

PlasmaAir AG, Weil der Stadt

und

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Universität Stuttgart

Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen  
Abscheideleistung und Partikeleigenschaften bei  
Elektroabscheidern für kleine Biomassefeuerungen  
- 2. Phase

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,

gefördert unter dem Az. 32159 von der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

**Dr.-Ing. Bernd Glocker (PlasmaAir AG)**

**Dr. Silke Marienfeld (PlasmaAir AG)**

**Dipl.-Ing. Christine Dobslaw (PlasmaAir AG)**

**Dr.-Ing. Michael Struschka (IFK)**

**Dipl.-Ing. Julia Goy (IFK)**

Weil der Stadt, den 17.02.2017

PlasmaAir AG

Am Lindenberg 8

71263 Weil der Stadt

Tel.: +49 7033 309 88 30

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 23

70569 Stuttgart

Tel.: +49 711 685 6 3487

PlasmaAir AG, Weil der Stadt

und

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Universität Stuttgart

# Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Abscheideleistung und Partikeleigenschaften bei Elektroabscheidern für kleine Biomassefeuerungen - 2. Phase

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,

gefördert unter dem Az. 32159 von der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

**Dr.-Ing. Bernd Glocker (PlasmaAir AG)**

**Dr. Silke Marienfeld (PlasmaAir AG)**

**Dipl.-Ing. Christine Dobslaw (PlasmaAir AG)**

**Dr.-Ing. Michael Struschka (IFK)**

**Dipl.-Ing. Julia Goy (IFK)**

Weil der Stadt, den 17.02.2017



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



Az	<b>32159</b>	Referat	<b>24/0</b>	Fördersumme	<b>124.781,00 €</b>
----	--------------	---------	-------------	-------------	---------------------

**Antragstitel**                      **Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Abscheideleistung und Partikeleigenschaften bei Elektroabscheidern für kleine Biomassefeuerungen**

**Stichworte**                      Kleinfeuerungsanlage, Abluftreinigung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>1 Jahr und 9 Monate</b>	<b>19.11.2014</b>	<b>30.09.2016</b>	<b>1</b>

Zwischenberichte

<b>Bewilligungsempfänger</b> PlasmaAir AG Am Lindenberg 8 71263 Weil der Stadt	Tel	07033/30988-30
	Fax	07033/30988-50
	<b>Projektleitung</b> Dr.-Ing. Bernd Glocker	
<b>Bearbeiter</b> Christine Dobslaw Dr. Silke Marienfeld		

**Kooperationspartner**      Institut für Feuerungs- und Kraftwerktechnik der Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart  
Projektleiter: Dr.-Ing. Michael Struschka

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Die erhöhten Feinstaubemissionen von Biomassefeuerungen im Geltungsbereich der 1. BImSchV stellen nach wie vor eine technische Herausforderung dar. Die in der Praxis erreichten Abscheideleistungen bei kleinen Elektrofiltern für Biomassefeuerungen liegen bisher deutlich unter den Prüfstandswerten. Je nach Verbrennungsbedingungen kommt es häufig zu massiven Schwankungen und auch immer wieder zu starken Einbrüchen der Abscheideleistung. Die Zusammenhänge waren hier noch ungeklärt, so dass ohne Erlangung von grundlegendem Wissen hierzu auch keine baldige Lösung zur Erreichung konstant hoher Staubabscheideleistungen und damit niedriger Emissionswerte zu erwarten. Wesentlicher Projektinhalt war daher die Durchführung grundlegender Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Abscheideleistung, Partikelkonzentration und Partikeleigenschaften, wobei unterschiedliche Partikelkonzentrationen und -eigenschaften durch verschiedene Feuerungsbauarten und Verbrennungsbedingungen erhalten werden sollten.

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

#### **AP1: Projektmanagement**

Die Koordination des Projektes wurde seitens IFK und PlasmaAir durchgeführt.

#### **AP2: Konstruktion und Bau eines flexiblen Laborabscheiders**

In AP 2 waren – aufbauend auf Phase 1 – der Entwurf und die Fertigung eines flexiblen Laborabscheiders geplant. Mit diesem sollten die Untersuchungen zu den grundlegenden Zusammenhängen in AP 3 durchgeführt werden. Die Konstruktion eines neuen Laborabscheiders wurde vertagt, da es als sinnvoller erachtet wurde, den Abscheider aus Phase 1 weiterzuverwenden und Erkenntnisse der Versuche in die Entwicklung des neuen Abscheiders einfließen zu lassen. Die Untersuchungen aus AP 3 wurden mit dem Laborabscheider aus Phase 1 (teilweise mit möglichen bauseitigen Modifikationen) durchgeführt werden. Die geplanten Arbeiten aus diesem AP wurden somit hauptsächlich in AP 5 verlagert.

#### **AP3: Untersuchungen Abscheideleistung und Partikel**

Für die Durchführung von Versuchen wurde ein vorhandener Prototyp aus einem gemeinsamen vorangegangenen Projekt verwendet (DBU-Projekt Az. 29769). Im Laufe des Projektes wurde dieser im Rahmen der Versuche und Messreihen teilweise modifiziert. Für die durchgeführten Untersuchungen wird die erforderliche Messstrategie beschrieben. Der Elektroabscheider-Prototyp mit Modifikationen sowie die Prüfstände, Messgrößen, Messtechnik, Messreihen und Ergebnisse werden ebenfalls beschrieben. Im Rahmen des Projektes wurden mehrere studentische Arbeiten aus unterschiedlichen Bereichen wie Versuchsdurchführung, Laboranalysen, Strömungssimulation und Konstruktion durchgeführt.

#### **AP4: Betrachtung der Strömungsführung**

In Ergänzung zu den praktischen Untersuchungen wurde in diesem AP die Strömungsführung im Laborabscheider mittels CFD-Simulation und der Einfluss verschiedener Bauteile auf die Strömung betrachtet.

#### **AP5: Entwicklung von grundlegenden Auslegungskriterien und Konstruktion eines flexiblen Laborabscheiders**

Im Bericht werden einige generelle Aussagen aus den Erfahrungen der durchgeführten Versuche und Modifikationen zu den für den Anwendungsbereich relevanten Auslegungskriterien gemacht.

Basierend auf den ersten Messungen des Projektes wurde ein flexibler Laborabscheider konstruiert. Es wurden verschiedene Varianten des Elektrofilters mit unterschiedlichen Konstruktionsschwerpunkten geplant und eine der 5 Varianten wurde detailliert fertig geplant, konstruiert und entsprechende Fertigungszeichnungen wurden erstellt.

#### **AP6: Bericht und Dokumentation**

Während der Projektlaufzeit wurden die verschiedenen Abschnitte dokumentiert, am Projektende in einem Abschlussbericht zusammengefasst und gegebenenfalls werden diese noch in weiteren wissenschaftlichen Veröffentlichungen der Fachwelt zugänglich gemacht.

#### ***Ergebnisse und Diskussion***

Aus den durchgeführten Messreihen konnten verschiedene Erkenntnisse gezogen werden.

Die Strom-Spannungs-Kennlinien ergaben, dass bei höherer Spannung die Abscheideleistung zunimmt. Es wurde eine neue Stromversorgung parallel zu den Versuchen gebaut und zur Verfügung gestellt. Diese kam während der Laufzeit dieses Vorhabens leider nicht zum Einsatz, da die Geometrie des Labormodells den Elektrodenabstand von 30 mm nicht zuließ.

Grundsätzlich hat ein Luftüberschuss einen positiven Effekt auf die Partikelbildung. Als ideal stellte sich hier ein Luftüberschusskoeffizient  $\lambda$  zwischen 2 und 4 heraus. Als idealer Brennstoff stellten sich Holzpellets mit einer maximal erreichbaren Abscheideleistung von 70% heraus.

Das Labormodell wurde umgebaut und die Abscheideeinheit wurde neu konzipiert und eingebaut. Aus dem vorangegangenen Projekt ergab sich, dass plane Flächen sowohl zur Abscheidung als auch für die Reinigung und somit dem Austrag der Partikel am besten geeignet sind. Die neue Abscheideeinheit, die mit der Möglichkeit einer manuellen Abreinigung ausgestattet ist, konnte während der Projektphase erfolgreich getestet werden.

Im Zuge einer Parameterstudie wurden Strömungssimulationen erstellt. Es konnte festgestellt werden, dass die Geometrie des Ein- und Austritts kaum einen Einfluss auf die Abscheideleistung hat. Im Falle des Strömungskanals und der Lochblende stellte sich in beiden Fällen eine kreisförmige Anordnung als ideal heraus.

Basierend auf den Ergebnissen der verschiedenen Messreihen, der erfolgreichen Entwicklung einer abreinigbaren Abscheideeinheit und der Strömungssimulation wurde bis zum Ende der Projektlaufzeit ein verbessertes Modell konzipiert und es wurden Detailkonstruktionen erstellt.

Parallel zur technischen Entwicklung hat die PlasmaAir eine Marktstudie durchgeführt um das Potenzial des Produkts abschätzen zu können. Die Ergebnisse der Studie sind in der Masterthesis von [Möller, 2016] zusammengefasst. Es zeigt sich, dass im Bereich der dezentralen Kleinf Feuerungen für Haushalte zukünftig kein großes Marktvolumen zu erwarten ist.

#### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Teilnahme an der Woche der Umwelt: Für die Teilnahme und den Messestand der Woche der Umwelt 2016 wurden Messetafeln und entsprechendes Material zusammengestellt (Flyer über das Projekt, Präsentation für den Messestand) und das Projekt auf der Ausstellung am Stand präsentiert.

Präsentation des Projektes auf der firmeneigenen Homepage: Aktuell wird die Homepage der Firma PlasmaAir AG überarbeitet und im Zuge dessen wird auch das Projekt eingepflegt und die Ergebnisse präsentiert. Nach Freigabe des Endberichtes wird dieser ebenfalls über die Homepage abrufbar sein.

#### ***Fazit***

Die in den letzten Jahren installierten Feuerungen halten die gesetzlichen Grenzwerte zumindest auf dem Teststand ein. Daher wird die Nachrüstung eines Abscheiders nicht notwendig. Altanlagen, die die Grenzwerte nicht einhalten, werden eher durch neue ersetzt bzw. haben Bestandsschutz. Eine Änderung der derzeit gültigen Grenzwerte durch den Gesetzgeber, die einen höheren Bedarf an nachrüstbaren Elektrofiltern nach sich ziehen würde, ist derzeit nicht absehbar. Anfragen bei Anbietern/Herstellern von Kleinf Feuerungsanlagen in Bezug auf eine eventuelle Kooperation verliefen ins Leere. Keiner der angeschriebenen Betriebe zeigte Interesse an einer Zusammenarbeit.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>5</b>
<b>Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Hauptteil</b> .....	<b>8</b>
1.1    Arbeitsplan und Arbeitspakete .....	8
1.2    AP 2: Konstruktion und Bau eines flexiblen Laborabscheiders .....	9
1.2.1    Konstruktion eines flexiblen Laborabscheiders.....	9
1.2.2    Bau eines flexiblen Laborabscheiders.....	10
1.3    AP 3: Untersuchungen Abscheideleistung und Partikel .....	10
1.3.1    Prototyp Elektroabscheider .....	10
1.3.2    Modifikationen am Prototypen.....	12
1.3.3    Prüfstand .....	14
1.3.4    Messtechnik.....	15
1.3.5    Entwicklung einer Messstrategie.....	16
1.3.6    Laboranalysen .....	18
1.3.7    Versuchsprogramm.....	19
1.3.8    Messreihe „Labor“ .....	20
1.3.9    Messreihe „Lambda“ .....	22
1.3.10    Messreihe „Hochspannung“ .....	28
1.3.11    Messreihe „Brennstoffeinfluss“ .....	31
1.4    AP 4: Betrachtung der Strömungsführung .....	36
1.5    AP 5: Entwicklung von grundlegenden Auslegungskriterien und Konstruktion eines flexiblen Laborabscheiders .....	39
1.5.1    Auslegungskriterien .....	39
1.5.2    Konstruktion eines flexiblen Laborabscheiders.....	40
1.6    Marktstudie .....	43
1.7    Bauseitige Änderungen .....	45
1.7.1    Änderung der Elektrodenkonstruktion .....	45
1.7.2    Beistellung einer Spannungsversorgung.....	45
1.7.3    Planung und Fertigung eines neuen Isolators .....	46
<b>2 Fazit</b> .....	<b>47</b>
<b>Anhang A</b> .....	<b>51</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Planung zu Beginn des Projekts zum Projektablauf.....	8
Abbildung 2:	Vorhandener Prototyp Elektroabscheider zu Projektbeginn.....	11
Abbildung 3:	Modifizierter Prototyp mit neuer Abscheidestufe.....	11
Abbildung 4:	CAD-Modell der entworfenen Abscheidestufe, verschiedene Ansichten [Baum, 2016].....	13
Abbildung 5:	Neue Abscheidestufe mit neuartiger Abscheidefläche und Abreinigungsmechanismus: links: vor der Abreinigung, rechts: nach der Abreinigung.....	13
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des Feuerungsprüfstands mit mobiler Einheit für den Elektroabscheider.....	14
Abbildung 7:	Elektroabscheider in mobiler Einheit am Pelletofen - CAD-Ansicht.....	15
Abbildung 8:	Messtechnik für die Staubmessung; links: Planfilterkopfgerät für die Gesamtstaubmessung, rechts: Low Pressure Impaktor mit 13 Stufen für die Bestimmung der Korngrößenverteilung.....	17
Abbildung 9:	Veranschaulichung der umgesetzten Messstrategie mit Messgrößen und Analysen.....	19
Abbildung 10:	Im Versuchsprogramm eingesetzte Brennstoffe.....	20
Abbildung 11:	Strom-Spannungs-Kennlinie bei verschiedenen Temperaturen mit Umgebungsluft [Wolf, 2015].....	20
Abbildung 12:	Strom-Spannungs-Kennlinie (Charakteristik) bei verschiedenen Elektrodenabständen im Labor (dargestellt sind die Messpunkte und Kurven für den horizontalen Elektrodenabstand $d_x = 0, 5, 10$ mm) [Wolf, 2015].....	21
Abbildung 13:	Strom-Spannungs-Kennlinie bei kleinem Elektrodenabstand im Labor und bei vergrößertem Elektrodenabstand am Prüfstand (jeweils bei Umgebungsbedingungen).....	22
Abbildung 14:	Zusammenhang zwischen Verbrennungsbedingungen und entstehenden Partikelarten.....	24
Abbildung 15:	Planfilter der Gesamtstaubmessung - Partikelproben aus dem Abgas des untersuchten Pelletofens (links: Betrieb bei Luftmangel, mittig: Betrieb im optimalen Bereich, rechts: Betrieb bei zu hohem Luftüberschuss).....	25
Abbildung 16:	Zusammenhang zwischen Partikelkonzentration sowie Abscheidegrad und Luftüberschusszahl am untersuchten Pelletofen (abstrahierte Darstellung aus den gewonnenen Untersuchungsergebnissen).....	25
Abbildung 17:	Auszug der Kohlenstoffanalyse von Planfiltern aus dem Rohgas [TC = gesamter Kohlenstoff; TOC = organisch gebundener Kohlenstoff („Teere“), TEC = elementar gebundener Kohlenstoff („Ruß“), TIC = anorganisch gebundener Kohlenstoff (z. B. Carbonate)].....	26
Abbildung 18:	Messreihe „Lambda“: Partikelkonzentration im Rohgas als Gesamtstaub in $\text{mg}/\text{m}^3$ und Abscheidegrad in % aufgetragen über der Luftzahl Lambda.....	28

Abbildung 19:	Messreihe „Hochspannung“: Darstellung des Abscheidegrades über der eingebrachten elektrischen Leistung (Brennstoff: überwiegend Holzhackschnitzel) .....	30
Abbildung 20:	Messreihe „Hochspannung“: Planfilter der Gesamtstaubmessung: links Rohgas, rechts Reingas. ....	31
Abbildung 21:	Messreihe „Brennstoffvergleich“: Darstellung des Abscheidegrades über der eingebrachten elektrischen Leistung (HHS. Holzhackschnitzel, HoP: Holzpellets, HeuP: Heupellets) .....	32
Abbildung 22:	Messreihe „Brennstoffvergleich“: Beladung der einzelnen Impaktorstufen in mg über dem aerodynamischen Partikeldurchmesser (HHS. Holzhackschnitzel, HoP: Holzpellets, HeuP: Heupellets) .....	34
Abbildung 23:	Messreihe „Brennstoffvergleich“: Absolute Abscheidung in mg der einzelnen Impaktorstufen von Rohgas und Reingas über dem aerodynamischen Partikeldurchmesser (HHS. Holzhackschnitzel, HoP: Holzpellets, HeuP: Heupellets) .....	35
Abbildung 24:	Messreihe „Brennstoffvergleich“: Fraktionsabscheidegrade in % über dem aerodynamischen Partikeldurchmesser (HHS. Holzhackschnitzel, HoP: Holzpellets, HeuP: Heupellets) .....	35
Abbildung 25:	Entwurf eines Laborabscheiders mit Plasmastufe und zweifacher Abscheidestufe, unten: Modell für die Simulation [Dominiczak, 2016] .....	37
Abbildung 26:	Untersuchte Geometrien von Ein-/Auslass und Strömungskanal.....	38
Abbildung 27:	Strömungsbild als Ergebnisse der Parameterstudie mit verschiedenen Lochblenden (Gegenelektrode) .....	38
Abbildung 28:	3D-Grafik der Variante 5 des Laborabscheiders (Stand 12/2015).....	41
Abbildung 29:	3D-Grafik der abschließenden Version des Laborabscheiders .....	42
Abbildung 30:	Zielmärkte der PlasmaAir AG (Quelle: [Möller, 2016]) .....	43

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Arbeitsplan laut Projektantrag.....	8
Tabelle 2:	Arbeitsplan an Projektgegebenheiten angepasst.....	9
Tabelle 3:	Varianten des Elektroabscheider-Prototyps mit Modifikationen und Messreihenverwendung .....	10
Tabelle 4:	Auflistung der verwendeten Mess- und Hochspannungstechnik.....	16
Tabelle 5:	Messgrößen und ihre Bestimmung im Abgas, am Elektroabscheider und bei Laboranalysen .....	17
Tabelle 6	Übersicht über die angewendeten Laboranalysen zur Charakterisierung der Abgas-Staubproben .....	18
Tabelle 7:	Versuchsprogramm und Messreihen .....	19
Tabelle 8:	Ergebnisse der Messreihe „Lambda“ .....	23
Tabelle 9:	Ergebnisse der Kohlenstoffanalyse und der berechneten ** C/H- Verhältnisse für die untersuchten Staubfilter [nach Reitberger, 2016].....	27
Tabelle 10:	Ergebnisse der Ionenbestimmung für die untersuchten Staubfilter .....	28
Tabelle 11:	Ergebnisse der Messreihe „Hochspannung“ .....	29
Tabelle 12:	Ergebnisse der Messreihe „Brennstoffvergleich“ (HHS: Holzhackschnitzel, HoP: Holzpellets, HeuP: Heupellets) .....	32
Tabelle 13:	Ergebnisse der Impaktormessungen zur Messreihe „Brennstoffvergleich“.....	33
Tabelle 14:	Szenarienübersicht Deutschland (Quelle: [Möller, 2016]) .....	44
Tabelle 15:	Abscheidetechnologien [Ulbricht/Lenz, 2011] .....	45

## Zusammenfassung

Die erhöhten Feinstaubemissionen von Biomassefeuerungen im Geltungsbereich der 1. BImSchV stellen nach wie vor eine technische Herausforderung dar. Hier hat sich mittlerweile der Handlungsdruck erhöht, da seit 2015 die 2. Stufe der im Jahr 2010 novellierten 1. BImSchV für einige Anlagenbauarten greift.

Die in der Praxis erreichten Abscheideleistungen bei kleinen Elektrofiltern für Biomassefeuerungen liegen bisher deutlich unter den Prüfstandswerten und auch unter den grundsätzlichen Erwartungen an derartige Systeme. Je nach Verbrennungsbedingungen kommt es häufig zu massiven Schwankungen und auch immer wieder zu starken Einbrüchen der Abscheideleistung. Dies betrifft bisher durchweg sämtliche Konstruktionen bei den Klein-elektrofiltern. Die Zusammenhänge waren/sind hier noch ungeklärt, so dass ohne Erlangung von grundlegendem Wissen hierzu auch keine baldige Lösung zur Erreichung konstant hoher Staubabscheideleistungen und damit niedriger Emissionswerte zu erwarten ist.

Wesentlicher Projektinhalt war daher die Durchführung grundlegender Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Abscheideleistung, Partikelkonzentration und Partikeleigenschaften, wobei unterschiedliche Partikelkonzentrationen und -eigenschaften durch verschiedene Feuerungsbauarten und Verbrennungsbedingungen erhalten werden sollten.

Ein in Phase 1 gefertigter Laborabscheider und die Ergebnisse aus dieser 1. Projektphase dienten als Grundlage zur Durchführung dieses Projektes. Mit diesem Gerät wurden – teilweise mit bauseitigen Änderungen – verschiedene Untersuchungen durchgeführt.

Auf Basis der Ergebnisse aus diesen Messreihen wurde ein neuer Elektroabscheider entwickelt, konstruiert sowie entsprechende Fertigungszeichnungen für ein verbessertes Vorseiengerät erstellt.

Parallel zur technischen Entwicklung hat die PlasmaAir eine Marktstudie durchgeführt um das Potential des Produkts abschätzen zu können.

Es zeigt sich, dass im Bereich der dezentralen Kleifeuerungen für Haushalte zukünftig kein großes Marktvolumen zu erwarten ist.

Nach jetziger Gesetzeslage ist davon auszugehen, dass die in den letzten Jahren installierten Feuerungen die gesetzlichen Grenzwerte zumindest auf dem Teststand einhalten und daher die Nachrüstung eines Abscheiders nicht notwendig wird. Altanlagen, die die Grenzwerte nicht einhalten, werden eher durch neue ersetzt bzw. haben Bestandsschutz. Bei größeren Feuerungen wird zukünftig eher Bedarf gesehen.

## Einleitung

Feinstaub ist in aller Munde und leider auch in vielen Lungen. Gerade in den letzten Wochen und Monaten ist dieses Thema immer mehr in den Fokus der Presse geraten. Insbesondere in Stuttgart, in deren Umfeld die Projektpartner angesiedelt sind, ist das Thema sehr präsent. Neben dem Verkehr, Hauptemittent dieser bedenklichen Stäube, hat der Gesetzgeber auch die kleinen Feuerungsanlagen privater Haushalte ins Visier genommen. Insbesondere den Holzfeuerungen wird ein erheblicher Emissionsanteil nachgesagt.

Bereits seit 2010 arbeiten die PlasmaAir AG und das IFK, Universität Stuttgart zusammen an der Entwicklung eines Elektroabscheiders für Kleinfeuerungsanlagen.

In der ersten Zusammenarbeit im Rahmen eines ZIM-Projektes wurde ein Laborabscheider entwickelt, konstruiert und gebaut. In ersten Versuchen wurden die Leistungsfähigkeit des Modells und dessen Schwachstellen getestet.

Ziel des auf die Vorversuche folgenden Projektes, der Phase 1 des durch die DBU-geförderten Projektes, war es ein Labormodell zu bauen, das stabil lief und hohe Abscheidegrade erreichte. Dabei lag der Schwerpunkt auf folgenden Punkten:

- Optimierung der Abscheideeinheit
  - Ermittlung der idealen Form der Niederschlagsflächen (Ketten, Platten, etc.)
  - Strömungsführung
- Weiterentwicklung eines automatischen Abreinigungs- und Austragungssystems
- Beseitigung der Kriechstrom- und Überschlagsquellen

Durch das verbesserte Abscheidesystem konnte ein Abscheidegrad von bis zu 80% ermöglicht werden.

Die Ergebnisse dieser Versuche können dem Schlussbericht des Projektes „Entwicklung eines Elektroabscheiders für Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen – 1. Phase“ (29769 – 24/0) entnommen werden.

Der in Phase 1 gemessene Abscheidegrad konnte nicht kontinuierlich eingehalten werden. Schwankungen im Betrieb der Feuerungsstätte führten zu erheblichen Einbrüchen in der Abscheideleistung.

In eigenen durchgeführten Messungen an verschiedenen elektrostatischen Staubabscheidern und auch nach Literaturangaben zeigt der Abscheidegrad eine deutliche Abhängigkeit zur Eingangstaubkonzentration und sinkt mit zunehmender Staubkonzentration deutlich, was unerwünscht ist, da höhere Staubkonzentrationen effektiv gemindert werden sollten. Die Ursache für den sinkenden Abscheidegrad bei höheren Staubkonzentrationen ist bisher noch nicht geklärt. Einerseits könnte dies an einer Änderung der Staubeigenschaften liegen oder an der Zunahme der Partikel-Anzahlkonzentration bei hohen Staubkonzentrationen, ggf. an einer Kombination dieser beiden Möglichkeiten. Inwieweit hier noch eine Leistungssteigerung der Abscheider erreicht werden kann, war zu Beginn der Phase 2 nicht abschätzbar.

Diese Lücke zu schließen und grundlegendes Wissen über die Zusammenhänge zwischen Abscheideleistung, Verbrennungsbedingungen und Partikeleigenschaften zu erlangen war Motivation dieses Projekts. Die Ergebnisse sollten zur Steigerung der Abscheideleistung von Kleinelektrofiltern beitragen und den Stand der Technik insgesamt voranbringen.

---

Wesentlicher Projektinhalt stellten daher grundlegende Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Abscheideleistung, Partikelkonzentration und Partikeleigenschaften dar, wobei unterschiedliche Partikelkonzentrationen und -eigenschaften durch verschiedene Feuerungsbauarten und Verbrennungsbedingungen erhalten werden sollten.

# 1 Hauptteil

## 1.1 Arbeitsplan und Arbeitspakete

In Tabelle 1 ist der Arbeitsplan zum Zeitpunkt des Projektantrags dargestellt. Aufgrund von Verzögerungen bei der Bearbeitung musste das Vorhaben verlängert werden. Ein geänderter Arbeitsplan ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1: Arbeitsplan laut Projektantrag

AP	Beschreibung	AP-Leiter
1	Projektmanagement	IFK
2	Konstruktion und Bau eines flexiblen Laborabscheiders	PlasmaAir
3	Untersuchungen zum Zusammenhang Abscheideleistung, Partikeleigenschaften und -größenverteilung	IFK
4	Betrachtung der Strömungsführung	IFK
5	Entwicklung von grundlegenden Auslegungskriterien	IFK
6	Bericht und Dokumentation	PlasmaAir / IFK

Der Arbeitsplan wurde aus folgenden Gründen abgeändert:

Direkt zu Beginn des Projekts wurden die Konstruktion und der Bau eines Laborabscheiders (AP2) vertagt, da es als sinnvoller erachtet wurde, den Abscheider aus Phase 1 weiterzuverwenden und Erkenntnisse der Versuche in die Entwicklung des neuen Abscheiders einfließen zu lassen.

Da sich der Erkenntnisgewinn über einen sehr langen Zeitraum erstreckte, zog sich auch die Konstruktion eines Laborabscheiders in die Länge, so dass Fertigungszeichnungen erst im Projektmonat 20 fertiggestellt wurden. Rücksprachen mit potenziellen Fertigungsunternehmen zeigten, dass die geplanten Teile des Abscheiders nur schwer und nicht ohne Änderun-

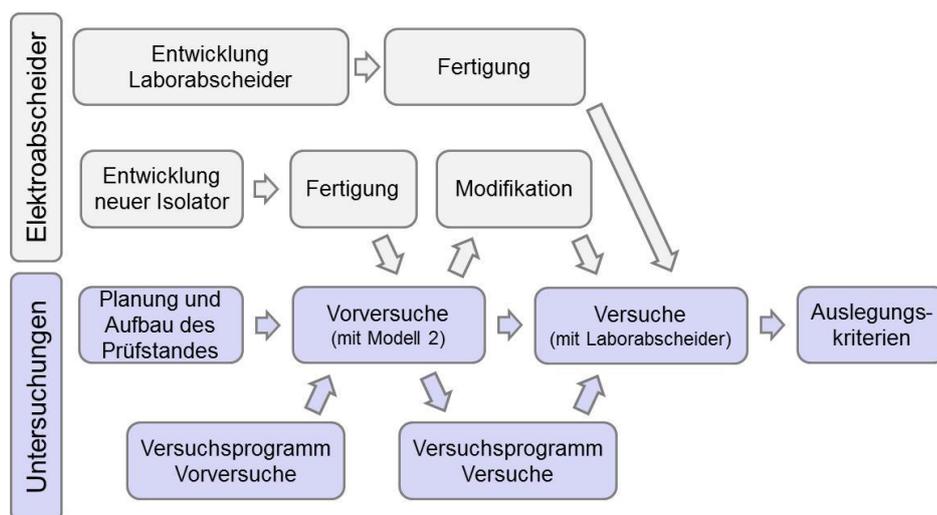


Abbildung 1: Planung zu Beginn des Projekts zum Projektablauf

gen zu fertigen wären. Lediglich ein Unternehmen wurde im August 2016 gefunden, welches bereit gewesen wäre sich weiter damit zu beschäftigen. Die Bereitschaft zur Fertigung hat keines der angefragten Fertigungsunternehmen signalisiert.

Die Fertigung eines Laborabscheiders hätte – nicht nur aufgrund der Urlaubszeit – mehr als 6 Wochen Zeit in Anspruch genommen und war zu diesem Zeitpunkt auch nur noch für eine 3. Projektphase sinnvoll. Sollte es eine 3. Projektphase geben, so liegt der Entwurf eines modifizierten Abscheiders mit CAD-Konstruktion vor. Ergebnisse der letzten Versuchsreihen am IFK könnten ggf. zusätzlich Berücksichtigung finden.

Die Erstellung einer Marktstudie war im Rahmen dieses Projektes nicht geplant. Eine solche Studie wurde seitens PlasmaAir jedoch außerhalb dieses Projektes durchgeführt. Da PlasmaAir die Ergebnisse als relevant für dieses Projekt einstuft, werden diese in diesem Bericht ebenfalls dargestellt (siehe Kapitel 1.6).

Auftretende Probleme führten zu bauseitigen Änderungen des Laborabscheiders. Diese werden in Kapitel 1.7 näher erläutert.

Tabelle 2: Arbeitsplan an Projektgegebenheiten angepasst

AP	Beschreibung	AP-Leiter
1	Projektmanagement	IFK / PlasmaAir
2	verschoben in AP5 bzw. Phase 3	PlasmaAir
3	Untersuchungen zum Zusammenhang Abscheideleistung, Partikeleigenschaften und -größenverteilung	IFK
4	Betrachtung der Strömungsführung	IFK
5	Entwicklung von grundlegenden Auslegungskriterien und Konstruktion eines flexiblen Laborabscheiders	IFK / PlasmaAir
6	Bericht und Dokumentation	PlasmaAir / IFK
X	Marktstudie (nicht Teil des Vorhabens)	PlasmaAir
Y	Bauseitige Änderungen (Reaktion auf auftretende Probleme)	IFK / PlasmaAir

## 1.2 AP 2: Konstruktion und Bau eines flexiblen Laborabscheiders

In AP 2 waren – aufbauend auf Phase 1 – der Entwurf und die Fertigung eines flexiblen Laborabscheiders geplant. Mit diesem sollten die Untersuchungen zu den grundlegenden Zusammenhängen in AP 3 durchgeführt werden.

### 1.2.1 Konstruktion eines flexiblen Laborabscheiders

Die Konstruktion eines neuen Laborabscheiders wurde vertagt, da es als sinnvoller erachtet wurde, den Abscheider aus Phase 1 weiterzuverwenden und Erkenntnisse der Versuche in die Entwicklung des neuen Abscheiders einfließen zu lassen. Die Untersuchungen aus AP 3 sollten somit mit dem Laborabscheider aus Phase 1 (teilweise mit möglichen bauseitigen Modifikationen) durchgeführt werden. Die geplanten Arbeiten aus diesem AP wurden somit hauptsächlich in AP 5 verlagert.

### 1.2.2 Bau eines flexiblen Laborabscheiders

Der Bau eines weiteren Laborabscheiders wurde aus den in Kapitel 1.1 genannten Gründen in Projektphase 3 verschoben.

### 1.3 AP 3: Untersuchungen Abscheideleistung und Partikel

Hauptanliegen der Versuche war es, Feuerungsabgase mit Partikeln mit möglichst unterschiedlichen Eigenschaften zu generieren und dessen Auswirkung auf das Betriebsverhalten des Elektroabscheiders zu untersuchen.

Für diese grundlegenden Untersuchungen war eine besondere Messstrategie erforderlich, die nachfolgend beschrieben wird. Ebenfalls erfolgen die Beschreibung des verwendeten Elektroabscheider-Prototyps mit Modifikationen und die Erläuterung von Prüfständen, Messgrößen, Messtechnik, Messreihen und Ergebnissen.

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere studentische Arbeiten aus unterschiedlichen Bereichen wie Versuchsdurchführung, Laboranalysen, Strömungssimulation und Konstruktion durchgeführt. Sie sind an den entsprechenden Stellen im Text als Literaturhinweise gekennzeichnet.

#### 1.3.1 Prototyp Elektroabscheider

Für die Versuche wurde ein vorhandener Prototyp aus einem gemeinsamen vorangegangenen Projekt verwendet (DBU-Projekt Az. 29769). Im Laufe des Projektes wurde dieser im Rahmen der Versuche und Messreihen teilweise modifiziert.

Welche Variante für welche Messreihe verwendet wurde, zeigt Tabelle 3.

Wesentliche Bestandteile des Elektroabscheiders sind die Plasmastufe, die mit Sprüh- und Gegenelektrode für die Aufladung der Partikel sorgt, und die Abscheidestufe, welche die Abscheidefläche zum Niederschlag der Partikel enthält. Periodisch müssen die Niederschlagsflächen vom abgeschiedenen Staub gereinigt werden. Dies erfolgte bisher manuell.

Tabelle 3: Varianten des Elektroabscheider-Prototyps mit Modifikationen und Messreihenverwendung

Elektrodenabstand	Isolator	Abscheidestufe	Messreihe	Feuerung	Messgrößen
5 - 6 mm	Modell 2	ohne	Labor Kennlinien	keine (Labor, kalt)	Spannung, Strom
18 - 20 mm	Modell 2	Ketten	Variation Luftzufuhr "Lambda"	Pelletofen	Gesamtstaub, Laboranalysen
18 - 20 mm	Modell 2	Schnecke mit Bürste	Vorversuche Impaktor	Pelletofen, Hackgutkessel	Gesamtstaub, Korngrößenverteilung
18 - 20 mm	Modell 3	Schnecke mit Bürste	Variation Hochspannung	Hackgutkessel	Gesamtstaub
18 - 20 mm	Modell 3	Schnecke mit Bürste	Variation Brennstoff	Hackgutkessel	Gesamtstaub, Korngrößenverteilung

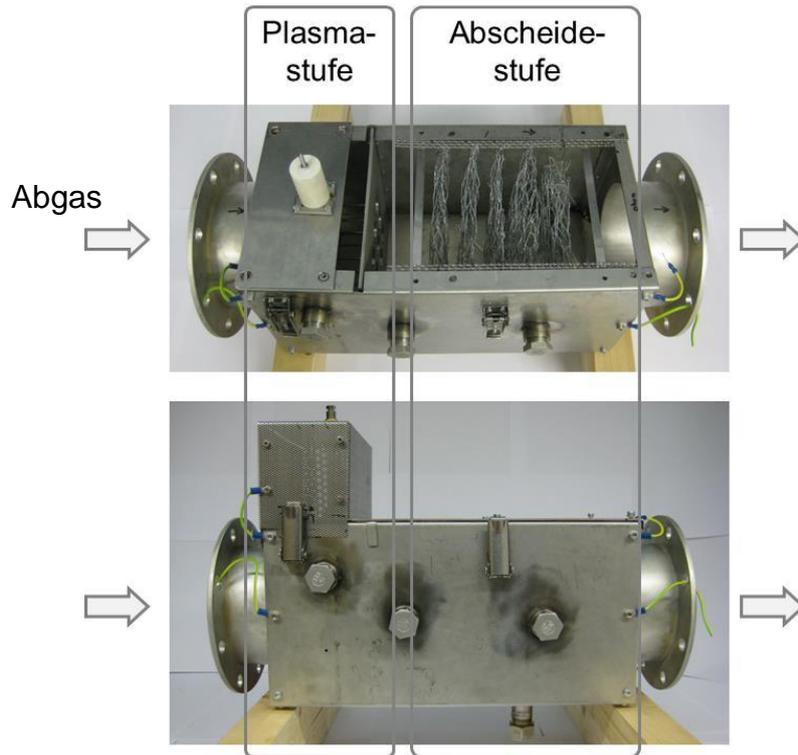


Abbildung 2: Vorhandener Prototyp Elektroabscheider zu Projektbeginn

Abbildung 2 zeigt den verwendeten Prototypen des Elektroabscheiders, wie er zu Projektbeginn zur Verfügung stand. Eine der wesentlichen Umbaumaßnahmen am Abscheider ist der Anbau einer neuen Abscheidestufe. Der bisherige Abscheideinsatz wird entnommen, und die neue Abscheidestufe an das alte Gehäuse mit bleibender Plasmastufe direkt dahinter montiert, siehe Abbildung 3. Details zur Modifikation sind im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

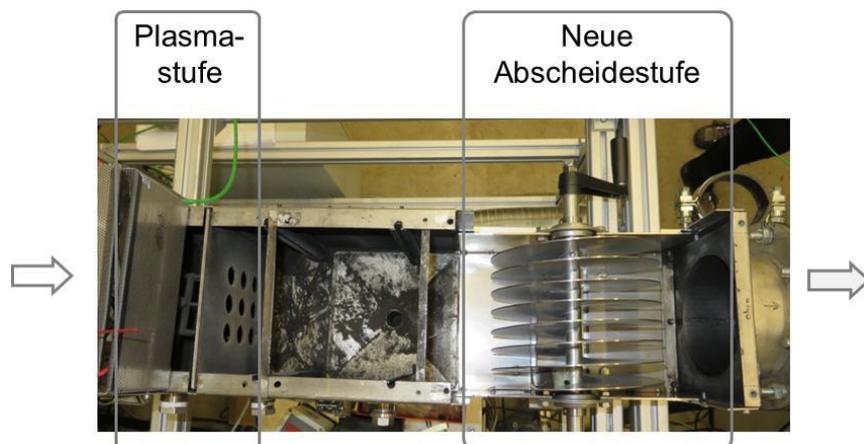


Abbildung 3: Modifizierter Prototyp mit neuer Abscheidestufe

### 1.3.2 Modifikationen am Prototypen

Im Verlauf der durchgeführten Versuche wurden am Prototyp einige Modifikationen vorgenommen, die nachfolgend beschrieben sind.

#### *Änderung des Elektrodenabstands*

Zu Beginn des Projekts wurden im Labor mit Umgebungsluft verschiedene Parameter als Einflussgrößen auf die Strom-Spannungs-Kennlinie untersucht [Wolf, 2015]. Ausgehend davon und auf Basis einer Literatur-Recherche bezüglich der Thematik des Strom-Spannungs-Verlaufs wurde entschieden, den ursprünglichen Elektrodenabstand der Konstruktion deutlich zu vergrößern, um eine höhere Betriebsspannung erreichen zu können. Auf diese Weise konnte die Betriebsspannung bei üblichen Abgasbedingungen von vorher etwa 5 kV auf später 9 bis 10 kV erhöht werden.

Bereits auf dem Markt befindliche oder weit entwickelte Kleinelektroabscheider für Biomassefeuerungen im Geltungsbereich der 1. BImSchV werden im Regelbetrieb allerdings durchweg oberhalb von 15 kV betrieben. Derart hohe Spannungen können mit dem vorhandenen bzw. modifizierten Prototyp allerdings nicht realisiert werden. Hierzu ist auch ein leistungsstärkeres Modell eines Hochspannungsnetzteils notwendig. Dazu müsste auch der Elektrodenabstand weiter vergrößert werden (Bereich 25 - 30 mm), was mit dem zur Verfügung stehenden Prototyp nicht möglich war, das Maximum war hier mit 18 - 20 mm Abstand erreicht.

#### *Neue Abscheidefläche mit Abreinigungsmechanismus*

Die Abscheidestufe ist, neben der Ionisationsstufe, ein wesentlicher Bestandteil des Abscheiders. Sie enthält die für die Partikelabscheidung notwendigen Abscheideflächen. Diese können klassisch z. B. als Platten ausgebildet sein, oder auch andere Formen annehmen. Wichtig dabei für eine gute Partikelabscheidung trotz kompakter Bauweise sind eine große Oberfläche und eine gute Kontaktwirkung zum partikelbeladenen Gasstrom. Je nach Bauform der Flächen gestalten sich dann die Anforderungen an einen Abreinigungsmechanismus dieser Flächen.

Zur Unterstützung der Konstruktion einer neuen Abscheidefläche mit Abreinigungsmechanismus für den Laborabscheider wurde eine systematische Konstruktionsstudie durchgeführt, in deren Rahmen eine Anforderungsliste erstellt und darauf aufbauend verschiedene Varianten entworfen und eine Variante gebaut wurden [Baum, 2016]. Ausgangspunkt für die Konstruktionsstudie war der vorhandene Prototyp des Elektroabscheiders.

Die vielversprechendste Variante einer neuen Abscheidestufe mit Abreinigungsmöglichkeit wurde gefertigt und am vorhandenen Prototyp als Anbau montiert. Es handelt sich um spiralförmig angeordnete Flächen, die mit Hilfe einer Bürste abgereinigt werden können. Dies erfolgt im jetzigen Stadium mittels Betätigen einer Handkurbel, kann jedoch in einem späteren Entwicklungsschritt auch automatisiert über einen Motor erfolgen. Das CAD-Modell der realisierten Abscheidestufe ist in Abbildung 4 dargestellt.

Die Konstruktion wurde im Rahmen von Vorversuchen beim Einsatz des Elektroabscheiders an einem Pelletofen getestet. Da sie nach einigen Anpassungen gut funktionierte (siehe Abbildung 5), wurde sie auch in späteren Messreihen eingesetzt.

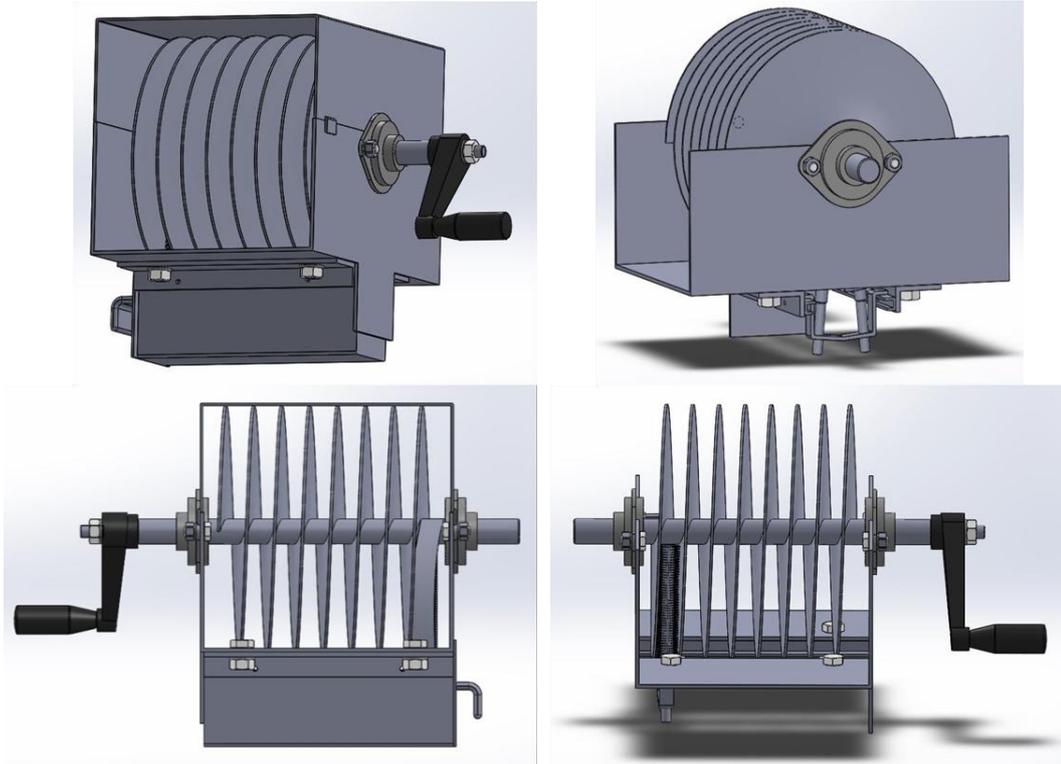


Abbildung 4: CAD-Modell der entworfenen Abscheidestufe, verschiedene Ansichten [Baum, 2016]

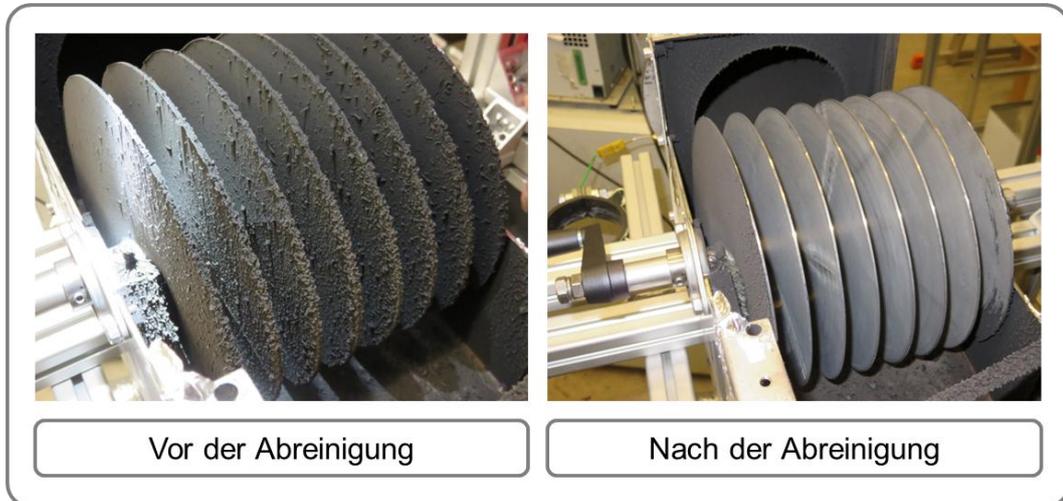


Abbildung 5: Neue Abscheidestufe mit neuartiger Abscheidefläche und Abreinigungsmechanismus: links: vor der Abreinigung, rechts: nach der Abreinigung

#### Neuer Isolator

Da der verwendete Isolator („Modell 2“), welcher im vorangegangenen Projekt (DBU-Projekt Az. 29769) entwickelt wurde, im Laufe der Versuche ausfiel, wurde ein neuer Isolator („Modell 3“) benötigt. Dieser wurde so entworfen, dass er sowohl in den aktuell verwendeten Elektroabscheider-Prototypen passt, als auch in einem neuen geplanten Laborabscheider verwendet werden kann.

Da es sich beim Einsatzgebiet um Abgas handelt, kommen Kunststoffe für diesen Temperaturbereich nicht in Frage, sondern es werden keramische Werkstoffe verwendet. Deren Fertigung und Bearbeitung setzt entsprechendes Fachwissen und Ausstattung voraus, vor allem wenn es sich um den Verbund von verschiedenen Materialien, wie hier Keramik und Metall, handelt. Daher erfolgt der Entwurf dieses komplexen Bauteils in Zusammenarbeit mit einem entsprechenden Fachbetrieb, der dann auch als Auftrag die Fertigung des neuen Isolators übernahm.

### 1.3.3 Prüfstand

Die Versuche erfolgten an verschiedenen Feuerungsprüfständen im Technikum des IFK. Für den Elektroabscheider wurde eigens eine mobile Einheit mit separatem Fördergebläse aufgebaut, damit der Wechsel von einem zum anderen Prüfstand leicht erfolgen kann. Diese mobile Einheit ist so aufgebaut, dass ein definierter Teilvolumenstrom des von der Feuerung produzierten Abgases entnommen und durch den Elektroabscheider geleitet wird. Ferner sind die jeweiligen Messstrecken für Roh- und Reingasmessungen an der Einheit untergebracht. Durch die Mobilität und Unabhängigkeit der Einheit können Versuche an verschiedenen Staubquellen ohne größere Umbaumaßnahmen realisiert werden.

Der Feuerungsprüfstand mit Feuerung, Messstellen und Abscheider ist in Abbildung 6 skizziert.

Abbildung 7 zeigt die CAD-Ansicht des Prüfstandsbaus, wie er z. B. am Pelletofen-Prüfstand realisiert wurde.

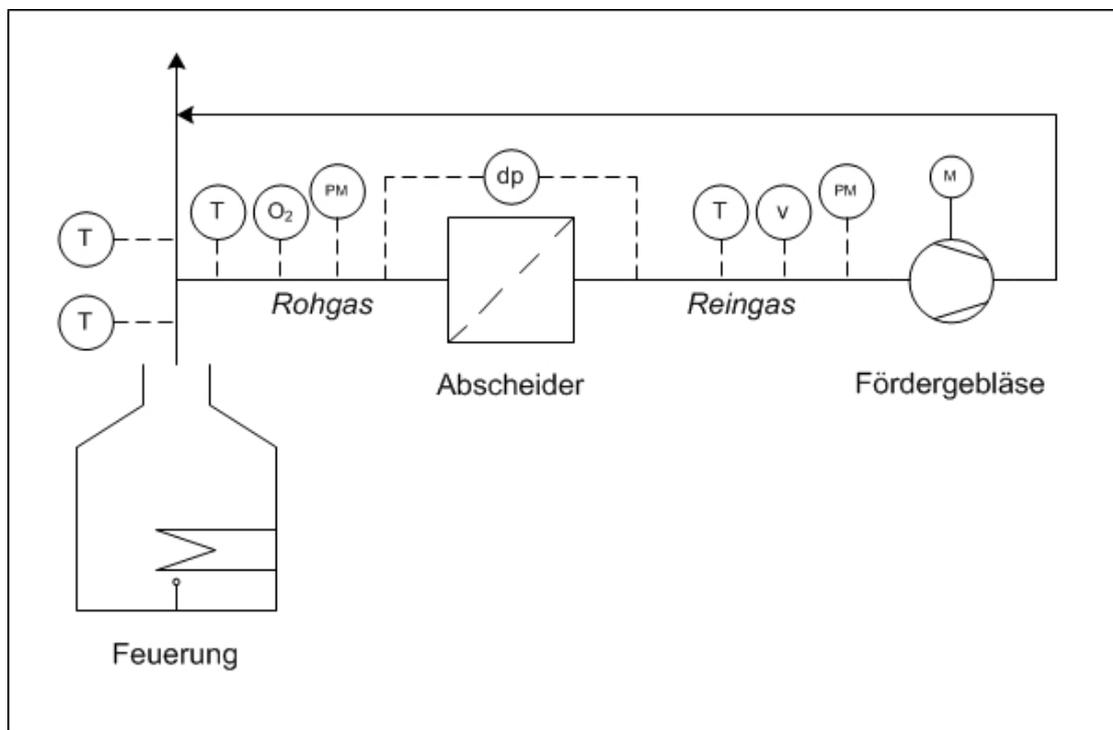


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Feuerungsprüfstands mit mobiler Einheit für den Elektroabscheider

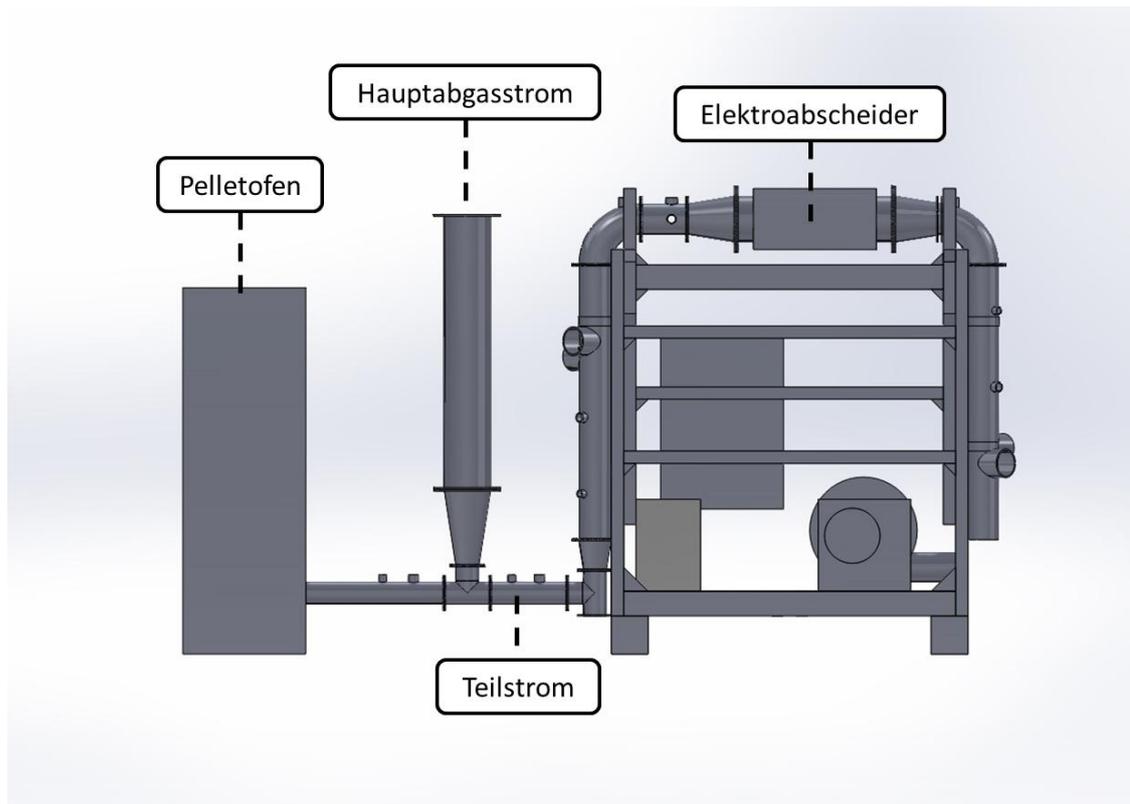


Abbildung 7: Elektroabscheider in mobiler Einheit am Pelletofen - CAD-Ansicht

Die Datenerfassung erfolgt über diverse Messmodule, deren Signale in der Software LabVIEW am Prüfstand erfasst und gespeichert werden. Spezielle Datenausgänge zur Regelung und Vorgabe von Sollwerten werden ebenfalls dort umgesetzt, wie z. B. die Regelung des Fördergebläses oder die Steuerung von Luft- und Brennstoffzufuhr des Pelletofens. Das Programm wurde speziell für die Versuche mit Elektrofilter erweitert

#### 1.3.4 Messtechnik

Zur Charakterisierung der Abgasbedingungen wird neben verschiedenen Temperaturen die Gaszusammensetzung kontinuierlich gemessen. Die Messgrößen sind hier die Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxid-Konzentration. Ferner wird die Konzentration an flüchtigen organischen Verbindungen (Kohlenwasserstoffe) gemessen.

Die Kenn- und Regelgrößen des Elektroabscheiders - Spannung und Strom - werden ebenfalls erfasst. Die Vorgabe des Sollwertes für die Hochspannung und ein maximal zulässiger Stromfluss werden über die Software an das Hochspannungsgerät weiter gegeben.

Die Staubmessungen erfolgten hauptsächlich diskontinuierlich mittels Planfilterkopfggeräten nach VDI 2066 Blatt 1 [VDI, 2006] in Verbindung mit der VDI 4206 Blatt 2 [VDI, 2015]. Es erfolgen parallele Messungen zur Einzelbestimmung der Gesamtstaubkonzentration im Rohgas und im Reingas und anschließenden Berechnung des Abscheidegrads. Teilweise erfolgen Messungen mit dem Online-Schornsteinfegermessgerät Wöhler SM500, wobei dies hauptsächlich für Vorversuche eingesetzt wurde.

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgt mit einem Low Pressure Impactor mit 13 Stufen nach VDI 2066 Blatt 5 [VDI, 1994]. Da diese Messung sehr aufwendig ist, erfolgt der

Einsatz des Impaktors nur punktuell. Die Messung von Rohgas und Reingas erfolgt nicht zeitgleich wie bei der Gesamtstaubmessung, so dass der Abscheidegrad nur seriell ermittelt werden kann. Daher wird eine spezielle Messstrategie umgesetzt, die im nachfolgenden Abschnitt erläutert wird.

Während einer Messung mit dem Impaktor wird zeitgleich die Gesamtstaubkonzentration, jeweils in Rohgas und in Reingas, im gleichen Messintervall gemessen

Tabelle 4: Auflistung der verwendeten Mess- und Hochspannungstechnik

Messgröße	Kürzel	Einheit	Messgerät	Messprinzip	Messbereich
Gastemperatur	Temp	°C	NiCr-Ni Thermoelemente	Thermospannung	
Sauerstoff-Konzentration	O <sub>2</sub>	Vol.-%	Emerson NGA 2000	Paramagnetismus	0...25 %
Kohlendioxid-Konzentration	CO <sub>2</sub>	Vol.-%	Emerson NGA 2000	Nicht dispersive Infrarot-Absorption	0...20 %
Kohlenmonoxid-Konzentration	CO	ppm	Emerson NGA 2000	Nicht dispersive Infrarot-Absorption	0...1000 ppm
Kohlenmonoxid-Konzentration	CO	Vol.-%	Emerson NGA 2000	Nicht dispersive Infrarot-Absorption	0...1 %
Flüchtige Kohlenwasserstoffe	VOC	ppm	Testa FID 123	Flammenionisation	0...1000 ppm
Elektrische Spannung	U	kV	Hochspannungs- gerät MMR-SP- 120N16-7.5m-P (REMO-HSE)		0...16 kV
Elektrischer Strom	I	mA	Hochspannungs- gerät MMR-SP- 120N16-7.5m-P (REMO-HSE)		0...3 mA
Gesamtstaub	c	mg/m <sup>3</sup>	Planfilterkopfgerät 50mm	Gravimetrisch nach VDI 2066-1 und nach VDI 4206-2	
Gesamtstaub	c	mg/m <sup>3</sup>	Wöhler SM500	Gravimetrisch, nach VDI 4206-2	
Korngrößen- verteilung	-	mg	Impaktor Dekati D-LPI	Impaktion nach VDI 2066-5	

### 1.3.1 Entwicklung einer Messstrategie

Für die Durchführung der Versuche steht nur ein Impaktor zur Verfügung, weshalb hier keine zeitgleichen Messungen für Rohgas und Reingas umgesetzt werden können. Daher wird auf eine Vorgehensweise mit zeitlich gestaffelten Messungen zurückgegriffen. Das wird als serielle Messung bezeichnet. Soweit möglich, werden die anderen Messgrößen zeitgleich bestimmt, was als parallele Messung bezeichnet wird.

Abbildung Mess-  
nik für



Planfilterkopfgeräte für die  
Gesamtstaubmessung

Low Pressure Impaktor mit 13  
Stufen für die Korngrößenverteilung

bil-  
8:  
tech-  
die

Staubmessung; links: Planfilterkopfgerät für die Gesamtstaubmessung, rechts: Low Pressure Impaktor mit 13 Stufen für die Bestimmung der Korngrößenverteilung

Die Durchführung der seriellen Messungen hat den Vorteil, dass für die Durchführung von Laboranalysen mehrere Partikelproben auf Planfiltern der Gesamtstaubmessung vorliegen. Die sonst sehr geringe Probenmenge erhöht sich dadurch etwas und es können zum Teil ganze Planfilter für die Analysen verwendet werden, und nur die Planfilter zur Kationen- und Chlor-Analyse müssen mittig zerschnitten werden.

Eine Übersicht über die Messgrößen und ihre Bestimmung gibt die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 5: Messgrößen und ihre Bestimmung im Abgas, am Elektroabscheider und bei Laboranalysen

Messgröße		Bestimmung	
Abgas	Gaszusammensetzung	kontinuerlich	parallel
	Temperaturen	kontinuerlich	parallel
	Gesamtstaub	diskontinuerlich	parallel
	Korngrößenverteilung	diskontinuerlich	seriell
Abscheider	Spannung Sollwert	kontinuerlich	parallel
	Spannung Istwert	kontinuerlich	parallel
	Strom Istwert	kontinuerlich	parallel
Analysen	TC/TIC/TEC/TOC	diskontinuerlich	seriell
	Kationen-Analyse	diskontinuerlich	seriell
	Chlor-Analyse	diskontinuerlich	seriell

Das Hauptproblem bei einer Messstrategie mit seriellen Messungen besteht darin, den Ausgangszustand vergleichbar zu gestalten. Um eine vergleichbare Basis für die Messungen zu schaffen, werden jeweils die beiden Einzelmessungen der seriellen Messung bei gleichen Einstellungen und möglichst zeitnah nacheinander durchgeführt. Um diese Bedingungen zu kontrollieren, werden dann sämtliche parallel gemessene Größen herangezogen.

Sind die parallel gemessenen Größen ähnlich genug zueinander, kann auch davon ausgegangen werden, dass die seriell gemessenen Größen mit einer ausreichenden Sicherheit miteinander verglichen werden können, siehe hierzu auch Abbildung 9.

Dabei wird für jeden interessierenden Versuchspunkt der verschiedenen Messreihen eine Einstellung gewählt. Dies kann z. B. die Luftzufuhr betreffen oder auch die Brennstoffwahl. Davon ausgehend entsteht ein bestimmter Verbrennungszustand in der Feuerung, der gewisse Bedingungen im Abgas nach sich zieht. Das Abgas stellt den unmittelbaren Input des Elektroabscheiders dar, und beeinflusst daher auch sein Verhalten. Soll dieses Verhalten untersucht werden, muss eben dieser Abgaszustand erfasst werden, so dass er für eine spätere Auswertung herangezogen werden kann. Dies gilt ebenso für den Abscheider selbst, auch dessen Kenngrößen müssen für die Vergleichbarkeit herangezogen werden.

So entsteht pro „Einstellung“ - also Versuchs-Variante - ein Daten-Paar aus zwei einzelnen Messungen, die dann miteinander verglichen werden können und für die weitere Auswertung und Interpretation zur Untersuchung der Zusammenhänge zur Verfügung stehen.

### 1.3.1 Laboranalysen

In Tabelle 6 sind die in dem Projekt angewendeten Laboranalysen und die Messgrößen aufgelistet [Reitberger, 2016]. Neben Chlor und einigen Hauptelementen der Brennstoffaschen sollten bei den Analysen der Staubproben im Wesentlichen die Gehalte an Kohlenstoff, auch unterschieden nach organischem, elementarem und anorganischem Kohlenstoff bestimmt werden.

Tabelle 6 Übersicht über die angewendeten Laboranalysen zur Charakterisierung der Abgas-Staubproben

Laboranalyse	Analysemethode	Messgröße
Kohlenstoffanalyse	DIN 19539 – E Untersuchung von Feststoffen - Temperaturabhängige Differenzierung des organischen, elementaren und anorganischen Kohlenstoffgehaltes	TC Gehalt an Gesamt-Kohlenstoff
		<i>davon TOC</i> Gehalt an organischem Kohlenstoff
		<i>davon EC</i> Gehalt an elementarem Kohlenstoff
		<i>davon TIC</i> Gehalt an anorganischem Kohlenstoff
Hauptelemente	DIN 51729-11 Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Brennstoffasche; Teil 11 Bestimmung mit ICP-OES	K <sub>2</sub> O, CaO, SO <sub>3</sub> Gehalt an unterschiedlichen Oxiden, z.B. Kaliumoxid, Kalziumoxid, Schwefeloxid und andere
Chlorid	DIN EN ISO 10304 Bestimmung der gelösten Anionen mittels Ionenchromatographie; Teil 1 Gering belastete Wässer	Cl Gehalt an wasserlöslichem Chlorid nach Aufschluss der Probe

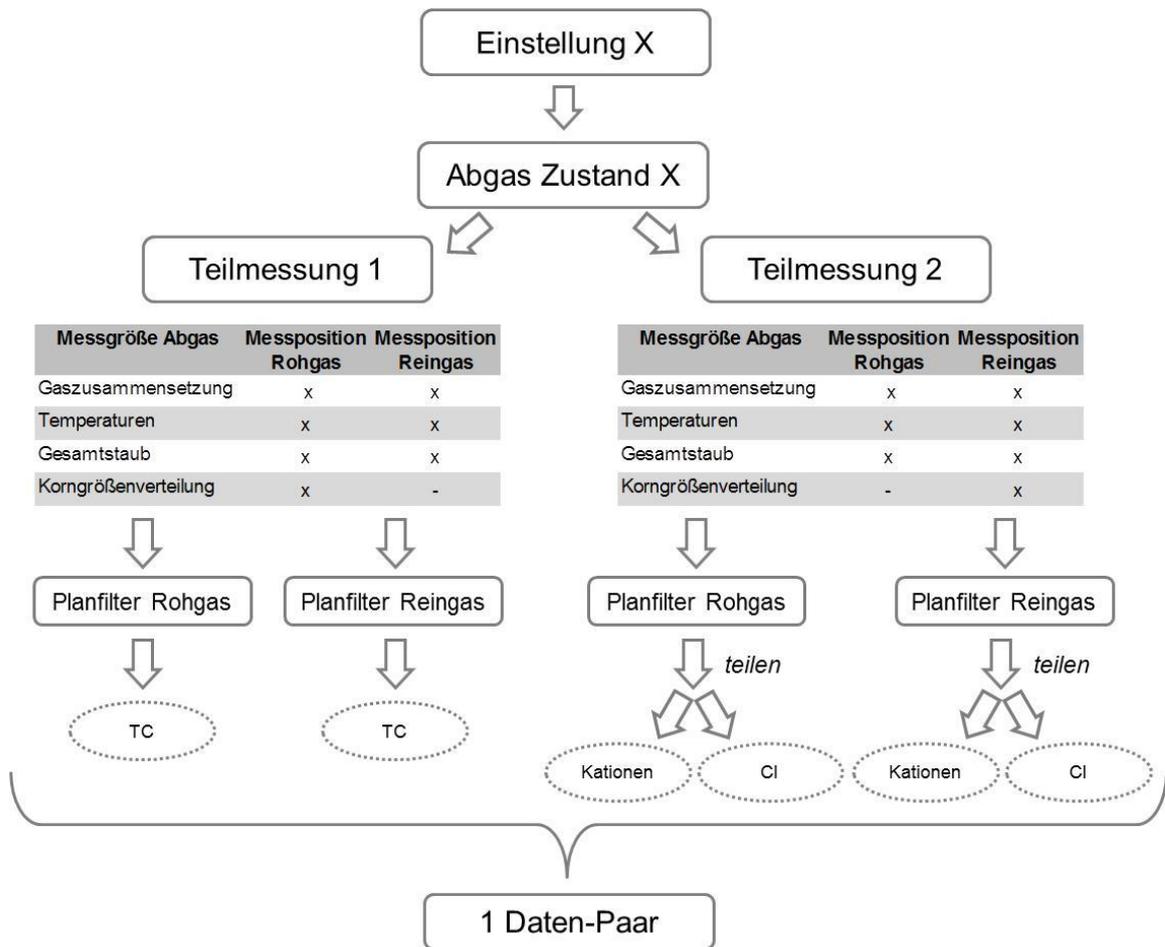


Abbildung 9: Veranschaulichung der umgesetzten Messstrategie mit Messgrößen und Analysen

### 1.3.2 Versuchsprogramm

Die im Versuchsprogramm durchgeführten Messreihen, die hierbei untersuchten Parameter und Haupt-Messgrößen, die verwendete Abscheidereinheit und die eingesetzte Feuerung mit Brennstoff zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Versuchsprogramm und Messreihen

Messreihe	Parameter	Abscheidereinheit	Feuerung	Brennstoff	Haupt-Messgrößen
Labor Kennlinien	Variation Elektrodenabstand	ohne	keine (Labor, kalt)	ohne	Spannung, Strom
"Lambda"	Variation Luftzufuhr	Ketten	Pelletofen	Holzpellets	Gesamtstaub Rohgas und Reingas
"Brennstoffeinfluss"	Variation Brennstoff	Schnecke mit Bürste	Hackgutkessel	Holzpellets, Hackschnitzel, Pelletmischung	Gesamtstaub, Korngrößenverteilung
"Spannung"	Variation Spannung	Schnecke mit Bürste	Hackgutkessel	Hackschnitzel	Gesamtstaub Rohgas und Reingas

In Abbildung 10 sind die eingesetzten Brennstoffe (Holzpellets und Holz hackschnitzel) sowie die Brennstoffmischung aus Holzpellets und Heupellets gezeigt.



Abbildung 10: Im Versuchsprogramm eingesetzte Brennstoffe

### 1.3.3 Messreihe „Labor“

Zu Beginn des Projekts werden als grundlegende Untersuchung zur Charakterisierung der Elektroden der Plasmastufe Strom-Spannungs-Kennlinien unter verschiedenen Parametervariationen zum Einfluss von Elektrodenanzahl, Elektrodenabstand, Elektrodenform und Temperatur durchgeführt. Als sehr wichtige Einflussgröße ist in Abbildung 11 die Strom-Spannungs-Charakteristik in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt.

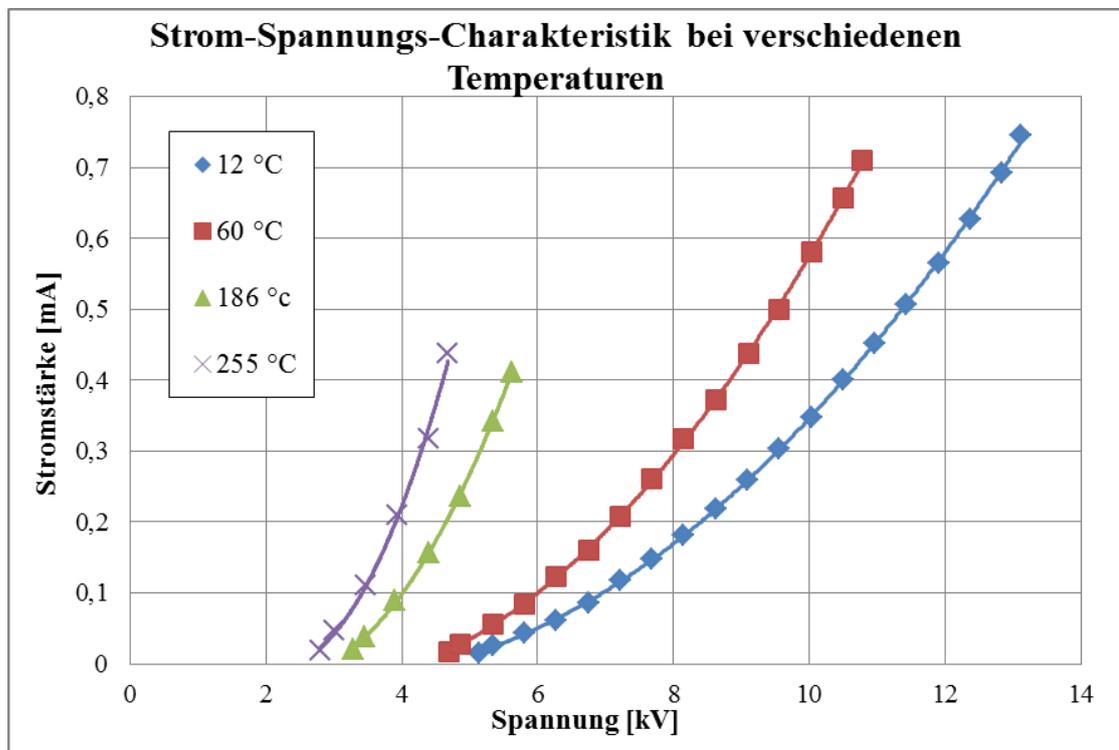


Abbildung 11: Strom-Spannungs-Kennlinie bei verschiedenen Temperaturen mit Umgebungsluft [Wolf, 2015]

Diese Untersuchungen liefern Erkenntnisse zum Betriebsbereich des Abscheiders und weitere wichtige Informationen z. B. für ein Regelkonzept zur Erhöhung der Abscheideleistung, im Sinne einer Vorhersagbarkeit bzw. Schätzung des Arbeitsbereiches der Hochspannung und der Durchbruchspannung unter Berücksichtigung der aktuellen Abgastemperatur.

Als weitere wichtige Größe ist in Abbildung 12 der Einfluss des Elektrodenabstands dargestellt. Um, im Vergleich zum Ausgangsprototyp des Elektroabscheiders, im Betrieb höhere Spannungen und elektrische Leistungen erreichen zu können, muss der Elektrodenabstand deutlich vergrößert werden. Im verwendeten Modell kann als Maximum ein horizontaler Abstand von ca. 18 - 20 mm umgesetzt werden. So kann die Betriebsspannung für die Versuche von bisher 5 kV auf etwa 9 - 10 kV erhöht und damit die eingebrachte elektrische Leistung etwas erhöht werden, siehe auch Abbildung 13.

Für einen neuen Laborabscheider sollte der horizontale Elektrodenabstand dann in Richtung 30 mm erhöht werden. Um Spannungen über 15 kV einstellen zu können, ist allerdings dann auch der Einsatz eines leistungsstärkeren Hochspannungsnetzteils notwendig.

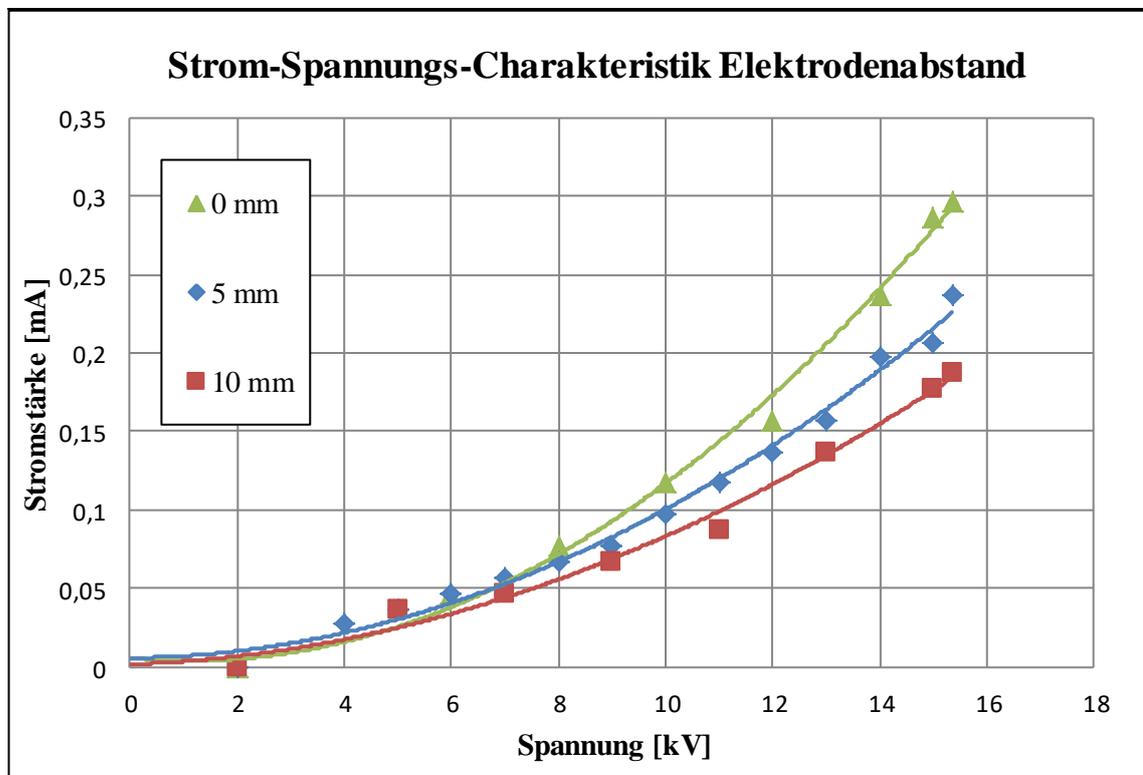


Abbildung 12: Strom-Spannungs-Kennlinie (Charakteristik) bei verschiedenen Elektrodenabständen im Labor (dargestellt sind die Messpunkte und Kurven für den horizontalen Elektrodenabstand  $d_x = 0, 5, 10$  mm) [Wolf, 2015]

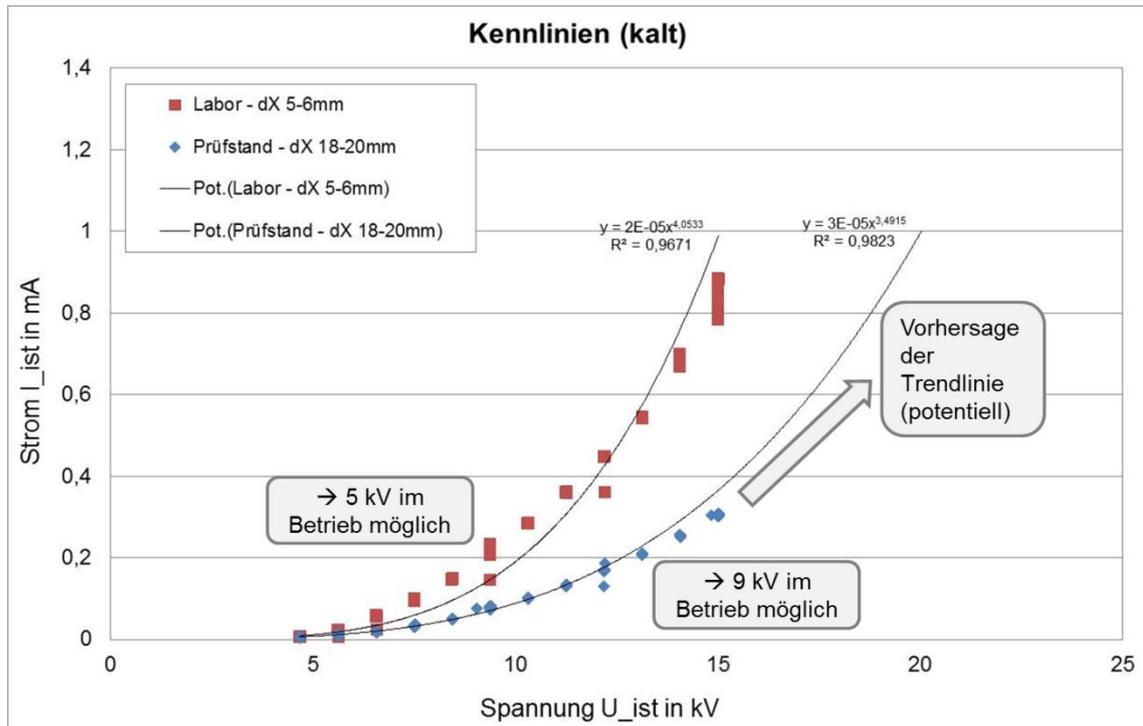


Abbildung 13: Strom-Spannungs-Kennlinie bei kleinem Elektrodenabstand im Labor und bei vergrößertem Elektrodenabstand am Prüfstand (jeweils bei Umgebungsbedingungen)

### 1.3.4 Messreihe „Lambda“

Zur Untersuchung des Einflusses des Luftüberschusses auf die Verbrennungsqualität und damit die Partikeleigenschaften sowie auf das Abscheideverhalten des Elektroabscheiders wurden Versuche an einem Pelletofen Buderus Blueline mit einer Nennwärmeleistung von 7,6 kW durchgeführt. Als Brennstoff wurden ausschließlich handelsübliche Holzpellets eingesetzt.

Definition der Luftüberschusszahl  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{m_{\text{Luft,IST}}}{m_{\text{Luft,STÖCH}}}$$

$m_{\text{Luft,IST}}$  : tatsächlich zur Verfügung stehende Luftmasse

$m_{\text{Luft,STÖCH}}$  : stöchiometrisch erforderliche Luftmasse

Bei Verbrennungsmotoren gilt  $\lambda = 1$  als ideal, da hier eine vollständige Verbrennung vorliegt. Darunter spricht man von einem Luftmangel, darüber von einem Luftüberschuss.

Im Falle der Verbrennung bei Kleinf Feuerungsanlagen stellt sich das jedoch anders dar, da hier der Einfluss der Luft auf die Bildung der Partikel untersucht wurde. Eine vollständige Verbrennung kann in solchen Anlagen nicht unter normalen Bedingungen erreicht werden, da die Feuerung in der Regel nicht wie bei Verbrennungsmotoren mit einem flüssigen / gasförmigen Brennstoff erfolgt, sondern mit festen Brennstoffen.

Die Ergebnisse der Messreihe „Lambda“ sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Versuch Nummer	Feuerung (Pelletofen)						Abgaszustand Rohgas										Abgaszustand Reingas						ESP					
	Leistung (Schnecke) Soll-Wert [%]	Leistung (Schnecke) Ist-Wert [%]	Luftfuhr (Gebäse) Soll-Wert [%]	Luftfuhr (Gebäse) Ist-Wert [%]	Brennstoffleistung Ofen (berechnet) [kW]	Abgastemperatur [°C]	O <sub>2</sub> [Vol.-%]	CO <sub>2</sub> [Vol.-%]	CO ppm	CO [mg/m <sup>3</sup> ] bezogen	COG [mg/m <sup>3</sup> ] bezogen	Luftüberschuss lambda [-]	Abgastemperatur T <sub>Rohgas</sub> [°C]	Unterdruck Abgas [Pa]	Staubkonzentration PM <sub>10</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Staubkonzentration PM <sub>2.5</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Staubkonzentration PM <sub>10</sub> bezogen	Abgastemperatur T <sub>Reingas</sub> [°C]	O <sub>2</sub> [Vol.-%] für PM-Bezug	Staubkonzentration PM <sub>10</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Staubkonzentration PM <sub>2.5</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Staubkonzentration PM <sub>10</sub> bezogen	Hochspannung U Soll-Wert [kV]	Hochspannung U Ist-Wert [kV]	Strom I [mA]	Elektrische Leistung P <sub>el</sub> [W]	Abscheidegrad eta [%]	Gebäseleistung ESP Ist [%]
01-1	50	50	90	90	5,3	235	15,5	3,8	303	-	4,0	131	16	33	48	94		94					8	6,9	0,06	0,4		5
02-1	75	75	90	90	7,9	307	8,3	9,8	177	11	1,7	149	20	73	46	99		99					9	8,4	0,11	0,9		5
02-2	50	50	50	50	5,3	275	11,1	6,4	179	184	7	2,1	139	15	35	28	99		99				9	8,5	0,10	0,8		5
02-3	50	50	50	50	5,3	276	10,5	7,2	150	5	2,0	138	17	36	27	98		98	11				9	8,5	0,06	0,5	71	5
03-1	75	75	75	75	7,9	310	9,8	10,9	327	272	16	1,9	145	13	95	68	102		102				9	8,5	0,09	0,7		5
03-2	75	75	75	75	7,9	324	8,8	11,6	475	365	29	1,7	148	13	156	102	101		101				9	8,5	0,08	0,7	39	5
03-3	75	75	50	50	7,9	282	9,9	10,7	223	192	21	1,9	140	9	98	71	100		100				9	8,5	0,06	0,5		5
03-4	75	73,4	50	50	7,7	293	9,2	11,3	284	233	16	1,8	140	9	107	73	94		94				9	8,5	0,05	0,4	23	4,9
05-1	75	75	75	75	7,9	317	8,9	11,3	622	468	34	1,7	150	13	162	107	105		105				10	9,4	0,10	0,9	36	5
05-2	25	25	50	50	2,6	209	17,1	3,4	532	1734	24	5,3	122	12	42	85	89		89				9	8,5	0,02	0,1	77	5
05-3	50	50	50	50	5,3	246	13,6	6,7	197	286	11	2,8	126	12	34	37	86		86				9	8,5	0,02	0,1	37	5
06-01	25	25	75	75	2,6	171	18,4	2,4	784	3971	54	8,3	81	58	55	172	46		46				9	7,5	0,01	0,1	42	5
06-02	100	100	75	75	10,5	343	7,9	13,1	375	288	61	1,6	138	50	199	121	70		70				9	8,1	0,04	0,3	55	5
06-03	50	50	75	75	5,3	303	14,1	6,9	194	324	3	3,1	137	50	51	59	72		72				9	8,4	0,04	0,3	60	5
06-04	75	75	25	25	7,9	299	9,2	11,8	477	376	15	1,8	130	54	116	79	67		67				9	8,4	0,04	0,3	41	5
07-01	75	75	100	100	7,9	321	9,5	11,4	359	296	9	1,8	136	23	87	60	82		82				9	8,5	0,12	1,0	53	5
07-02	50	50	100	100	5,3	299	13,5	7,5	186	283	4	2,8	141	22	37	40	91		91				9	8,5	0,15	1,3	71	5

Tabelle 8: Ergebnisse der Messreihe „Lambda“

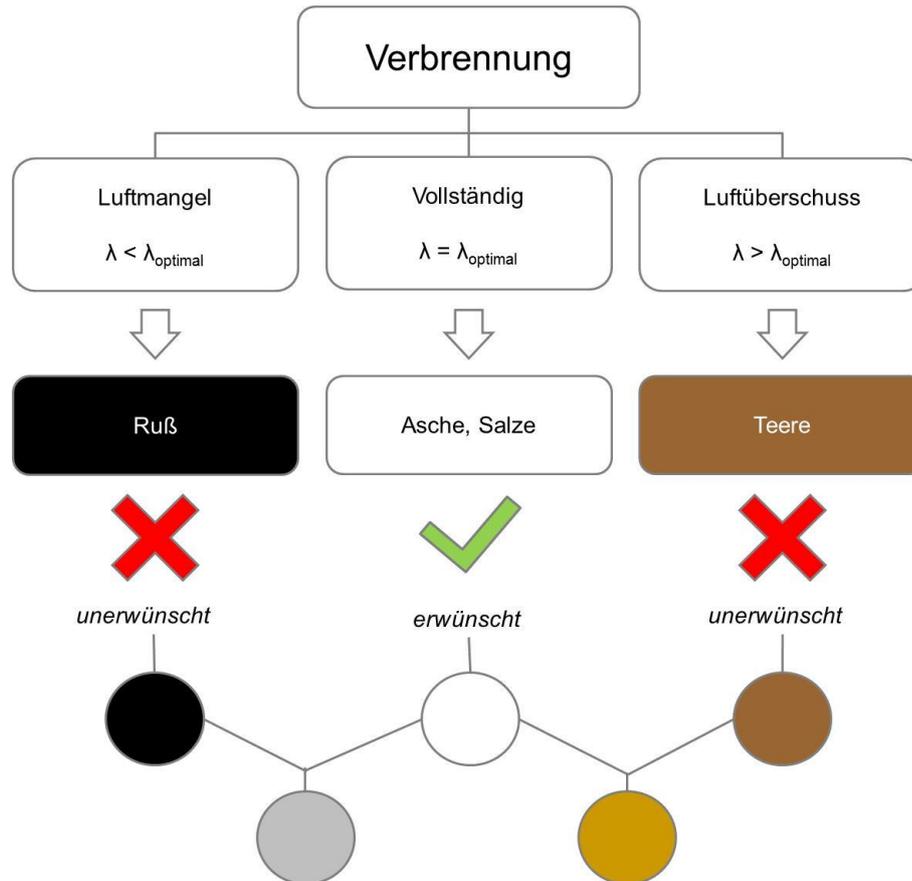


Abbildung 14: Zusammenhang zwischen Verbrennungsbedingungen und entstehenden Partikelarten

Durch softwareseitige Variation der Brennstoff- und Luftzufuhr am Pelletofen können unterschiedliche Verbrennungsbedingungen eingestellt werden, die durch den Luftüberschuss im Abgas charakterisiert sind. Dieser wird durch die Luftzahl Lambda angegeben. Durch variierende Brennstoff- und Luftzufuhr werden die Verbrennungsbedingungen im Brennraum verändert. Dadurch verändern sich die Parameter des Abgases - sowohl Abgaszusammensetzung als auch emittierte Partikelmenge und die Zusammensetzung der Partikel (siehe Abbildung 14).

Bei nahezu vollständiger Verbrennung entstehen hauptsächlich Salze, die emittierte Gesamtstaubkonzentration ist auf niedrigem Niveau. Erfolgt eine Verbrennung mit reduzierter Luftzufuhr, also im (lokalen) Luftmangel, entstehen hauptsächlich Rußverbindungen, die Gesamtstaubkonzentration kann sehr stark ansteigen.

Je weiter der Betriebspunkt im Luftmangel gewählt wird, umso mehr Partikel werden emittiert, so dass daraus eine hohe bis sehr hohe Gesamtstaubkonzentration im Rohgas entsteht. Erfolgt der Betrieb hingegen bei erhöhter Luftzufuhr, also im Bereich des Luftüberschusses, kann dies ebenfalls eine Erhöhung der emittierten Partikel im Vergleich zu optimalen Verbrennungsbedingungen zur Folge haben. Allerdings bestehen hier nun die Partikel zu einem großen Anteil aus kondensierbaren organischen Verbindungen, die als Teere bezeichnet werden, siehe hierzu Abbildung 15.

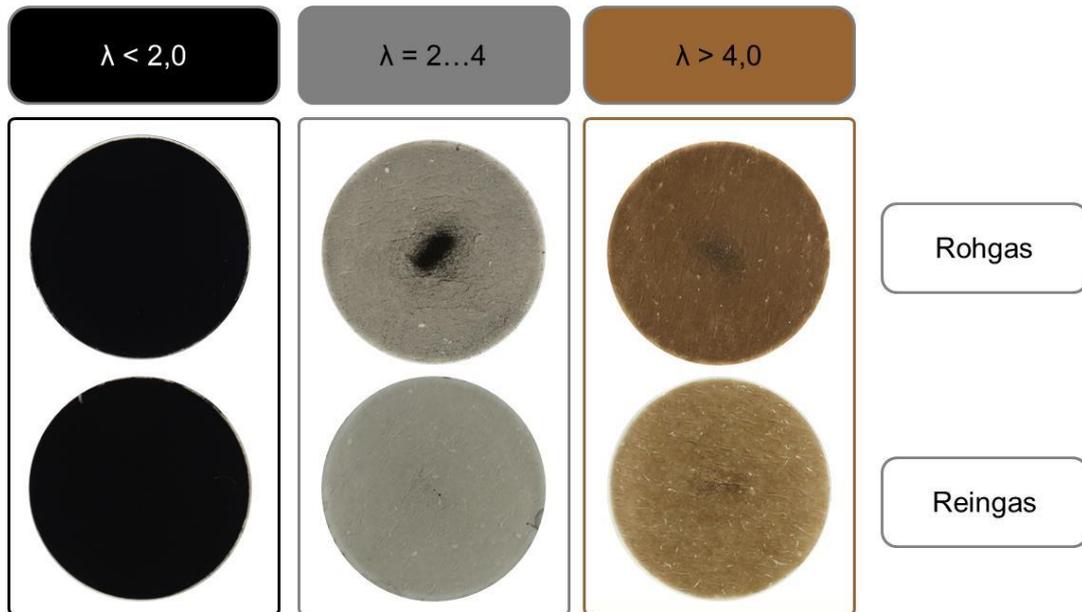


Abbildung 15: Planfilter der Gesamtstaubmessung - Partikelproben aus dem Abgas des untersuchten Pelletofens (links: Betrieb bei Luftmangel, mittig: Betrieb im optimalen Bereich, rechts: Betrieb bei zu hohem Luftüberschuss)

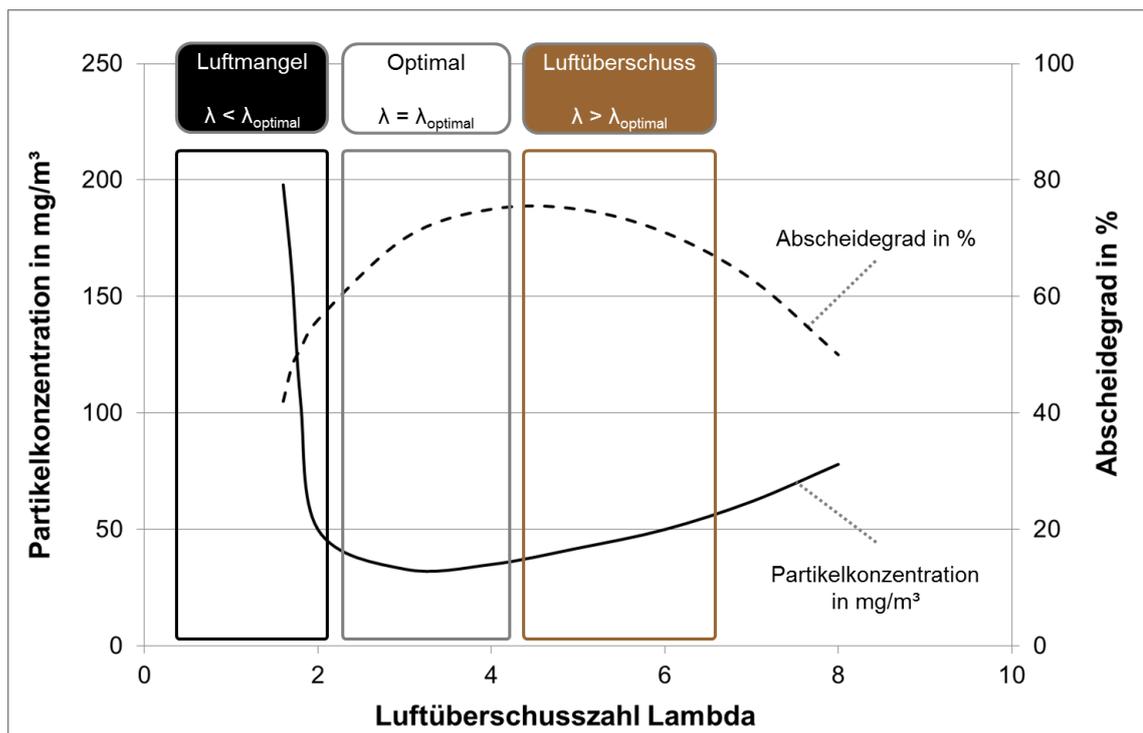


Abbildung 16: Zusammenhang zwischen Partikelkonzentration sowie Abscheidegrad und Luftüberschusszahl am untersuchten Pelletofen (abstrahierte Darstellung aus den gewonnenen Untersuchungsergebnissen)

Hieraus ergeben sich Abhängigkeiten im Betriebsverhalten von der Feuerung nachgeschalteten elektrostatischen Abscheidern (siehe z. B. Lauber und Nussbaumer [Lauber, 2010];

Bologa *et al.* [Bologa, 2011] und Domat *et al.* [Domat, 2014]). So gelten Salze als ideal abscheidbar, da sie eine für Elektroabscheider in einem günstigen Bereich liegende elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Ruß- und Teerverbindungen gelten als schwieriger abzuscheiden, da ihre Leitfähigkeit eher unterhalb bzw. oberhalb dieses günstigen Bereichs liegt (siehe Abbildung 16).

Im Rahmen der Versuche am Pelletofen wurden verschiedene Verbrennungsbedingungen über die Änderung der Luftzufuhr einerseits und über die Brennstoffzufuhr andererseits hergestellt. Die geringsten Partikelkonzentrationen 30...40 mg/m<sup>3</sup> befinden sich etwas unterhalb der Einstellungen zur Nennwärmeleistung. Die dominierenden Inhaltsstoffe sind mineralische Bestandteile, hauptsächlich in Form von Salzen. Der Gesamtkohlenstoffgehalt (TC) beträgt nur wenige Prozent (10% und darunter).

Ausgehend hiervon wurde in mehreren Schritten die Luftzufuhr reduziert, so dass sich die Verbrennungsbedingungen in Richtung Luftmangel bewegen (hier  $\lambda < 2$ ). Je weiter die Luft reduziert wird ( $\lambda = 1,7...1,8$ ), umso schlechter wird die Verbrennung und die Partikelkonzentration im Abgas steigt immer weiter an (100 mg/m<sup>3</sup> und darüber), der Rußanteil der Partikel nimmt zu (bis über 30% TC-Anteil). Erkennbar wird dies durch die schwarze Färbung der Planfilter der Gesamtstaubmessung, was die Kohlenstoffanalysen im Labor bestätigen. Der Anteil des gesamten Kohlenstoffs der Proben (TC) ist hoch, der Anteil des elementaren Kohlenstoffs (EC) dominiert. Der beinhaltete Wasserstoffanteil ist eher niedrig, wodurch sich ein niedriges C/H-Verhältnis ergibt, was ebenfalls als Indikator für ringförmige Rußverbindungen anzusehen ist.

Wird die Luftzufuhr ausgehend von den optimalen Einstellungen erhöht, verschieben sich die Verbrennungsbedingungen in Richtung hoher Luftüberschuss ( $\lambda > 4$ ). Hier erhöhen sich die Partikelkonzentrationen ebenfalls, jedoch erfolgt der Anstieg nicht annähernd so steil und auch nicht bis zu so hohen Werten wie im Bereich des Luftmangels. Die dominierende Fraktion stellen hier die Teere dar – klassifiziert über einen hohen Gesamtkohlenstoffgehalt, aber mit hohem Anteil an organischem Kohlenstoff. Der erhöhte Wasserstoffanteil lässt auf ein hohes C/H-Verhältnis, also auf langkettige Verbindungen schließen.

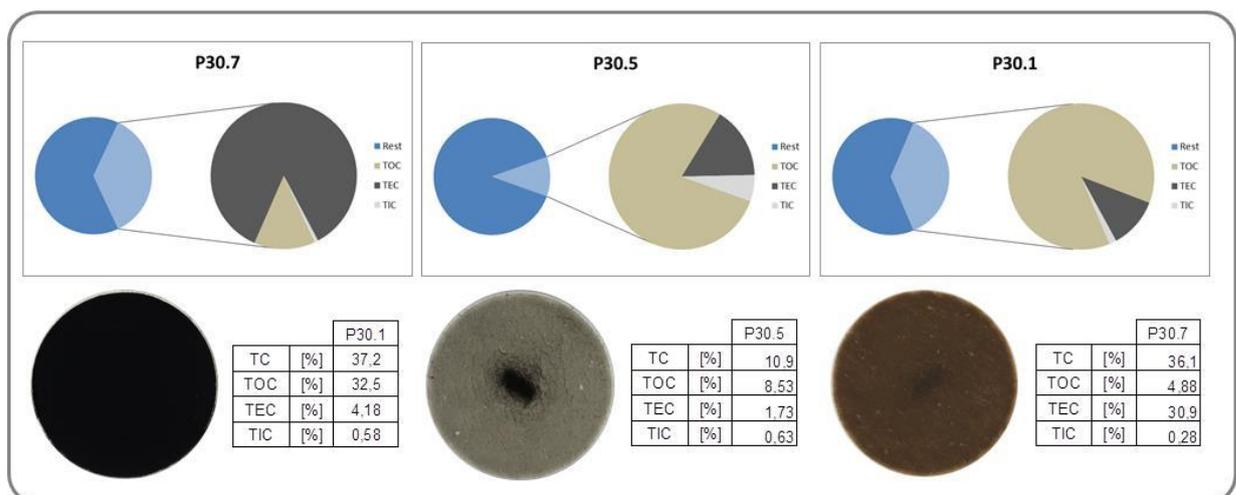


Abbildung 17: Auszug der Kohlenstoffanalyse von Planfiltern aus dem Rohgas [TC = gesamter Kohlenstoff; TOC = organisch gebundener Kohlenstoff („Teere“), TEC = elementar gebundener Kohlenstoff („Ruß“), TIC = anorganisch gebundener Kohlenstoff (z. B. Carbonate)]

Tabelle 9: Ergebnisse der Kohlenstoffanalyse und der berechneten \*\* C/H-Verhältnisse für die untersuchten Staubfilter, nach [Reitberger, 2016]

Probe	Probenherkunft*	TC	TOC	EC	TIC	Wasser	C/H***
		%	%	%	%	%	mol/mol
P 2.5	PO; Reingas; gute Verbrennung	11,40	9,27	2,00	0,13	-	-
P 2.6	PO; Rohgas; gute Verbrennung	7,52	4,48	2,38	0,66	-	-
P 11.03	HGF; HHS; Rohgas; gute Verbrennung	3,28	3,14	0,25	<0,10	-	-
P 11.04	HGF; HHS; Reingas; gute Verbrennung	3,61	2,87	0,68	<0,10	-	-
P 30.2	PO; Reingas; Luftüberschuss	17,70	3,85	10,60	3,22	163,0	0,3
P 30.6	PO; Reingas; gute Verbrennung	18,90	14,80	3,63	0,49	302,0	-
P 30.8**	PO; Reingas; Luftmangel	100,00	0,00	99,80	0,20	40,3	7,4
P 30.1	PO; Rohgas; Luftüberschuss	37,20	32,50	4,18	0,58	95,2	1,2
P 30.5	PO; Rohgas; gute Verbrennung	10,90	8,53	1,73	0,63	93,3	-
P 30.7	PO; Rohgas; Luftmangel	36,10	4,88	30,90	0,28	23,9	4,5

\* PO = Pelletofen; HFG = Hackgutfeuerung; HHS = Hackschnitzel

\*\* veränderte Analyse: TC Anteil wurde zu 100% zu EC angenommen

\*\*\* C/H-Verhältnis nach [Reitberger, 2016]

Die Ergebnisse der Kohlenstoffanalyse zeigt Tabelle 9. Je nach Verbrennungsbedingungen befindet sich der Gesamtkohlenstoffgehalt TC in einem anderen Bereich. Die höchsten Gehalte liegen im Bereich zwischen 30 bis 40% reinen Kohlenstoffs als Massenanteil der Probe. Der Gesamtkohlenstoffanteil setzt sich wiederum zusammen aus den Anteilen für TOC (organischer Kohlenstoff), EC (elementarer Kohlenstoff) und TIC (anorganischer Kohlenstoff). Der Planfilter P 30.1 beispielsweise hat einen Gesamtkohlenstoffgehalt von ca. 37%, mit einem dominierenden Anteil von ca. 33% an TOC, die Probe besteht also zu einem deutlichen Anteil aus Teerverbindungen. Es handelt sich um einen Filter aus dem Rohgas des Pelletofens beim Einsatz von Holzpellets und Verbrennung im Luftüberschuss. Planfilter P 30.7 hat einen ähnlich hohen Gehalt an Gesamtkohlenstoff, allerdings überwiegt hier der Anteil an EC deutlich, so dass davon ausgegangen werden kann, dass es sich bei der Probe hauptsächlich um Rußverbindungen handelt. Es handelt sich um einen Filter ebenfalls aus dem Abgas des Pelletofens beim Einsatz mit Holzpellets aber bei Verbrennung im Luftmangel.

Zur Bestimmung der Ionen als Repräsentanten für die mineralischen Bestandteile der Partikel im Abgas werden die Hauptelemente der Probe bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Die Planfilter P 2.3 (Reingas) und P 2.4 (Rohgas) stammen aus dem Abgas des Pelletofen mit Holzpellets bei guten Verbrennungsbedingungen (Versuch 1.02), die Proben P 15.01 (Rohgas) und P 15.02 (Reingas) aus dem Abgas der Hackgutfeuerung beim Einsatz von Hackschnitzeln mit normalen (guten) Verbrennungsbedingungen (Versuch 1.06). Die dominierenden Fraktionen sind in beiden Fällen Kalium und Schwefel. Ein deutlicher Unterschied besteht im Chlorid-Gehalt, der bei den Hackschnitzeln um ein Vielfaches höher liegt. Die Unterschiede zwischen Rohgas und Reingas sind bei allen Werten eher gering.

Dies allein kann das Verhalten eines Elektroabscheiders allerdings nicht ausschließlich erklären. Die Abscheidung der Partikel unterliegt auch noch vielen anderen Faktoren und Einflussgrößen. Es spielt nicht nur die Zusammensetzung der Partikel eine Rolle, sondern ebenso die eingetragene Gesamtmasse und Anzahl der Partikel und auch ihre Größenverteilung. Ferner beeinflusst die (lokale) Geschwindigkeitsverteilung sowohl die Aufladung als auch die Abscheidung der Partikel und mögliche Wiedereintragsvorgänge, bei denen sich

Tabelle 10: Ergebnisse der Ionenbestimmung für die untersuchten Staubfilter

Probe	Aluminiumoxid	Bariumoxid	Kalziumoxid	Eisenoxid	Kaliumoxid	Magnesiumoxid	Manganoxid	Natriumoxid	Phosphoroxid	Schwefeltrioxid	Strontiumoxid	Titanoxid	Chlorid	Summe
	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% BaO	% CaO	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% K <sub>2</sub> O	% MgO	% MnO <sub>2</sub>	% Na <sub>2</sub> O	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	% SO <sub>3</sub>	% SrO <sub>2</sub>	% TiO <sub>2</sub>		
P 2.3	1,14	0,07	3,23	7,33	23,10	0,38	0,22	0,62	0,18	34,50	0,01	0,05	4,16	74,9
P 2.4	0,51	0,12	9,94	0,69	33,90	1,78	1,20	0,52	1,21	44,30	0,03	0,02	3,34	97,6
P 15.01	0,26	0,02	1,24	0,25	42,70	0,23	0,07	1,61	0,80	22,90	0,00	0,01	19,10	89,2
P 15.02	0,20	0,02	0,79	0,20	40,90	0,16	0,05	1,57	0,72	22,80	0,00	0,00	16,30	83,7

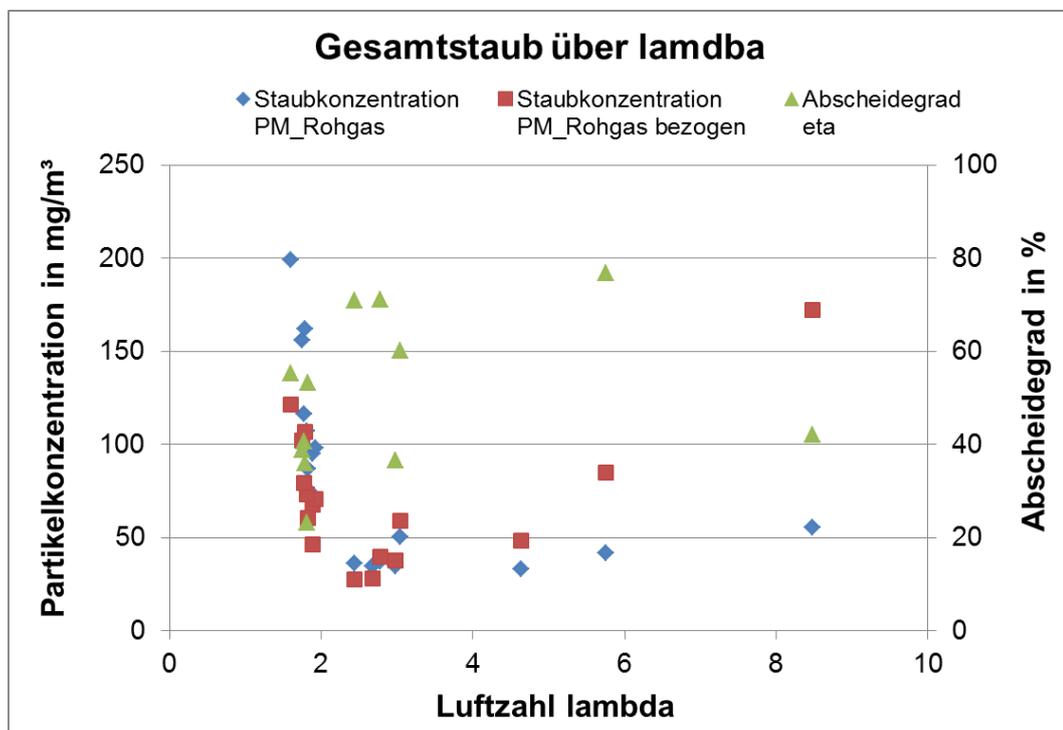


Abbildung 18: Messreihe „Lambda“: Partikelkonzentration im Rohgas als Gesamtstaub in mg/m<sup>3</sup> und Abscheidegrad in % aufgetragen über der Luftzahl Lambda

bereits an den Niederschlagsflächen angehaftete Partikel wieder zurück in den Gasstrom lösen.

### 1.3.5 Messreihe „Hochspannung“

Die Abscheidung eines Elektroabscheiders ist unter anderem abhängig von der ins Abgas eingebrachten elektrischen Leistung, also wie viel elektrische Ladung in der Plasmastufe vom elektrischen Feld aus auf die im Abgas vorbeigetragenen Partikel gebracht werden können. Als Einstellgröße dient hier die angelegte Hochspannung. Der Stromfluss als daraus

resultierende Größe wird durch unterschiedliche Abhängigkeiten und Einflussgrößen unterschiedlichster Art bestimmt:

- Ionisationsstufe:
  - Bauform und Gestaltung
  - Anzahl der Elektroden
  - Elektrodenabstand
  - Hochspannung
- Abgasparameter:
  - Wesentliche Einflussgröße: Temperatur
  - Gaszusammensetzung
  - Partikelkonzentration.

Durch die Verwendung eines bestimmten Abscheiders und einer bestimmten Feuerung, werden etliche dieser Größen festgelegt. Je nach gewünschter Untersuchung können dann verschiedene Parameter geändert und damit ihr Einfluss untersucht werden.

In dieser Messreihe soll der Einfluss der eingestellten Hochspannung auf die Abscheidung untersucht werden. Nach theoretischem Zusammenhang sollte bei einer höheren Spannung auch ein höherer Stromfluss entstehen und sich somit auch der Abscheidegrad erhöhen. Als sinnvolle Untergrenze für den zu untersuchenden Spannungsbereich ergibt sich die Koronaeinsatzspannung. Diese liegt bei den aktuellen Bedingungen etwa bei 4 – 5 kV, so dass die niedrigste Einstellung mit 6 kV gewählt wird. Als Obergrenze des Arbeitsbereichs eines Elektroabscheiders ergibt sich die Überschlagsspannung. Im vorliegenden Fall kann mit 10 kV noch ein halbwegs sicherer Betrieb aufrechterhalten werden, so dass dies als maximale Einstellung gewählt wird. Da zu viele Abstufungen nicht sinnvoll sind, wird als Zwischenstufe zwischen 6 und 10 kV die Einstellung mit 8 kV gewählt.

Die Versuche erfolgen am Prüfstand mit der Hackgutfeuerung, als Brennstoff werden Hackschnitzel verwendet. Die Partikelkonzentration wird als Gesamtstaubmessung mit Planfiltern als parallele Abscheidegradmessung erfasst. In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Messreihe „Hochspannung“ aufgelistet, Abbildung 19 zeigt den Zusammenhang zwischen Abscheidegrad und in den Abgasstrom eingebrachter Leistung für diese Messreihe.

Tabelle 11: Ergebnisse der Messreihe „Hochspannung“

Messreihe "Hochspannung"																		
Versuchsnummer	Feuerung		Abgaszustand Rohgas						Abgaszustand Reingas				ESP					
	Brennstoff	Abgastemperatur T_Ofen [°C]	O2 [Vol. %]	CO2 [Vol. %]	CO (bezogen) [mg/m³]	Abgastemperatur T_Rohgas [°C]	Staubkonzentration PM_Rohgas [mg/m³]	Staubkonzentration PM_Rohgas bezogen [mg/m³]	Abgastemperatur T_Reingas [°C]	O2 für PM-Bezug [Vol. %]	Staubkonzentration PM_Reingas [mg/m³]	Staubkonzentration PM_Reingas bezogen [mg/m³]	Hochspannung U Soll-Wert [kV]	Hochspannung U Ist-Wert [kV]	Strom I [mA]	Elektrische Leistung P_el [W]	Abscheidegrad eta [%]	Gebälseleistung ESP Ist [%]
2.1	HoP/HHS	202	12,5	8,0	133	165	32	30	101	12,5	11	10	10	9,4	0,13	1,19	65	5
2.2	HHS	193	12,2	8,3	170	156	63	57	95	12,2	33	30	8	7,5	0,07	0,49	47	5
2.3	HHS	196	11,9	8,7	87	162	51	45	95	11,9	19	17	6	5,6	0,03	0,17	63	5
3.2	HHS	198	10,7	10,0	94	165	67	52	99	13,2	32	33	5	4,7	0,01	0,04	35	5

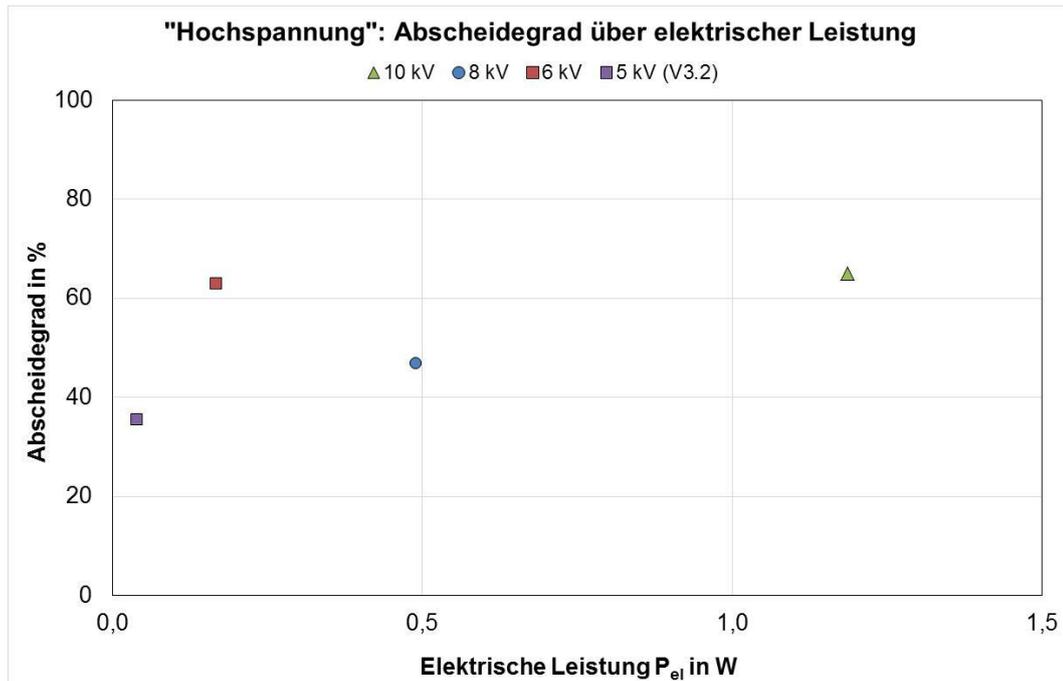


Abbildung 19: Messreihe „Hochspannung“: Darstellung des Abscheidegrades über der eingebrachten elektrischen Leistung (Brennstoff: überwiegend Holzhackschnittel)

Bei der ersten Einstellung sind noch Holzpellets im Feuerungssystem vorhanden, weshalb hier die Werte nicht so gut zu den anderen Daten passen (Partikelkonzentration im Rohgas niedrig, Abscheideleistung höher). Zur Ergänzung ist daher der Versuch 3.2 mit angegeben. Hier erfolgte jedoch die Bestimmung der Konzentration nicht mit Planfilter sondern mit dem Schornsteinfegermessgerät Wöhler SM 500. Der Versuch wurde bei einer Spannung beim Elektrofilter von 5 kV und ebenfalls mit Hackschnitzeln durchgeführt.

In Abbildung 20 sind die Planfilter der Gesamtstaubmessung für Roh- und Reingas der Messreihe „Hochspannung“ abgebildet.

Insgesamt lässt sich sagen, dass sich das grundsätzliche Verhalten des untersuchten Elektrofilters aus der Theorie erkennen lässt. Aufgrund der wenigen Daten und vielen Betriebsstörungen und Schwankungen lässt sich jedoch nur eine Tendenz darstellen, die für weitere Berechnungen oder Abschätzungen nicht geeignet ist.

Aus den bisherigen Erfahrungen und anderen Messreihen und Daten kann geschlossen werden, dass die Abscheideleistung bei höherer elektrischer Leistung deutlich ansteigt. Die Einstellung der Hochspannung bringt jedoch keine Sicherheit für einen bestimmten Abscheidegrad, da diverse andere Abhängigkeiten und Betriebsstörung bestehen. Kann dauerhaft eine hohe Betriebsspannung mit einer entsprechenden eingebrachten elektrischen Leistung aufrechterhalten werden, so wird davon ausgegangen, dass sich auch höhere Abscheidegrade ergeben

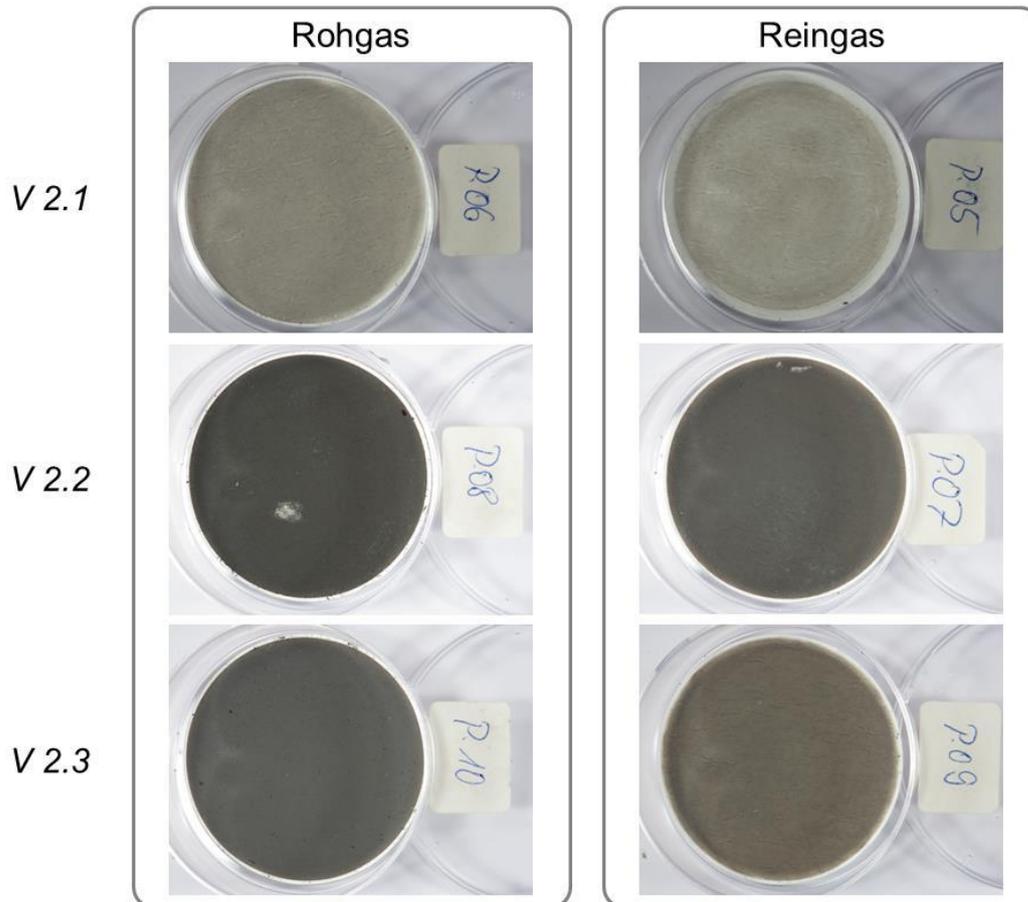


Abbildung 20: Messreihe „Hochspannung“: Planfilter der Gesamtstaubmessung: links Rohgas, rechts Reingas.

### 1.3.6 Messreihe „Brennstoffeinfluss“

Neben den Verbrennungsbedingungen beeinflusst die Wahl des Brennstoffes die Zusammensetzung des von der Feuerung emittierten Abgases. Dies betrifft nicht nur die Zusammensetzung der gasförmigen Komponenten, sondern macht sich vor allem auch bei der Zusammensetzung und Konzentrationshöhe der Partikel bemerkbar.

Daher ist ein wesentlicher Aspekt der Untersuchungen die Durchführung von Messungen beim Einsatz verschiedener Brennstoffe. Holzpellets werden sehr häufig eingesetzt und sind, was die Verbrennungseigenschaften und das Emissionsverhalten angeht, eher unkritisch zu sehen. Holzhackschnitzel werden ebenfalls recht häufig eingesetzt und weisen bei ihrer Verbrennung im Allgemeinen etwas höhere partikelförmige Emissionen auf. Halmgutartige Biomassen wie Stroh oder Heu sind dagegen schwieriger zu verbrennen und weisen durch ihre Inhaltsstoffe meist vergleichsweise hohe Partikelemissionen auf, gerade die erhöhten Kaliumanteile im Brennstoff gelten hier als „Partikelbildner“. Als Vertreter dieser Brennstoffklasse werden Heupellets verwendet. Da diese während der Verfeuerung zu Schlackebildung neigen, was zu massiven Betriebsstörungen in der Feuerung führt, werden Heupellets lediglich zu Holzpellets in einem geringeren Anteil zu dosiert. In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Messreihe „Brennstoffvergleich“ aufgelistet. Abbildung 21 zeigt den Zusammenhang zwischen Abscheidegrad und in den Abgasstrom eingebrachter Leistung für diese Messreihe.

Tabelle 12: Ergebnisse der Messreihe „Brennstoffvergleich“ (HHS. Holzhackschnitzel, HoP: Holzpellets, HeuP: Heupellets)

Paare: Impaktor-Messungen nach Brennstoff																		
Versuchsnummer	Brennstoff	Abgaszustand Rohgas						Abgaszustand Reingas						ESP				
		Abgastemperatur T_Ofen [°C]	O2 [Vol. %]	CO2 [Vol. %]	CO (bezogen) [mg/m³]	Abgastemperatur T_Rohgas [°C]	Staubkonzentration PM_Rohgas [mg/m³]	Staubkonzentration PM_Rohgas bezogen [mg/m³]	Abgastemperatur T_Reingas [°C]	O2 für PM-Bezug [Vol. %]	Staubkonzentration PM_Reingas [mg/m³]	Staubkonzentration PM_Reingas bezogen [mg/m³]	Hochspannung U Soll-Wert [kV]	Hochspannung U Ist-Wert [kV]	Strom I [mA]	Elektrische Leistung P_el [W]	Abscheidegrad eta [%]	Gebälseleistung ESP Ist [%]
1.06	HHS	197	10,8	9,8	152	172	66	51	96	10,8	32	25	10,59	8,2	0,07	0,55	51	5
1.07	HHS	198	10,6	9,4	119	172	78	60	102	10,6	39	30	10	8,9	0,04	0,35	50	5
1.09	HoP	209	11,1	9,5	21	178	29	23	107	11,1	8	6	10	7,1	0,17	1,22	72	5
1.10	HoP	214	10,3	10,4	21	183	20	15	110	10,3	7	6	10	9,1	0,14	1,31	63	5
1.11	HoP+HeuP	158	10,5	10,1	20	135	38	29	80	10,5	21	16	10	9,4	0,08	0,79	43	5
1.12	HoP+HeuP	158	11,4	9,2	16	135	31	25	80	11,4	19	16	10	9,4	0,04	0,42	37	5

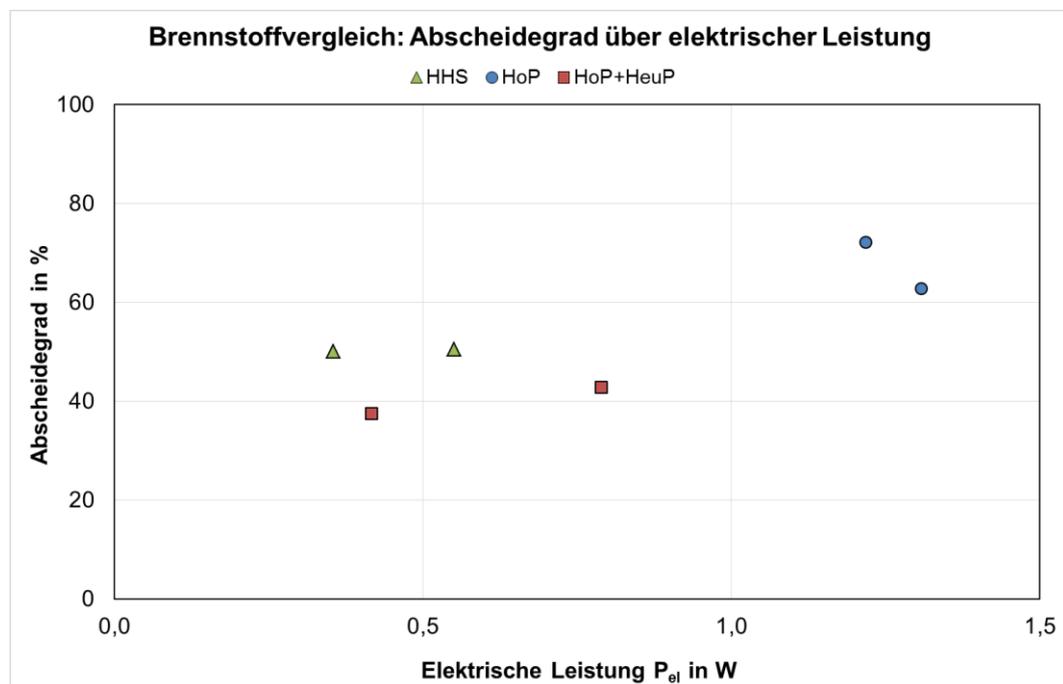


Abbildung 21: Messreihe „Brennstoffvergleich“: Darstellung des Abscheidegrades über der eingebrachten elektrischen Leistung (HHS. Holzhackschnitzel, HoP: Holzpellets, HeuP: Heupellets)

Der Abscheidegrad zeigt hier, im Vergleich zur vorherigen Messreihe „Hochspannung“ einen leichten Zusammenhang. Die angelegte Hochspannung war bei allen Versuchen der Messreihe „Brennstoffvergleich“ identisch. Durch andere Bedingungen im Abgas, verursacht durch die verschiedenen Brennstoffe, ergeben sich jedoch deutlich andere Stromflüsse, was auch zu einer anderen elektrischen Leistung führt. Die Versuchspunkte von Holzpellets liegen bei den höchsten elektrischen Leistungen und weisen auch den höchsten Abscheidegrad auf. Beachtet werden muss aber auch, dass hier die Gesamtstaubkonzentrationen auch am niedrigsten liegen, was ebenfalls eine höhere Abscheidung begünstigt.

Es werden neben den Abgasparametern und Messgrößen des Elektroabscheiders die Gesamtstaubkonzentrationen in Rohgas und Reingas parallel mittels Planfiltern erfasst und außerdem erfolgt die Bestimmung der Korngrößenverteilung mit dem Impaktor.

Tabelle 13 zeigt die Ergebnisse der Impaktormessungen derjenigen Versuche, die für den Brennstoffvergleich ausgewertet und miteinander verglichen werden. Zu erkennen sind Unterschiede sowohl zwischen den verschiedenen Brennstoffen als auch zwischen Rohgas und Reingas.

Nachfolgend werden die Daten in Abbildung 22 zum besseren Verständnis grafisch dargestellt. Zu sehen ist die absolute Beladung der einzelnen Impaktorstufen dargestellt in mg über den aerodynamischen Trenndurchmessern der Stufen. Gut zu erkennen ist, dass vor allem bei den Stufen im kleineren Korngrößenbereich der Rohgaswert deutlich höher liegt als der jeweilige Wert im Reingas. Die Höhe der Beladungen unterscheidet sich ebenfalls zwischen den verschiedenen Brennstoffen, was gut zu den Werten der Gesamtstaubmessung passt.

Tabelle 13: Ergebnisse der Impaktormessungen zur Messreihe „Brennstoffvergleich“

Filterstufe	Trenndurchmesser [µm]	Beladungen in mg					
		Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
		<b>V-1.06</b>	<b>V-1.07</b>	<b>V-1.09</b>	<b>V-1.10</b>	<b>V-1.11</b>	<b>V-1.12</b>
1	0,030	0,17	0,28	0,38	0,04	0,55	0,22
2	0,059	0,98	0,16	0,80	0,24	1,59	1,03
3	0,103	2,98	1,37	0,50	0,26	1,30	0,75
4	0,166	1,80	0,70	0,27	0,14	0,66	0,35
5	0,255	1,04	0,43	0,11	0,07	0,42	0,17
6	0,392	0,74	0,20	0,11	0,05	0,35	0,14
7	0,637	0,33	0	0,05	0,04	0,11	0,12
8	0,990	0,09	0,09	0,04	0,01	0,05	0,05
9	1,610	0,15	0,16	0,07	0,02	0,03	0,06
10	2,460	0,05	0,14	0,10	0,02	0,02	0,07
11	3,980	0,02	0,33	0,12	0,05	0,03	0,06
12	6,640	0,10	0	0,12	0,22	0,05	0,25
13	10,220	0,27	0,34	0,21	0,22	0,07	0,13
	<b>Summe</b>	<b>8,72</b>	<b>4,19</b>	<b>2,88</b>	<b>1,37</b>	<b>5,25</b>	<b>3,38</b>

Die höchsten Emissionen treten bei der Verbrennung von Holzhackschnitzeln auf. Die Maxima der Verteilungen im Rohgas liegen bei allen drei Brennstoffen im Bereich um 0,1 µm aerodynamischer Partikeldurchmesser. Die mittleren Stufen (zwischen 0,4...4 µm aerodynamischer Partikeldurchmesser) sind kaum belegt. Ein zweites, allerdings deutlich kleineres Maximum weisen die Verteilungen im groben Bereich bei 6 bis 10 µm aerodynamischer Partikeldurchmesser auf.

Abbildung 23 zeigt für die Messreihe „Brennstoffvergleich“ die absolute Abscheidung der einzelnen Impaktorstufen von Rohgas und Reingas über dem aerodynamischen Partikeldurchmesser. Die Zusammenhänge zwischen Roh- und Reingas lassen sich hierbei gut erkennen. So wird deutlich, dass die feinen Partikel unterhalb 1 µm aerodynamischer Partikeldurchmesser in allen Fraktionen durch den Elektroabscheider gemindert werden und sich die Verteilungen in Richtung größerer Partikel verschieben, da diese Fraktionen nicht gemindert werden, sondern sogar zunehmen.

Dieser Zusammenhang lässt sich mit dem Fraktionsabscheidegrad darstellen, siehe Abbildung 24. Hier wird der Abscheidegrad jeder einzelnen Stufe berechnet und aufgetragen. Die einzelnen Werte (Säulen) sind verblasst dargestellt, damit der Mittelwert (Linie) deutlicher zu erkennen ist. Hier wird dieses Muster der Verteilungsverschiebung deutlich.

Insgesamt ist der Abscheidegrad der Gesamtstaubkonzentration positiv, er bewegt sich bei Hackschnitzeln um die 50% bei Staubkonzentrationen im Rohgas zwischen 50 - 60 mg/m<sup>3</sup>. Bei der niedrigeren Rohgaskonzentration mit Holzpellets von ca. 20 mg/m<sup>3</sup> wird der höchste Abscheidegrad mit Werten um die 70% erreicht. Bei der Zudosierung von Heupellets nimmt die Rohgaskonzentration auf knapp 30 mg/m<sup>3</sup> leicht zu und der Abscheidegrad auf etwa 40% ab.

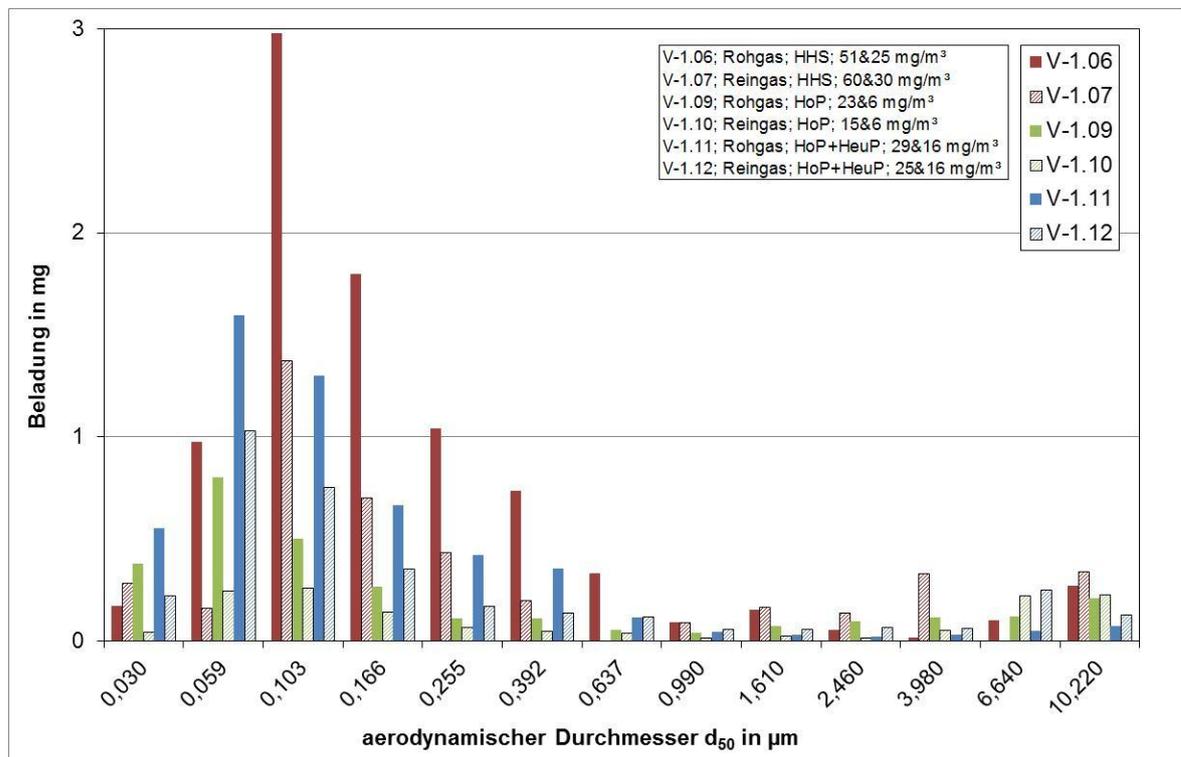


Abbildung 22: Messreihe „Brennstoffvergleich“: Beladung der einzelnen Impaktorstufen in mg über dem aerodynamischen Partikeldurchmesser (HHS: Holzhackschnitzel, HoP: Holzpellets, HeuP: Heupellets)

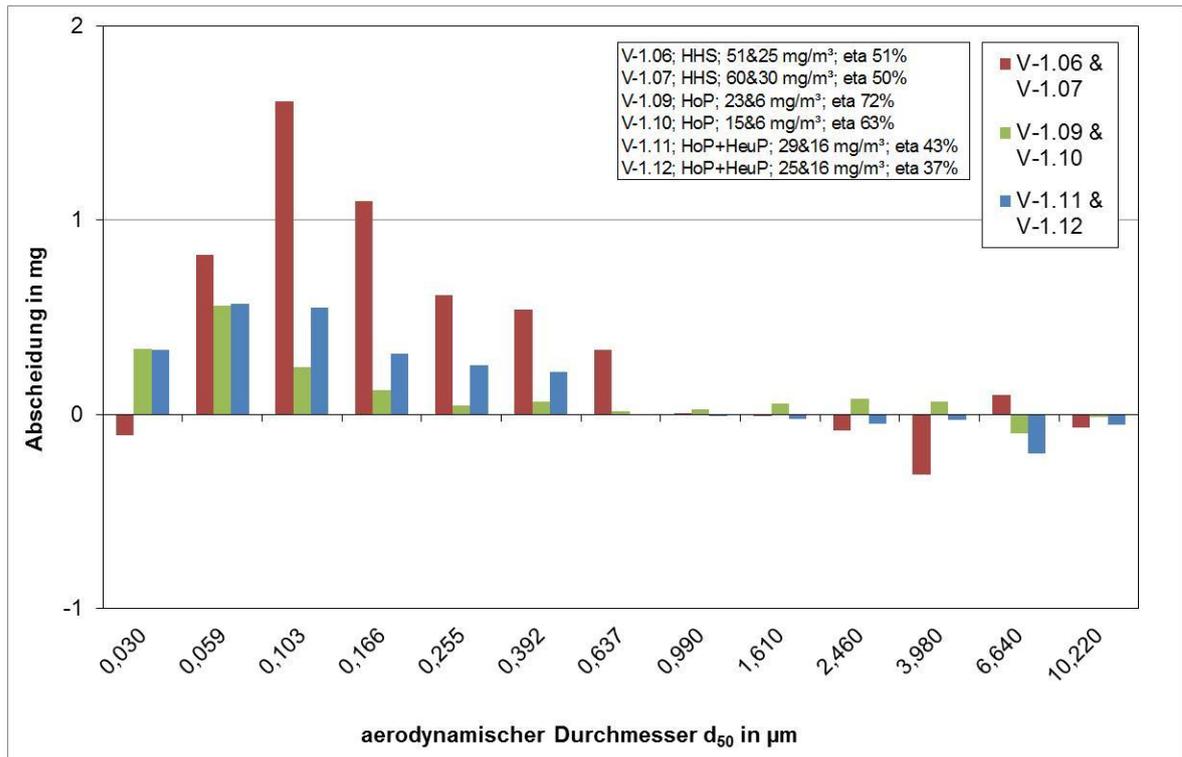


Abbildung 23: Messreihe „Brennstoffvergleich“: Absolute Abscheidung in mg der einzelnen Impaktorstufen von Rohgas und Reingas über dem aerodynamischen Partikeldurchmesser (HHS: Holz hackschnitzel, HoP: Holzpellets, HeuP: Heupellets)

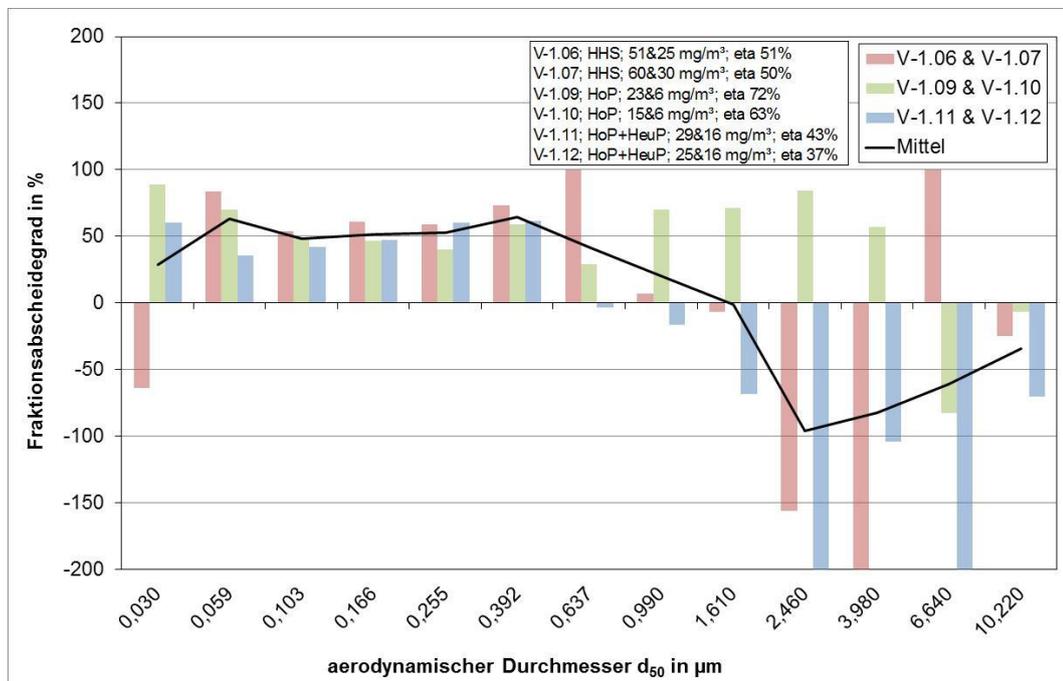


Abbildung 24: Messreihe „Brennstoffvergleich“: Fraktionsabscheidegrade in % über dem aerodynamischen Partikeldurchmesser (HHS: Holz hackschnitzel, HoP: Holzpellets, HeuP: Heupellets)

## 1.4 AP 4: Betrachtung der Strömungsführung

Die Führung der Strömung ist ein wichtiger Einflussfaktor für die Partikelabscheidung. Vor allem die lokale Geschwindigkeitsverteilung kann die Abscheidung der Partikel entweder verbessern oder auch erschweren. Aus diesem Grund wurde im Hinblick auf den Laborabscheider der Einfluss verschiedener Bauteile auf die Strömung mittels Parameterstudien untersucht:

- Geometrie von Gaseinlass und Gasauslass
- Variation von Anordnung und Anzahl der Düsen in der Gegenelektrode (Lochblende)
- Variation der Eintrittsgeschwindigkeit
- Variation des Strömungskanals.

Für die Untersuchungen wurde erst ein Entwurf eines Laborabscheiders konstruiert und daraus dann ein Modell für die Simulation umgesetzt (siehe Abbildung 25). Die in der Parameterstudie untersuchten Geometrien von Ein-/Auslass für den Elektrofilter und vom Strömungskanal im Elektrofilter sind in Abbildung 26 dargestellt.

Nachfolgend werden exemplarisch verschiedene Lochblenden mit Strömungsbild als Ergebnisse dieser Parameterstudie gezeigt (siehe Abbildung 27).

Die Lochblende ist für den größten Druckverlustanteil des Abscheiders verantwortlich. Große und möglichst weit verteilte Düsen wirken sich günstig auf die Strömungsbedingungen aus. Das Aussehen der Lochblende entscheidet, wie gut die Flächen in der Abscheidestufe angeströmt und genutzt werden. Die Konzeption der Plasmastufe ist von großer Bedeutung, sie muss für eine gleichmäßige Strömungsverteilung über den Querschnitt sorgen und Rückströmungen ausschließen. Rein strömungstechnisch wäre hier die Nr. (4) in Abbildung 27 der untersuchten Varianten die günstigste. Die Verteilung der Strömung ist am gleichmäßigsten und ihr Druckverlust am niedrigsten. Abgewogen muss dies in einem realen Modell natürlich immer gegen die Funktion der Elektroden als Bestandteil zur Generierung des elektrischen Feldes.

Für den Strömungskanal stellt sich die kreisrunde Kontur (siehe Abbildung 26) als strömungstechnisch am günstigsten heraus, die quadratische am schlechtesten. Bei einem realen Modell muss hier die Fertigung berücksichtigt werden, für die die quadratische Kontur wesentlich einfacher ist.

Einen guten Kompromiss stellt die halbrunde Kontur dar, sie bietet wesentliche Vorteile für die Konstruktion und Fertigung, steht der runden Kontur strömungstechnisch jedoch nicht viel nach.

Es stellte sich heraus, dass die genaue Ein- und Austrittsgeometrie von niedrigerer Priorität für Strömungsbild und Druckverlust ist.

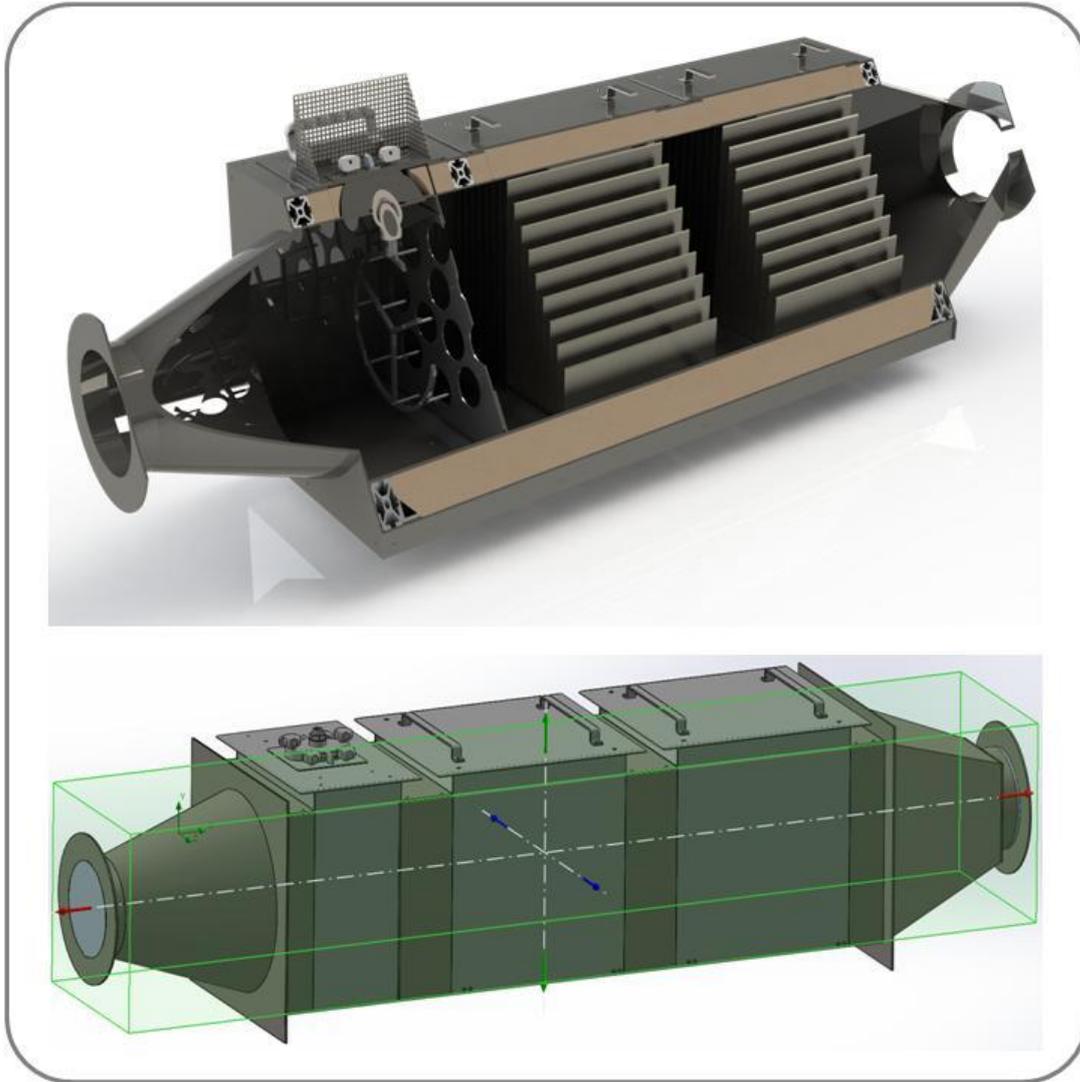


Abbildung 25: Entwurf eines Laborabscheiders mit Plasmastufe und zweifacher Abscheidestufe, unten: Modell für die Simulation [Dominiczak, 2016]

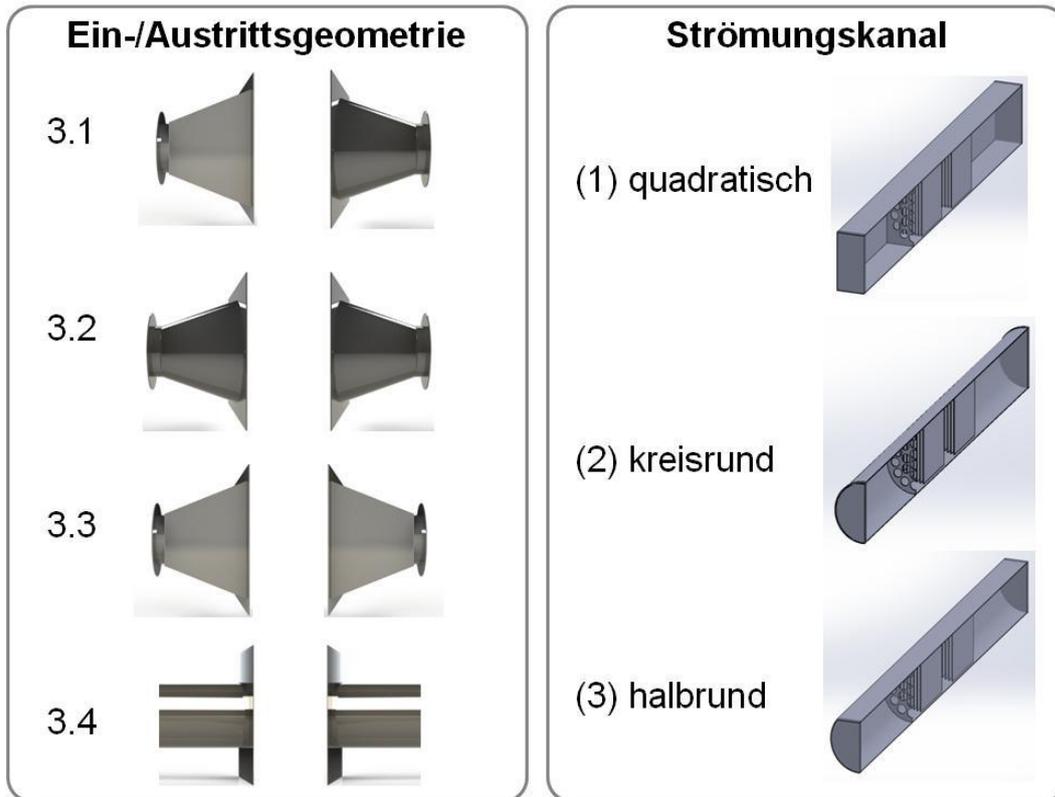


Abbildung 26: Untersuchte Geometrien von Ein-/Auslass und Strömungskanal

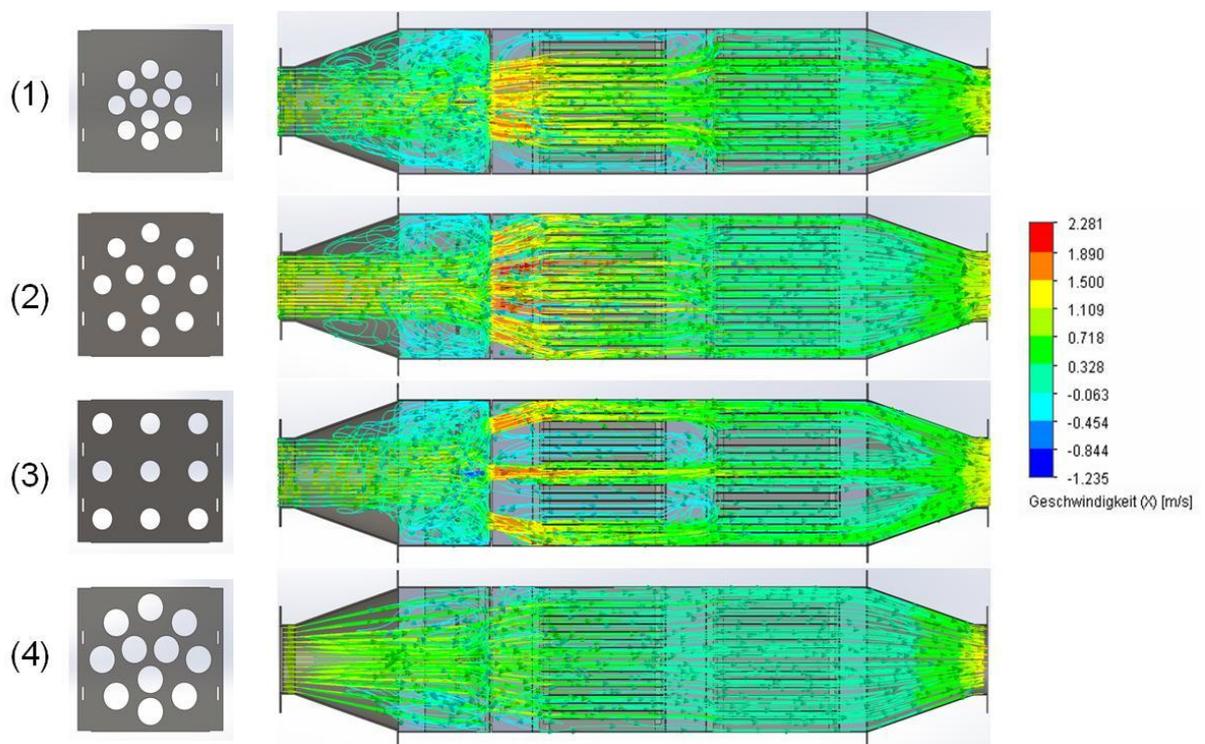


Abbildung 27: Strömungsbild als Ergebnisse der Parameterstudie mit verschiedenen Lochblenden (Gegenelektrode)

## 1.5 AP 5: Entwicklung von grundlegenden Auslegungskriterien und Konstruktion eines flexiblen Laborabscheiders

### 1.5.1 Auslegungskriterien

In diesem Arbeitspaket sollten grundsätzliche Auslegungskriterien, basierend aus den Ergebnissen der Untersuchungen, formuliert werden. Viele der geplanten Messreihen konnten so allerdings nicht durchgeführt werden, da kein entsprechendes Modell des Abscheiders zur Verfügung stand. Messreihen mit einem größeren Spannungsbereich, mit verschiedenen Elektroden, mit größerem Partikelkonzentrationsbereich und mit genaueren Geschwindigkeitsmessungen, mit verschiedenen Abscheidestufen waren gedacht gewesen. Dies wäre allerdings nur mit entsprechend variablem und betriebssicherem Abscheider (Laborabscheider) möglich gewesen.

Da die Daten also leider nicht zur Verfügung stehen, können nur ein paar generelle Aussagen aus den Erfahrungen der durchgeführten Versuche und Modifikationen getroffen werden.

Die Betriebssicherheit des Abscheiders basiert im Wesentlichen darauf, ob das elektrische Feld mit entsprechend hoher elektrischer Leistung dauerhaft im partikelbehafteten Abgas aufrechterhalten werden kann. Das wichtigste Bauteil dabei stellt der Isolator dar. Auf der Oberfläche des Isolators bildet sich zwangsläufig ein Partikelniederschlag, in dem Partikel aus dem Abgas an der Isolatoroberfläche anhaften. Diese bestehen zu einem gewissen Anteil aus leitfähigen Verbindungen, weshalb Kriechströme verursacht werden und somit hochspannungsführende Bauteile mit geerdeten Bauteilen in Kontakt kommen. Ist keine Maßnahme installiert, die dem entgegenwirkt, kann keine Hochspannung aufrecht erhalten bleiben. Es führt zum Zusammenbruch des elektrischen Feldes, es kann keine Korona gebildet werden, es erfolgt keine Partikelaufladung mehr. Dies kann, je nach Abgasbedingungen und Geometrie des Abscheiders, bereits nach wenigen Betriebsstunden der Fall sein. Hier muss also bei einem Elektroabscheider die größte Anstrengung unternommen werden, den Isolator frei zu halten bzw. periodisch regenerieren zu können. Mit dem bisher umgesetzten Isolator konnte die Wirksamkeit einer solchen Maßnahme grundsätzlich gezeigt werden. Für einen dauerhaften Einsatz muss dies allerdings in der Umsetzung und Fertigung des Bauteils wesentlich präziser sein.

Durch Anzahl der Elektroden und durch den Elektrodenabstand wird der Arbeitsbereich von Hochspannung und Stromfluss bestimmt. Hier zeigte sich, dass die Anzahl der Elektroden bzw. Entladungspunkte direkt proportional der Anzahl verläuft (also eine Verdoppelung der Anzahl bewirkt eine Verdoppelung des Stromflusses bei gleichbleibender anliegender Spannung). Durch einen größeren Elektrodenabstand vergrößern sich die Überschlagsspannung und der Arbeitsbereich der Spannung. Für den vorliegenden Anwendungsfall beim Einsatz an Kleinf Feuerungen scheinen nach eigenen Erfahrungen und Angaben in Literatur Abstände um 30 mm mit einer Hochspannung im Bereich von 20 – 30 kV und mehreren über den Strömungsquerschnitt verteilten Entladungspunkten für eine gute Partikelabscheidung günstig zu sein.

Die Geometrie des Abscheiders sollte so gestaltet sein, dass sowohl während dem Aufladevorgang in der Ionisationsstufe als auch während dem Abscheidevorgang in der Abscheidestufe die Strömung möglichst gleichmäßig verteilt ist und keine lokalen Geschwin-

digkeitsspitzen oder Rückströmungen auftreten. Sprunghafte Übergänge sind eher ungünstig zu betrachten.

Die Geometrie eines Röhrenabscheiders scheint für den Anwendungsfall eher ungünstig zu sein. Dieser besitzt einen deutlich höheren Elektrodenabstand, weshalb er bei einer partikelbehafteten Raumladung bei hohen Partikelemissionen (im Sinne einer hohen Partikelanzahl) nicht entgegenwirken kann. Daher sind andere Geometrien mit mehreren Entladungspunkten von Vorteil. Ebenfalls scheinen diese unempfindlicher gegenüber Geschwindigkeitsänderungen zu sein, wenn sich der Abgasvolumenstrom ändert.

Durch eine periodische, automatische Abreinigung der Niederschlagsflächen kann der Abscheidegrad wesentlich erhöht werden. Die Flächen belegen sich mitunter sehr schnell, innerhalb weniger Betriebsstunden. Die Abscheideleistung insgesamt geht zurück oder es kommt vermehrt zum Wiedereintrag von Partikeln, der im Anwendungsbereich durch Rußverbindungen stark begünstigt wird. Für automatische Feuerungen, wie in den Untersuchungen verwendet, traten eher Abgasbedingungen im Luftmangel oder bei relativ guter Verbrennung auf, was zu Abgas mit einem höheren Rußanteil führt, aber weniger zu Luftmangel mit erhöhten Emissionen an klebrigen Teeren, weshalb das Problem des Rücksprühens eher weniger auftritt. Alleine die in den Versuchen umgesetzte manuelle Reinigung hat den Abscheidegrad günstig beeinflusst, musste jedoch entsprechend oft betätigt werden.

Erfolgt eine Abreinigung seltener, muss die Abscheidefläche entsprechend groß gestaltet sein. Dies wird jedoch problematisch, da die Größe der Feuerung begrenzt ist, und somit auch eine Sekundärmaßnahme kompakt sein sollte. Daher lautet die Empfehlung eher auf einer häufigen Abreinigung mit kleinerer Fläche als anders herum.

Wichtig für die Abscheidefläche ist ihre gleichmäßige Anströmung. Flächen, die zwar eingebaut, aber nicht effektiv angeströmt werden, haben zu wenig Kontakt zu den geladenen Partikeln und mindern somit den Abscheidegrad. Die Strömungsgeschwindigkeiten sollten so gering wie möglich sein. Bei klassischen Flächen wie Platten sollte der Gassenabstand klein sein, jedoch muss die Abreinigung dabei bedacht werden.

Wie die Impaktormessungen und auch anderen Untersuchungen zeigen, wirken Elektroabscheider oft als „Agglomerator“, sie sorgen für eine Minderung kleiner Partikel, diese tauchen jedoch als agglomerierte größere Partikel im Reingas wieder auf. Das ist durch die Verschiebung der Korngrößenverteilung im Vergleich von Rohgas zum Reingas zu sehen. Dies trat bei den Versuchen bei allen untersuchten Brennstoffen auf, bei manchen Versuchen mehr, bei anderen weniger ausgeprägt. Dies erfolgte unabhängig vom Abscheidegrad und der Gesamtstaubkonzentration.

### 1.5.2 Konstruktion eines flexiblen Laborabscheiders

Basierend auf den ersten Messungen des Projektes (Phase 2) wurde in Rücksprache mit dem IFK ein flexibler Laborabscheider konstruiert. Der Konstruktionsprozess erwies sich als langwieriger als zunächst gedacht, da sich einerseits die ersten Messungen in die Länge zogen und andererseits die aus den Messungen resultierenden Erkenntnisse hinsichtlich der baulichen Konstruktion des Laborabscheiders nicht immer umsetzbar waren oder teilweise nur mit erheblichen Einschränkungen bezüglich anderer notwendiger oder gewünschter Teile des Laborabscheiders.

### 1.5.3 Varianten

Es wurden nach Rücksprache mit dem IFK nacheinander verschiedene Varianten des Elektrofilters mit unterschiedlichen Konstruktionsschwerpunkten geplant, die im Folgenden stichpunktartig aufgeführt sind.

#### **Variante 1: Blechkonstruktion mit Einzelblechen auf Profil-Grundrahmen.**

Schwerpunkt: Abdichtung des Gehäuses.

Problem: Undichtigkeit im Gehäuse durch komplexe Profilquerschnitte zwischen den einzelnen Bereichen.

#### **Variante 2: Blechkonstruktion mit Einzelblechen ohne „Träger-Profile“.**

Schwerpunkt: Dichtes Gehäuse mit einfachem Innenquerschnitt zum einfachen Trennen von Elektro- und Abscheideeinheit.

Problem: Keine gleichzeitige Abnahme von mehreren Einzelblechen zur Beobachtung möglich

#### **Variante 3: Ähnlich Variante 2 nur mit Flachstahlrahmen als Trägerkonstruktion**

Schwerpunkt: Probleme der vorhergehenden Varianten minimieren

Problem: durch viereckige Bauform schlechte Strömungsführung in der Abscheideeinheit.

#### **Variante 4: Grundform eines Rohres mit entsprechenden Blechanbauten**

Schwerpunkt: Strömungsverbesserung

Problem: keine abnehmbaren Bleche, schwierige Einbringung der Abscheide- und Elektrodeneinheit als Modul

#### **Variante 5: Kombination aus Halbrohr u. Blechen auf einem Flachstahl-Trägerrahmen**

Schwerpunkt: Kombination der Vorteile und Minimierung der Nachteile der vorhergehenden Varianten.

Problem: Modulbauweise erwünscht um verschiedene Situationen testen zu können

Variante 5 (siehe Abbildung 28) wurde in Absprache mit dem IFK weiter ausgearbeitet.

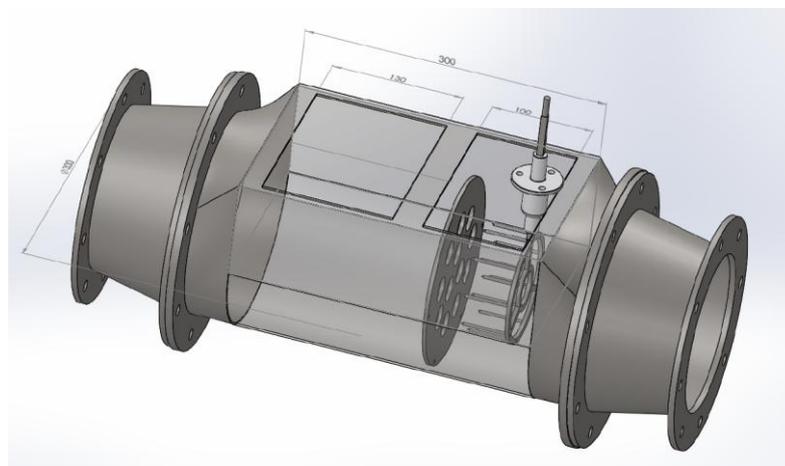


Abbildung 28: 3D-Grafik der Variante 5 des Laborabscheiders (Stand 12/2015).

### 1.5.3.1 Ausarbeitung der Konstruktions- und Fertigungszeichnungen

Zur Ausarbeitung von Variante 5 wurden die Dimensionierung des Geräts, die Anordnung der Elektroden, der Abstand zwischen Elektroden und Düsenplatte sowie insbesondere die Abscheidefläche des Elektrofilters detailliert mit dem IFK besprochen. Grundlage für die gewählten Parameter waren mehrere am IFK durchgeführte Studienarbeiten und konstruktions-technische Überlegungen.

Eine entsprechende 3D-Grafik der abschließenden Version des Laborabscheiders zeigt Abbildung 29, Seite 42.

Abschließende Zeichnungen zur Fertigung der Einzelteile wurden erstellt<sup>1</sup> und entsprechende Angebote hierzu eingeholt. Ergänzende Änderungen der Fertigungszeichnungen sind aufgrund fertigungstechnischer Aspekte der jeweiligen Hersteller möglich und vermutlich nötig.

Rücksprachen mit potenziellen Fertigungsunternehmen zeigten, dass die geplanten Teile des Abscheiders nur schwer und nicht ohne Änderungen zu fertigen wären. Lediglich ein Unternehmen wurde im August 2016 gefunden, welches bereit gewesen wäre sich weiter damit zu beschäftigen. Die Bereitschaft zur Fertigung hat keines der angefragten Fertigungsunternehmen signalisiert.

Die Fertigung eines Laborabscheiders hätte – nicht nur aufgrund der Urlaubszeit – mehr als 6 Wochen Zeit in Anspruch genommen und war zu diesem Zeitpunkt auch nur noch für eine 3. Projektphase sinnvoll. Sollte es eine 3. Projektphase geben, so liegt der Entwurf eines modifizierten Abscheiders mit CAD-Konstruktion vor (siehe Anhang X). Ergebnisse der letzten Versuchsreihen am IFK könnten ggf. zusätzlich Berücksichtigung finden.

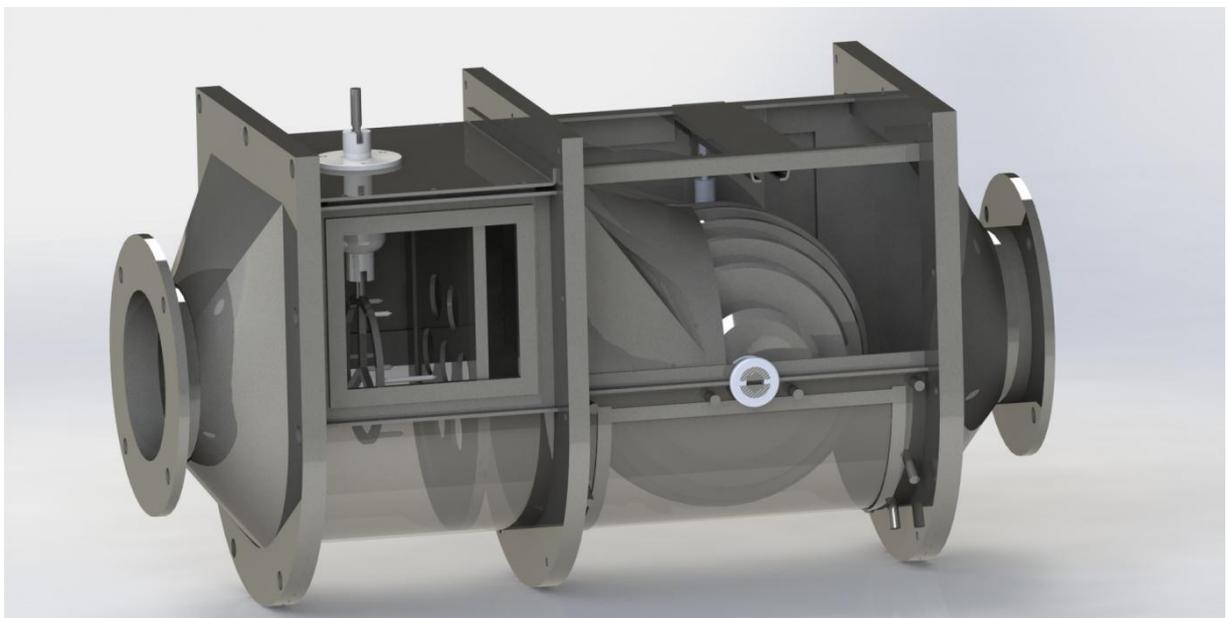


Abbildung 29: 3D-Grafik der abschließenden Version des Laborabscheiders

<sup>1</sup> Diese Zeichnungen finden sich in Anhang X.

## 1.6 Marktstudie

Im Zuge der Masterthesis „Markt- und Wettbewerbsanalyse für Abluftanlagen für Holzfeuerung: Antizipation der Änderungen durch Immissionsschutzverordnungen der EU 2016-2020“ [Möller, 2016] an der Universität Hohenheim (in Kooperation mit der PlasmaAir AG), wurde das Marktpotential für einen marktreifen, elektrischen Feinstaubabscheider (EFA) für die Länder Deutschland (D), Österreich (A) und Schweiz (CH) untersucht. Für die Beurteilung wurden folgende Daten herangezogen:

- Literatur
- Absatzzahlen von Konkurrenten
- Expertenmeinungen

In der folgenden Abbildung 30 ist die Differenzierung der verschiedenen Zielmärkte nach Ländern dargestellt.

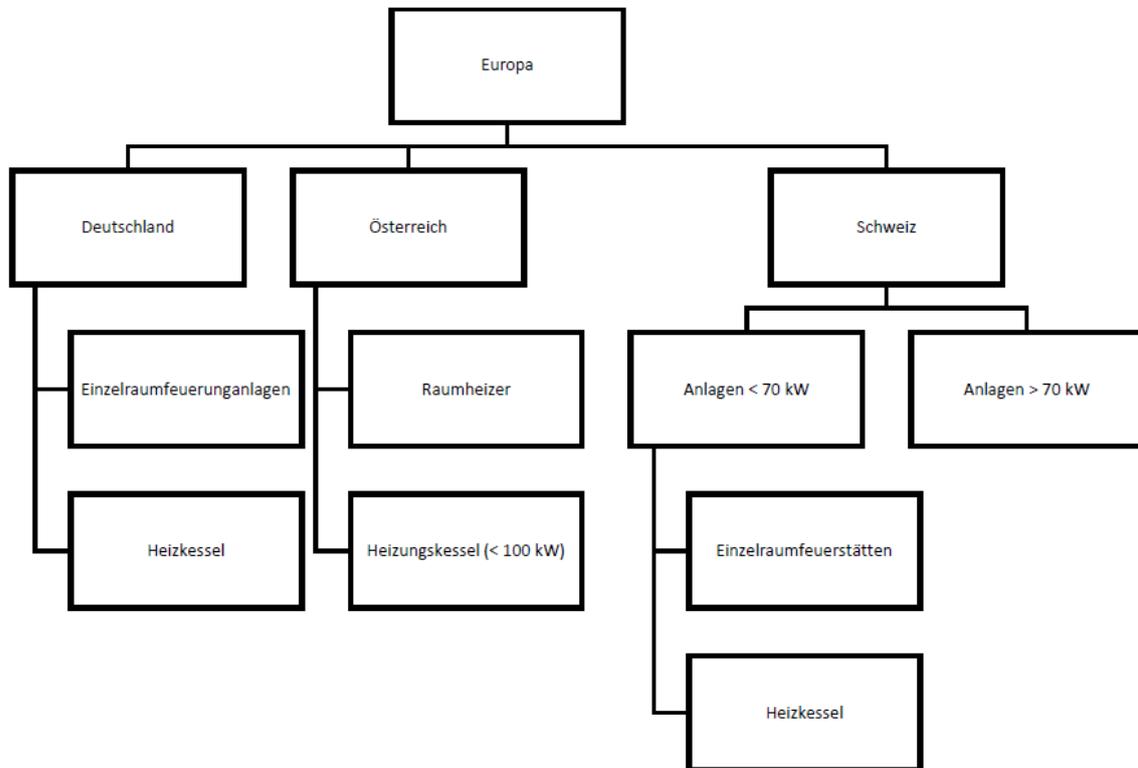


Abbildung 30: Zielmärkte der PlasmaAir AG (Quelle: [Möller, 2016])

Wichtig hierbei ist die Unterscheidung der verschiedenen Feuerungsanlagen. Dies spielte bei der Analyse ebenfalls eine wesentliche Rolle, ausgenommen der Markt für Raumheizer in Österreich, da hier keine Daten vorlagen.

Eine besondere Rolle für den Absatzmarkt spielt der potentielle Kunde. Daher wurde zunächst dessen Motivation zum Erwerb eines Staubabscheiders untersucht. In erster Linie ist die gesetzliche Vorgabe von Grenzwerten ausschlaggebend; lediglich ein kleiner Kundenkreis würde einen Staubabscheider aus Gründen des Umweltschutzes nachträglich einbauen

lassen. Ein weiterer Aspekt ist das Bedürfnis des Kunden, das sich darin äußert, dass die Kosten für die Nachrüstung möglichst gering sein sollten. Dies schließt neben dem Erwerb, den Einbau und dessen Folgen in Form von notwendigen Renovierungsmaßnahmen, den Betrieb und dessen Wartung ein. Hinzu kommen die Notwendigkeit der kompletten Integration des Abscheiders in die baulichen Begebenheiten und der möglichst lautlose und sichere Betrieb der Anlage.

Berücksichtigt man alle diese Vorgaben bei der Entwicklung des elektrischen Feinstaubabscheiders, so stellt sich der mögliche Absatzmarkt in Deutschland wie folgt dar:

Tabelle 14: Szenarienübersicht Deutschland (Quelle: [Möller, 2016])

Szenario	4,3 Mio. betroffene Anlagen		4,6 Mio. betroffene Anlagen	
	Einzelraum	Heizkessel	Einzelraum	Heizkessel
<b>Worst Case</b>	4.042	258	4.324	276
<b>Middle Case</b>	20.210	1.290	21.620	1.380
<b>Best Case</b>	40.420	2.580	43.240	2.760

Worst Case: 0,1% aller betroffenen Anlagen werden nachgerüstet.

Middle Case: 0,5% aller betroffenen Anlagen werden nachgerüstet.

Best Case: 1% aller betroffenen Anlagen werden nachgerüstet.

Letztendlich hat der potentielle Kunde im Fall, dass seine Anlage nicht mehr den gesetzlichen Vorgaben entspricht, folgende Optionen: nachrüsten, austauschen oder komplett stilllegen.

Die in obiger Tabelle aufgeführten Zahlen müssen bei einer Betrachtung in Bezug auf das Marktpotential für die PlasmaAir AG auf die bisher existierenden Anbieter verteilt werden. Ausgehend von insgesamt 5 Marktteilnehmern, reduzieren sich die Zahlen dann erheblich für die PlasmaAir AG. Diese Zahlen spiegeln den derzeit aktuellen Stand dar.

Für jedes Unternehmen ist jedoch auch die Marktentwicklung ein wichtiger Faktor, speziell das Wachstum. In Deutschland ist das Marktwachstum nach der heutigen Gesetzeslage auf die Jahre zwischen 2012 bis 2024 beschränkt.

Relevant hier ist die Tatsache, dass neue Anlagen nur dann in Verkehr gebracht werden dürfen, wenn sie den gesetzlichen Vorgaben entsprechen. Daher entfallen Neuanlagen der Betrachtung. Das Marktwachstum beschränkt sich daher auf Anlagen, die vor 2010 eingebaut wurden. Und hier ist davon auszugehen, dass insbesondere die Kleinf Feuerungsanlagen potentiell eher ausgetauscht oder stillgelegt werden, als dass diese nachgerüstet werden. Lediglich bei den fest im Gebäude verbauten, größeren Anlagen wird mit einer höheren Quote an Nachrüstungen gerechnet, da hier die baulichen Konsequenzen eines Austausches erheblich größer sein können als die einer Nachrüstung.

Bei beiden Anlagen ist davon auszugehen, dass spätestens 2025 der Markt für Nachrüstungen erschöpft ist, da zum einen auf Grund des Alters der Anlagen diese ausgetauscht wurden und zum anderen nicht davon auszugehen ist, dass die Grenzwerte noch weiter verschärft werden.

Neben der Motivation des Kunden und der Marktentwicklung muss auch das Augenmerk auf die Rentabilität für den Anbieter gelenkt werden. Hierbei müssen einige Punkte beachtet werden. Zum einen benötigt man für den Einbau eines Staubabscheiders in Deutschland eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ), diese ist mit erheblichen Gebühren verbunden. Hinzu kommen die Entwicklungs-, Fertigungs- und Vertriebskosten. All diese Kosten

zusammen müssen durch den Verkaufspreis ausreichend gedeckt sein, damit ein gewinnbringender Vertrieb möglich ist.

Studien haben jedoch gezeigt, dass der Kunde lediglich bereit ist, einen gewissen Prozentsatz der Anschaffungskosten zu zahlen, um eine bestehende Anlage nachzurüsten. Ansonsten würde dieser eher zu einer Neuanschaffung tendieren.

Hinzu kommt, dass es bereits Abscheidetechnologien auf dem Markt gibt, zwischen denen ein potenzieller Kunde wählen kann.

Tabelle 15: Abscheidetechnologien [Ulbricht/Lenz, 2011]

Abscheidetechnologie	Preisspanne
Elektroabscheider	1.500 Euro bis 9.000 Euro
Katalysatoren	350 bis 750 Euro
Filter integriert (inklusive Kaminofen)	Weniger als 2.100 Euro

Die in Tabelle 15 dargestellten Preise sollten auf keinen Fall überschritten werden, um konkurrenzfähig zu bleiben.

Auf Basis dieser Daten und deren Auswertung wird in der Masterarbeit empfohlen sich auf den deutschen Markt für Heizkesselanlagen zu konzentrieren, da hier ein deutlich höheres Potential zu sehen ist und die Rentabilität einer solchen Markteinführung eher gegeben ist als die eines Staubabscheiders für Einzelkesselanlagen.

## 1.7 Bauseitige Änderungen

Während des Projekts traten unvorhergesehene Probleme auf, die eine Reaktion erforderlich machten und teilweise zu zusätzlichen Änderungen führten.

### 1.7.1 Änderung der Elektrodenkonstruktion

Zur Verbesserung der Fixierung und Ausrichtung der Elektroden wurden Änderungen an der Elektrodenkonstruktion vorgenommen. Hierzu wurden von PlasmaAir Skizzen bzw. Konstruktionszeichnungen angefertigt und die entsprechenden Bauteile zur Fertigung in Auftrag gegeben. Nach Fertigstellung wurden diese ans IFK weitergegeben.

### 1.7.2 Beistellung einer Spannungsversorgung

In den durchgeführten Tests zeigte sich, dass die aus Phase 1 vorhandene Spannungsversorgung Probleme bereitet. Deshalb wurde die Stromversorgung für den Elektroabscheider im 1. Halbjahr 2016 von der Firma Schnier nach Vorgaben von PlasmaAir und IFK überarbeitet. Ein Gerät für die Laborversuche am IFK wurde von PlasmaAir beschafft und zur Verfügung gestellt.

Diese kam während der Laufzeit dieses Vorhabens leider nicht zum Einsatz, da die Geometrie des Labormodells den Elektrodenabstand von 30 mm nicht zuließ und so die höheren Spannungen nicht untersucht werden konnten.

---

### 1.7.3 Planung und Fertigung eines neuen Isolators

Da der verwendete Isolator („Modell 2“), welcher im vorangegangenen Projekt (DBU-Projekt Az. 29769) entwickelt wurde, im Laufe der Versuche ausfiel, wurde ein neuer Isolator („Modell 3“) benötigt. Hierauf wurde bereits in Kapitel 1.3.2 eingegangen.

## 2 Fazit

Zum Zeitpunkt der Antragsstellung stellte sich die technische und gesetzliche Situation wie folgt dar:

2013/14 stellten die erhöhten Feinstaubemissionen von Biomassefeuerungen im Geltungsbereich der 1. BImSchV eine technische Herausforderung dar, da zum einen die auf dem Markt befindlichen Anlagen die vorgegebenen Grenzwerte nicht einhielten und zum anderen es keine nachrüstbaren Elektrofilter für Kleinanlagen auf dem Markt gab. Der Handlungsdruck schien groß, da bereits ab 2015 die neuen Grenzwerte der im Jahr 2010 novellierten 1. BImSchV gelten sollten.

Ziel der Kooperation zwischen der PlasmaAir AG und dem IFK, Universität Stuttgart war es daher ein marktfähiges Modell eines nachrüstbaren Staubabscheiders für holzbefeuerte Kleinverbrennungsanlagen zu entwickeln. In zwei vorangegangenen Projekten wurde dazu ein verbessertes Labormodell entwickelt und gebaut.

Bei den Vorprojekten zeigte sich, dass noch Grundlagenuntersuchungen zum Verständnis und zur Verbesserung des Abscheidegrades notwendig waren.

Basierend auf den Ergebnissen des vorangegangenen Forschungsprojektes sollte ein Prototyp konstruiert und gebaut werden, mit dem man die Zusammenhänge zwischen der Abscheideleistung und verschiedenen Parametern untersucht werden konnten.

Zu Beginn des Projektes wurde in Absprache mit dem IFK der Bau dieses Prototyps zu einem späteren Zeitpunkt des laufenden Projektes verschoben, da es technisch sinnvoller war, noch weitere Versuche mit dem Labormodell zu machen, um die daraus gewonnenen Ergebnisse dann in die Entwicklung des neuen Modells einfließen zu lassen.

Die im folgenden beschriebenen Versuche wurden mit dem Labormodell bzw. dem in einigen Punkten verbesserten und erweiterten Modell durchgeführt.

Zunächst wurden verschiedene Messreihen gemacht:

- „Labor“
  - Erstellung von Strom-Spannungs-Kennlinien
- „Lambda“
  - Einfluss des Luftüberschusses auf den Abscheidegrad
- „Hochspannung“
  - Einfluss der Spannung auf die Abscheideleistung
- „Brennstoffeinfluss“
  - Verhalten verschiedenen Brennstoffe

Aus diesen Messreihen konnten verschiedene Erkenntnisse gezogen werden.

Die Strom-Spannungs-Kennlinien ergaben, dass je höher die Spannung ist, desto höher wird die Abscheideleistung. Die anfangs verwendete Stromversorgung konnte die erforderlichen 15 kV nicht ermöglichen, daher wurde eine neue Stromversorgung parallel zu den Versuchen gebaut und zur Verfügung gestellt. Diese kam während der Laufzeit dieses Vorhabens leider nicht zum Einsatz, da die Geometrie des Labormodells den Elektrodenabstand von 30 mm nicht zuließ und so die höheren Spannungen nicht untersucht werden konnten.

Grundsätzlich hat ein Luftüberschuss einen positiven Effekt auf die Partikelbildung. Als ideal stellte sich hier ein Luftüberschusskoeffizient  $\lambda$  zwischen 2 und 4 heraus. Darunter stieg die Partikelzahl erheblich an, darüber bildeten sich vermehrt Teere, die einen Austrag der Partikel negativ beeinflussen.

Als idealer Brennstoff stellten sich Holzpellets mit einer maximal erreichbaren Abscheideleistung von 70% heraus. Des Weiteren wurden Holz hackschnitzel (50%) und eine Mischung aus Heupellets und Holzpellets (40%) getestet.

Das Labormodell wurde umgebaut und die Abscheideeinheit wurde neu konzipiert und eingebaut. Dabei flossen insbesondere Ergebnisse aus dem vorangegangenen Projekt ein, woraus sich ergab, dass plane Flächen sowohl zur Abscheidung als auch für die Reinigung und somit dem Austrag der Partikel am besten geeignet sind. Die neue Abscheideeinheit, die mit der Möglichkeit einer manuellen Abreinigung ausgestattet ist, konnte während der Projektphase erfolgreich getestet werden.

Im Zuge einer Parameterstudie wurden Strömungssimulationen erstellt. Das zugrundeliegende Modell des Elektroabscheiders war ein virtuelles Modell mit doppelter Abscheideeinheit. Dabei wurden folgende Parameter variiert:

- Geometrie des Ein- und Austritts
- Geometrie des Strömungskanal
- Geometrie der Lochblende

Dabei konnte festgestellt werden, dass die Geometrie des Ein- und Austritts kaum einen Einfluss auf die Abscheideleistung hat. Im Falle des Strömungskanal und der Lochblende stellte sich in beiden Fällen eine kreisförmige Anordnung als ideal heraus.

Basierend auf den Ergebnissen der verschiedenen Messreihen, der erfolgreichen Entwicklung einer abreinigbaren Abscheideeinheit und der Strömungssimulation wurde bis zum Ende der Projektlaufzeit ein verbessertes Modell konzipiert und es wurden Detailkonstruktionen erstellt. Aus zeitlichen Gründen war ein Bau des Modells während der Projektlaufzeit leider nicht mehr möglich. Parallel zur technischen Entwicklung hat die PlasmaAir eine Marktstudie durchgeführt um das Potential des Produkts abschätzen zu können. Die Ergebnisse der Studie sind in der Masterthesis von [Möller, 2016] zusammengefasst. Es zeigt sich, dass im Bereich der dezentralen Kleinf Feuerungen für Haushalte zukünftig kein großes Marktvolumen zu erwarten ist.

Nach jetziger Gesetzeslage ist davon auszugehen, dass die in den letzten Jahren installierten Feuerungen die gesetzlichen Grenzwerte zumindest auf dem Teststand einhalten und daher die Nachrüstung eines Abscheiders nicht notwendig wird. Altanlagen, die die Grenzwerte nicht einhalten, werden eher durch neue ersetzt bzw. haben Bestandsschutz.

Eine Änderung der derzeit gültigen Grenzwerte durch den Gesetzgeber würde einen höheren Bedarf an nachrüstbaren Elektrofiltern nach sich ziehen, dies ist aber derzeit nicht absehbar.

Hinzu kommt, dass Anfragen bei Anbietern/Herstellern von Kleinf Feuerungsanlagen in Bezug auf eine eventuelle Kooperation ins Leere verliefen. Keiner der angeschriebenen Betriebe zeigte Interesse an einer Zusammenarbeit.

Bei größeren Feuerungen wird allerdings zeitnah ein Bedarf gesehen. Hier ist auch das Verhältnis der Kosten eines Abscheiders im Verhältnis zur Feuerung akzeptabel und die Grenzwerte werden überwacht. Daher ist geplant, die Zielrichtung der Entwicklung in Richtung größere Feuerungen anzupassen. Die erzielten Ergebnisse und die Abscheideraten sind vielversprechend und der konzeptionelle Entwurf erscheint als Serienprodukt umsetzbar. Die Langzeitstabilität muss allerdings noch nachgewiesen werden.

## Literaturverzeichnis

[Baum, 2016]

Baum, C. (2016). Methodische Entwicklung einer Abreinigungs- und Austragseinrichtung für einen neuartigen Klein-Elektrofilter. *Bachelorarbeit* Nr. 3412, IFK, Universität Stuttgart.

[Bologa, 2011]

Bologa, A.; Paur, H.-R.; Woletz, K., Development and Study of an Electrostatic Precipitator for Small Scale Wood Combustion. ICESP XII, (2011).

[Domat, 2014]

Domat, M.; Krus F.E.; Fernandez-Diaz, J.M., Investigations of the effect of electrode gap on the performance of a corona charger having separated corona and charging zones. *Journal of Aerosol Science*, 68 (2014) 1-13.

[Dominiczak, 2016]

Dominiczak, T. (2016). Entwicklung eines Laborelektroabscheiders für polydisperse Stoffsysteme und strömungstechnische Parameterstudie. *Masterarbeit* Nr. 3411, IFK, Universität Stuttgart.

[Lauber, 2010]

Lauber, A. und Nussbaumer, T. Charakterisierung der Partikelarten aus der Holzverbrennung und Eigenschaften in Elektroabscheidern. 11. *Holzenergie-Symposium*, ETH-Zürich, 17. September 2010.

[Möller, 2016]

Möller, J. E. (2016). Markt- und Wettbewerbsanalyse für Abluftanlagen für Holzfeuerung: Antizipation der Änderungen durch Immissionsschutzverordnungen der EU 2016-2020. *Master Thesis*, Uni Hohenheim.

[Reitberger, 2016]

Reitberger, J. (2016). Charakterisierung von Partikelproben aus Feuerungsabgasen von kleinen Biomassefeuerungen mit Staubabscheider. *Studienarbeit* Nr. 3445, IFK, Universität Stuttgart.

[Ulbricht/Lenz, 2011]

Ulbricht, T.; Lenz, V. (2011), Abscheider für biogene Kleinfeuerungsanlagen in: DBFZ (Hrsg.), 2011, *DBFZ Report* Nr. 8. Kompakt, S. 73–103.

---

[VDI, 2006]

VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1. November **2006**, Messen von Partikeln, Staubmessung in strömenden Gasen. Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. Beuth Verlag, Berlin.

[VDI, 1994]

VDI-Richtlinie 2066 Blatt 5. November **1994**, Messen von Partikeln, Staubmessung in strömenden Gasen. Funktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren, Kaskadenimpaktor. Beuth Verlag, Berlin.

[VDI, 2015]

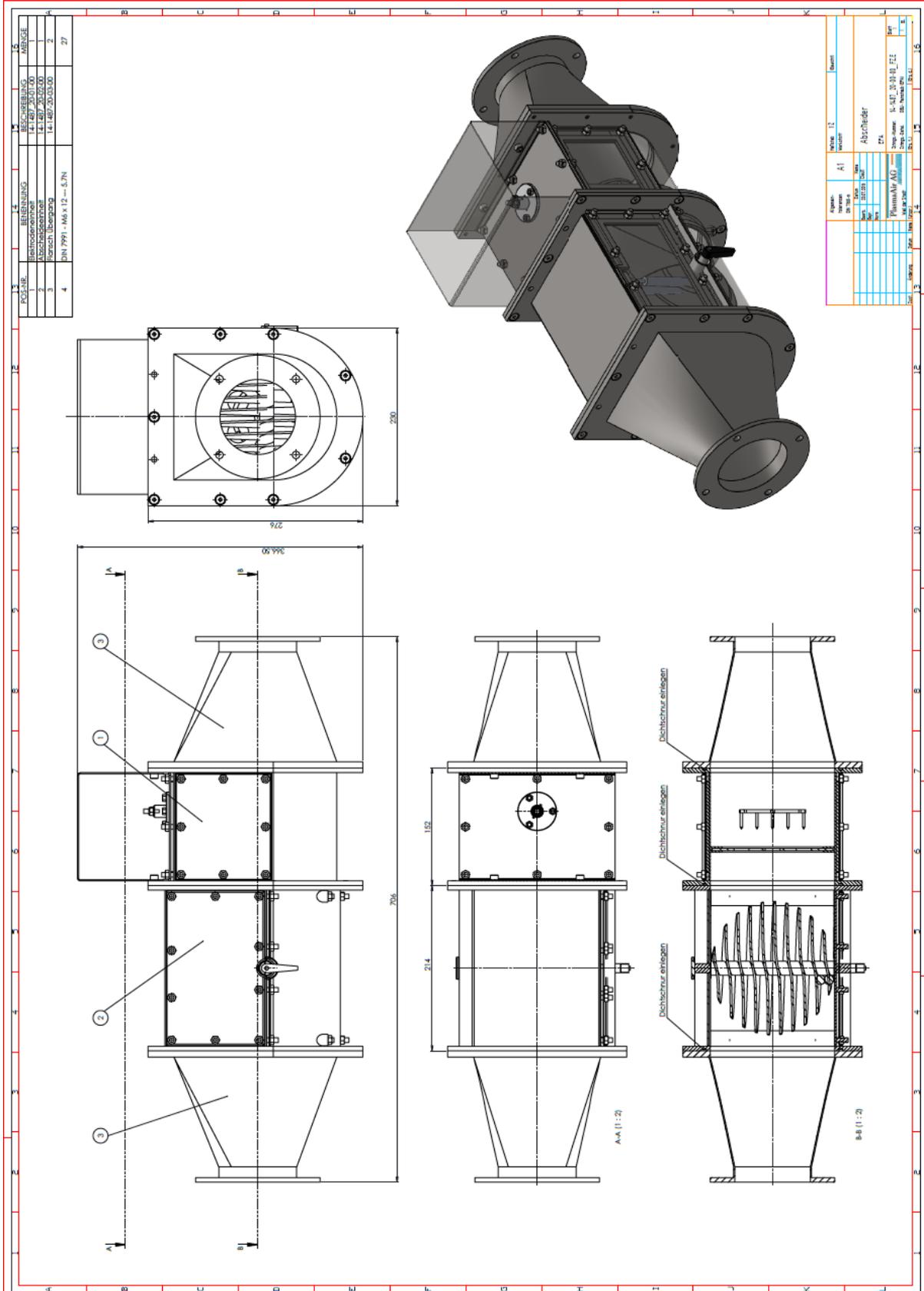
VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2. Februar **2015**, Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen. Messgeräte zur Ermittlung von partikelförmigen Emissionen. Beuth Verlag, Berlin.

[Wolf, 2015]

Wolf, A. (**2015**). Untersuchung des Zusammenhangs von Strom- und Spannungsverhalten an einem kleinen elektrostatischen Staubabscheider. *Bachelorarbeit* Nr. 3327, IFK, Universität Stuttgart, 2015.

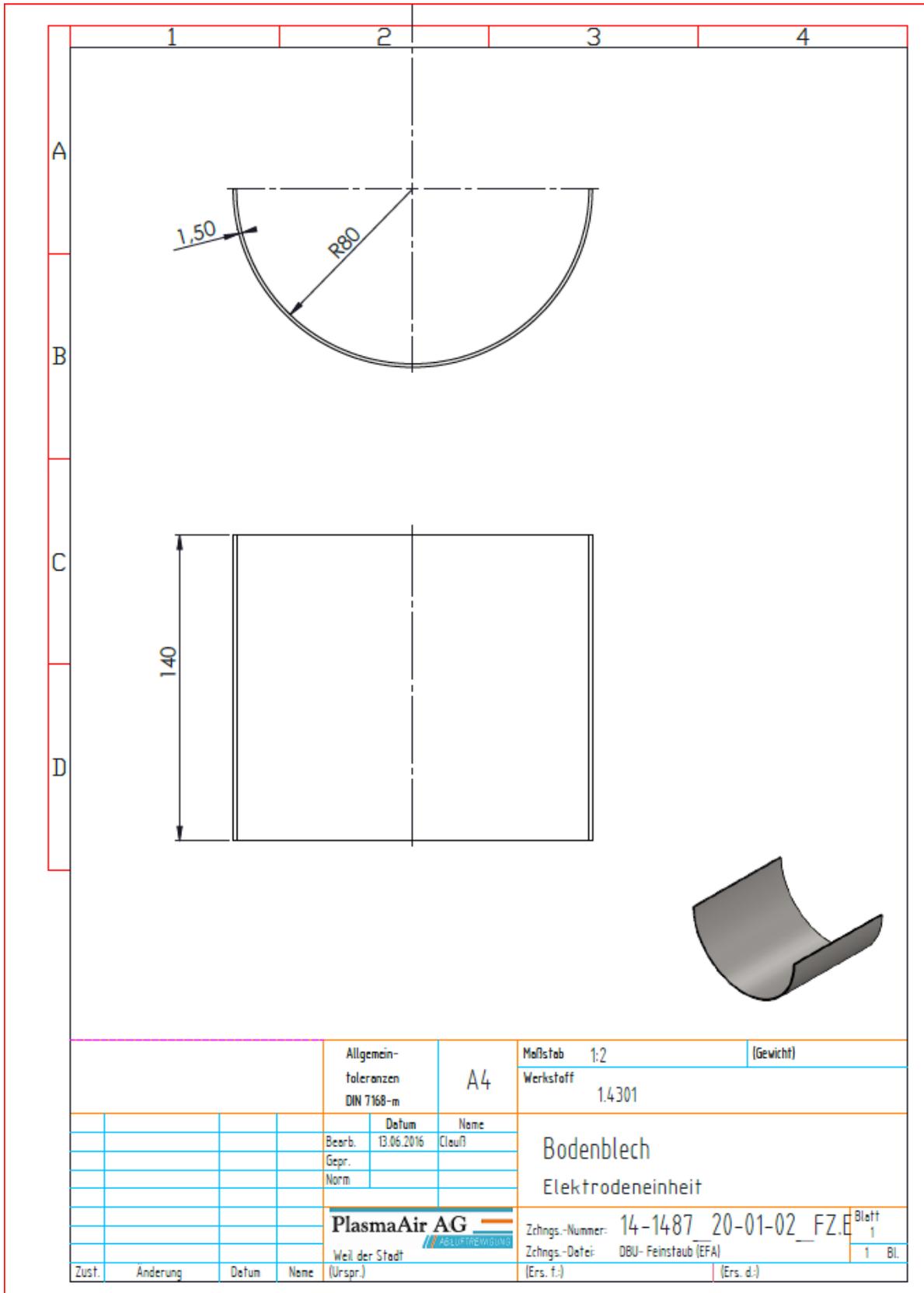
## Anhang A

In diesem Anhang befinden sich die Fertigungszeichnungen des flexiblen Laborabscheiders.

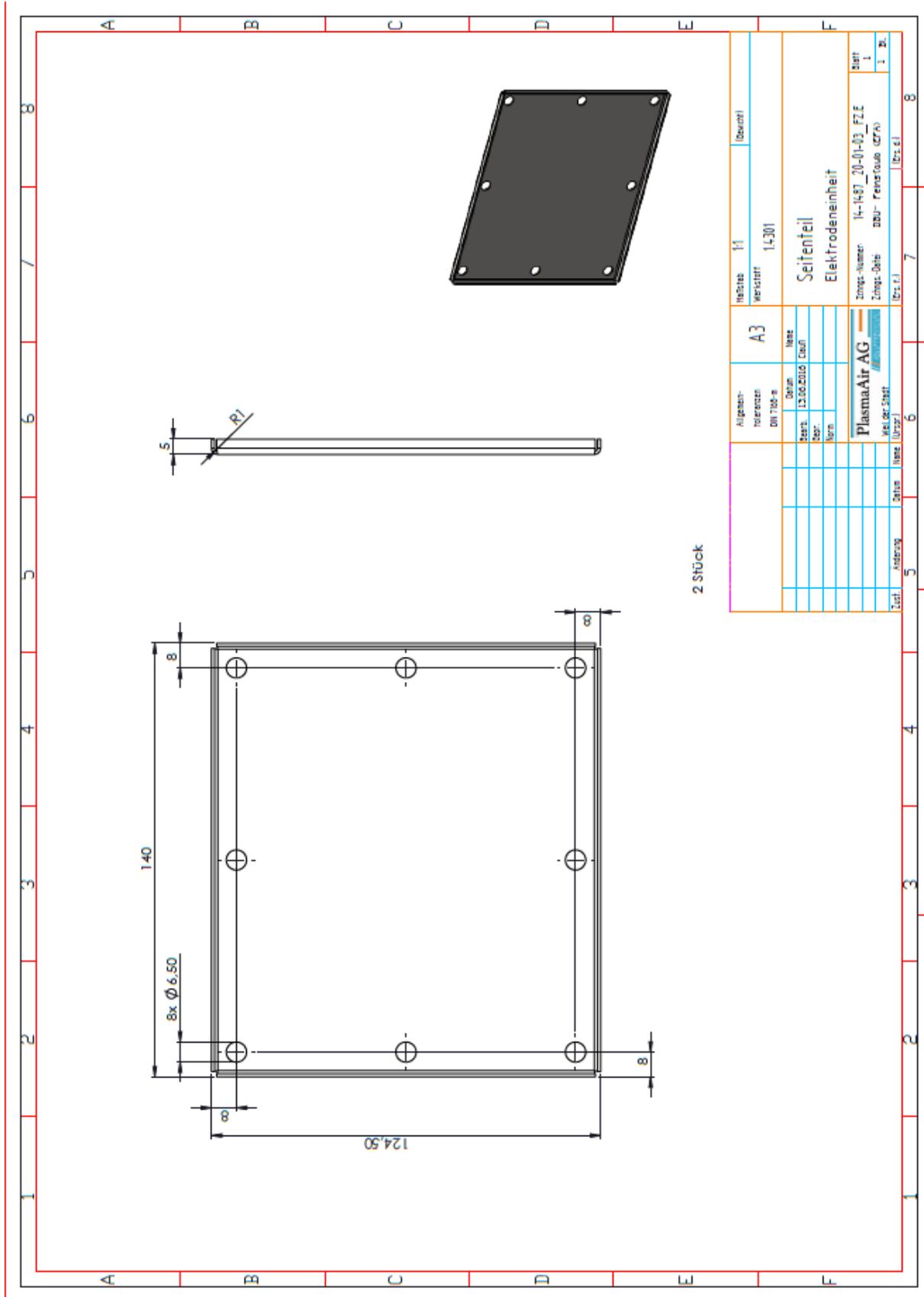








		Allgemein- toleranzen DIN 7168-m	A4	Maßstab 1:2	(Gewicht)	
				Werkstoff 1.4301		
				Bodenblech Elektrodeneinheit		
		 <small>ABLUTREINIGUNG</small>		Zchngs.-Nummer: 14-1487_20-01-02_FZ.E	Bleif 1	
		Weil der Stadt <small>(Urspr.)</small>		Zchngs.-Datei: DBU-Feinstaub (EFA)	1 Bl.	
Zust.	Anderung	Datum	Name	(Ers. f.)	(Ers. d.)	





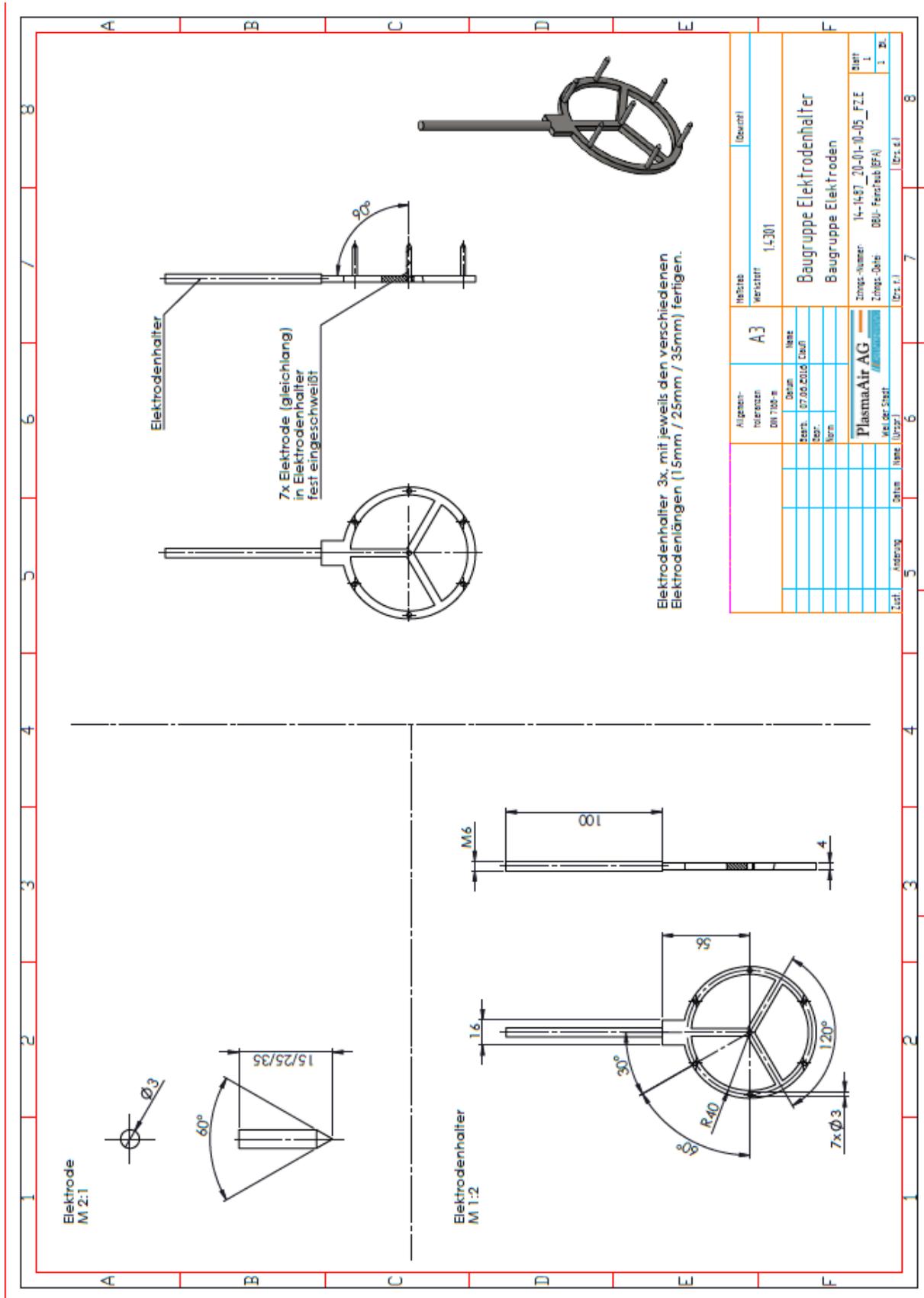
Bohrungen und Elektroden zentrisch zueinander  
(vor Ort einreguliert)

POS-NR.	Isolator	BESCHREIBUNG	MENGE
1	Trägerplatte	14-1487_20-01-10-02	1
2	Bgr. Elektrodenhalter		1
3	Duesenplatte		1
4	14-1487 Elektroden Isolator		1
5	Sicherungsmutter M6	DIN EN 1664 - M6 - N	1
6	Sechskantmutter M5	ISO 4032 - M5 - W - N	3
7	Sechskantmutter M6	ISO 4032 - M6 - W - N	2
8	Innensechskantschraube M6	DIN 912 M6 x 15-25N	2

Abgabeperson	Heiße	12	(bzw.)
DIN 1100-8	A3	Material	
Datum	14.08.2010	Zeichn.	
Druck	13.00.2010	Erst	
Norm			
<b>PlasmaAir AG</b> Masch. Fertigung 14-1487_20-01-10-00_FZE 1 Bl.			







Arbeits- zeichnung DIN 1030-3	A3	Arbeits- zeichnung 1:1,301	(Bauart)
Bezeichnung	Baugruppe Elektrodenhalter		
Norm	Baugruppe Elektroden		
Zeichnungs- nummer	14-1487_20-01-10-05_FZL		
Zeichnungs- datei	08U_Fertfab_BFA		
Blatt	1		
Blatt	1		
Zust.	Freigegeben	Datum	10.07.2014
Zust.	Freigegeben	Datum	10.07.2014





