich der zusätzliche Leistungsbedarf  $P_{C,D}$  der Corona (Gleichung (4)):

$$P_{C,D} = \frac{P_C}{\eta_{LM} * \eta_M} [W] \quad (4)$$

Somit ergibt sich der zusätzliche Leistungsbedarf zu 564 W. Um die Einsatzdauer  $t_E$  zur Aufhebung des Verbrauchsvorteils zu bestimmen wird die Energiedifferenz  $\Delta E_{Reg}$  durch den Leistungsbedarf  $P_{C,D}$  des NTP-Generators geteilt. Eine Multiplikation von  $\Delta E_{Reg}$  mit dem Faktor 1000 rechnet von kWh in Wh um. Damit ist die Einsatzdauer auf mehr als 3,7 h mit Hilfe von Gleichung (5) bestimmt.

$$t_E = \frac{\Delta E_{Reg} * 1000}{P_{C,D}} [h] \quad (5)$$

Somit ist ein Verbrauchsvorteil, und damit eine CO<sub>2</sub>-Reduktion, mit dem NTP-Generator unterhalb eines Regenerationsintervalls von 3,7 h zu erzielen. Dieser Vorteil konnte ohne Optimierung des Systems umgesetzt werden. Nachfolgend wurde der NTP-Generator hinsichtlich der bestmöglichen Felddurchdringung optimiert.

### 3.3 Multi-Physics-Modellierung des „NTP“ und Optimierung des Penetrationsvolumens

Die Simulation zur optimierten Felddurchdringung (Arbeitsvolumen) wurde mit der Multiphysics-Simulationssoftware „COMSOL-Multiphysics“ durchgeführt. Zunächst wurden die Igniter modelliert. Hierzu standen sowohl Ein- wie auch Fünf-Spitzen-Igniter zu Verfügung. Die Spitzen sind aufgrund des dadurch entstehenden inhomogenen Feldes von größter Bedeutung. Angenähert wurden diese durch Zylinder mit einem Kegel an der Spitze.

Die Coronaentladung zeigt mit der Strahlung der angeregten Spezies den Aktivitätsbereich des Niedertemperatur-Plasmas an. Um diesen Volumenbereich in einer Berechnung darstellen zu können wird auf die Streamereinsatzspannung von ca. 1,5kV/cm nach Reather [2] zurückgegriffen und die DIN-Norm zur Durchschlagsfestigkeit [49] und aus dem Verhältnis der Einsatzspannung zur Durchschlagsspannung für eine gegebene Geometrie die Grenze zu 4,35kV/cm berechnet.

#### 3.3.1 Betrachtete NTP-Generatorgeometrien

Simuliert wurden dabei 5 unterschiedliche Konfigurationen mit einem Rohrdurchmesser von 32,5 mm. Diese sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Bei der ersten Geometrie handelt es sich um a) Standardgeometrie. Die Igniter liegen in einer Ebene im 90°-Winkel zueinander. Die Corona-Igniter liegen sehr weit in der Mitte. Die b) Spiralgeometrie zeichnet neben dem Versatz der Igniter um 90° ein konstanter Abstand in axialer Richtung aus. Ähnlich wirkt die c) Versatzgeometrie. Jedoch liegen Igniter eins und zwei in einem Winkel von 180° zueinander. Selbes gilt für Igniter drei und vier, welche um 90° versetzt zu den ersten beiden sind. Auch diese Geometrie besitzt einen gleichbleibenden Abstand der Igniter in axialer Richtung. Das d) Reihenkonzept ist völlig anders aufgebaut. Hier sitzen die Igniter in einer Linie mit konstantem Abstand zueinander. Zuletzt wird noch die e) Vergleichsgeometrie simuliert. Diese Geometrie ist ähnlich zur a) Standardgeometrie. Jedoch sind bei dieser die Corona-Igniter deutlich weiter außen angeordnet. Diese Anordnung wurde bei den Stichversuchen verwendet. Für alle Fälle wurden verschiedene Abstände und Einschraubtiefen getestet. Auf diese wird im nachfolgenden Unterkapitel näher eingegangen.

### 3.3.2 Simulationsergebnisse

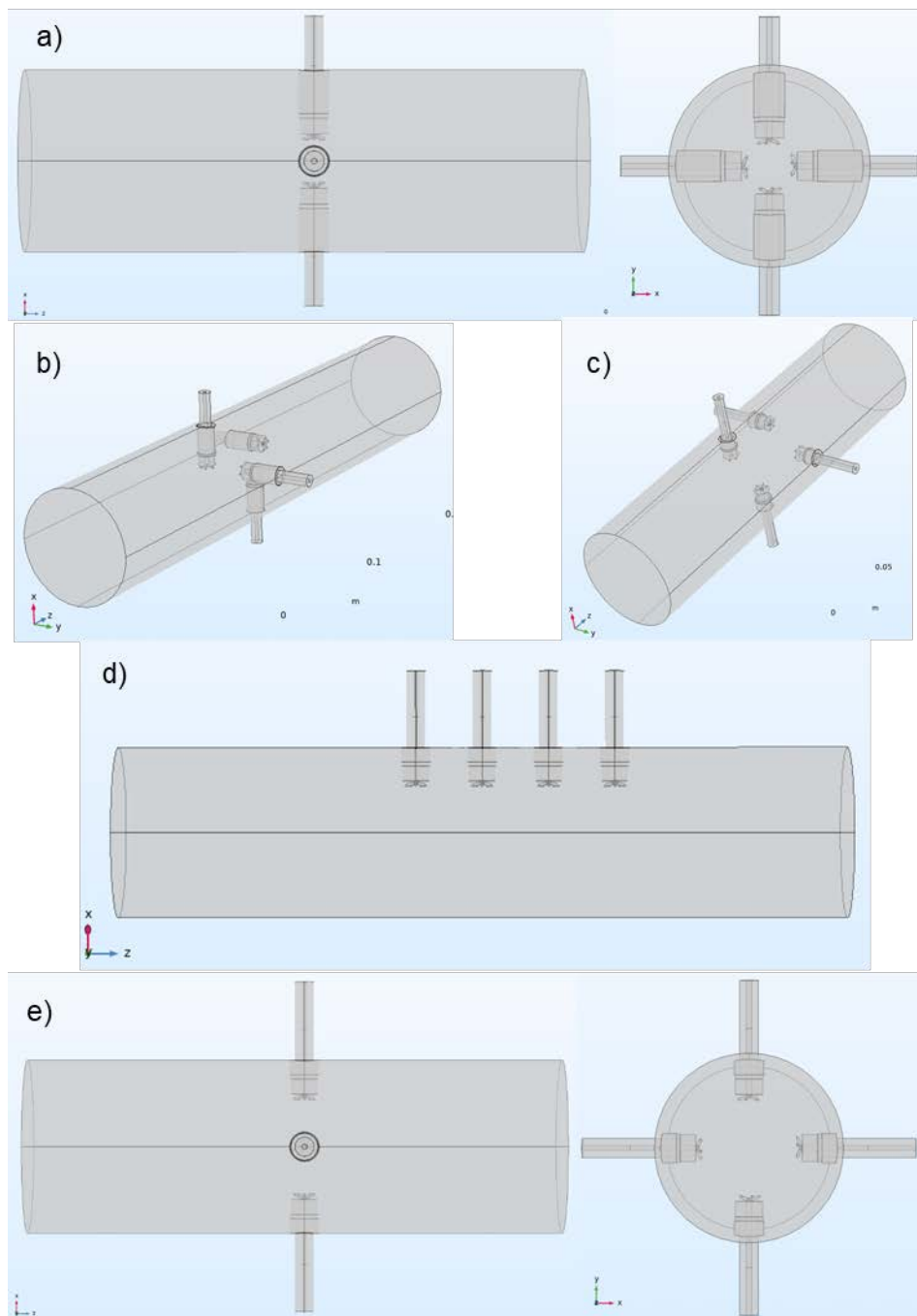


Abbildung 9: Übersicht der simulierten NTP-Reaktoren. **a) Standardgeometrie** bei der die Corona-Igniter nahe beieinander liegen. **b) In der Spiralgeometrie** sind die Igniter im 90° Winkel zueinander angeordnet und nach hinten versetzt. **c) Die Versatzgeometrie** kennzeichnet sich dadurch aus, dass Igniter eins und zwei, und drei und vier jeweils um 180° zueinander versetzt sind. **d) Bei der Reihengeometrie** liegen alle Igniter in einer Linie zueinander. **e) Die Vergleichsanordnung** ist sehr ähnlich zu der Standardgeometrie. Jedoch sind die Igniter deutlich weiter am Rand des NTP-Generator-Rohrs angesiedelt. Diese Anordnung entspricht der im Stichversuch.

Das folgende Unterkapitel zeigt die Übersicht der Simulationen der anliegenden Feldstärke der verschiedenen Geometrien. Verwendet wurde das Plasmaphysik-Paket. Dieses erlaubt, gerade bei dynamischen Betrachtungen ein deutlich präziseres Ergebnis im Hinblick auf

Durchschlagsspannungen. Der Datensatz ist auf die Durchschlagsspannung begrenzt. Das bedeutet, dass weiße Flächen, die an rote Flächen angrenzen oberhalb der Durchschlagfeldstärke sind. Zusätzlich wird auch eine Begrenzung nach unten festgelegt. Hierbei entsprechen weiße Flächen, die an blaue Flächen angrenzen Feldstärken unterhalb der Streamer-Einsatzspannung. Gezeigt wird in den folgenden Abbildungen nur der Arbeitsbereich und nicht die anliegende Spannung. Berührt eine rot-weiße-Grenzfläche die Wand, ist ein Durchschlag wahrscheinlich.

### Standardgeometrie

Bei der Standardgeometrie wurde nur die Einschraubtiefe der Corona-Igniter variiert. Das Optimum wurde bei einer Einschraubtiefe von 26,25 mm gefunden. Das Ergebnis der Simulation zeigt Abbildung 10. Die Simulation ergab einen Arbeitsbereich von 185,61 cm<sup>3</sup>. Die maximale Spannung, bevor Durchschläge möglich sind, beträgt -80 kV.

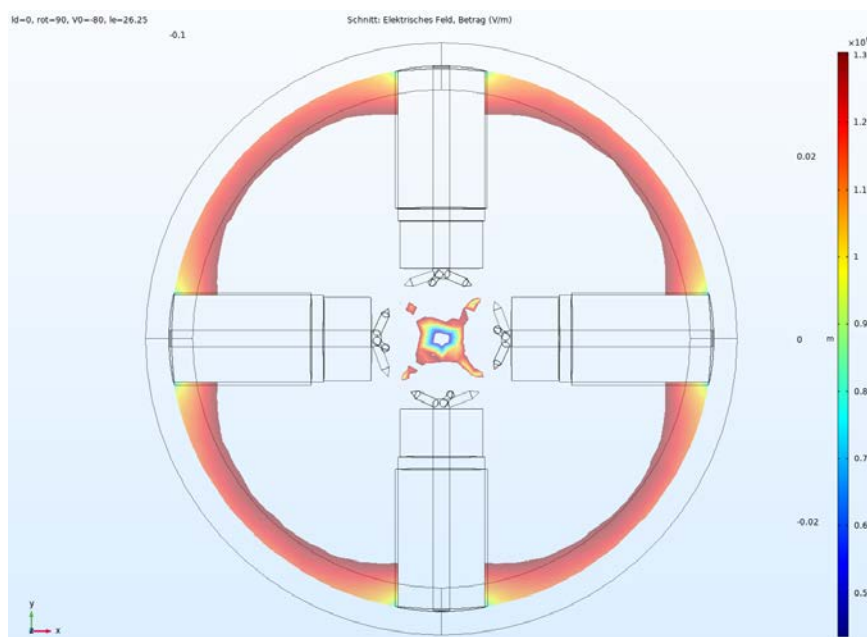


Abbildung 10: Arbeitsbereich der Standardgeometrie im Querschnitt.

### Spiralgeometrie

Die Spiralgruppe hatte mehrere Parameter zur Variation frei. Zum einen wurde die Einschraubtiefe variiert. Zum anderen wurde der Versatz der Igniter in axialer Richtung verändert. Auch hier konnte ein Optimum gefunden werden. Dabei war die Einschraubtiefe auf 30 mm und der Abstand zwischen den Ignitern zu 65 mm bestimmt worden. Zur besseren Übersicht wird der Reaktor in fünf Längsschnitte unterteilt. Diese sind in Abbildung 11 aufgezeigt. Der Abstand zwischen jedem Bild beträgt 1 cm. Beginnend in der Nähe der Wand bei -2 cm. Das Ende befindet sich bei 2 cm. Das Arbeitsbereichsvolumen konnte zu 790,47 cm<sup>3</sup> berechnet werden. Die maximale mögliche durchschlaglose Spannung liegt bei -175 kV.



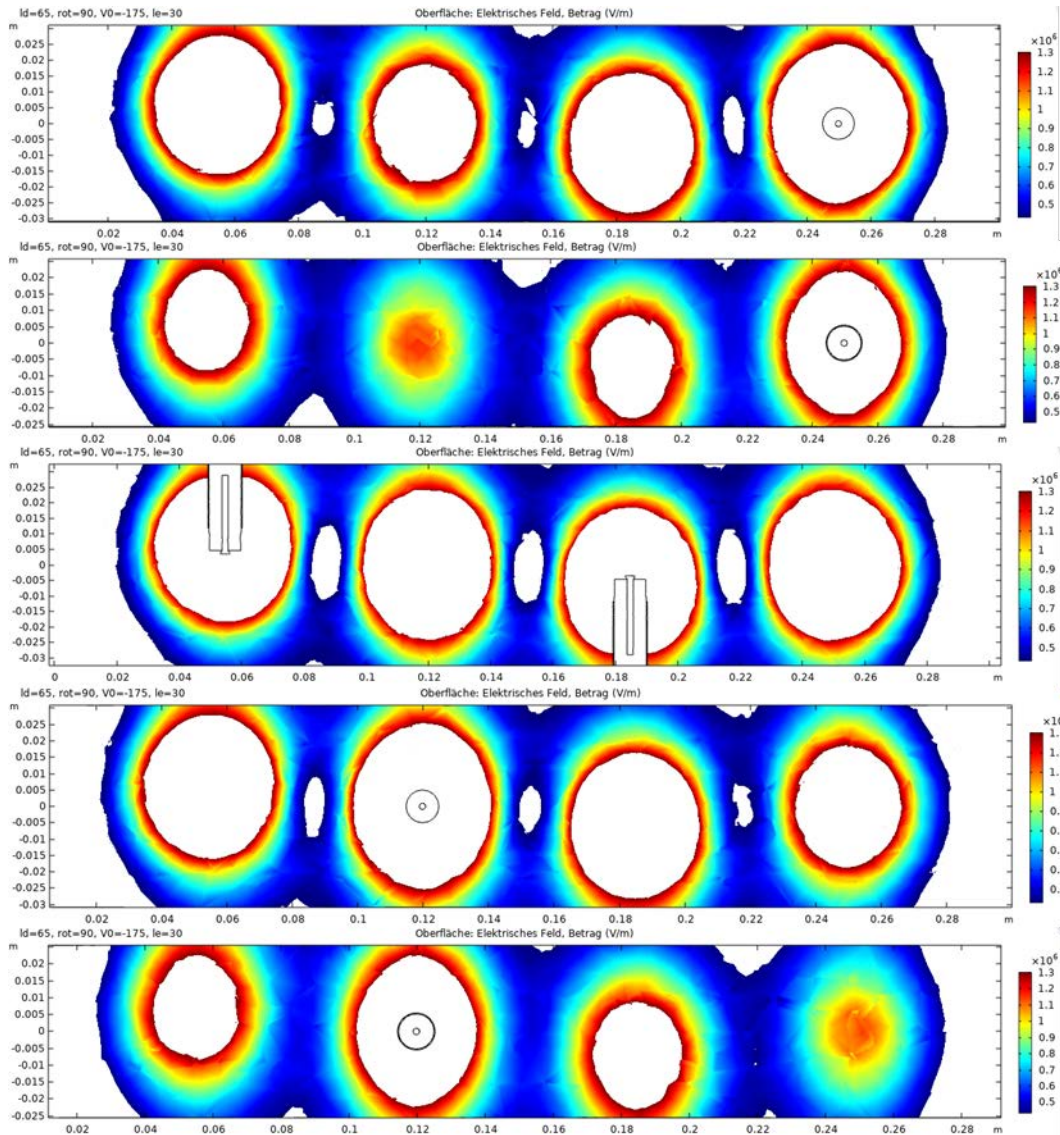


Abbildung 11: Arbeitsbereich der Spiralgeometrie im Längsschnitt von  $y = -2 \text{ cm}$  bis  $y = 2 \text{ cm}$  in 1 cm Schritten.

### Versatzgeometrie

Ähnlich zu der Spiralgeometrie konnten auch bei der Versatzgeometrie die Parameter der Einschraubtiefe und Corona-Igniter Abstand variiert werden. Die Einschraubtiefe ergab sich zu 30 mm. Der Abstand zwischen den Ignitern beträgt 65 mm. Auch hier wird, analog zur Spiralgeometrie, der Reaktor in fünf Längsschnitte von -2 cm bis 2 cm unterteilt. Diese Abschnitte werden in Abbildung 12 dargestellt. Ein Arbeitsbereich mit einem Volumen von  $797,02 \text{ cm}^3$  wurde berechnet. Wie bei der Spiralgeometrie ergibt sich auch in diesem Fall eine maximal mögliche durchschlaglose Spannung von -175 kV.

Abschlussbericht: Plasma – Abgasmachbehandlung für regenerativ gefeuerte Stationärmotorenanwendungen

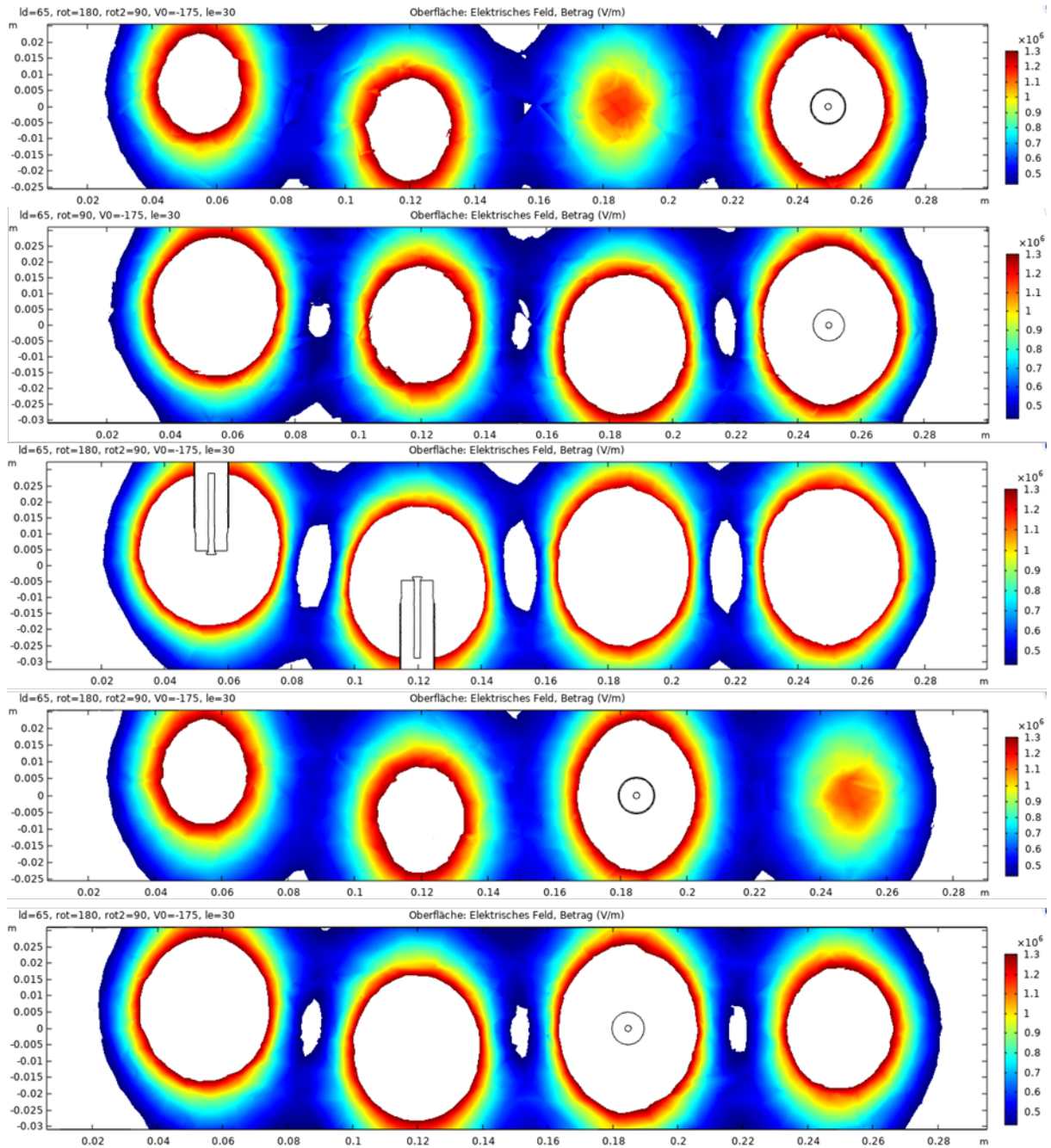


Abbildung 12: Arbeitsbereich der Versatzgeometrie im Längsschnitt von  $y = -2 \text{ cm}$  bis  $y = 2 \text{ cm}$  in 1 cm Schritten.

### Reihengeometrie

Wie bei der Spiral und Versatzgeometrie auch konnten die beiden Parameter Einschraubtiefe und Igniter Abstand variiert werden. Wie bei den beiden vorherigen ergab sich ein Optimum von 30 mm bzw. 65 mm für die Einschraubtiefe und den Abstand. Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse in den bereits beschriebenen fünf Längsschnittsegmenten. Der Arbeitsbereich beträgt 784,92 cm<sup>3</sup>. Die maximal mögliche Spannung ohne Durchschläge beträgt -175 kV

Abschlussbericht: Plasma – Abgasnachbehandlung für regenerativ gefeuerte  
Stationärmotorenanwendungen

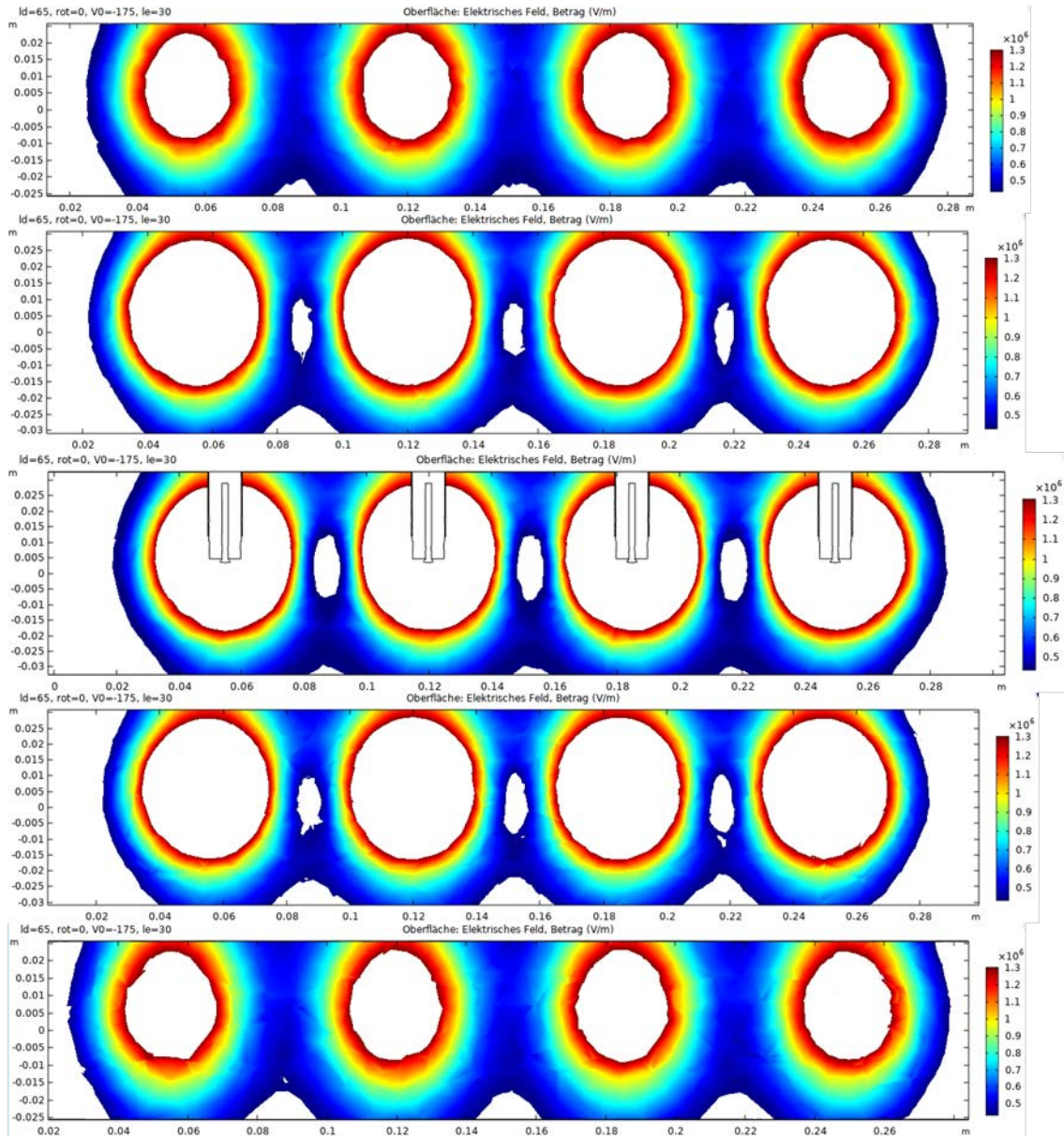


Abbildung 13: Arbeitsbereich der Reihengeometrie im Längsschnitt von  $y = -2 \text{ cm}$  bis  $y = 2 \text{ cm}$  in 1 cm Schritten.

### Vergleichsanordnung

Bei der Vergleichsanordnung aus dem Stichversuch gab es nur den festen Parameter der Einschraubtiefe. Dieser beträgt 15 mm. Diese Anordnung bringt es auf ein Arbeitsbereichvolumen von  $85,61 \text{ cm}^3$ . In dieser Konfiguration ist ab -30 kV mit Durchschlägen ist rechnen.

Abschlussbericht: Plasma – Abgasnachbehandlung für regenerativ gefeuerte  
Stationärmotorenanwendungen

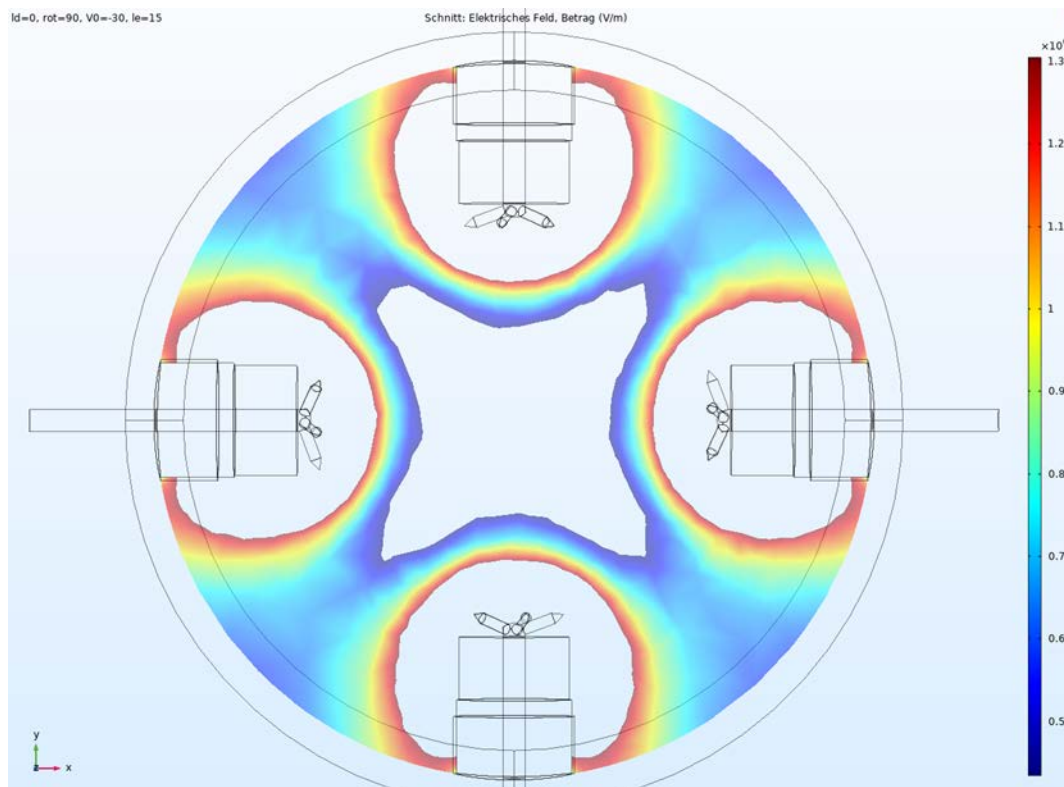


Abbildung 14: Arbeitsbereich der Vergleichsgeometrie im Querschnitt.

**Fazit**

Gesucht ist die Anordnung, welche die höchsten Durchschlagsspannungen und einen möglichst großen Arbeitsbereich bereitstellt. Hierzu dient Tabelle 3.

Tabelle 3: Zusammenfassung Ergebnisse der Feldsimulation.

| Anordnung  | Abstand Igniter / mm | Einschraubtiefe / mm | Durchschlagsspannung / kV | Arbeitsbereich / cm <sup>3</sup> |
|------------|----------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Standard   | 0                    | 26,25                | -80                       | 185,61                           |
| Spirale    | 65                   | 30                   | -175                      | 790,47                           |
| Versatz    | 65                   | 30                   | -175                      | 797,02                           |
| Reihe      | 65                   | 30                   | -175                      | 784,92                           |
| Vergleichs | 0                    | 15                   | -30                       | 85,61                            |

Die Anordnungen mit dem größten Potential hinsichtlich Durchschlagssfestigkeit und Arbeitsbereich sind die Spiral-, die Versatz- und die Reihenanordnung. Diese drei Konfigurationen besitzen Durchschlagssfestigkeiten von -175 kV. Auch das Arbeitsvolumen zwischen 784,92 cm<sup>3</sup> und 797,02 cm<sup>3</sup> ist, verglichen mit der Standard- und vor allem der Vergleichsgeometrie, sehr groß. Diese Anordnungen sind gerade in Bezug auf die Feldüberschneidung sehr gut optimiert. Geringere Unterschiede sind durch die stirnseitige Anströmung zu entnehmen. So liegen alle Igniter der Reihenanordnung in einer Linie. Dadurch ist weniger Fläche von den Ignitern eingenommen. Dadurch ist hier eine größere Überlagerung der Arbeitsbereiche jedes einzelnen Corona-Igniters vorhanden. Die Versatzgeometrie ist in

diesem Aspekt die Überlegene. Im Vergleich der beiden stellt die Spiralgeometrie einen Zwischenkandidaten dar.

Die Standardgeometrie ist in Bezug auf Durchschlagsfestigkeit und Arbeitsbereich deutlich schlechter. Die Arbeitsbereiche der Igniter überlagern sich stark. Dies ist damit begründet, dass es sich bei dieser Anordnung um eine 2-Dimensionale Anordnung handelt. Durch die räumliche Nähe der Igniterspitzen ist die Durchschlagsfestigkeit reduziert. Dies führt zu einer weiteren Reduktion des Arbeitsbereichs.

Am schlechtesten schneidet die Vergleichsanordnung aus dem Stichversuch ab. Durch die Nähe zur Wand ist ein Durchschlag bei geringen Spannungen von -30 kV wahrscheinlich. Somit ist der Arbeitsbereich sehr gering. Durch die niedrigen Spannungen wird in der Mitte des Reaktors kein Plasma erzeugt. Jedoch ist gerade in diesem Bereich eine starke Strömung zu erwarten, weshalb dort eine maximale Durchdringung wichtig wäre.

Zusätzlich zu den unterschiedlichen Arbeitsbereichsvolumen ist auch die Aufenthaltszeit im Reaktor wichtig. Im Vergleich zwischen zwei Konfigurationen, bei demselben Volumenstrom kann das Verhältnis aus den beiden Arbeitsbereichen gebildet werden. Dies ist ein Maß dafür, wie viel Unterschied in der Penetrationsdauer von zwei Konzepten liegt. Im Vergleich zwischen dem Versatz und dem Vergleichskonzept aus dem Stichversuch lässt sich eine etwa 10-mal längere Penetrationsdauer errechnen. Damit ist mit der Versatzgeometrie eine deutliche Steigerung der Partikelreduktion und der Verbesserung der Regenerationszeit zu erwarten.

### 3.4 Aufbau des NTP Generators

#### 3.4.1 Aufbau des NTP Rohrs

Als Generatorgehäuse wird ein Rohr mit vier Corona Ignitern verwendet. Das Rohr hat einen Innendurchmesser von 55,6 mm. Das Schema des Generators ist in Abbildung 15 dargestellt. An das Rohr angeschweißt ist ein sogenanntes Flexrohr, dass dazu dient Schwingungen und Versätze beim Einbau auszugleichen. Der erste Corona Igniter sitzt 435 mm hinter dem Ende dem Abgasturbolader. Der Abstand zwischen den einzelnen Ignitern beträgt 22,5 mm und 90°, sodass der letzte Igniter 502,5 mm hinter dem Abgasturbolader liegt.

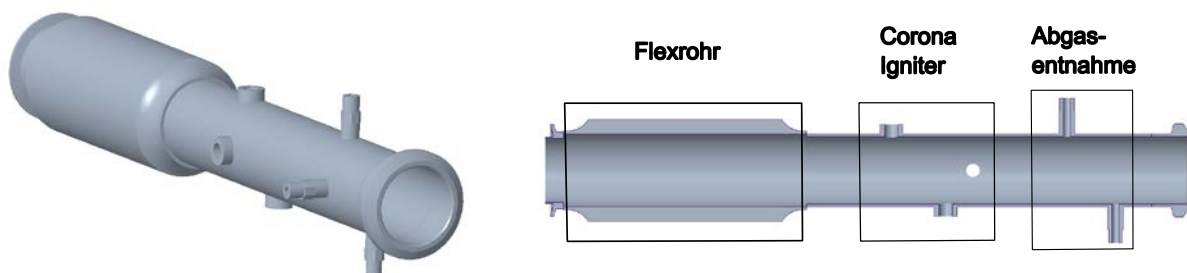


Abbildung 15: Schematischer Aufbau des NTP.

#### 3.4.2 Verwendetes Coronasystem

Bei dem verwendeten Corona-Zündsystem handelt es sich um ein EcoFlash® System der Firma BorgWarner Ludwigsburg GmbH. Abbildung 16 zeigt das System-Layout des Zündsystems. Das System besitzt einen HF-Controller und mehrere Hochspannungs-

Koaxialkabel und Igniter. Der Controller wird mit 12 V versorgt. Es können bis zu 6 Igniter unabhängig voneinander angesteuert werden. Diese sind über die Hochspannungskoaxialkabel mit den Ignitern verbunden.

Die Eingangsspannung von 12 V wird zunächst in die Zielspannung (Primärspannung) transformiert. Dies geschieht durch die zugehörige Bedienungssoftware. Durch einen AC-Inverter wird die Spannung auf eine 1,2 kV Wechselfspannung mit einer Frequenz von 1 MHz (Sekundärspannung) transformiert. Schließlich wird im Resonanzkreis des Igniters die Spannung auf 30 kV (Tertiärspannung) angehoben. Die Resonanzfrequenz von Controller und dem Resonanzkreis des Igniters müssen übereinstimmen. Mit einem sogenannten „Phase-Locked-Loop“ im Controller wird die Resonanzfrequenz ertastet. Dies geschieht durch Vergleich des Strom- mit dem Spannungsverschiebung [50]. Aufgrund der Tatsache, dass es nur einen Primärkreis gibt, kann nur ein Igniter zu einem Zeitpunkt bestromt werden.

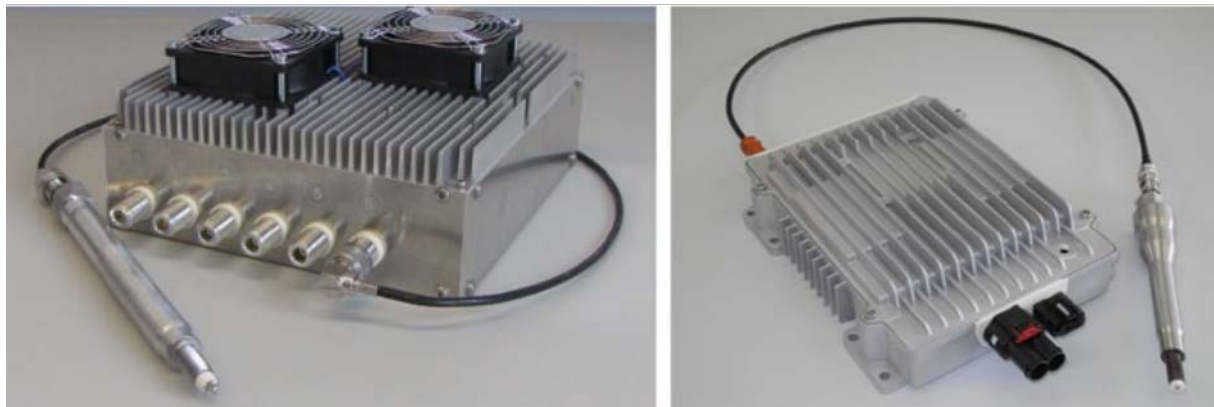
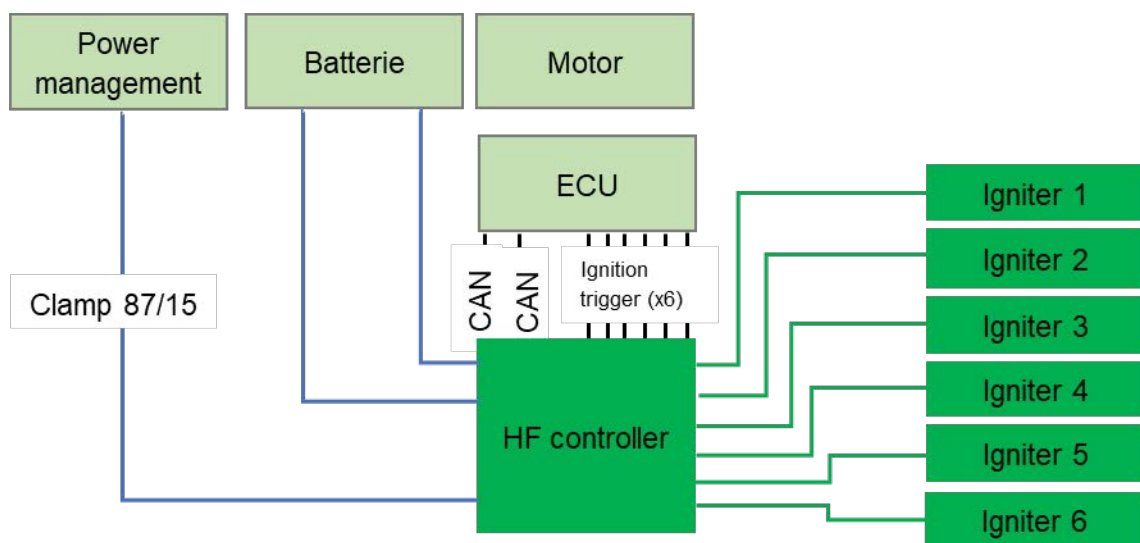


Abbildung 16: System-Layout des Corona-Zündsystems [51]

### 3.4.3 Triggerkette und Delay

Da das Corona System nur einen Primärkreis besitzt um die Igniter anzusteuern muss eine Delay Kette aufgebaut werden. Zusätzlich dazu muss das Signal noch invertiert werden, da der Trigger des Steuergeräts auf „active-low“ reagiert. Der schematische Aufbau der Trigger- und Delay Kette ist in Abbildung 17 zu sehen. Das erste TTL Signal wird von einem Funktionsgenerator erzeugt. Dieses wird aufgesplittet und zum einen über einen Inverter an den Trigger von Zylinder 1 (Trig. Zyl. 1) und zum anderen auf das erste Delay Glied 1

geleitet. Dieses Delay Glied erzeugt einen kurzen Puls, der mit einer Verzögerung von 2,7 ms zum vorherigen Signal wieder an den Inverter und das Delay Glied 2 gesendet wird. Das weitere Vorgehen bis Zylinder 4 ist analog dazu. Die Verzögerung von 2,75 ms ergibt sich aus der maximal möglichen Gesamtburstdauer von 2,55 ms und einer kleinen Verzögerung von 200  $\mu$ s zur Sicherstellung eines ausreichenden Abstands zur vorherigen Ansteuerung eines Igniters. In Vorversuchen hatte sich herausgestellt, dass diese Verzögerung ausreichend ist um zwei Zündzyklen zu entkoppeln.

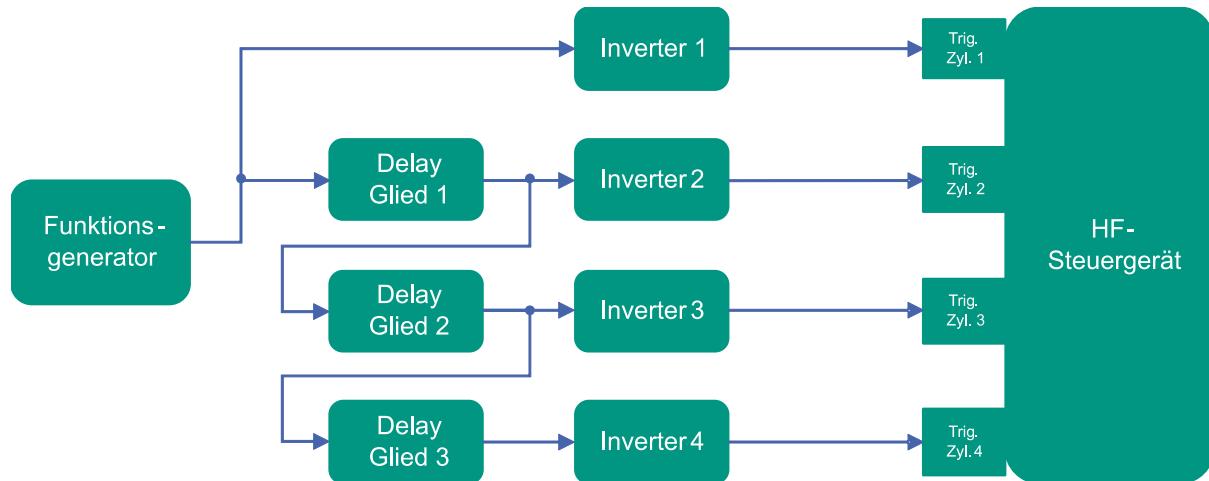


Abbildung 17: Triggerkette für die einzelnen Igniter des Corona Systems

## 4 Versuchsvorbereitung und Durchführung der Prüfläufe

### 4.1 Penetration von Diesel-Abgas Versuchsaufbau

#### 4.1.1 Versuchsträger

Bei dem verwendeten Versuchsträger handelte es sich um einen Zweiliter 4-Zylinder Dieselmotor der Volkswagen AG vom Typ EA189 mit der Motorkennung CBAB. Eine Übersicht der wichtigsten Motordaten zeigt Tabelle 4. Um die Einflüsse einer Beladung des DPFs und die daraus resultierende Erhöhung von interner Abgasrückführung (AGR) zu reduzieren wurde die Abgasnachbehandlungsbox, bestehend aus einem Dieseloxydationskatalysator (DOC) und einem Dieselpartikelfilter (DPF), entfernt.

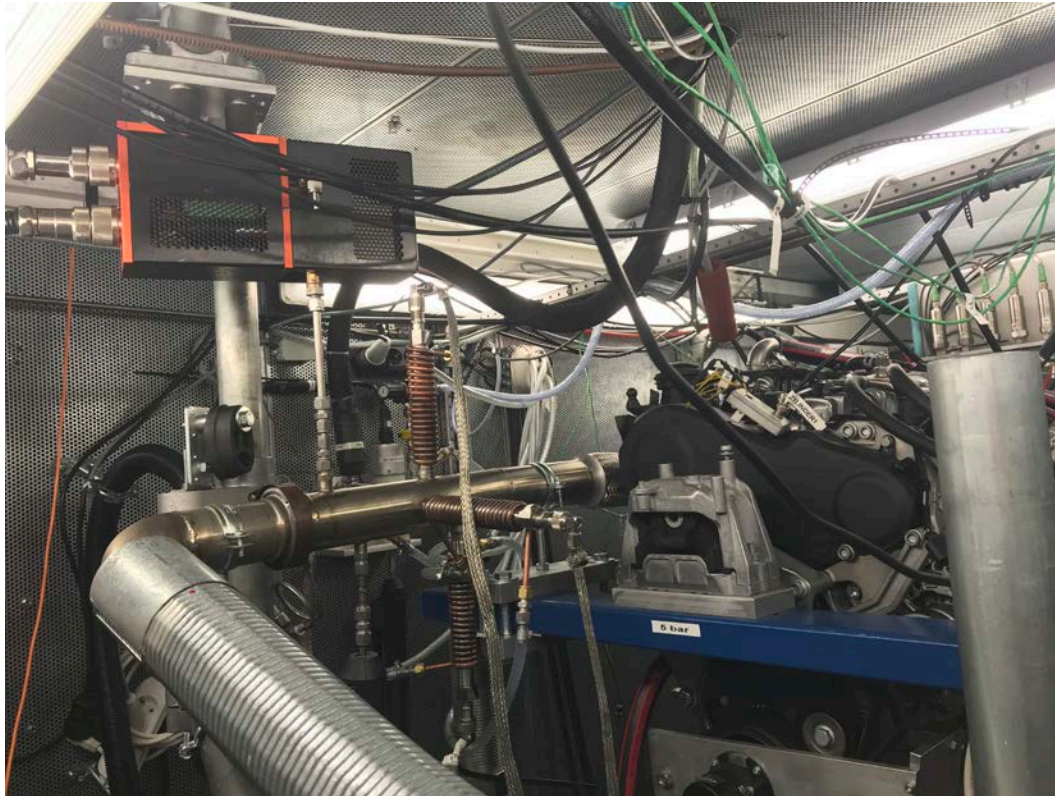
*Tabelle 4: Daten des Versuchsträgers*

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Motor                     | VW R4 CR-Diesel                            |
| Hubraum                   | 1968 cm <sup>3</sup>                       |
| Bohrung x Hub             | 81 mm x 95,5 mm                            |
| Max. Leistung             | 103 kW bei 4200 min <sup>-1</sup>          |
| Max. Drehmoment           | 320 Nm bei 1750 bis 2500 min <sup>-1</sup> |
| Verdichtungsverhältnis    | 16,5:1                                     |
| Gemischaufbereitung       | Common Rail DI Piezo-Ventil bis 1800 bar   |
| Hochdruck-Kraftstoffpumpe | Bosch CP 4.1                               |
| Einspritzsystem           | Bosch CRS 3.2                              |
| Aufladung                 | Pneumatisch verstellbarer VTG              |

Das Steuergerät wurde über die Mess- und Applikationssoftware INCA gesteuert. Für den Betrieb wurde für jeden Betriebspunkt sowohl der Einspritzzeitpunkt wie auch die Einspritzdauer konstant gehalten. Der konstruierte NTP-Generator wurde direkt an den Abgasturbolader (ATL) geflanscht. Die Steckverbindung zwischen ATL und dem ersten Corona-Igniter betrug dabei 385 mm. Die Position des NTP-Generators und der zugehörigen Corona-Igniter ist in Abbildung 18 zu sehen. Um die Corona-Igniter vor den hohen Temperaturen im Abgasstrang zu schützen sind Kupferspiralen, welche mit 15°C kaltem Wasser durchspült worden sind, an ihnen angebracht. Dadurch konnte die Temperatur der Corona-Igniter auf



etwa 40°C gehalten werden.



*Abbildung 18: Aufbau der Coronaigniter im Abgasstrang. Zu sehen sind drei der Igniter mit den zugehörigen Kühlwendeln. Links von den Ignitern befindet sich die erste Verdünnungsstufe des EEPS.*

#### 4.1.2 Verwendete Messtechnik

Um möglichst viele Daten über das Abgasverhalten zu bekommen, wurden verschiedene Messtechniken eingesetzt. Zur Bestimmung der gasförmigen Emissionen kam eine AVL Abgasmessanlage (AMA) 4000 zum Einsatz. Um die Partikel zu charakterisieren, wurde drei verschiedene Messgeräte eingesetzt. Die Rußemission wurde mit dem Rauchwertmessgerät AVL Typ 415S (Smokemeter) bestimmt. Die Partikelkonzentration und Größenverteilung wurde mit dem Model 3090 Engine Exhaust Particle Sampler (EEPS) von TSI erfasst. Die Sammlung der Partikel für die Durchführung von Rußreaktivitätsanalyse erfolgte mittels des Particulate Sampling System PSS-20 von Control System. Im Folgenden werden nähere Details zur verwendeten Messtechnik beschrieben. Die Abgasentnahmestellen für Abgasmessanlage, das Smokemeter und das EEPS bzw. PSS-20 liegen 77,5 mm, 97,5 mm, und 117,5 mm vom letzten Corona Igniter entfernt.

##### **AMA 4000**

Bei den eingesetzten Gasanalysatoren handelt es sich um einen Flammenionisationsdetektor (FID) für Kohlenwasserstoffe (HC), einem Chemilumineszenzdetektor (CLD) für die Stickoxide (NO und NO<sub>x</sub>), einem Nichtdispersiven Infrarotsensor (NDIR) für die Größen CO<sub>low</sub>, CO<sub>High</sub> und CO<sub>2</sub> (CO<sub>low</sub> und CO<sub>High</sub> messen in verschiedenen Messbereichen) und einem Paramagnetischendetektor für Sauerstoff.

Über die AMA wurde dabei auch das Lambda nach der Methode von Brettschneider bestimmt, indem die verschiedenen Abgaszusammensetzungen und die mittlere Summenformel des Kraftstoffs verwendet werden.

Die erfassten Werte wurden jeweils über einen Zeitraum von 60 s gemittelt.

### **Smokemeter**

Mit dem Smokemeter wird die sogenannte „Filter Smoke Number“ (FSN) ermittelt. Durch eine im Abgasstrang befindliche Sonde mit definiertem Volumen entnimmt das Smokemeter Abgas. Dieses Abgas wird durch ein weißes Filterpapier gesaugt, wodurch dieses durch den enthaltenen Ruß schwarz verfärbt wird. Im Anschluss an die Messung wird das geschwärzte Papier mit einer Glühlampe beleuchtet und das reflektierte Licht von einer Fotodiode aufgenommen. Die Intensität des reflektierten Lichts dient somit als Maß für die Schwärzung des Papiers und damit dem Rußgehalt des Abgases. Zum Verhindern von Kondensation ist das Gerät und die Entnahmeleitung beheizt. In regelmäßigen Intervallen wird vom Gerät durch abschalten der Lampe ein Schwarzwertabgleich durchgeführt. Der Weißwertabgleich geschieht wiederum bei eingeschalteter Lampe auf einem definierten Hintergrund.

### **EEPS**

Beim EEPS handelt es sich um ein Partikelspektrometer welches sowohl die Gesamtpartikelkonzentration (TPNC) sowie auch ein Partikelspektrum des elektrischen Mobilitätsdurchmesser der Partikel ermittelt. Der gemessene Durchmesserbereich beträgt 5,6 bis 560 nm in 32 logarithmischen Größenklassen.

Zunächst wird das Abgas entnommen und in einem ersten Rotationsverdünner bei einer Temperatur von 120°C verdünnt. Daraufhin wird das verdünnte Gas in eine sogenannte „evaporation tube“ weitergeleitet, wo es zunächst auf 300°C erhitzt wird. Dies soll die flüchtigen nicht festen Elemente entfernen. Anschließend wird das Gas ein weiteres Mal verdünnt. Die Gesamtverdünnung beträgt dabei Faktor 174. Das Funktionsschema des Meßgerätes kann aus Abbildung 19 entnommen werden. Das verdünnte Aerosol wird in das Gerät eingeleitet und über eine unipolaren Aufladeeinheit geleitet, um die einströmenden Partikel auf die gleiche Polarität zu bringen. Danach wird das Aerosol mit der sogenannten „Sheath Air“ zu den Elektroden transportiert. Zwischen den drei mittig liegenden „High-Voltage“ Elektroden und den 22 außenliegenden Elektrometern ( $E_1$  bis  $E_N$ ) liegt eine Hochspannung an, welche die Partikel, je nach Größe, verschieden stark ablenkt. Die Ladung der Partikel fließt beim Auftreffen auf die Elektrometer ab und kann als Strom gemessen werden, der ein Maß für die Partikelanzahl pro Elektrometer darstellt.

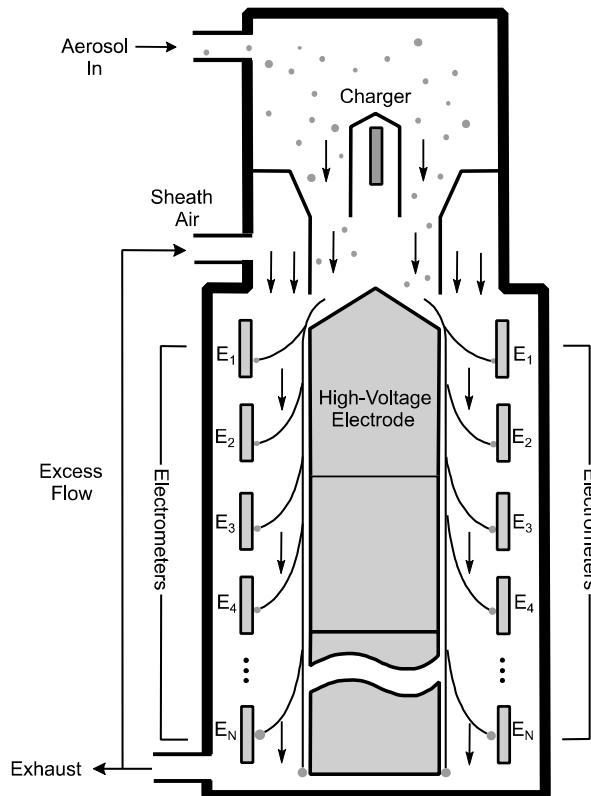


Abbildung 19: Funktionsschema des EEPS [52].

Die Umrechnung der gemessenen Ströme auf den Elektrometern erfolgt über die sogenannten „calibration matrices“. Beim EEPS sind dies die „compact“ [53] Matrix für sphärische Partikel und die „soot“ [54] Matrix für Rußpartikel. Zur Auswertung wurde die sogenannte „soot“ Matrix verwendet. Die Messunsicherheit beträgt laut Hersteller etwa 12%.

### DMS500

Das DMS500 der Firma Cambustion ist ein weiteres Partikelspektrometer. Das Funktionsprinzip ist analog zu dem des EEPS. Der gemessene Partikeldurchmesser beträgt zwischen 5 nm und 1000 nm und ist damit etwas größer im Vergleich zum EEPS. Auch das DMS500 besitzt 22 Elektrometerringe, die allerdings eine Aufteilung in 38 Größenklassen bei 16 Größenklassen pro Dekade erlauben. Ein weiterer Unterschied ist der Druck in dem Gerät. Während das EEPS bei 1 atm betrieben wird, beträgt der Innendruck des DMS500 etwa 0.25 atm. Sowohl die erste wie auch die zweite Verdünnungsstufe werden bei 150°C betrieben. Zur Auswertung der Partikelgrößenverteilung wurde die „Diesel“ Matrix verwendet. Weitere Informationen und der Vergleich zwischen EEPS mit dem DMS500 können aus [55] entnommen werden.

### PSS-20

Beim PSS 20 handelt es sich um einen Teilstromverdünnungstunnel. Dabei wird Abgas mithilfe einer Lochsonde entnommen und weiter verdünnt. In den Versuchen wurde um das Gerät nicht zu beschädigen ein Verdünnungsfaktor von 7 verwendet. Das Verdünnte Abgas wird

dann über ein Quarzfaser-Filterplättchen, welches den im Aerosol enthaltenen Ruß aufnimmt, gefördert. Der so abgeschiedene Ruß kann danach weiter untersucht werden.

#### **4.2 Analyse der Rußproben mittels Temperaturprogrammierter Oxidation**

Bevor die Rußproben mit Hilfe des PSS-20 gesammelt werden, werden die Quarzfaser-Filterplättchen bei 500°C 24 h in einem Ofen vorkonditioniert, damit flüchtige Rückstände aus der Produktion, Fette und Wasser entfernt werden. Danach werden die Filterplättchen in das PSS-20 eingesetzt und der Ruß aus dem Abgas gewonnen.

Unmittelbar vor der Temperaturprogrammierten Oxidation (TPO) / gravimetrischen Analyse (TGA) werden die Quarzfaser-Filterplättchen 30 min lang bei 150°C vorkonditioniert, um Kraftstoffrückstände zu entfernen. Teile dieser beladenen Filterplättchen werden in einen Tiegel gefüllt und auf eine hochgenaue Waage gestellt.

Die TPO/TGA fand unter einer 95% N<sub>2</sub> und 5% O<sub>2</sub> Atmosphäre statt. Die Temperaturrampe betrug 5 K pro Minute. Sowohl die Masse im Tiegel wie auch die Werte von CO und CO<sub>2</sub> (welche mittels eines FTIRs gemessen wurden) werden in einem Temperaturintervall von 190°C bis 850°C aufgezeichnet.

Durch Ableitung und anschließender Normierung der Massenabnahme ergeben sich die charakteristischen Verläufe einer TGA Analyse.

## **5 Vergleich unterschiedlicher Kraftstoffe im stationären Betrieb an zwei Forschungseinzylindern**

Um den Einfluss von Kraftstoffen aus regenerativen Quellen auf die Partikelemission zu betrachten, wurde im folgenden Kapitel handelsüblicher B7 Diesel mit einem R33 Blue Diesel an einem Forschungseinzylinder verglichen. Der genannte R33 Diesel besteht aus 67 Vol.-% Diesel aus fossilen Quellen, zu 7 Vol.-% Biodiesel und zu weiteren 26 Vol.-% aus sogenanntem Hydrotreated Vegetable Oils (HVO). Der Kraftstoff wurde am KIT aus den Einzelkomponenten gemischt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den beiden Kraftstoffen sicherzustellen.

Zusätzlich wurde an einem weiteren Forschungseinzylinder ein handelsüblicher Super E5 Ottokraftstoff und eine Mischung von diesem mit einem aus regenerativen Quellen stammenden Kraftstoff (bioliq) untersucht. Das Mischungsverhältnis betrug dabei 90 Vol.-% Super E5 und 10 Vol.-% bioliq. Es wurde so gewählt, dass die Mischung innerhalb der EN 228 liegt und somit sich auch an realen im Feld einsetzbaren Kraftstoffen orientiert. Begrenzend war hierbei der hohe Aromatengehalt des bioliq.

Die Gesamtpartikelkonzentration und Partikelgrößenverteilung wurden an einem Einzylinder Dieselaggregat gemessen. Das verwendete Messsystem war dabei das DMS500 von Cambustion. Gemessen wurden relativ niedrige Lasten mit einem effektiven Mitteldruck ( $p_{me}$ ) von 3 bzw. 4 bar, um den Massenstrom und damit den Abgasvolumenstrom und die Strömungsgeschwindigkeit gering zu halten, was sich positiv auf den Wirkungsgrad des NTP Generators auswirkt. Die zugehörigen Drehzahlen waren  $1400 \text{ min}^{-1}$  bei 3 bar  $p_{me}$  und  $2000 \text{ min}^{-1}$  bei 4 bar  $p_{me}$ .

Am Ottomotor wurden Einspritzbeginn (ESB) Variationen bei unterschiedlichen Betriebspunkten getestet. Es wurde sowohl die Gesamtpartikelkonzentration sowie die Partikelgrößenverteilung mittels des EEPS aufgezeichnet. Zur Übersicht wird im Folgenden am  $2000 \text{ min}^{-1}$  und 5 bar  $p_{mi}$  (das entspricht etwa dem 4 par  $p_{me}$  Punkt des Dieselaggregates) Betriebspunkt die Kraftstoffeinflüsse aufgezeigt.

### **5.1 Gesamtpartikelkonzentration der untersuchten Kraftstoffe**

#### **5.1.1 Diesel**

Zunächst wird die Gesamtpartikelkonzentration der beiden genannten Dieselaftstoffe betrachtet. Abbildung 20 zeigt die Übersicht dieser als Funktion der beiden Kraftstoffe und den zwei genannten Betriebspunkten. Die eingezeichnet Fehlerbalken stellen die Standardabweichung der Messergebnisse dar. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung ist festzuhalten, dass bei den beiden genannten Betriebspunkten der teilweise aus regenerativen Quellen hergestellte R33 Blue Diesel eine höhere Partikelemission aufweist. Eine mögliche Ursache hierfür ist das etwas schlechtere Siedeverhalten der Siedekurve bei  $250^\circ\text{C}$  wo im Falle von B7 Diesel bereits 45,6% und im Falle von R33 erst 32,6% verdampft sind. Dieses kann zu mehr flüssigen Anteilen während der Verbrennung und damit zu einer erhöhten Partikelbildung führen. Der niedrige Lastpunkt verstärkt diesen Effekt, weswegen er im restlichen Kennfeld nicht mehr zu beobachten ist.

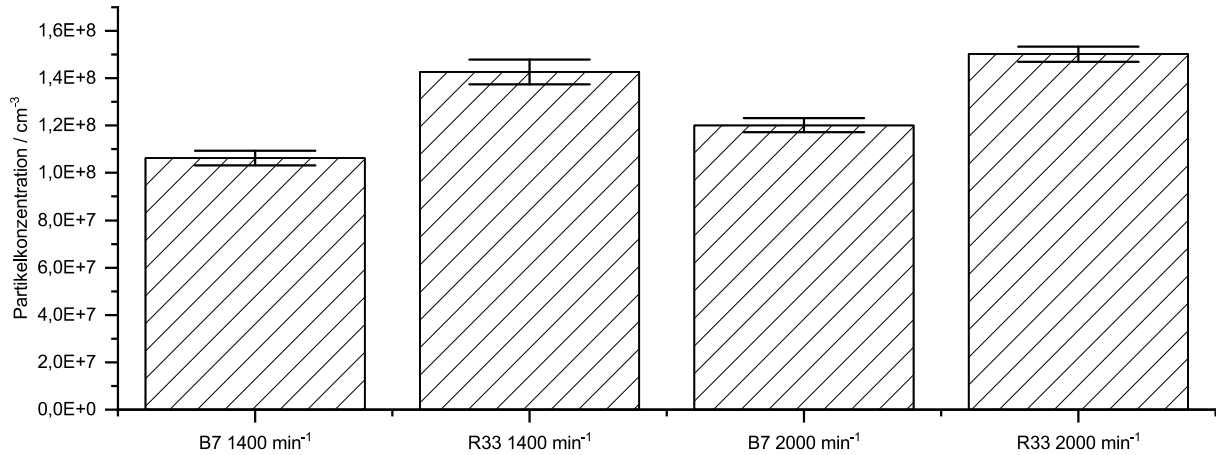


Abbildung 20: Gesamtpartikelkonzentration von handelsüblichem B7 und R33 Diesel bei unterschiedlichen Drehzahlen. Der  $p_{me}$  bei  $1400 \text{ min}^{-1}$  beträgt 3 bar. Der  $p_{me}$  bei  $2000 \text{ min}^{-1}$  beträgt 4 bar.

An dieser Stelle sei noch einmal erwähnt, dass sich dieser Effekt der erhöhten Partikelemission des R33 Blue Diesels gegenüber des handelsüblichen B7 Diesels bei mittleren bis hohen Lasten verringert und leicht umkehrt.

### 5.1.2 Otto

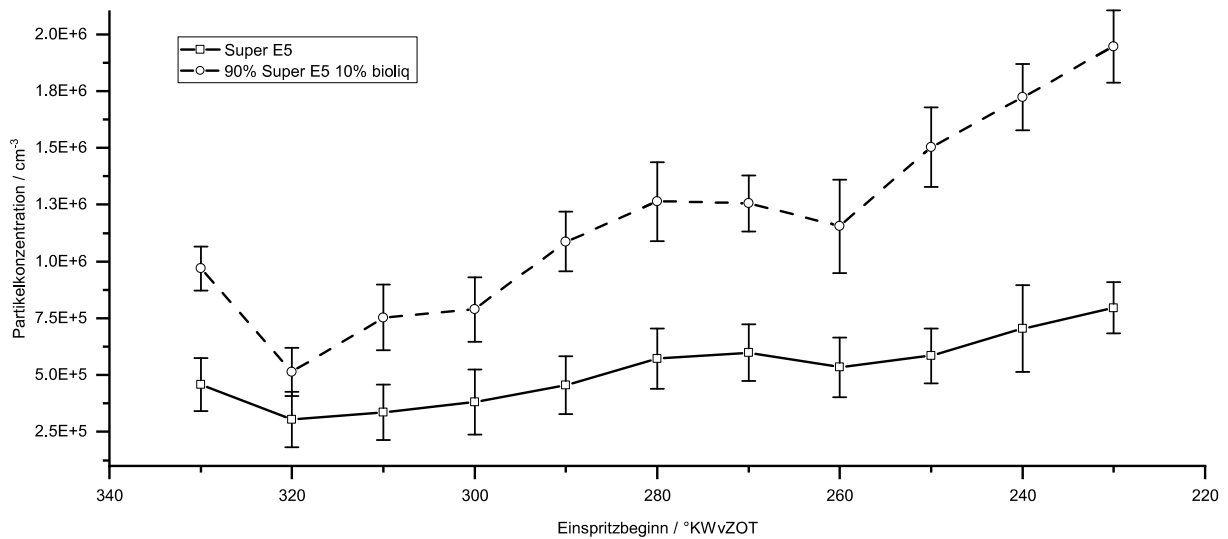


Abbildung 21: Partikelkonzentration von handelsüblichem Super E5 und einer Mischung aus diesem und bioliq bei verschiedenen Einspritzbeginnen. ( $2000 \text{ min}^{-1}$   $p_{mi}$  5 bar)

Abbildung 21 zeigt die Gesamtpartikelkonzentration von Super E5 und der Mischung aus Super E5 mit bioliq in Abhängigkeit vom Einspritzbeginn. Der grundsätzliche Verlauf beider Kurven ist ähnlich und lässt sich auf dieselben Mechanismen zurückführen. Bei sehr frühen ESB von  $330 \text{ °KWvZOT}$  wird der Kolben benetzt. Die resultierende diffusive Verbrennung führt zu einem erhöhten Partikelaustritt. Schon kurz darauf bei  $320 \text{ °KWvZOT}$  entsteht das globale Minimum. Anschließend steigen die Emissionen wieder an. Zurückzuführen ist dies auf eine schlechtere Gemischbildung und Benetzung der Zylinderwand und des Einlassventils.

Der unterschied zwischen den zwei Kraftstoffen kann zum einen auf den erhöhten Aromatengehalt und zum anderen auf die leicht schlechtere Siedelinie zurückgeführt werden. Die Aromaten größer  $C_9$  führen zu einer gesteigerten Partikelentstehung. Diese sind im bioliq in höherem Maße vorhanden und machen sich gerade bei späteren ESB durch eine höhere Partikelkonzentration bemerkbar. Die schlechtere Siedelinie fällt vor allem bei Benetzung von Kolben, Zylinderwand und Einlassventil auf und erklärt eine Steigerung der Partikelkonzentration zu früheren und mittleren ESB.

## 5.2 Partikelgrößenverteilung

### 5.2.1 B7 Diesel vs. R33 bei mittleren Drehzahlen und niedrigen Lasten

Was die Gesamtpartikelkonzentration bereits angedeutet hat, zeigt sich auch in der Partikelgrößenverteilung des  $2000 \text{ min}^{-1}$  Betriebspunktes in Abbildung 21. Hier sind zwei Moden erkennbar, die mit einem Maximum in der Partikelkonzentration bei einem Durchmesser von  $23,71 \text{ nm}$  und  $74,99 \text{ nm}$  aufzufinden sind. Dabei unterscheiden sich die beiden Kraftstoffe bzgl. der Position der Maxima nicht. Es fällt jedoch auf, dass der R33 Blue Diesel dazu neigt eine höhere Anzahl an agglomerierten Partikeln (Partikel mit einem Durchmesser  $> 23 \text{ nm}$ ) zu bilden.

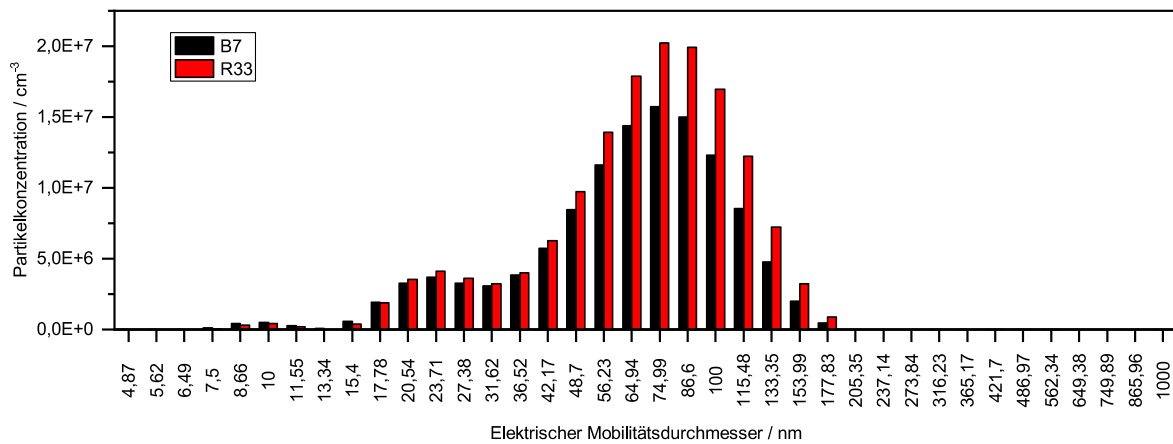


Abbildung 22: Partikelgrößenverteilung von B7 und R33 Diesel bei  $2000 \text{ min}^{-1}$  und einem  $p_{me}$  von 4 bar

### 5.2.2 B7 Diesel vs. R33 bei niedrigen Drehzahlen und Lasten

Die in Abbildung 22 gezeigte Partikelgrößenverteilung aus dem  $1400 \text{ min}^{-1}$  Betriebspunkt weist einen ähnlichen Verlauf wie die zuvor gezeigte Verteilung auf. Es sind wieder zwei Moden zu erkennen. Die erste Mode ist analog zu der vorherigen Messung bei  $23,71 \text{ nm}$ . Die zweite Mode befindet sich bei etwas größeren Partikeln mit einem elektrischen Mobilitätsdurchmesser von  $86,6 \text{ nm}$ . Auch hier ist auffällig, dass der R33 Blue Diesel in diesem Niedriglast-Betriebspunkt dazu neigt, größere Partikel zu bilden.

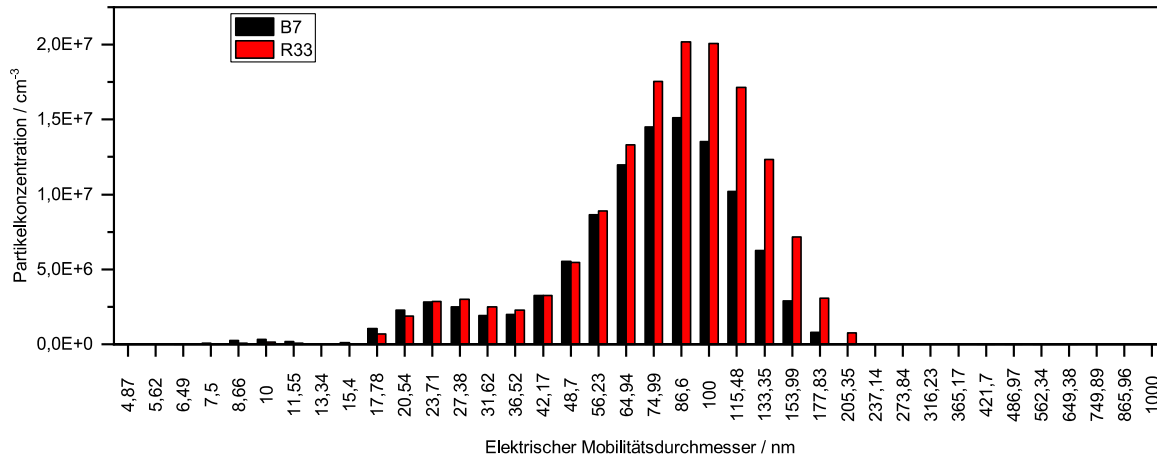


Abbildung 23: Partikelgrößenverteilung von B7 und R33 Diesel bei 1400 min<sup>-1</sup> und einem p<sub>me</sub> von 3bar

### 5.2.3 Partikelgrößenverteilung bei Ottokraftstoffen bei unterschiedlichen Einspritzbeginn

In Abbildung 24 sind die Partikelgrößenverteilungen der beiden Kraftstoffe bei unterschiedlichem ESB aufgetragen. Die obere Verteilung zeigt dabei den frühen ESB bei 330 °KWvZOT, die untere die Verteilung bei der geringsten Gesamtpartikelkonzentration und einem ESB von 320 °KWvZOT. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung der Partikelkonzentration bei einer Größenklasse während der Messung. Gerade bei kleinen Durchmessern ist diese Abweichung extrem hoch, da dort die Nachweisgrenze zu kleineren Partikeln hin ansteigt.

Bei allen Partikelgrößenverteilungen ist ein bimodaler Verlauf zu erkennen. Bei früher Einspritzung zeigt die Super E5 / bioliq Mischung eine deutlich gesteigerte Partikelkonzentration im Akkumulationsmodenbereich im Vergleich zu normalem Super E5. Dies deutet auf ein schnelleres Wachstum der Rußteilchen hin, welches vermutlich durch die größeren Aromaten und deren erhöhte Anzahl zurückzuführen ist.

Der spätere ESB mit den geringsten Gesamtpartikelkonzentrationen beider Kraftstoffe hat einen deutlich ausgeprägteren bimodalen Verlauf. Beide Kraftstoffe neigen zu kleineren Partikeln im Nukleationsmodenbereich bei etwa 10 nm. Die Partikelkonzentrationen bei diesen Durchmessern sind unter Berücksichtigung der Standardabweichung und der Nachweisgrenze etwa gleich hoch. Wie beim frühen ESB zeigt sich auch hier zu größeren Durchmessern ein Unterschied zwischen den beiden Kraftstoffen. Der größere Aromatengehalt der bioliq Mischung sorgt auch hier für eine erhöhte Partikelkonzentration in der Akkumulationsmode. Die Partikel wachsen durch die Aromaten schneller, was zu höheren Konzentrationen und Durchmessern führt.



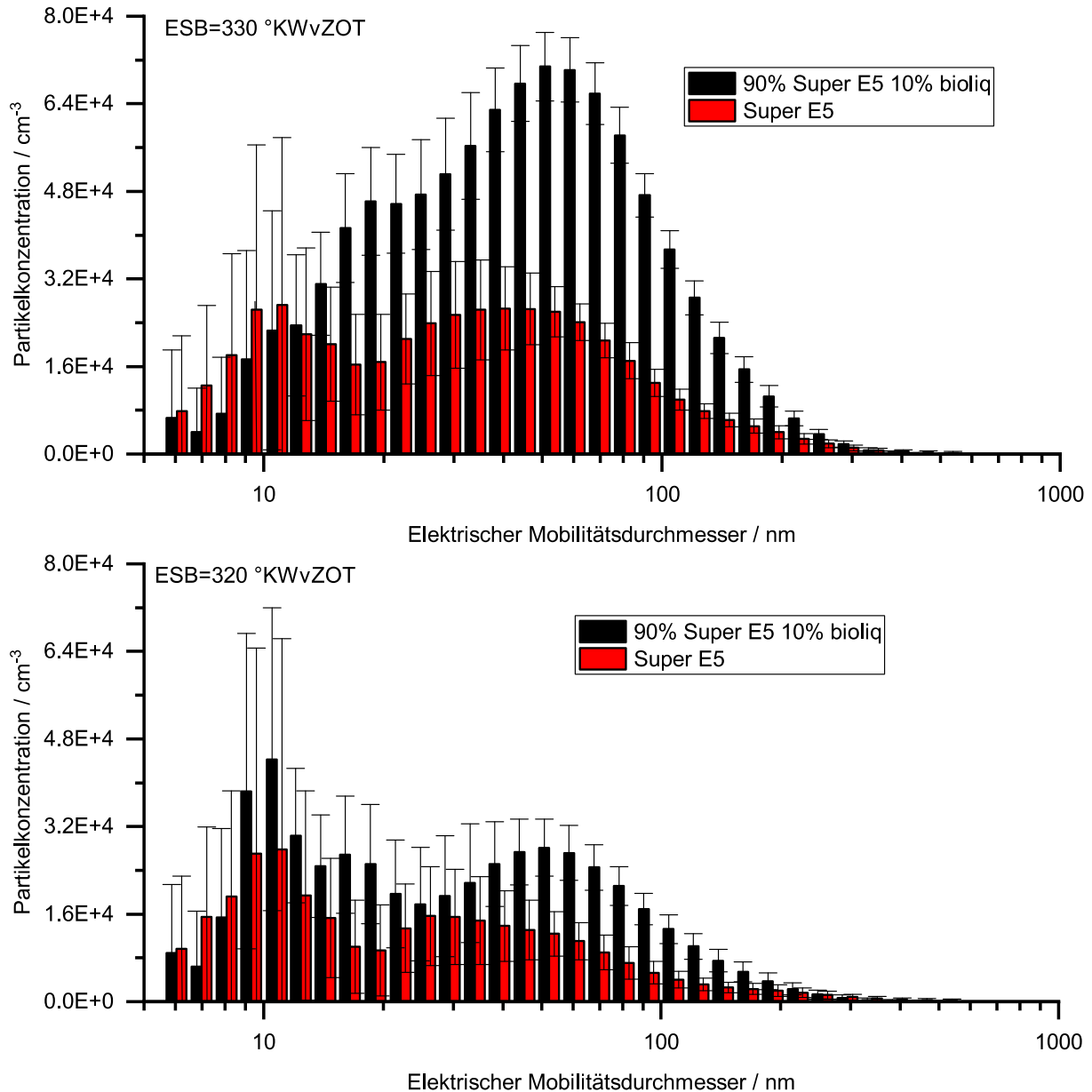


Abbildung 24: Partikelgrößenverteilung von handelsüblichem Super E5 und einer Mischung aus diesem und bioliq. Oben bei einem Einspritzbeginn (ESB) von 330 °KWvZOT und unten bei 320 °KWvZOT. ( $2000 \text{ min}^{-1}$   $p_{mi}$  5 bar)

## 6 Analyse der Versuchsergebnisse am Niedertemperatur-Plasma-Generator

Um den Effekt des NTP-Generators besser erfassen zu können wurden die Versuche ausschließlich mit Diesel durchgeführt, da dieser einen höheren Rußmassenstrom bereitstellte. Für die Versuche wurden zwei Betriebspunkte angefahren. Der effektive Mitteldruck  $p_{me}$  von beiden Punkten lag bei 4 bar. Die Drehzahlen unterschieden sich jedoch zwischen  $2000$  und  $1500 \text{ min}^{-1}$ . Zum einfacheren Vergleich der verschiedenen Messungen wurde neben der TPNC auch der Durchmesser der maximalen Partikelanzahl (Diameter@Peak) sowie der Sauterdurchmesser (SMD) verwendet.

Die vier Corona-Igniter wurden jeweils 1,27 ms mit jeweils 2 Bursts dieser Länge bestromt. Daraus ergibt sich eine Gesamtbestromungsdauer von 2,54 ms. Die Frequenz betrug dabei, wenn nicht anders angegeben, 50 Hz (um der gewählten Motordrehzahl zu entsprechen). Daraus ergibt sich ein Duty-Cycle von 50,8%. Dieser wurde gewählt, da das Steuergerät bei höheren Duty-Cycles oder zu hohen Spannungen einen Spannungseinbruch detektierte, der den Effekt der Coronaentladung unterbindet. Der Zusammenhang zwischen Duty-Cycle und Spannung ist in Abbildung 25 dargestellt.

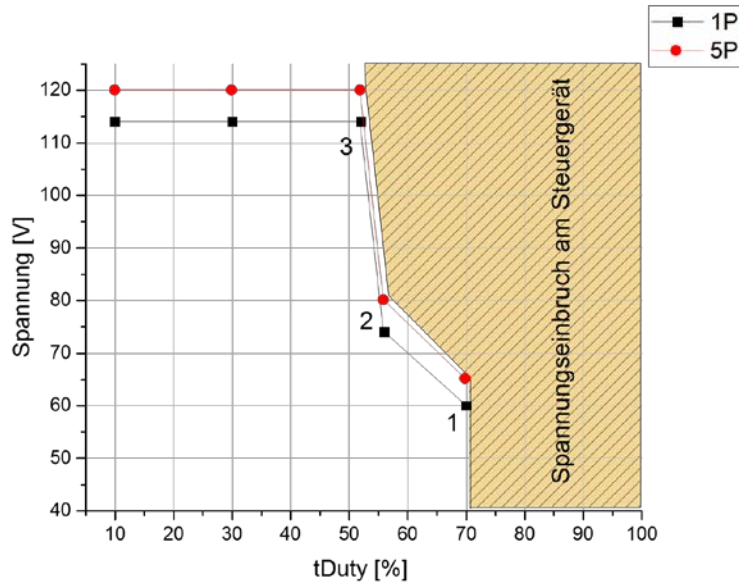


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen Spannung der Primärseite im Coronasteuergerät und dem Duty-Cycle tDuty.

## 6.1 Partikelkonzentration und Durchmesser

Abbildung 26 zeigt die TPNC über der Spannung des Primärkreises des Coronasteuergeräts (sogenannte buck Spannung) beim  $2000 \text{ min}^{-1}$  und 4 bar  $p_{\text{me}}$  Lastpunkt. Die grüne Linie mit den quadratischen Marken zeigt dabei den Verlauf der TPNC bei der Variation der buck Spannung. Die Frequenz beträgt dabei 50 HZ, die Anzahl der Bursts sind 2 und die Dauer eines Bursts beträgt 1,27 ms. Die Messpunkte mit blauem Kreis sind bei einer Frequenz von 40 Hz und einer Spannung von 85 V gemessen. Der Duty-Cycle für diese Messung liegt bei 40,6%. Das orange Dreieck bei 50 Hz, einem Burst (was einem Duty-Cycle von 25,4% entspricht) und 85 V Spannung. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung innerhalb einer Messung, die im Bereich von  $2-3 \cdot 10^5 \text{ \#/cm}^3$  liegt. **Sowohl die Variation der Corona buck Spannung wie auch die Änderung der Frequenz oder Anzahl der Bursts zeigen keinen Einfluss auf die TPNC.** Diese liegt bei allen Messungen um  $7,0 \cdot 10^6 \text{ \#/cm}^3$ .

Abschlussbericht: Plasma – Abgasnachbehandlung für regenerativ gefeuerte Stationärmotorenanwendungen

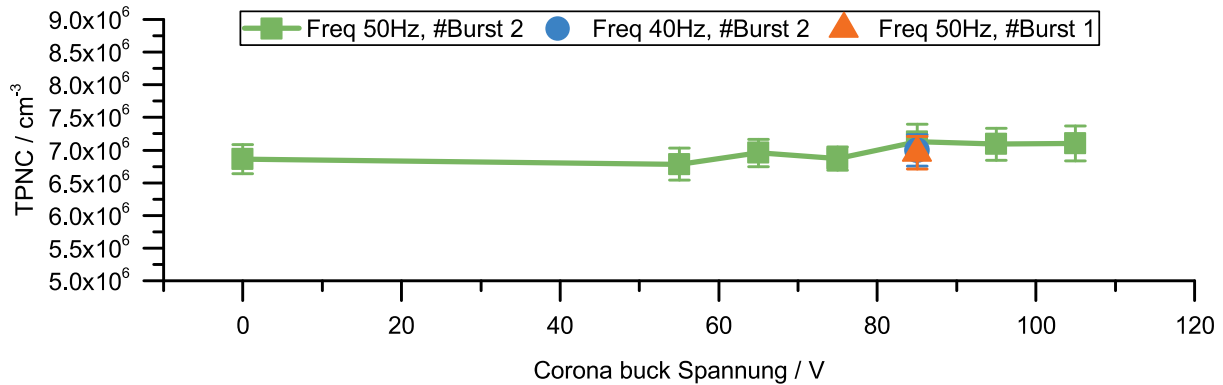


Abbildung 26: TPNC bei Variation der Corona buck Spannung, Frequenz und Anzahl der Bursts. Betriebspunkt:  $2000 \text{ min}^{-1}$   $p_{me}$  4 bar.

Auch die bereits genannten Durchmesser SMD und Diameter@Peak zeigen, wie in Abbildung 27 dargestellt, denselben Trend. Die Quadrate stehen hierbei für den SMD, der bei  $20 \text{ nm} \pm 0,26 \text{ nm}$  liegt und weder mit der Corona buck Spannung noch der Frequenz oder Anzahl der Bursts variiert. Gleiches gilt für den Diameter@Peak (runde Symbole). Dieser liegt im Mittelwert bei  $53,6 \text{ nm} \pm 0,9 \text{ nm}$ .

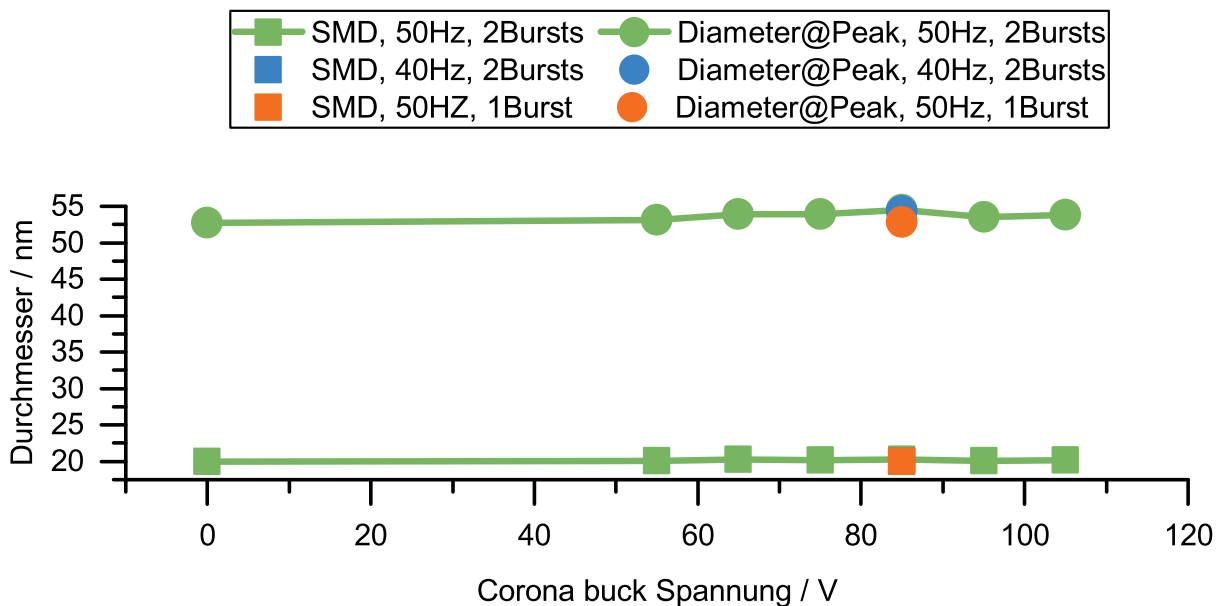


Abbildung 27: Übersicht des Durchmessers des Maximums (Diameter@Peak) und dem Sauter Mean Diameter (SMD) bei Variation der Corona buck Spannung. Betriebspunkt:  $2000 \text{ min}^{-1}$   $p_{me}$  4 bar.

Ähnliches gilt für den zweiten Betriebspunkt bei  $1500 \text{ min}^{-1}$ , wie er in Abbildung 28 dargestellt ist. Die Variation der buck Spannung und damit auch die Intensität des Corona-Plasmas zeigen keinen Einfluss auf die TPNC die in der Größenordnung von  $1,5 \cdot 10^7 \text{ #/cm}^3$  liegt. Hierbei wurde die buck Spannung weiter bis 135 V erhöht. Allerdings musste aufgrund des Spannungsdurchbruchs (Funkenbildung) bei einer buck Spannung von 125 V die Burstdauer auf 1,15 ms und bei 135 V sogar auf 1 ms reduziert werden. Dies entspricht einem Duty-Cycle von 46% bzw. 40%.

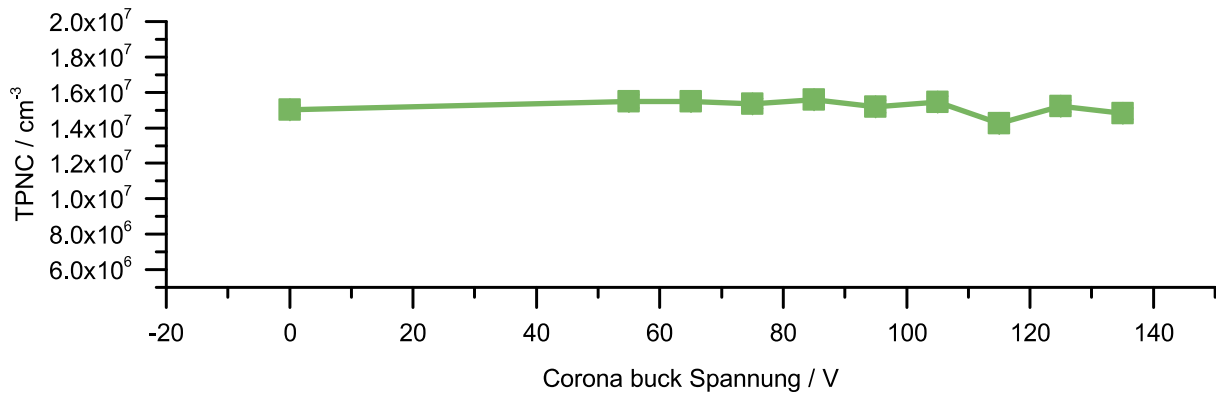


Abbildung 28: TPNC bei Variation der Corona buck Spannung. Betriebspunkt: 1500 min<sup>-1</sup> p<sub>me</sub> 4 bar.

Auch bei den genannten Durchmessern SMD (grüne Linie mit quadratischen Symbolen) und der Diameter@Peak (blaue Linie mit Kreissymbol) ist über die Variation der Corona buck Spannung kein Einfluss zu sehen. Der SMD ist mit 24,18 nm ± 0,41 nm etwas größer als beim 2000 min<sup>-1</sup> Betriebspunkt. Der Diameter@Peak liegt dabei sogar konstant bei 69,8 nm.

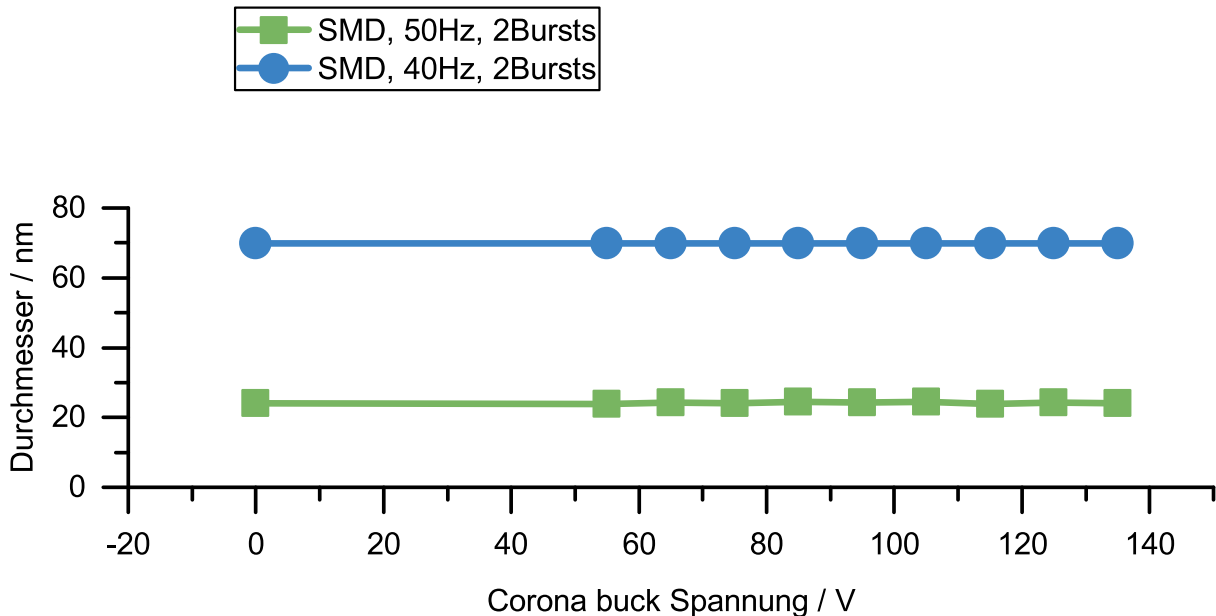


Abbildung 29: Übersicht des Durchmessers des Maximums (Diameter@Peak) und dem Sauter Mean Diameter (SMD) bei Variation der Corona buck Spannung. Betriebspunkt: 1500 min<sup>-1</sup> p<sub>me</sub> 4 bar.

Allerdings fiel bei den Messungen auf, dass die Schwärzungszahl mit steigender buck Spannung leicht absinkt (siehe Abbildung 30). Eine mögliche Vermutung, weshalb ein Abfallen der FSN beobachtet wird gleichzeitig in der TPNC aber kein unterschied erkennbar ist könnte in dem Messbereich des EEPS liegen. Das EEPS misst Partikel im Größenbereich zwischen 5,6 und 560 nm. Im Bereich der Schwärzungszahl werden vor allem auch größere Partikel mit gemessen. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Coronaentladung eher Partikel mit größerer Oberfläche reduziert, weshalb bei den deutlich kleineren Partikeln beim 2000 min<sup>-1</sup> Betriebspunkt auch keine Unterschiede erkannt werden konnten. Deshalb wurden im Folgenden Rußproben von diesem Betriebspunkt entnommen um mehr Informationen über die Eigenschaften des Rußes zu erhalten.

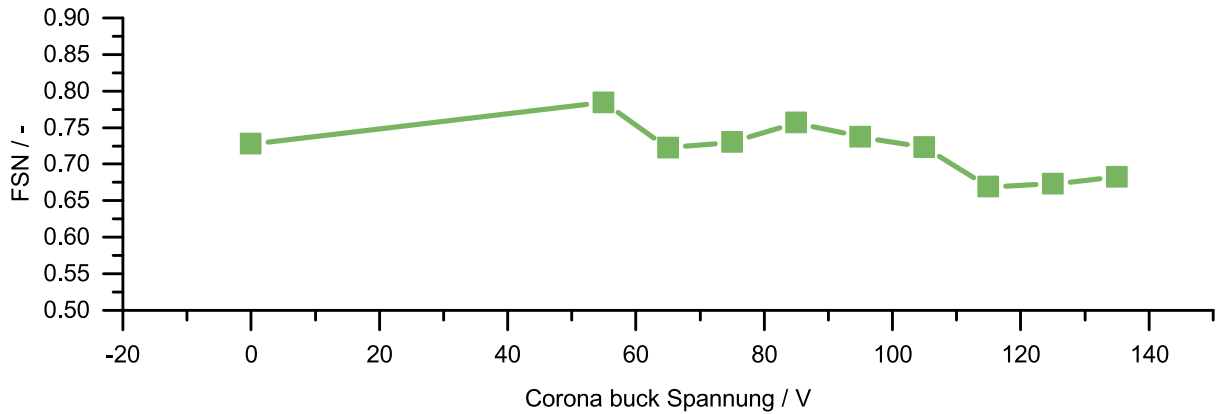


Abbildung 30: Schwärzungszahl als Funktion der Corona buck Spannung. Betriebspunkt:  $1500 \text{ min}^{-1}$   $p_{me}$  4 bar.

## 6.2 Regenerationsverhalten

Zur Bewertung des Regenerationsverhaltens eines DPFs wurden TPO-Analysen im  $1500 \text{ min}^{-1}$  und 4 bar  $p_{me}$  Betriebspunkt vorgenommen. Neben der Referenz, die den Betriebspunkt ohne Zuschaltung der Corona-Igniter darstellt, wurden der NTP bei einer Frequenz von 50 Hz betrieben. Variiert wurde dabei die Corona buck Spannung von 105 V bis 125 V. Aufgrund des in Abbildung 25 gezeigten Zusammenhangs zwischen der Primärspannung und dem Duty-Cycle konnte nur für eine Corona buck Spannung von 105 V und 115 V der Duty-Cycle auf 50,8% gehalten werden. Die weitere Erhöhung auf 125 V führte zu einer Reduzierung des Duty-Cycle auf 46%. Diese Reduzierung wurde durch Verringerung der Burstdauer erzielt. Für die Punkte bei 105 V und 115 V betrug die Burstdauer auf 1,27 ms bei zwei Bursts. Beim 125 V Betriebspunkt wurde diese auf 1,15 ms reduziert.

Die TPO-Analysen sind in Abbildung 31 gezeigt. Für alle Betriebspunkte zeigen sich zwei Peaks. Die Peaks der linken Seite bei niedrigen Temperaturen werden durch Einlagerungen von flüchtigen Kohlenwasserstoffen, die nicht durch die Vorkonditionierung entfernt wurden, hervorgerufen [56]. Dies wird auch durch die parallele Messung mit dem FTIR bestätigt. Dieses misst die CO und CO<sub>2</sub> Emission während des Erhitzens. Diese Peaks tauchen dort nicht auf, was bedeutet, dass keine Oxidationsprodukte nachzuweisen sind. Auf der rechten Seite im Bereich von 620°C sind weitere Peaks zu erkennen, welche durch die Oxidation des Rußes erzeugt werden. Die Temperaturen an denen das Maximum dieser Peaks zu finden sind liegt zwischen 616°C und 621°C. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung bei dieser Art der Messung von 5°C kann somit kein Unterschied zwischen den  $T_{max}$  der verschiedenen NTP-Generator Parameter erkannt werden. Die Höhe der Peaks spielt dabei keine Rolle und ist nur auf eine unterschiedliche Masse an flüchtigen Kohlenwasserstoffen zurückzuführen. Auch der Verlauf wird nicht vom NTP-Generator beeinflusst. So zeigt die „Schulter“ links des Hochtemperaturpeaks bei allen Messungen den gleichen Verlauf.

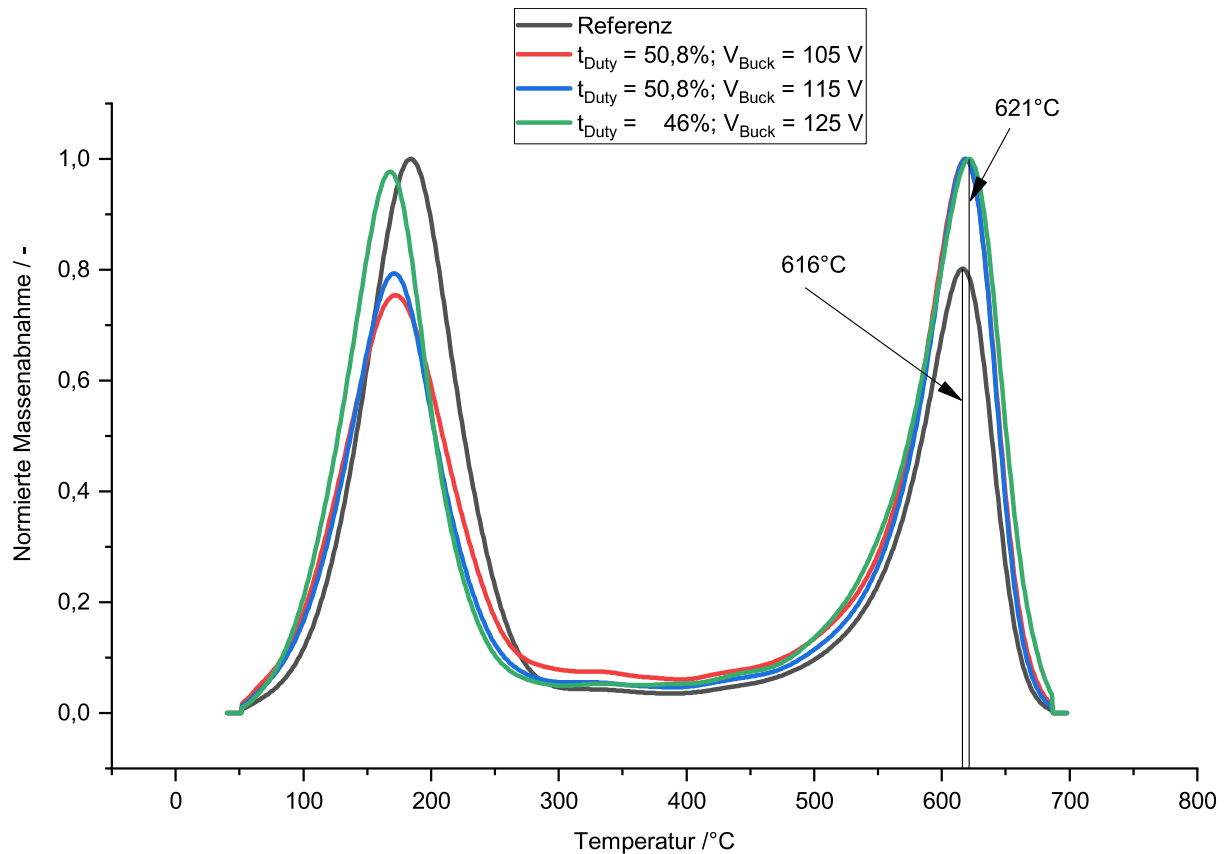


Abbildung 31: Ergebnis der TPO-Analyse für die Referenz bei  $1500 \text{ min}^{-1}$  und einem  $p_{me}$  von 4 bar.

Grundsätzlich bietet die TPO ein Mittel zur Bewertung der Reaktionsfähigkeit von Rußen. Je reaktiver diese sind, desto geringer ist Hochtemperaturpeak oder es bildet sich eine Emissionsschulter links des Peaks aus. Daraus bietet sich somit die Möglichkeit, den Abbrand verschiedener Rußarten im DPF zu bewerten. Da sich die Reaktivität des Rußes unbeeinflusst vom NTP-Generator zeigt, ist somit keine signifikante und reproduzierbare Verbesserung der Reaktivität und damit des Abbrandverhaltens im DPF zu erwarten.

### 6.3 Bewertung der Ergebnisse

Nachdem zunächst erfolgreiche Messungen - wie sie in Kapitel 3.2 gezeigt sind - durchgeführt wurden, gilt es nun zu klären, weshalb diese trotz deutlicher Verbesserung des Reaktionsvolumens um den Faktor 9,2 die Ergebnisse nicht reproduziert werden konnten. Dabei zeigen Veröffentlichungen wie [18], dass es prinzipiell möglich ist, sowohl den Partikelmassenstrom deutlich zu reduzieren als auch die Reaktivität der Partikel zu erhöhen. Hierfür werden im Folgenden mehrere potentielle Faktoren diskutiert.

Zunächst wird die Position des EEPS betrachtet. In den Voruntersuchungen befand sich das Gerät in der Prüfzelle des Motors. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde dieses jedoch außerhalb der Zelle positioniert, um den Effekt der EMV-Störungen durch die Corona-Igniter zu mindern. Das Corona System wies, trotz hoher Abschirmbemühungen (z.B. geschirmte und geerdete Hochspannungsleitungen), in den Versuchen eine starke EM-Strahlung auf. Dies führte soweit, dass selbst Temperatur und Drehmomentmesstechniken von dieser EM-Strahlung betroffen war. Da das EEPS sogar ein elektromagnetisches Messprinzip verwendet, liegt es somit nahe, dass die durch das Corona-System

hervorgerufene EM-Strahlung die Messungen verfälscht. Auch das Aufbringen oder Entfernen von Ladung auf den Partikeln können zu Unregelmäßigkeiten in der Messung führen.

Generell ist neben dem aktiven Volumen des NTP-Generators auch die Aufenthaltsdauer der Partikel von großer Bedeutung. So entnimmt [18] nur einen Teil des Abgasvolumenstroms von 60 l/min. Dadurch konnte die Aufenthaltsdauer erhöht werden, was der Wirkung des Reaktors zugutekommt. In dem hier untersuchten Fall wurde im Gegensatz hierzu der gesamte Abgasvolumenstrom verwendet. Bei einer sehr groben Abschätzung, unter Vernachlässigung der zugeführten Kraftstoffmasse kann durch eine simple Abschätzung nach Gleichung (6) zumindest die Größenordnung des Abgasvolumenstroms bestimmt werden.

$$Q_B = \frac{Q_N(273 + T_A)}{273} \quad (6)$$

Wobei  $Q_B$  der Abgasvolumenstrom des Verbrannten Gemisches,  $Q_N$  der Abgasvolumenstrom bei Normzustand und  $T_A$  die Temperatur des Abgases ist.

$T_A$  wurde direkt mit 335°C gemessen.  $Q_N$  wird abgeschätzt durch das Motorvolumen, unter Annahme eines Drucks von 1 bar und einem Liefergrad von 1, und der Drehzahl. So ergibt sich aus bei 2 l Hubraum und einer Drehzahl von 750 min<sup>-1</sup> ein Abgasvolumenstrom im Normzustand von 1500 l/min. Eingesetzt in die obige Formel ergibt sich der Abgasvolumenstrom zu 3340 l/min. Dieser wird in der Realität normaler Nutzung eines Motors dieser Größe aufgrund der zugeführten Kraftstoffmasse und einem höheren Ladedruck deutlich höher ausfallen. Der Wert dient somit nur dazu die Größenordnung, um die Verhältnisse abschätzen zu können. Damit ist der bei diesen Versuchen durch den NTP-Generator beförderte Abgasvolumenstrom rund 56 mal höher wie der in [18] verwendete Volumenstrom. Hinzu kommt die Länge des Reaktors von 500 mm der deutlich größer als der in diesen Versuchen verwendete Reaktor mit einer Länge von etwa 70 mm.

Neben den Möglichkeiten der zu geringen Durchströmung auch in den Vorversuchen, ist auch noch der Einfluss durch den DPF zu erwähnen. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Beladung des DPFs und der daraus resultierende Abgasgegendruck bei den Stichprobenmessungen jederzeit konstant war. Dementsprechend kann bei einer geringeren Beladung des DPF auch der Abgasgegendruck geringer sein. Dies führt zu einer reduzierten internen Abgasrückführung, was die Partikelbildung verringert. Dieser Effekt ist auch umgekehrt möglich. Somit ist leider schwer reproduzierbar, ob ein Einfluss eines beladenen die beobachteten Effekte verstärkt hat. Die hier durchgeführten weitergehenden Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass der Einfluss der Coronaentladung auf die Partikel und deren Oxidation ein realen Vollstromanwendungen signifikant zu gering ist.

## Fazit

Es wurde die Machbarkeit eines Niedertemperatur Plasma Generators in der Stationärmotorenanwendung geprüft. Hierzu wurden zunächst mögliche Reaktionspfade und deren Umsetzbarkeit mittels einer Corona-Entladung gesichtet. An einem Strömungsprüfstand wurden zunächst die Einsetzbarkeit des verwendeten Corona Systems unter den Strömungsbedingungen einer Abgasanlage validiert. Es zeigte sich dabei, dass mit steigendem Massenstrom das aktivierte Volumen sinkt.

Nachfolgend wurden erste Stichversuche an einem Motorenprüfstand durchgeführt. Dabei wurde neben der Partikelanzahl auch die Partikelgrößenverteilung erfasst. Bei Aktivierung des Niedertemperatur Plasma Generators wurde eine leichte Reduktion der Partikelanzahl um etwa 10% festgestellt. Ein ähnlicher Effekt spiegelte sich auch in der Partikelgrößenverteilung wider. Hier wurde das Partikelspektrum leicht reduziert, jedoch konnte keine Änderung am eigentlichen Verlauf dieser Verteilung beobachtet werden. Zusätzlich wurde der Abbrand des Dieselpartikelfilters untersucht. Hier zeigte sich ein leichter Trend zu schnelleren Abbranddauern, was positive Effekte auf den Kraftstoffverbrauch und damit den CO<sub>2</sub> Ausstoß hat.

Mit den aus den Stichversuchen gewonnenen Erkenntnissen wurde mittels einer Multiphysicssimulation versucht den Niedertemperatur Plasma Generator zu optimieren. Hierzu wurde als wichtigste Kenngröße das aktivierte Volumen betrachtet. Eine E-Feldsimulation mehrerer Anordnungen führte zu dem Ergebnis, dass mit einer schraubenförmigen Anordnung das aktivierte Volumen um den Faktor 9,2 erhöht wird.

Zur Beurteilung des Einflusses von Kraftstoffen aus regenerativen Quellen wurden ein handelsüblicher B7 Diesel mit einem R33 Blue Diesel sowie ein Super E5 und eine Mischung aus Super E5 und bioliq verglichen. Die Vergleiche erfolgten an zwei Forschungseinzylinder. Beurteilt wurden beim Diesel zwei Betriebspunkte bei niedrigen Lasten von 4 bzw. 3 bar  $p_{me}$  bei Drehzahlen von 2000  $min^{-1}$  bzw. 1400  $min^{-1}$ . Die Ottokraftstoffe wurden bei einem  $p_{mi}$  von 5 bar und einer Drehzahl von 2000  $min^{-1}$  untersucht. Die Betriebspunkte wurden so gewählt um den Abgasmassenstrom und damit die Strömungsgeschwindigkeit im Niedertemperatur Plasmagenerator zu senken, was zu einem verbesserten Wirkungsgrad durch höhere Verweilzeiten führt. Beide Brennverfahren zeigen in den Betriebspunkten einen erhöhten Gesamtpartikelaustritt mit den aus regenerativen Quellen hergestellten Kraftstoffen. Bei Betrachtung der Partikelgrößenverteilungen sind bi-modale Verläufe ersichtlich. Beide Dieselmotoren weisen ihren maximalen Peak bei einem elektrischen Mobilitätsdurchmesser von 86,6 nm bzw. 74,99 nm bei dem 2000  $min^{-1}$  bzw. 1400  $min^{-1}$  Betriebspunkt auf. Generell lässt sich sagen, dass der R33 Blue Diesel in den untersuchten Last und Drehzahlbereichen im Vergleich zum handelsüblichen B7 Diesel dazu tendiert, leicht größere Agglomerate zu entwickeln. Die Vermutung liegt nahe, dass dies an Unterschieden im Siedeverlauf der beiden Kraftstoffe liegt, welche zu mehr nicht verdampften Anteilen beim R33 Blue Diesel während der Verbrennung führen und somit der Partikelaustritt steigt. Ähnliches lässt sich auch bei den Ottokraftstoffen beobachten. So weist die bioliq Mischung mehr Partikel mit größeren Durchmessern auf.

In der nachfolgenden Versuchsreihe zur Validierung des Niedertemperatur Plasma Generators wurde zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Dieselpartikelfilter entfernt. Mittels der temperaturprogrammierten Oxidation wurde die Reaktivität der



Rußpartikel ermittelt, um den Einfluss des NTP Generators auf das Abbrandverhalten des Dieselpartikelfilters besser bewerten zu können. Zusätzlich wurden auch wieder sowohl die Partikelanzahl sowie die Partikelgrößenverteilung gemessen. Um Störeinflüsse wie die starken elektromagnetischen Störungen des Corona-Systems zu minimieren wurde die Messtechnik dieses Mal außerhalb der Prüfwelle platziert. **Es zeigte sich, dass weder die Partikelanzahl noch die Partikelgrößenverteilung signifikante Änderungen durch den Einsatz des Niedertemperatur Plasma Generators erfuhren.** Auch die Reaktivität des Rußes wurde nicht weiter beeinflusst, sodass kein in einer industriellen Anwendung erzielbarer Einfluss auf das Abbrandverhalten und die damit reduzierte Notwendigkeit des aktiven Partikelfilterabbrennens ermittelt und erreicht werden konnte.

Die Gründe für die unterschiedlichen Ergebnisse aus den Stichversuchen und denen nach der Optimierung können sehr unterschiedlich sein. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist die Platzierung des Partikelanalysators außerhalb der Prüfwelle und damit die deutliche Reduktion des Einflusses durch elektromagnetische Strahlungen.

Die Abgasnachbehandlung mittels Niedertemperatur Plasmen ist generell möglich, wie [18] zeigt, allerdings ist diese mit bisher verfügbaren Systemen aus dem Fahrzeugbau nicht in motorisch relevanten Größenordnungen umsetzbar. Dementsprechend ist es leider nicht möglich, mithilfe dieser Niedertemperatur Plasma Module auf Basis von Coronaentladungen eine CO<sub>2</sub> Ersparnis durch weniger häufiges oder langes regenerieren von Partikelfiltern zu erzielen. Das Betreiben der Motoren mit dem teilweise aus regenerativen Quellen hergestellte R33 Blue Diesel Kraftstoff war problemlos möglich. Mit Hilfe dieses Kraftstoffes ist eine starke Reduzierung von etwa 20% der Treibhausgasemission möglich.

## Projektbezogene Publikationen

Auf Basis der zuvor genannten Ergebnisse wurden Fachbeiträge auf Tagungen und in Zeitschriften publiziert, so dass die gewonnen Erkenntnisse im Rahmen der Fachwelt diskutiert und der Öffentlichkeit bereits teilweise zugänglich gemacht werden konnten.

Langhorst, T.; Toedter, O.; Koch, T.; Gonner, P.: „Impact of Non-Thermal Plasma on Particulate Emissions in Application in a Diesel Engine Exhaust Duct“, 2017, SAE International, Warrendale (PA). doi:10.4271/2017-01-5100

Teile der Ergebnisse wurden aus folgenden Abschlussarbeiten übernommen:

Wooyeong Kim: „Fundamental Research on Discharge Characteristics and Reaction Kinetics of Corona Ignition“, Karlsruher Institut für Technologie, 2016

Patrick Gonner: „Untersuchung der Beeinflussung motorisch erzeugter Rußpartikel durch Coronazündung“, Karlsruher Institut für Technologie, 2016

Naim Kaan Cakir: „Modelling and Electric Field Simulation of High-Frequency Corona Discharge Ignition“, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft / Karlsruher Institut für Technologie, 2018

Anton Dewald: „Numerische Multiphysics-Simulation einer Plasma-Reaktors zur Abgasnachbehandlung mittels Corona-Entladung“, Karlsruher Institut für Technologie, 2019

Zhaoyu Teng: „Theoretische Analyse der Möglichkeiten der Behandlung von Kohlenstoffpartikeln mit Corona-Entladung oder Mikrowellenplasmen“, Karlsruher Institut für Technologie, 2019

## 7 Literaturangaben

- [1] Ellensohn, R. u. Link, A.: Gibt es in der Industrie in 20 Jahren noch Verbrennungsmotoren? In: Maus, W. (Hrsg.): Zukünftige Kraftstoffe: Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2019, S. 676–694
- [2] Küchler., A.: Hochspannungstechnik. Grundlagen, Technologie, Anwendungen. VDI-Buch. s.l.: Springer-Verlag 2009
- [3] Loeb, L. B.: Basic processes of gaseous electronics. Berkeley, Calif. [u.a.]: Univ. of California Pr 1955
- [4] Meek, J. M. u. Craggs, J. D. (Hrsg.): Electrical breakdown of gases. The international series of monographs on physics. Oxford: Clarendon Press 1953
- [5] Lino da Silva, M.: An adaptive line-by-line—statistical model for fast and accurate spectral simulations in low-pressure plasmas. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 108 (2007) 1, S. 106–125
- [6] Lino da Silva, M.: A Contribution for the Simulation of VUV-IR Radiation Transfer in CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> Entry Flows Using a Line-By-Line Model. Radiation of High Temperature Gases in Atmospheric Entry. 2011
- [7] McTaggart, F. K.: Plasma Chemistry in electrical Discharges. Elsevier Publishing (1967)
- [8] Fridman, A. u. Kennedy, L. A.: Plasma Physics and Engineering, Second Edition. Hoboken: CRC Press 2011
- [9] Stokes, C. S.: Chemical Reaction in Electrical Discharge Plasmas. In: Venugopalan, M. (Hrsg.): Reactions under plasma conditions Volume I. United States: John Wiley and Sons, Inc 1971
- [10] Tang, X., Lu, H., Lin, L. u. Yao, S.: Experimental Investigation of Plasma Oxidation of Diesel Particulate Matter. Plasma Chemistry and Plasma Processing 33 (2013) 1, S. 281–292
- [11] Stanmore, B.R., Brillhac, J.F. u. Gilot, P.: The oxidation of soot: a review of experiments, mechanisms and models. Carbon 39 (2001) 15, S. 2247–2268
- [12] Jacquot, F., Logie, V., Brillhac, J.F. u. Gilot, P.: Kinetics of the oxidation of carbon black by NO<sub>2</sub>. Carbon 40 (2002) 3, S. 335–343
- [13] Grundmann, J., Müller, S. u. Zahn, R.-J.: Treatment of Soot by Dielectric Barrier Discharges and Ozone. Plasma Chemistry and Plasma Processing 25 (2005) 5, S. 455–466
- [14] Popov, N. A.: Fast gas heating in a nitrogen–oxygen discharge plasma: I. Kinetic mechanism. Journal of Physics D: Applied Physics 44 (2011) 28, S. 285201

- [15] Yanallah, K., Pontiga, F., Fernández-Rueda, A. u. Castellanos, A.: Experimental investigation and numerical modelling of positive corona discharge: ozone generation. *Journal of Physics D: Applied Physics* 42 (2009) 6, S. 65202
- [16] Magureanu, M., Bradu, C. u. Parvulescu, V. I.: Plasma processes for the treatment of water contaminated with harmful organic compounds. *Journal of Physics D: Applied Physics* 51 (2018) 31, S. 313002
- [17] Arakoni, R. A., Babaeva, N. Y. u. Kushner, M. J.: O<sub>2</sub>(1Δ) production and gain in plasma pumped oxygen–iodine lasers: consequences of NO and NO<sub>2</sub> additives. *Journal of Physics D: Applied Physics* 40 (2007) 16, S. 4793–4809
- [18] Fan, R., Cai, Y., Shi, Y. u. Cui, Y.: Effect of the Reaction Temperature on the Removal of Diesel Particulate Matter by Ozone Injection. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 39 (2019) 1, S. 143–163
- [19] Gu, L., Cai, Y., Shi, Y., Wang, J., Pu, X., Tian, J. u. Fan, R.: Effect of indirect non-thermal plasma on particle size distribution and composition of diesel engine particles. *Plasma Science and Technology* 19 (2017) 11, S. 115503
- [20] Kovalev, A. S., Lopaev, D. V., Mankelevich, Y. A., Popov, N. A., Rakhimova, T. V., Poroykov, A. Y. u. Carroll, D. L.: Kinetics of in oxygen RF discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics* 38 (2005) 14, S. 2360–2370
- [21] Malik, M. A. u. Hughes, D.: Ozone synthesis improves by increasing number density of plasma channels and lower voltage in a nonthermal plasma. *Journal of Physics D: Applied Physics* 49 (2016) 13, S. 135202
- [22] Panarin, V. A., Skakun, V. S., Sosnin, E. A. u. Tarasenko, V. F.: Production of nitrogen oxides in air pulse-periodic discharge with apokamp. *Journal of Physics D: Applied Physics* 51 (2018) 20, S. 204005
- [23] Shi, Y., Cai, Y., Li, X., Xu, H., Li, W. u. Pu, X.: Low Temperature Diesel Particulate Filter Regeneration by Atmospheric Air Non-thermal Plasma Injection System. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 36 (2016) 3, S. 783–797
- [24] Yulianto, E., Restiwijaya, M., Sasmita, E., Arianto, F., Kinandana, A. W. u. Nur, M.: Power analysis of ozone generator for high capacity production. *Journal of Physics: Conference Series* 1170 (2019), S. 12013
- [25] Takeuchi, N., Ishibashi, N., Sugiyama, T. u. Kim, H.-H.: Effective utilization of ozone in plasma-based advanced oxidation process. *Plasma Sources Science and Technology* 27 (2018) 5, S. 55013
- [26] Penetrante, B. M., Hsiao, M. C., Bardsley, J. N., Merritt, B. T., Vogtlin, G. E., Kuthi, A., Burkhart, C. P. u. Bayless, J. R.: Identification of mechanisms for decomposition of air pollutants by non-thermal plasma processing. *Plasma Sources Science and Technology* 6 (1997) 3, S. 251–259
- [27] Chen, X., Tan, Z., Liu, Y., Wang, X. u. Li, X.: Effects of oxygen concentration on the electron energy distribution functions in atmospheric pressure helium/oxygen and

- argon/oxygen needle-electrode plasmas. *Journal of Physics D: Applied Physics* 51 (2018) 37, S. 375202
- [28] Komuro, A., Ono, R. u. Oda, T.: Numerical simulation for production of O and N radicals in an atmospheric-pressure streamer discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics* 45 (2012) 26, S. 265201
- [29] Liu, R., Yu, Z., Cao, H., Liu, P. u. Zhang, Z.: Characteristics of DBD micro-discharge at different pressure and its effect on the performance of oxygen plasma reactor. *Plasma Science and Technology* 21 (2019) 5, S. 54001
- [30] Shi, Y. X., Cai, Y. X., Li, X. H., Chen, Y. Y., Ding, D. W. u. Tang, W.: Mechanism and method of DPF regeneration by oxygen radical generated by NTP technology. *International Journal of Automotive Technology* 15 (2014) 6, S. 871–876
- [31] Tang, S., Li, N., Qi, J., Yuan, D. u. Li, J.: Degradation of phenol using a combination of granular activated carbon adsorption and bipolar pulse dielectric barrier discharge plasma regeneration. *Plasma Science and Technology* 20 (2018) 5, S. 54013
- [32] Babaie, M., Kishi, T., Arai, M., Zama, Y., Furuhashi, T., Ristovski, Z., Rahimzadeh, H. u. Brown, R. J.: Influence of non-thermal plasma after-treatment technology on diesel engine particulate matter composition and NO<sub>x</sub> concentration. *International Journal of Environmental Science and Technology* 13 (2016) 1, S. 221–230
- [33] Trompeter, F.-J.: Barrierenentladung zum Abbau von Schadstoffen in motorischen Verbrennungsabgasen, RWTH Aachen Dissertation. Aachen 2003
- [34] Yuan, D., Wang, Z., Ding, C., He, Y., Whiddon, R. u. Cen, K.: Ozone production in parallel multichannel dielectric barrier discharge from oxygen and air: the influence of gas pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics* 49 (2016) 45, S. 455203
- [35] Pulsed positive corona discharges : fundamental study and application to flue gas treatment, Creighton, Y. Y.M., 1994
- [36] Soria, C., Pontiga, F. u. Castellanos, A.: Plasma chemical and electrical modelling of a negative DC corona in pure oxygen. *Plasma Sources Science and Technology* 13 (2003) 1, S. 95–107
- [37] Große-Kreul, S., Hübner, S., Schneider, S., Ellerweg, D., Keudell, A. von, Matejčík, S. u. Benedikt, J.: Mass spectrometry of atmospheric pressure plasmas. *Plasma Sources Science and Technology* 24 (2015) 4, S. 44008
- [38] Wei, L., Liang, X. u. Zhang, Y.: Numerical investigation on the effect of gas parameters on ozone generation in pulsed dielectric barrier discharge. *Plasma Science and Technology* 20 (2018) 12, S. 125505
- [39] Ranji-Burachaloo, H., Masoomi-Godarzi, S., Khodadadi, A. A. u. Mortazavi, Y.: Synergetic effects of plasma and metal oxide catalysts on diesel soot oxidation. *Applied Catalysis B: Environmental* 182 (2016), S. 74–84
- [40] Plasma und plasmakatalytische Verfahren zum NO<sub>x</sub>-Abbau im Dieselabgas, Zrilli, T., 2005

- [41] Huiskamp, T., Hoeben, W F L M, Beckers, F J C M, van Heesch, E J M u. Pemen, A. J. M.: (Sub)nanosecond transient plasma for atmospheric plasma processing experiments: application to ozone generation and NO removal. *Journal of Physics D: Applied Physics* 50 (2017) 40, S. 405201
- [42] Mok, Y. S. u. Huh, Y. J.: Simultaneous Removal of Nitrogen Oxides and Particulate Matters from Diesel Engine Exhaust using Dielectric Barrier Discharge and Catalysis Hybrid System. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 25 (2005) 6, S. 625–639
- [43] Yamamoto, T., Okubo, M., Hayakawa, K. u. Kitaura, K.: Towards ideal NO/sub x/ control technology using a plasma-chemical hybrid process. *IEEE Transactions on Industry Applications* 37 (2001) 5, S. 1492–1498
- [44] Komuro, A., Ono, R. u. Oda, T.: Behaviour of OH radicals in an atmospheric-pressure streamer discharge studied by two-dimensional numerical simulation. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46 (2013) 17, S. 175206
- [45] Skalný, J. D., Országh, J., Matejčík, Š. u. Mason, N. J.: Ozone generation in positive and negative corona discharge fed by humid oxygen and carbon dioxide. *Physica Scripta T131* (2008), S. 14012
- [46] Mikoviny, T., Skalny, J. D., Orszagh, J. u. Mason, N. J.: The role of water and oxygen impurities on ozone production in a negative corona discharge of CO<sub>2</sub>. *Journal of Physics D: Applied Physics* 40 (2007) 21, S. 6646–6650
- [47] Kanazawa, S., Kawano, H., Watanabe, S., Furuki, T., Akamine, S., Ichiki, R., Ohkubo, T., Kocik, M. u. Mizeraczyk, J.: Observation of OH radicals produced by pulsed discharges on the surface of a liquid. *Plasma Sources Science and Technology* 20 (2011) 3, S. 34010
- [48] Jiao, P., Li, Z., Shen, B., Zhang, W., Kong, X. u. Jiang, R.: Research of DPF regeneration with NO<sub>x</sub>-PM coupled chemical reaction. *Applied Thermal Engineering* 110 (2017), S. 737–745
- [49] DIN EN 60060-1:2010:2011-10. *Hochspannungs- Prüftechnik - Teil 1: Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen*, abgerufen am: 20.05.2020
- [50] Untersuchung eines Koronazündsystems im Motorbetrieb, Trumpf, M. C., 2014
- [51] Bohne, S., Rixecker, G., Brichzin, V. u. Becker, M.: Hochfrequenz-Zündsystem mittels Korona-Entladung. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 75 (2014) 1, S. 50–55
- [52] TSI Incorporated: Model 3090 Engine Exhaust Particle Sizer Spectrometer Operation and Service Manual. 2009Revision F ed.
- [53] Wang, X., Grose, M. A., Avenido, A., Stolzenburg, M. R., Caldow, R., Osmondson, B. L., Chow, J. C. u. Watson, J. G.: Improvement of Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS) size distribution measurement – I. Algorithm and applications to compact-shape particles. *Journal of Aerosol Science* 92 (2016), S. 95–108
- [54] Wang, X., Grose, M. A., Caldow, R., Osmondson, B. L., Swanson, J. J., Chow, J. C., Watson, J. G., Kittelson, D. B., Li, Y., Xue, J., Jung, H. u. Hu, S.: Improvement of Engine

Exhaust Particle Sizer (EEPS) size distribution measurement – II. Engine exhaust particles. Journal of Aerosol Science 92 (2016), S. 83–94

- [55] Michler, T., Dörnhöfer, J., Erforth, D., Heinz, A., Scheiber, K., Weber, P., Nowak, N., Kubach, H., Meyer, J., Koch, T. u. Dittler, A.: Comparison of Different Particle Measurement Techniques at a Heavy-Duty Diesel Engine Test Bed. SAE Technical Paper Series. SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States 2019
- [56] Koch, S., Kubach, H., Velji, A., Koch, T., Hagen, F. P., Bockhorn, H., Loukou, A., Trimis, D. u. Suntz, R.: Impact of the Injection Strategy on Soot Reactivity and Particle Properties of a GDI Engine. SAE Technical Paper Series. SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States 2020